

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ONARICI KAPSÜL İÇEREN BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ahmet Münir ÖZDEMİR

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ulaştırma Bilim Dalı

MAYIS-2020

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Onarıcı Kapsül İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi
Yazarı:	Ahmet Münir ÖZDEMİR
İlk Teslim Tarihi:	22.5.2020
Savunma Tarihi:	19.6.2020

TEZ ONAYI

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

Danışman:	Prof. Dr. Mehmet YILMAZ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Baha Vural KÖK Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Bahadır YILMAZ Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

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

İmza
Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Onarıcı Kapsül İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

19/06/2020

Ahmet Münir ÖZDEMİR



ÖNSÖZ

Agrega ve bağlayıcı malzeme olarak bitüm kullanılarak elde edilen bitümlü sıcak karışımlarda, bazı çevresel ve yapısal etkilere ötürü bozulmalar meydana gelmektedir. Bozulmalar başta çatlak oluşumu ile kendini gösterirken, bakım ve onarım işlemleri gerekli sıklık ve miktarda uygulanmadıkça daha büyük hasarlara yol açmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlarda bakım ve onarım periyotlarını seyreltip, asfaltın servis ömrünü uzatmak amacıyla, malzemelerin kendini iyileştirme özelliklerinden esinlenerek bazı metotlar geliştirilmiştir. Sözü edilen metotlar temel olarak mikro düzeyde iyileşme sağlayarak, daha büyük bozulmaların önüne geçmektedir.

Bu tez çalışmasında bu metotlardan biri olan mikrokapsül ilavesi ile iyileşme metodu üzerinde çalışılmış, geliştirici malzeme seçiminde atık malzemeleri değerlendirip geri dönüşüme ve ekonomiye katkıda bulunmak amacıyla literatürden farklı olarak atık bitkisel ve atık madeni motor yağı tercih edilmiştir. Elde edilen kapsüller bitümlü sıcak karışımlara farklı oranlarda ilave edilerek karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Lisans ve yüksek lisansım boyunca değerli bilgilerini, tecrübelerini, zamanını ve güler yüzünü esirgemeyen, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemi asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Mehmet YILMAZ'a teşekkürlerin yetersiz kalacağını bile bile teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca derin bilgilerinden istifade etme şansını yakaladığım Prof. Dr. Baha Vural KÖK'e, ders aldığım kıymetli hocam Prof. Dr. Taner ALATAŞ'a, gerek laboratuvarında ve eğitimimde gerekse ihtiyaç duyduğum her konuda desteğini ve kıymetli vaktini benden esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Erkut YALÇIN hocama ve lisans eğitimime başladığım ilk günden bu yana yardımlarını ve sevgisini esirgemeyen Arş. Gör. Özge ERDOĞAN YAMAÇ hocama teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak ideallerimin oluşmasını ve bilimsel bir bakış açısı edinmemi sağlayan babam Prof. Dr. Necmi ÖZDEMİR başta olmak üzere, dualarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Maddi olarak 1001 Program kodlu ve 217M570 numaralı proje ile tezimi destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür ederim.

Ahmet Münir ÖZDEMİR

19/06/2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
1. Giriş	1
2. KENDİNİ ONARABİLEN MALZEME KAVRAMI	4
2.1. Bitümün Kendini Onarabilme Yeteneği	5
2.2. Kendi Kendini İyileştirme Mekanizması ve Asfalt Malzeme Modeli	6
2.2.1. Moleküler Difüzyon İyileşme Modeli	6
2.2.2. Yüzey Enerjisi İyileşme Modeli	8
2.2.3. Kapiler Yükselme İyileşme Modeli	8
2.2.4. Faz Alanı İyileşme Modeli	9
2.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Kendini Onarması	10
2.3.1. Bitümlü Karışımların Hızlandırılmış Kendini Onarabilme Yöntemleri	10
2.3.2. İndüksiyon Yöntemi	11
2.3.3. Mikrodalga Yöntemi	13
2.3.4. Mikrokapsül Yöntemi	15
3. MATERYAL	20
3.1. Bağlayıcı Temini	20
3.2. Agrega Temini	20
3.3. Kapsüllerin Üretimi	21
3.3.1. Kapsül Üretimi İçin Gerekli Malzemelerin Özellikleri ve Temini	21
3.3.2. Kapsül Üretimi	22
3.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması	24
3.5. Kapsüllerin Bitümlü Sıcak Karışıma İlave Edilmesi	25
4. METOT	26
4.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	26
4.2. Çekme Dayanımı Oranı Deneyi	27
4.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi	30
4.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi	31
4.5. Dinamik Sünme Deneyi	33
4.6. Kırılma Mekanizması Yaklaşımlarıyla Yarım Daire Şeklindeki BSK'ların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi	36

5. DENEY SONUÇLARI	48
5.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Hacimsel Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	48
5.2. Marshall Stabilité ve Akma Deneyi Sonuçları	51
5.3. Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları.....	54
5.4. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları	57
5.5. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları.....	60
5.6. Dinamik Sünme Deney Sonuçları	74
5.7. Yarım Daire Numunelerinin Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi	84
5.7.1. LEKM Yaklaşımıyla Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımın Tespiti	88
5.7.2. EPKM Yaklaşımıyla Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımın Tespiti	91
6. SONUÇLAR	98
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Onarıcı Kapsül İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Ahmet Münir ÖZDEMİR

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Ulaştırma Anabilim Dalı
Mayıs 2020, Sayfa xii+106

Bitümlü sıcak karışımlarda çevresel ve yapısal etkilerden dolayı başta çatlak oluşumu olmak üzere çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir. Çatlak oluşumlarından ötürü meydana gelecek hasar, müdahale edilmediği takdirde sürüş konforu ve güvenliğini tehdit edebilecek boyutlara ulaşabilmektedir. Bu sebeple bilim insanları asfaltın kendi doğasında bulunan fakat yeterli sıcaklık ve zaman sağlamak mümkün olmadığı için istenilen düzeylere ulaşamayan kendini iyileştirme özelliğine odaklanmışlardır. Kendini iyileştirme olayını hızlandırmak ve etkisini güçlendirmek için çeşitli metotlar tasarlanmıştır. Bu metotlardan yaygın olarak kullanılanları İndüksiyon Metodu, Mikrodalga Metodu ve Mikrokapsül metodudur. İndüksiyon ve mikrodalga metodunun amacı bitümlü sıcak karışımın yüzey ve içsel sıcaklığını artırarak iyileşme olayını sağlamaktır. Mikrokapsül metodunda ise, gençleştirici içeren kapsüller hazırlanmakta, bu kapsüller yapım aşamasında bitümlü sıcak karışıma ilave edilmekte, karışıma ilave edilen kapsüllerin çatlak ile teması sonucu içerisindeki gençleştirici serbest kalarak çatlağı iyileştirmesi esasına dayanmaktadır. Tez çalışması kapsamında atık bitkisel ve atık madeni yağ olmak üzere iki farklı tipte gençleştirici kullanılarak farklı oranlarda (agrega ağırlığınca %0.25, %0.50, %0.75, %1.00) bitümlü sıcak karışıma ilave edilmiştir. Çalışmada atık bitkisel yağ olarak kullanılmış yemeklik ayçiçek yağı atığı, atık madeni yağ olarak ise otomobillerin periyodik bakımları sonrası açığa çıkan atık motor yağı temin edilmiş ve kullanılmıştır. Kapsül ilavesinin bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla karışım numunelerinin hacimsel özellikleri belirlenmiş, ardından Marshall stabilite ve akma, çekme dayanımı oranı, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çapta yarım daire şeklinde numuneler elde edilerek, bu numunelere de kapsül ilavesi yapılmıştır. Ardından çatlak ilerlemesine karşı dayanımları farklı yaklaşımlar ile değerlendirilmeye çalışılmıştır. Karışım deneyleri sonucunda gençleştirici olarak atık yağların kullanılmasının ekonomik ve çevresel anlamda fayda sağlayacağı belirlenmiş, karışımdaki optimum kapsül içeriğinin agrega ağırlığınca %0.5 olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü Sıcak Karışım, Mekanik Özellikler, Kendini İyileştirme, Mikrokapsül, Gençleştirici, Atık Bitkisel Yağ, Atık Madeni Yağ

ABSTRACT

Investigation of Mechanical Properties of Hot Mix Asphalts Containing Self-Healing Capsules

Ahmet Münir ÖZDEMİR

Master Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural&Applied Sciences

Department of Transportation
May 2020, Page: xii+106

Due to environmental and structural effects, various deterioration, especially crack formation, occurs in hot mix asphalts. Damage, due to crack formation, can reach levels that may threaten driving comfort and safety if not intervened. Therefore, scientists have focused on the self-healing feature that is inherent in the asphalt but cannot reach the desired levels since it is not possible to provide sufficient temperature and time. Various methods have been designed to accelerate the self-healing phenomenon and strengthen its impact. Commonly used among these methods are Induction Method, Microwave Method and Microcapsule method. The aim of the induction and microwave method is increase the surface and internal temperature of the hot mix asphalt and provide healing. In the microcapsule method, briefly, capsules containing rejuvenator are preparing, these capsules adding to the hot mix asphalt during the construction process, the rejuvenator in the mixture is releasing and heals the crack as a result of contact with the crack. Within the scope of the thesis, two different types of rejuvenators, waste vegetable and waste mineral oil, were added to the hot mix asphalt at different rates (0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00% by weight of aggregate). The vegetable oil used in the study was supplied as waste sunflower oil in the kitchens, the mineral oil was obtained as the waste engine oil released after periodic maintenance of the cars. In order to evaluate the effect of capsule addition on the mechanical properties of hot mix asphalts, the volumetric properties of the mixture samples were determined, followed by Marshall stability and flow, tensile strength ratio, indirect tensile stiffness module, indirect tensile fatigue and dynamic creep tests. In addition, semicircular samples were obtained and capsules with different proportions were added to these samples. Then, resistance to crack propagation were tried to be evaluated in different approaches. As a result of the mixture experiments, it has been determined that the use of waste oils as rejuvenators will provide economic and environmental benefits, and the optimum capsule content in the mixture has been determined to be 0.5% by weight of the aggregate.

Keywords: Hot Mix Asphalt, Mechanical Properties, Self-Healing, Microcapsule, Rejuvenator, Waste Vegetable Oil, Waste Mineral Oil

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Düşük (a), orta (b) ve yüksek (c) şiddette yorulma çatlakları	2
Şekil 1.2.	Düşük ısı çatlakları	2
Şekil 2.1.	Kendi kendini onarabilen malzemelerin performans-zaman eğrisine etkisi	4
Şekil 2.2.	Yorulma hasarı oluşumu-İyileşme	5
Şekil 2.3.	Çatlak arayüzeyinde iyileşme sırasında zincir hareketinin şematik gösterimi.	7
Şekil 2.4.	Asfalt betonu çatlağının iyileşme sürecinde kuvvetlerin davranışlarının şematik gösterimi	9
Şekil 2.5.	Asfaltta doğal kendi kendine iyileşme	10
Şekil 2.6.	İndüksiyonla ısıtma mekanizması	11
Şekil 2.7.	İndüksiyon ısıtma cihazı	12
Şekil 2.8.	Mikrodalga ısıtmanın öncesi ve sonrasındaki çatlak genişlikleri ölçümlerinin şematik gösterimi	13
Şekil 2.9.	Eski, yıpranmış asfalt kaplamaların çatlak iyileştirme özelliklerine sahip yeni ve	14
Şekil 2.10.	sürdürülebilir bir asfalt kaplamaya uyarlanması	14
Şekil 2.11.	Kapsüllenmiş gençleştirici ile iyileşme mekanizması	15
Şekil 3.1.	(a)Testten önce asfalt numunesi, (b) Kırılmış kapsüllerle birlikte testten sonra asfalt numunesi	18
Şekil 3.2.	Çalışmada kullanılan elenmiş agregalar	21
Şekil 3.3.	Kapsül üretiminde kullanılacak sodyum aljinat, kalsiyum klorit ve gençleştiriciler	21
Şekil 3.4.	Kapsül üretimi için gerekli olan dehidratör, manyetik ısıtıcı karıştırıcı, beher ve damlatma hunisi	22
Şekil 3.5.	Atık bitkisel yağ ile kapsül üretimi	23
Şekil 3.6.	Atık madeni yağ ile kapsül üretimi	23
Şekil 3.7.	Kapsül üretiminin şematik bir gösterimi	23
Şekil 4.1.	Superpave yoğunlaştırıcı	24
Şekil 4.2.	Marshall stabilite ve akma deney düzeneği	26
Şekil 4.3.	Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuş BSK numuneleri	27
Şekil 4.4.	Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması	28
Şekil 4.5.	Çekme dayanımı deney düzeneği	29
Şekil 4.6.	Çekme dayanımı deneyine tabi tutulmuş numuneler	29
Şekil 4.7.	UTM cihazı ve ITSM deney düzeneği	31
Şekil 4.8.	Yorulma deney düzeneği	32
Şekil 4.9.	Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiği	32
Şekil 4.10.	Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi	34
Şekil 4.11.	Dinamik sünme deney düzeneği	35
Şekil 4.12.	Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi	35
Şekil 4.13.	Akma sayısının bulunması.	36
Şekil 4.14.	Kırılma modları	38
Şekil 4.15.	BSK'lara uygulanan lineer elastik kırılma mekaniği deneyleri.	39
Şekil 4.16.	Kırılma deneylerinde en çok kullanılan deney geometrileri.	40
Şekil 4.17.	SCB deneyinde asfalt karışımların elde edilen başlıca yük-deformasyon diyagram türleri	41
Şekil 4.18.	YI değerinin belirlenmesi.	41
Şekil 4.19.	Yarım daire eğilme deney düzeneği	42
Şekil 5.1.	Numuneye çentik açılması	43
Şekil 5.1.	Karışımların boşluk oranı (V _h) değerlerinin kapsül içeriği ile değişimi	49

Şekil 5.2.	Karışımların agregalar arası boşluk oranı (VMA) değerlerinin kapsül içeriği ile değişimi	50
Şekil 5.3.	Karışımların bitümle dolu boşluk oranı (Vfa) değerlerinin kapsül içeriği ile değişimi	51
Şekil 5.4.	Karışımların Marshall stabilite ve akma değerlerinin değişimi	52
Şekil 5.5.	Karışımların MQ değerlerinin kapsül kullanımı ile değişimi	53
Şekil 5.6.	Karışımların çekme dayanımı (TS) değerlerinin kapsül türü ve koşullandırma ile değişimi	55
Şekil 5.7.	Bitümlü sıcak karışımların çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri	56
Şekil 5.8.	Kapsül kullanımının ITSM değerleri üzerindeki etkisi	58
Şekil 5.9.	Sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkisi	59
Şekil 5.10.	Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü	61
Şekil 5.11.	Deformasyon yük tekrar sayısı grafiklerinden yorulma ömrü (Nf) ve çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarının (Ni) belirlenmesi	62
Şekil 5.12.	Saf ve atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	66
Şekil 5.13.	Saf ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	67
Şekil 5.14.	Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 450 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	68
Şekil 5.15.	Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 450 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	68
Şekil 5.16.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (Ni) – kapsül içeriği ilişkisi	69
Şekil 5.17.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların yorulma ömrü (Nf) – kapsül içeriği ilişkisi	69
Şekil 5.18.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (Np) – kapsül içeriği ilişkisi	70
Şekil 5.19.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda 3mm deformasyona neden olan yük tekrar sayısı – kapsül içeriği ilişkisi	71
Şekil 5.20.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda Ni değerindeki deformasyon miktarı – kapsül içeriği ilişkisi	72
Şekil 5.21.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda Nf değerindeki deformasyon miktarı – kapsül içeriği ilişkisi	72
Şekil 5.22.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda Ni – Nf arası çatlak ilerleme oranı – kapsül türü ilişkisi	73
Şekil 5.23.	Dinamik sünme deneyine tabi tutulan bir numune	74
Şekil 5.24.	Karışımların akma sayısının bulunmasına bir örnek	75
Şekil 5.25.	Saf ve atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	78
Şekil 5.26.	Saf ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	79
Şekil 5.27.	Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi	80
Şekil 5.28.	Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi	80
Şekil 5.29.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların akma sayısı değerleri	80
Şekil 5.30.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri	81
Şekil 5.31.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarındaki esneklik modülü değerleri	82
Şekil 5.32.	Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerleri	83

Şekil 5.33.	Numunelerin yarım daire şekline getirilmesi ve çentik açılması	84
Şekil 5.34.	%0,25 (a) ve %1,0 (b) kapsül içeren numunelerin kesit görüntüleri	85
Şekil 5.35.	Örnek bir numune içindeki kapsül görüntüsü ve büyütülmüş hali	85
Şekil 5.36.	Deney numunelerinin bir kısmı	86
Şekil 5.37.	Değişik yükseklikte çentiğe sahip numuneler	86
Şekil 5.38.	Yarım daire eğilme deney düzeneği	87
Şekil 5.39.	Hızı ayarlanabilir Marshall cihazının dijital göstergesi	87
Şekil 5.40.	Numunelerde görülen intergranüler (a) ve transgranüler (b) kırılmalar	88
Şekil 5.41.	Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların yük-deformasyon eğrileri	89
Şekil 5.42.	Karışımların kırılma tokluğu (KIC) değerleri	90
Şekil 5.43.	Kapsül kullanımı ile maksimum şekil değiştirme (ϵ_{mak}) ilişkisi	91
Şekil 5.44.	Atık bitkisel yağ kullanılan kapsül içeren 1 cm çentiğe sahip numunelerin yük deformasyon ilişkisi	92
Şekil 5.45.	Atık bitkisel yağ içeren (a) ve atık madeni yağ içeren (b) kapsül kullanılan karışımların maksimum yük – kapsül içeriği ilişkisi	93
Şekil 5.46.	Atık bitkisel yağ içeren (a) ve atık madeni yağ içeren (b) kapsül kullanılan karışımlarda yükün boşaldığı andaki deformasyon – kapsül içeriği ilişkisi	94
Şekil 5.47.	Atık bitkisel yağ içeren (a) ve atık madeni yağ içeren (b) kapsül kullanılan karışımlarda yük – deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan – kapsül içeriği ilişkisi	94
Şekil 5.48.	Karışımların J_c değerleri	95
Şekil 5.49.	Karışımların J_c ve r_p değerlerinin karşılaştırılması	96

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu.....	20
Tablo 3.2 . Atık bitkisel ve atık madeni yağın viskozite değerleri.....	22
Tablo 5.1. Kapsül kullanımı ile ITSM değerlerindeki azalma miktarları.....	59
Tablo 5.2. Saf ve atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları	64
Tablo 5.3. Saf ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları	65
Tablo 5.4. Saf ve atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışım numunelerinin dinamik sünme deney sonuçları	76
Tablo 5.5. Saf ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışım numunelerinin dinamik sünme deney sonuçları	77

1. GİRİŞ

Bitüm, petrolün rafine edilmesiyle elde edilen, karayolu ve havaalanı üstyapılarında yaygın olarak kullanılan viskoelastik bir malzemedir (Agzenai ve diğ., 2015). Asfalt kaplamalar, konforlu yol yüzeyleri oluşturmak için genellikle agrega ve bitümden meydana gelen kompozit malzemelerdir. Bu malzemelerin yapısal iskeletini özel tesislerde kayaların parçalanıp ufalanmasından elde edilen agregalar oluşturur. Bitüm ise agregaları bir arada tutan bir bağlayıcı malzemedir. Bitümlü sıcak karışımlar bitüm ve agreganın ısıtılıp belirli sıcaklıklarda karıştırılması ve yine uygun sıcaklıklarda sıkıştırılması ile elde edilmektedir.

Asfalt yüzeyler çok çeşitli sıcaklıklara, yağmura, buza, çevresel kimyasallara ve ağır yüklere maruz kalmaktadır (Read ve Whiteoak, 2003). Servis ömrünün başlangıcında esneklik özellikleri yüksek olmasına rağmen zamanla bu etkilerden dolayı özellikleri zayıflamakta, yaşlanmadan ötürü bitüm kırılmaya yatkın hale gelmektedir (Sun ve diğ., 2018). Bu durum öncelikle çatlak oluşumu ile kendini gösteren bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışım kaplamalarda en yaygın görülen çatlak oluşumları yorulma ve düşük ısı çatlakları olmaktadır. Asfalt karışımındaki hasar, ilk başta mikroyapı düzeyinde başlamakta ve gözle görülebilecek düzeye kadar ilerlemektedir. Daha sonra sürüş konforu ve güvenliğinde olumsuzluklar meydana gelmektedir (Read ve Whiteoak, 2003; Wu ve diğ., 2008)

Yorulma çatlakları, genellikle tekrarlı ağır tekerlek yüklerinden dolayı oluşmaktadır. Yorulma çatlakları, üstyapı eksenine paralel olup, uzunlukları birkaç desimetre ile onlarca metre arasında değişen ince çatlaklar biçiminde başlayarak, zamanla tekrarlanmak suretiyle küçük bloklar serisi şeklinde, birbirine bağlı timsah sırtı çatlaklara dönüşen çatlaklardır. Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin belirli bir tekerrürü sonucu kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması ile oluşmaktadır (Yılmaz, 2011; Şengöz, 2003; Kaşak, 2007). Ayrıca; taban zemini, alttemel ve/veya temel tabakalarının yetersiz sıkışması ve/veya yetersiz drenajı nedeni ile taşıma gücü yetersizliği, uygun olmayan malzeme kullanımı ve kötü yapım teknikleri, çevre ve iklim şartları (donma etkisi, nem değişiklikleri, vb.) gibi etkiler altında, ağır taşıtların tekerlek yörüngesinde meydana gelmekte ve kaplamanın yorulma mukavemetine ve ağır taşıt trafik hacmine bağlı olarak Şekil 1.1’de görüldüğü gibi düşük, orta veya yüksek şiddette olabilmektedir.



Şekil 1.1. Düşük (a), orta (b) ve yüksek (c) şiddette yorulma çatlakları (KGM 2008)

Bitümlü sıcak karışımlar çok düşük sıcaklık şartlarında gevrek bir davranış sergilemektedirler. Agregası ve bağlayıcı malzeme olarak kullanılan bitümün birbirlerinden farklı olan hacimsel genleşme katsayıları sebebiyle, trafik yükü çok az olsa bile kaplamada çatlaklar oluşabilmektedir (Şekil 1.2) (Kök, 2019).



Şekil 1.2. Düşük ısı çatlakları (Kök, 2019)

Oluşan çatlaklar, zamanında müdahale edilmemesi durumunda daha büyük yapısal bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle bitümlü karışım tabakalarının düzenli olarak gözlenmesi ve ihtiyaç halinde bakım ve onarım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Devletler ulusal ve bölgesel yol ağlarının geliştirilmesi ve bakımına büyük yatırımlar yapmaktadır. 2009 yılında AB devletleri, AB karayolu ağlarının geliştirilmesi ve bakımına AB ulaştırma ağı fonunun (10.74 milyar €) % 42'si kadar (4.5 milyar €) yatırım yapmışlardır (European Union Road Federation, 2012). 2018 yılında ülkemizde KGM'ye ayrılan yatırım bütçesi, merkezi yönetim bütçesinin %2.36'sına (18 milyar TL) denk gelmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019). Araştırmacılar, bakım ve onarım maliyetlerinin azaltılıp, asfalt kaplamanın servis kabiliyetinin artırılması için malzemenin kendi kendini iyileştirmesi kavramına odaklanmışlardır.

Bu çalışmada bitümlü sıcak karışımlar üzerinde, kendi kendini iyileştirme olayı için geliştirilen yöntemlerden olan mikrokapsül yöntemi, gençleştirici olarak atık bitkisel ve atık

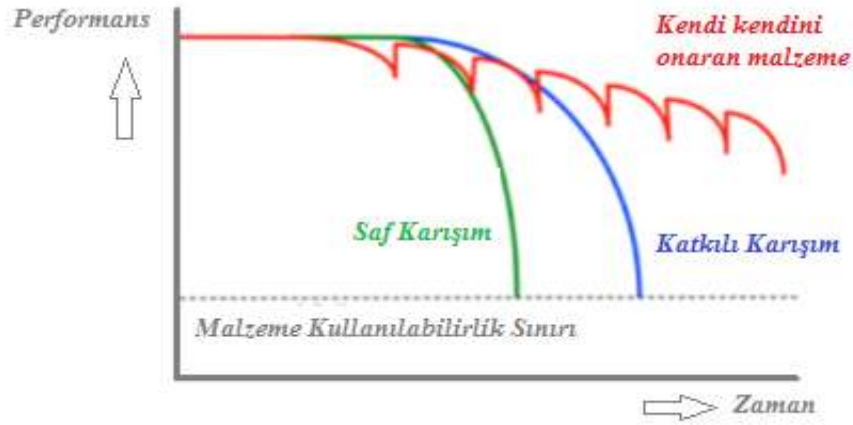
madeni yağ kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu yöntemin bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine olan etkisi hacimsel özellikler belirlenerek, Marshall Stabilite ve Akma, Çekme Dayanımı Oranı, İndirekt Çekme Rijitlik Modülü, İndirekt Çekme Yorulma, Dinamik Sünme ve Yarım Daire Eğilme deneyleri yapılarak değerlendirilmiştir.



2. KENDİNİ ONARABİLEN MALZEME KAVRAMI

Kendini onarabilen malzemeler için doğadan esinlenilmiştir. Bir ağaç, gövdesinde veya dallarında oluşan bir hasarı kendi kendine onarabilmektedir. Ya da parmakta oluşan bir kesik sonucu ortaya çıkan kan kendiliğinden durabilmektedir. Kemikte oluşan çatlak veya kırık zamanla iyileşebilmektedir. Eğer malzeme kendi kendini onarabiliyorsa malzemede oluşan hasar sorun olmaktan çıkmaktadır. Başka bir deyişle hasar onarırsa hasarın etkisi kaybolmaktadır. Kendini onaran malzemelerde mekanik dayanım ve kendini onarma kapasitesinin ikisi birlikte bulunmalı ve bu değerler optimum bir seviyede olmalıdır.

Günümüz teknolojisinde asfalt gibi bazı malzemelerin kendini onarması üzerine önemli aşamalar kat edilmiştir. Son zamanlarda yapılan araştırmalarla, üstyapı ömrünü arttırmak ve bakımını azaltmak amacıyla kendini onarabilen asfalt karışımlar ve uzun ömürlü üstyapılar gibi yeni yaklaşımlar ön plana çıkmaya başlamıştır (Marshall, 2006; State of Wisconsin, 2010). Malzeme performansı zamanın bir fonksiyonudur. Geleneksel malzemelerde hasar birikmekte ve belirli bir zaman periyodundan sonra malzeme kullanılamaz hale gelmektedir. Özellikleri iyileştirilen (asfaltta katkı kullanımı gibi) malzemelerde de bozulma benzer şekilde olmakla birlikte sadece malzemenin kullanım süresi artmaktadır. Kendini onarabilen malzemelerde erken bozulmalar meydana gelse de kendini onarabilme özelliği sayesinde kullanılamaz hale gelmesi diğer malzemelere göre çok daha uzun sürebilmektedir (Şekil 2.1) (Yahya ve diğ. 2015).



Şekil 2.1. Kendi kendini onarabilen malzemelerin performans-zaman eğrisine etkisi (Yahya ve diğ. 2015)

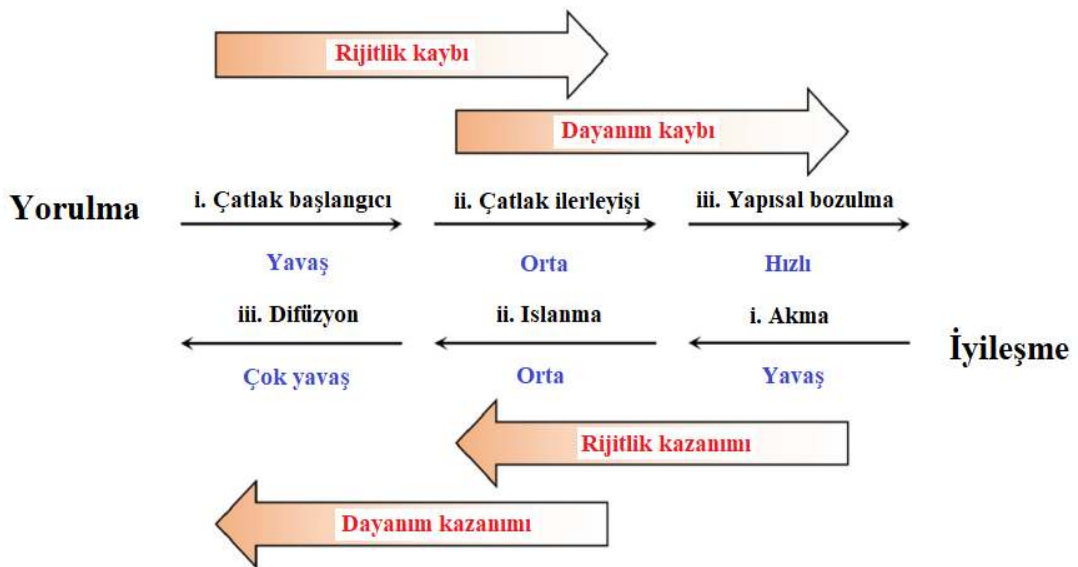
Kendini onarabilen BSK'ların geliştirilmesi ve yol kaplamalarında kullanılması, yol ömrünü 40 ila 80 yıla kadar uzatıp iki katına çıkarabilecek ve yol bakım faaliyetini önemli ölçüde azaltabilecek bir yenilik olarak görülmektedir (Yahya ve diğ., 2015). Kendini onarabilen asfalt kaplamaların uzun servis ömrü, hasarı en aza indirmenin klasik yaklaşımından ziyade, yeni

yaklaşımında kullanılan yöntem ve malzemelerle kaplamaya "kendini iyileştirici" yetenekler kazandırılmasıyla sağlanmaktadır.

2.1. Bitümün Kendini Onarabilme Yeteneği

Polimerlerin kendini onarma teorisi, asfaltın kendini onarma mekanizmasına dair çalışmalara büyük bir ilham kaynağı olmuştur. Ancak asfalt bileşimlerinin karmaşıklığı, mikro yapı ve olası etkileşimler nedeniyle, asfaltın kendini iyileştirme mekanizması günümüzde tam olarak açıklanamamaktadır. Bu nedenle genel bir ifadeyle kendiliğinden iyileşme; asfaltın hasar çatlaklarını azaltmak ve dolayısıyla orijinal özelliklerin kısmen geri kazanılmasını sağlamak için verilen tepki olarak ifade edilmektedir (Agzenai ve diğ., 2015; Qiu, 2012; Canestrari ve diğ., 2015; Shen ve Carpenter, 2007; Sun ve diğ., 2017). İyileşme malzeme tamamen bozuluncaya kadar devam etmekte olup, ayrışan parçalar bir dış kuvvetle yeniden temas ettirilerek iyileşmenin devam etmesi sağlanabilmektedir. Phillips, yorulma çatlaklarının iyileşme sürecini üç aşamalı bir model ile ifade etmektedir: i) Makro çatlakların kuvvet uygulanarak (sıkıştırma) veya akma yolu ile (ısıtma) kapanması, ii) Mikro çatlakların kapanması ve ıslatma ile kohezyonun sağlanması iii) Asfaltın yapıların difüzyon ile oluşturulmasıyla mekanik özelliklerin geri kazanılması (Phillips, 1998).

Servis ömrü boyunca yorulma hasarı oluşumu ile birlikte iyileşme sürekli olarak tekrarlanmakta olup hasar veya iyileşme sıcaklığa bağlı olarak belirgin bir şekilde değişmektedir. Şekil 2.2, bu mekanizmanın şematik diyagramını göstermektedir.



Şekil 2.2. Yorulma hasarı oluşumu-İyileşme (Ashouri, 2014)

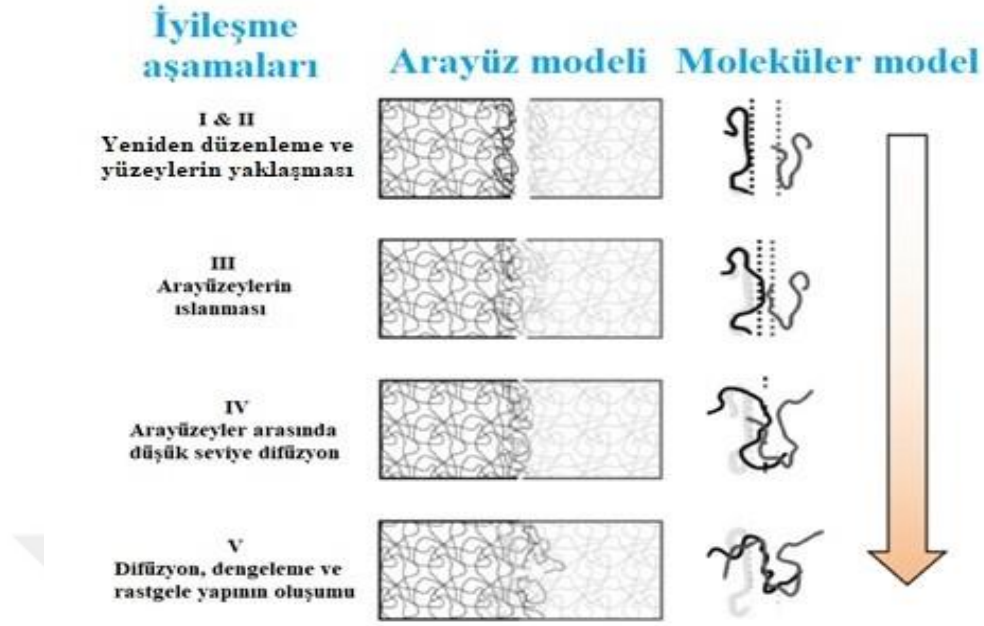
Bitümlü malzemeler, mikro çatlak hasarlarının onarımı için kendiliğinden iyileşme özelliğine sahip olup; çatlak oluştuktan sonra yüklemeye maruz bırakılmadıklarında ve yeterli süre olduğunda işlevselliklerini bir miktar geri kazanabilmekte ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Servis ömrü uzayabilmekte ve bunlara bağlı olarak sonuçta sera gazı salınımı azaltılabilmektedir (Chung ve diğ., 2015). Esasen kendi kendini iyileştirme, malzemelerin sürekliliğini engelleyen çatlak yüzeylerde oluşan moleküler difüzyondur (Agzenai ve diğ., 2015; Hager ve diğ., 2010; Kim ve diğ., 2001).

2.2. Kendi Kendini İyileştirme Mekanizması ve Asfalt Malzeme Modeli

Kendi kendini iyileştirme bir malzeme özelliği olduğundan, araştırmacılar, kendini iyileştirme davranışını anlamak ve açıklamak için mekanik testleri kullanmışlardır. Asfalt malzemelerin kendi kendini iyileştirme mekanizmaları aşağıda verilmiştir:

2.2.1. Moleküler Difüzyon İyileşme Modeli

Moleküler difüzyona dayalı iyileştirme mekanizması, kendiliğinden iyileşen polimerik sistemlerden ilham almakta olup polimer zincirin hareketliliğini baz alarak kendi kendini onarma davranışını tarif etmektedir (De Gennes, 1971). Wool ve O'Connor, polimerlerin kendiliğinden iyileşme sürecini moleküler difüzyona dayanarak açıklamış ve ara yüzeylerde difüzyon teorisinin, iyileşmenin ardışık beş aşamayı içerdiğini belirtmiştir (Wool ve O'connor, 1981): Yüzeyin yeniden düzenlenmesi, yüzey yaklaşımı, ıslatma, difüzyon ve rastgele iyileşme (Wool ve O'connor, 1981; Kline ve Wool, 1988; Ezekoye ve diğ., 1998; Garcia, 2014). Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilen bu modelde moleküller veya mikro yapı bileşenleri arasında ikincil bağlar onarılmakta ve arayüzde mekanik kuvvet sağlayan bir yapı oluşmaktadır (De Gennes, 1971). Bu aşamalar, yapışan yüzeyler arasında kuvvetli bir arayüz teması sağlamakta ve böylece malzemenin karakteristik dayanımı geri kazanılmaktadır (Gaskin, 2013).



Şekil 2.3. Çatlak arayüzünde iyileşme sırasında zincir hareketinin şematik gösterimi: (I) yeniden düzenleme, (II) yaklaşım, (III) ıslatma, (IV) difüzyon ve (V) rastgele bağ yapısının oluşumu (Qui, 2012; Wool ve O’connor, 1981).

Viskoelastik ortamda bir çatlakın büyümesinin habercisi, çatlakın ucundan itibaren bir çatlama bölgesinin gelişimidir (Schapery, 1989). Çatlama bölgesinin bir dizi mikro veya nano çatlaktan oluştuğu düşünülebilir. Çatlak iyileşmesi dış yükün kaldırılmasından hemen sonra gerçekleşir.

İyileşme sırasında daha yüksek bir sıcaklık, iyileşme tepkisini daha kısa sürelerle çeker. Özellikle sıcaklık, ıslanma alanlarının çekirdek yoğunluğunu ve artış hızını, yüzey düzenleme olayını ve moleküler hareketlilik yoluyla difüzyonun başlatılması ve adaptasyon etkileriyle zincirlerin yayılma derinliğini farklılaştırarak ıslanmayı değiştirir (Wool ve O’connor, 1981). Son zamanlarda, Sun ve arkadaşları, Denklem (2.1)’de gösterildiği gibi iyileşme süresi ve sıcaklığın etkilerini içeren, yukarıda bahsedilen moleküler difüzyon teorisine dayanan asfalt malzemelerinin makroskopik bir iyileşme fonksiyonunu önermiştir (Sun ve diğ., 2015).

$$H_I(t, T) = H_{I0}(T) + D(T) \cdot t^{0.25} \quad (2.1)$$

Burada $H_I(t, T)$, T sıcaklığında ve t zamanında gözlenen makroskopik iyileşme geri kazanımıdır. $H_{I0}(T)$ anlık dayanım kazancını temsil eder. $D(T)$, T sıcaklığındaki çatlak yüzeyleri arasındaki moleküllerin difüzyonundan kaynaklanan dayanım kazanımı oranını gösteren sıcaklığa bağlı bir parametredir.

2.2.2. Yüzey Enerjisi İyileşme Modeli

Kırılma mekaniğine dayanarak, asfalt betonunun çatlak iyileştirme sistemi aslında yüzey alanının değişmesidir, yani çatlak yüzey enerjisinin azalmasıdır. Lytton ve ekibi, Schapery (Schapery; 1989) tarafından türetilen viskoelastik ortam için (Denklem 2.4) , iyileşme için yorulma çatlaklarında kırılma mekaniği ile tutarlı olan basit bir kanun tanımlamışlardır (Denklem 2.2-2.3) (Lytton ve diğ., 1993).

$$2\Gamma_h = E_R D_h(t_a) H_v \quad (2.2)$$

$$D_h(t) = D_{0h} + D_{1h} \cdot t^{m_h} \quad (2.3)$$

$$2\Gamma_f = E_R D_f(t_a) \cdot J_v \quad (2.4)$$

Burada Γ_h ve Γ_f çatlak yüzeyin enerji yoğunluğunu ve çatlak yüzeyin yüzey iyileşme yoğunluğunu göstermektedir. E_R , isteğe bağlı referans modülüdür. $D_f(t_a)$ ve $D_h(t_a)$ ise t_a zamanında çekme sünme ve basınç sünme uyumudur. J_v , viskoelastik J integrali; H_v ise viskoelastik H integralidir. m_h , asfalt betonunun sünme isteğinin zamanla değişiminin logaritmik eğimini göstermektedir.

2.2.3. Kapiler Yükselme İyileşme Modeli

İyileşmenin, asfalt bağlayıcının yüzey enerjisine ve molekülün bir yüzünden diğerine olan difüzyon kapasitesine bağlı olduğu bilinmektedir. Ancak, moleküler difüzyon ve yüzey enerjisi temelli iyileşme teorileri, görünmeyen nano ve mikro çatlaklar üzerinden kurulmuştur. Çünkü çatlak yüzeylerindeki moleküller arası etkileşim çok küçük bir ölçüde sınırlandırılmıştır. Asfaltta yeni bir açık çatlak söz konusu olduğunda, moleküler interdifüzyon, yüzeyler arasındaki boşluk büyük olduğundan dolayı meydana gelmeyebilir. Buna rağmen, iyileşme süreci halen devam etmekte ve daha sonra, bir dinlenme süresine izin verildiğinde ve asfalt malzemelerine yeterli enerji uygulandığında görünen çatlaklar ortadan kalkabilmektedir. Şekil 2.4’de gösterildiği gibi; asfalt kaplamadaki açık çatlakların iyileşmesi yukarıdaki teoriler ile açıklanamadığından, kapiler yükselmeye dayalı iyileşme teorisi, Lucas-Washburn denkleminin (Garcia ve diğ., 2014) bir modifikasyonu yoluyla bölgesel çatlak iyileştirme verimliliğini, hatta makro çatlak iyileştirme verimliliğini de karakterize edilebilmektedir. Öne sürülen hipoteze göre: uygun sıcaklıkta asfalt çatlağındaki kapiler yükselme, çatlağın kapanmasına neden olur ve arayüzey moleküllerinin difüzyonu nedeniyle arayüz dayanımı kademeli olarak geri kazanılır. Çatlakta rol oynayan ana kuvvetler yüzey geriliminden (F_t) kaynaklanmaktadır (Denklem 2.5).

$$F_t = 2\pi\gamma\cos(\theta) \quad (2.5)$$

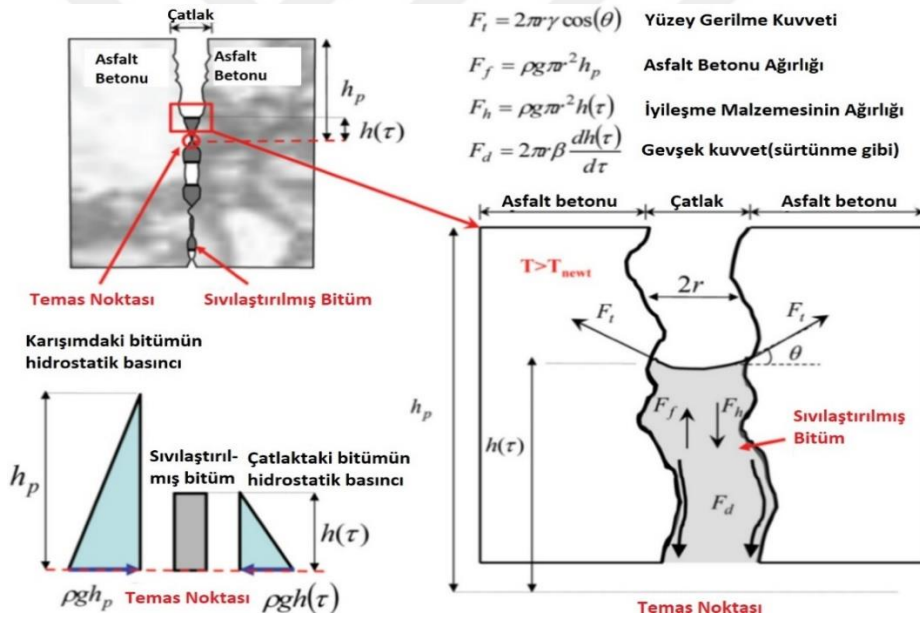
Burada r , kılcal yarıçap veya yarık genişliğinin yarısıdır. γ , sıvının yüzey gerilimidir. θ , ıslanma yüzündeki temas açısıdır. Temas açısı sabit bir değer değildir, iyileşme oranı ve karışım içindeki farklı malzemeler ile değişebilmektedir.

Ek olarak, yerçekimi kuvveti (F_g) bu modelde alandaki hidrostatik kuvvet olarak kabul edilmektedir.

$$F_g = F_f - F_h = \rho g \pi r^2 (h_p - h(\tau)) \quad (2.6)$$

Burada, $\rho g \pi r^2 h_p$ yani (F_f), çatlaktaki pozitif hidrostatik kuvveti temsil etmektedir. $\rho g \pi r^2 h(\tau)$ yani (F_h) ise, iyileşme süresi ve sıcaklığıyla ilişkili τ parametresine bağlı olarak iyileşmiş bölgenin ağırlığını belirlemektedir. Ayrıca, iyileşme sırasında enerjiyi dağıtabilecek olası bir kaynağı, çatlak yüzlerine karşı asfaltın hareketinden kaynaklanan sürtünme kuvveti (F_d) gibi, dikkate almak için bir dağıtma parametresi olan β ortaya konulabilir (Denklem 2.7).

$$F_d = 2\pi r \beta \frac{dh(\tau)}{d\tau} \quad (2.7)$$



Şekil 2.4. Asfalt betonu çatlaklarının iyileşme sürecinde kuvvetlerin davranışlarının şematik gösterimi (Garcia ve diğ., 2013)

2.2.4. Faz Alanı İyileşme Modeli

Klasik moleküler difüzyona dayalı iyileştirme modeli polimerlerden ilham alır, ancak iyileştirme işlemi asfaltın kimyasal yapısından dolayı daha karmaşıktır. Asfaltta uzun zincirli polimer moleküllerinin bulunması alışılmış bir durum değildir. Bu nedenle, difüzyon modeli gözlemlenen iyileşme davranışını tam olarak tanımlayamayabilir. Kringos ve arkadaşları, faz alanı teorisini kullanarak başka bir model geliştirmiş ve iyileşme modelinin temeli olarak asfaltın çok fazlı yapısını önermiştir (Kringos ve diğ., 2009).

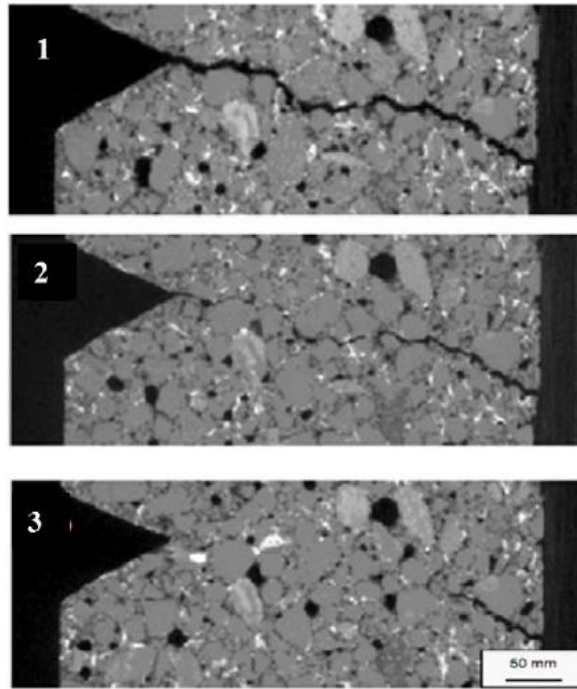
2.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Kendini Onarması

Bitümlü malzemelerin kendi kendini iyileştirme kabiliyeti 40 yıldır bilinmektedir ve son zamanlarda araştırmacılar bu konudaki çabalarını artırmıştır. Bunun sonucunda bitümlü sıcak karışımlardaki doğal iyileşme yöntemlerini araştırmaya başlamışlardır. Bu yöntem asfalt kaplamaların bakım maliyetini azaltırken, kaplamaların hizmet ömrünü de artırmaktadır.

Bitümlü malzemelerin yük tekrarına maruz kalması durumunda bitümlü malzemelerin sertliği ve dayanımı azalmaktadır. Tekrarlı yükleme sırasında mikro çatlakların oluşması ve daha sonra büyüyerek makro çatlaklara dönüşme süreci birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır (Yalcin ve diğ., 2018; Francken, 1979; Van Dijk ve diğ., 1972). Malzeme sertliğinin ve dayanımının geri kazanımı ve yorulma ömrünün uzaması ilk kez 1960'larda dinlenme süreli yorulma testi ile belirlenmiştir.

2.3.1. Bitümlü Karışımların Hızlandırılmış Kendini Onarabilme Yöntemleri

Bazin ve Saunier, asfalt kaplamalarda, yorulma hasarı ve dinlenme sırasındaki toparlanma süreci esnasında asfalt karışımların doğal kendi kendini iyileştirme sürecini incelemiştir. Bu çalışma laboratuvarda gerçekleştirilen ilk çalışmalardan biridir. Malzeme özelliklerinin geri kazanımı ile ilgili olarak dinlenme süresinden sonra iyileşme kavramı birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Bazin ve Saunier, 1967). Şekil 2.5, asfalt numunesinde doğal olarak kendi kendine iyileşmenin nasıl meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 2.5. Asfaltta doğal kendi kendine iyileşme (Garcia ve diğ., 2013)

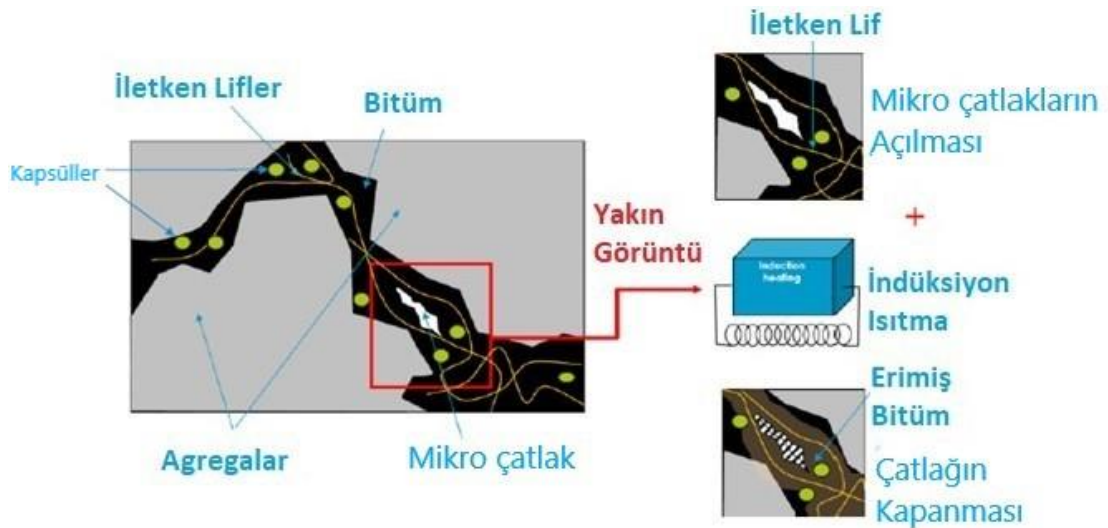
Boyer, asfalt kaplamalarda meydana gelen yorulma çatlaklarını gidermek için gençleştirici kullanımını araştırmıştır. Gençleştiriciler kaplama yüzeyine uygulandıktan sonra birkaç yıl boyunca kaplamanın hizmet ömrünü artırmaktadır. Ancak bu gençleştiriciler kaplamaların derinlerinde meydana gelen çatlaklara etki etmeyip sadece yüzeyden birkaç santimetre aşağıyı etkilemektedir (Boyer, 2000).

Son yıllarda gençleştirici ve derz dolgu malzemelerinin oluşturduğu yan etkilerden ötürü bitümlü sıcak karışımların iyileşme hızının artırılması için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bunlar indüksiyon yöntemi, mikrodalga yöntemi ve mikrokapsül yöntemidir.

2.3.2. İndüksiyon Yöntemi

İletken bir malzemeyi, alternatif bir manyetik alana yerleştirerek elektrik akımı üretme sürecine Faraday elektromanyetik indüksiyonu adı verilir. İndüklenen akımlar, kondüktörün elektriksel öz direncine karşı akar ve Joule Etkisi ile kondüktörde ısı üretir. Bu metot genellikle indüksiyon ısıtması olarak adlandırılır. Son zamanlarda indüksiyonla ısıtma teknikleri, asfalt kaplamaların sıcaklıklarını arttırarak yüksek sıcaklıklarda çatlakların iyileşmesini sağlamaktadır (Liu, 2012).

Bu işlem, kendini iyileştirme seviyesinin artmasını ve çatlakların kapanmasını sağlamaktadır. Şekil 2.6, iletken metal lif kullanımı ve indüksiyonla ısıtma ile çatlakların nasıl kapandığını gösterilmektedir.

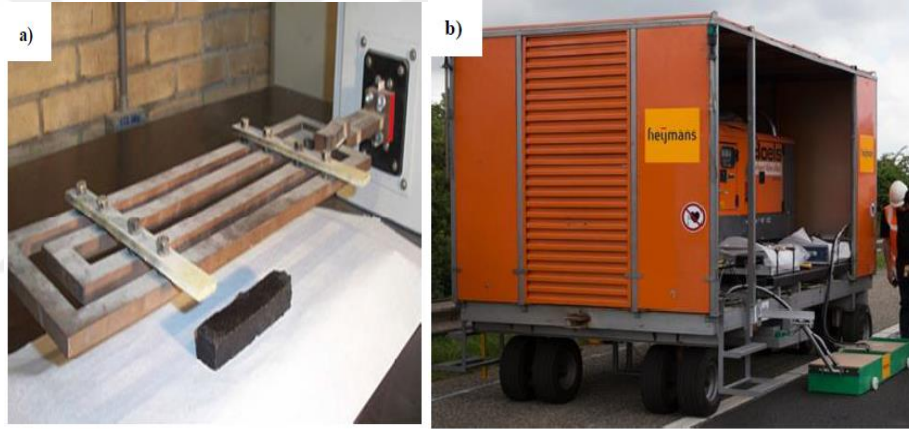


Şekil 2.6. İndüksiyonla ısıtma mekanizması (Garcia ve diğ., 2011a)

Asfalt kaplamaların kendi kendine iyileşmesinde indüksiyonla ısıtma popürlüğünü yeniden kazanmaktadır. Elektriksel iletkenliklerini incelemek için asfalt kaplamalara elektriksel olarak

iletken lifler ve filler maddeleri (karbon lifleri, grafit, çelik cürufu, çelik lifler, çelik yün ve iletken polimer polianilin) eklenmiştir. Sonuçlar elektriksel dirençliliğin, liflerin ve filler maddelerinin tipine, şekline ve boyutuna göre değiştiğini göstermiştir (Amir ve Schlangen, 2015).

İndüksiyon ısıtması yöntemi basit ve etkili bir yöntem olarak görünmesine rağmen, dünya çapında endüstriyel bir süreç haline gelmeden önce çözülmesi gereken sorunlar mevcuttur. Laboratuvardaki test numuneleri küçük olduğundan dolayı indüksiyon ısıtma cihazı da küçük olmalıdır ki bu durumda da sahadaki durumla çakışmayacaktır. Çünkü sahada daha büyük cihazlara ihtiyaç duyulacaktır. Bu da ekonomik olmamakta ve uygulandığı zaman yolda bozulmalara neden olduğundan kendi kendini iyileştirmenin avantajlarından birini etkisiz hale getirmektedir. İndüksiyonla ısıtma cihazının hareket hızı, asfalt kaplamaların ısınma ve soğumasına bağlı olarak belirlenmelidir (Garcia ve diğ., 2012). Laboratuvar ve sahada kullanılan indüksiyonlu ısıtma cihazlarının bir görüntüsü Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Laboratuvar tipi indüksiyon ısıtma cihazı (a), test aracına yüklenmiş indüksiyon ısı üreticisi (b) (Garcia ve diğ., 2011b)

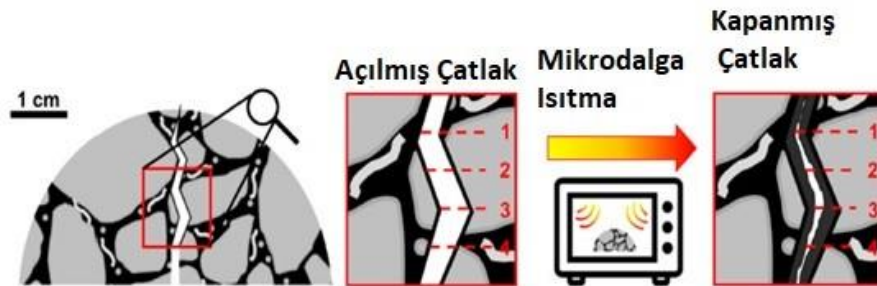
Yoğun gradasyonlu bitümlü sıcak karışımların indüksiyonla iyileşmesini etkileyen faktörleri belirlemek amacıyla, Garcia ve ekibi çalışmalarında farklı uzunluklarda, miktarlarda ve çaplarda çelik yün lifler içeren farklı karışımları değerlendirmiştir. Ek olarak, asfalt geri kazanımını tanımlayan yarı deneysel bir model geliştirmişlerdir (Garcia ve diğ. 2013). Gómez-Meijide ve ekibi ise, üç farklı hava boşluğuna sahip (%4.5, %13 ve %21) çatlamış asfalt kırırlarında kendi kendine iyileşmeyi, kızılötesi radyasyon ve indüksiyonla ısıtma ile gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, asfalt karışımındaki çatlakların kızılötesi ve indüksiyonla ısıtma ile tamamen onarılabilirliğini göstermiştir. Karışımın ulaştığı maksimum iyileşme seviyesi, yoğun gradasyonlu karışım için, daha yüksek hava boşluğuna sahip karışımlardan daha düşük olmuştur. Bunun nedeni, yoğun agrega gradasyonuna sahip karışımlarda çatlak oluşumu sırasında

agregaların daha fazla kırılma eğiliminde olmasıdır. Agregalardaki çatlaklar bitüm ile doldurulabilir, ancak iyileşemez (Gomez-Meijide ve diğ. 2016).

Liu ve ekibi yapmış oldukları çalışmada, çelik yünü lif içeren bitümlü sıcak karışımların indüksiyon ısısı ile iyileşebilirliğini değerlendirmişlerdir. Çalışmada kırış numuneler üzerinde 4 noktalı eğilme yorulma deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan çelik yünü lif içeren karışımların saf karışımlara göre daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. İndüksiyon ısısının iyileşme oranını arttırdığı tespit edilmiş, çelik yününün en yüksek iyileşme etkisi gösterebilmesi için indüksiyon ısısının 85°C olması gerektiği belirlenmiştir. Daha fazla ısıнын, numunede şişmeye neden olduğu ve mukavemeti azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, indüksiyonun birden çok kez uygulanması ile iyileşmenin de arttığı gözlemlenmiştir (Liu ve diğ., 2012).

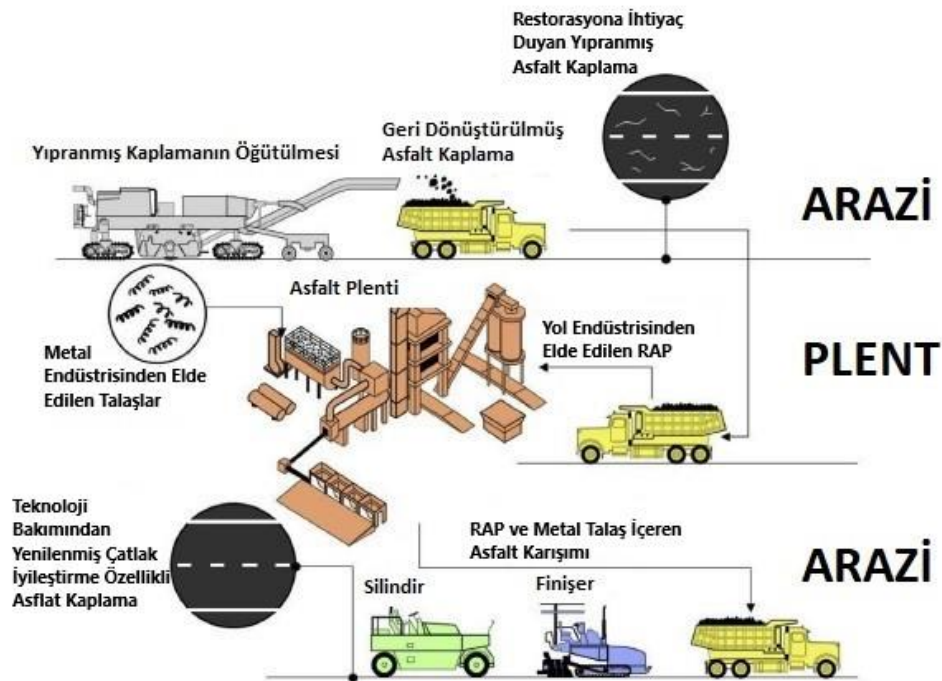
2.3.3. Mikrodalga Yöntemi

Günümüzde mikrodalga teknolojisi, metalik liflerle malzemelerin ısınma hızlarını arttırarak kendiliğinden iyileşme oranlarını artırmak üzere geliştirilen bir tekniktir (Gallego ve diğ., 2013). Çelik cürufllu bitümlü sıcak karışımın, mikrodalga ısıtma yoluyla kendi kendine iyileşme potansiyeli, Yihan ve ekibi tarafından çalışılmıştır. Çalışmada, mikrodalga ısıtma oranı ve asfalt karışımlarının termal iletkenliği test edilmiştir. Sonuçlar, çelik cürufllu asfalt karışımlarının kendi kendini iyileştirebilen malzemeler olduğunu göstermiştir. Çelik cürufllu asfalt karışımlarının ısınma oranı, kireçtaşı agregalı asfalt karışımlarının ısınma oranından yaklaşık iki kat daha fazla iken, termal iletkenliği biraz daha düşük olmuştur (Yihan ve diğ., 2014). Norambuena-Contreras ve Gonzalez-Torre, mikrodalga ısıtma süresinin, çelik lifler içeren dört farklı asfalt karışımının kendi kendini iyileştirme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. 40 saniyenin asfalt numunelerinde en düşük hasarla en yüksek iyileştirme seviyelerine ulaşmak için en uygun ısıtma süresi olduğu ve 30 saniyenin üzerindeki ısıtma sürelerinin de çatlakları kapatabileceği, böylece asfalt karışımlarının mikrodalga ısıtması yoluyla kendi kendine iyileşme sağladığı sonucuna varmışlardır (Şekil 2.8) (Norambuena-Contreras ve Gonzalez-Torre, 2017).



Şekil 2.8. Mikrodalga ısıtmanın öncesi ve sonrasındaki çatlak genişlikleri ölçümlerinin şematik gösterimi (Norambuena-Contreras ve Gonzalez-Torre, 2017)

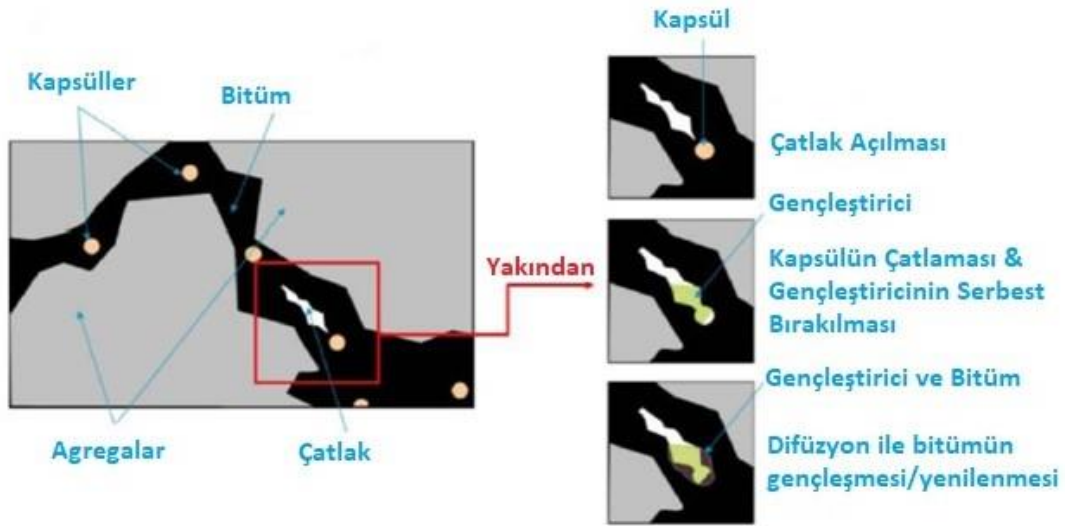
Asfalt karışımların bitümün sıcaklık artışıyla kendi kendini iyileştirme kavramı, araştırmacılar tarafından mikrodalga veya indüksiyonla ısıtma ile çatlak iyileştirme özelliklerine sahip bir asfalt karışımı oluşturmak için kullanılmıştır. Metaller (genellikle çelik yün lifler-SWF), termal enerjiyi emmek ve iletmek için asfalt karışımlarına eklenmektedir. Metal endüstrisinin atık bir malzemesi olan metal talaşı, SWF'nin yerine kullanılabilir. Ayrıca, daha sürdürülebilir bir yol malzemesi yapmak için bu karışımlara geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) eklenebilir. Gonzalez ve ekibi bu araştırmada, metal talaşı ve RAP eklemenin asfalt karışımlarının mikrodalga ısıtma ile çatlak iyileştirme özelliklerine olan etkisini değerlendirmeyi amaçlamıştır (Şekil 2.9). Metal talaşı eklenmesi, asfalt karışımlarının çatlak iyileşmesini pozitif yönde geliştirirken, metal talaşı olan karışımlara RAP eklenmesi bu gelişmeyi azaltmıştır. Mikrodalga ısıtmadan sonra asfalt numunelerinin ortalama yüzey sıcaklığı, indüksiyonla ısıtma ile elde edilen sıcaklıklardan daha yüksek olup, bu durum karışımlar mikrodalga radyasyonu ile ısıtıldığında talaşların daha verimli olduğunu göstermektedir. CT taraması analizi, talaşların, karışımda homojen bir şekilde dağıldığını ve metal talaşların ilave edilmesinin, hava boşluklarını artırdığını göstermiştir. Genel olarak, RAP ve atık metal talaşı içeren asfalt karışımlarının, mikrodalga ısıtma ile çatlak iyileştirme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Gonzalez ve diğ. 2018).



Şekil 2.9. Eski, yıpranmış asfalt kaplamaların çatlak iyileştirme özelliklerine sahip yeni ve sürdürülebilir bir asfalt kaplamaya uyarlanması (Gonzalez ve diğ., 2018)

2.3.4. Mikrokapsül Yöntemi

Mikrokapsül yönteminde; çatlaklar oluştuğunda çatlaklara temas halindeki kapsüllerin bazıları Şekil 2.10'daki gibi kırılırlar, kırılan kapsüllerin içindeki yağ, çatlaklardaki bitümle temas eder ve bitümün özelliklerini bir miktar geri getirerek, çatlakların iyileşme kapasitesini artırır. Bu sürecin çatlakları onarıp önemli ölçüde azalttığı görülüp ayrıca yeni çatlak yayılımını da önlediği düşünülmektedir. Temel varsayım, yorulma çatlakları ve termal çatlaklarda kapsüller üzerine yüksek bir gerilme uygulandığında kapsüllerin kırılacağı yönündedir. Bu gençleştiriciler bitüme nüfuz ederek sertliğinin azalmasına ve kimyasal dengesini geri kazanmasına yardımcı olacaktır (Tabakovic ve Schlangen, 2015).



Şekil 2.10. Kapsüllenmiş gençleştirici ile iyileşme mekanizması (Tabakovic ve Schlangen, 2015)

Garcia ve ekibinin yaptığı çalışmada, asfalt kaplamaların kendi kendini iyileştirmesi için iki tip kapsül üretilmiştir. Birinci tip kapsüller çapı 1-1.5 mm arası olan epoksi-çimento kabuğu içeren kapsüllerden oluşmaktadır. İkinci tip kapsüller ise çapı yaklaşık 23.5 µm olan metanol-melamin-formaldehit (MMF) polimerli bir kabukla oluşan kapsüllerdir (Garcia ve diğ., 2015).

Su ve ekibine göre, mikrokapsül kabuğunun içindeki gençleştiriciye nüfuz etme ve dağılma izni vermek için mikrokapsülün kabuğunu kırarak gerilmeyi belirlemek gerekmektedir. Mikrokapsül kabuğu kırıldıktan sonra gençleştirici çatlaktaki bitümle temas ederek bitümün özelliklerini geri getirecek ve çatlakların iyileşme kapasitesini artıracaktır (Su ve diğ., 2013a).

Bununla birlikte mikrokapsüllerin yakınında bir yorulma çatlağı veya termal çatlağın meydana gelmesi kesin değildir, bu da kendini iyileştirme sürecinin her zaman gerçekleşmeyeceği anlamına gelmektedir (Su ve diğ., 2015). Ek olarak, Su ve arkadaşları bazı mikrokapsüllerin yüksek plastik deformasyonları nedeniyle kırılmadığını tespit etmişlerdir. Bu

plastik deformasyonun ısı ve uygulanan yük kombinasyonundan kaynaklanabileceğini öne sürmektedirler (Su ve diğ., 2013b)

Yukarıda açıklanan gençleştirici kapsüllemenin iki yöntemi, geleneksel gençleştirme sistemine göre farklı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar şu şekilde özetlenebilir: Gençleştiricinin asfalt karışımı içindeki bütün hacimsel nüfuzu, ki bu kaplama yüzeyinde sürtünme açısından olumsuz yan etki oluşturmamaktadır, daha iyi bir çevresel performans sunmaktadır. Ek olarak, akıllı ve yenilikçi yollar üretmeye yönelik öncü adımlardan biri olarak kabul edilmektedir.

Garcia ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada, yaşlandırılmamış bağlayıcılarda asfaltın maltenlere oranı belirlenmiştir. Yaşlanma meydana gelmiş bitümlü bağlayıcı numunelerinde yaşlanmadan önceki asfalt/malten oranını sağlayabilmek amacıyla gençleştiriciler kullanılmıştır. Bu ürünler, yüzeydeki ince taneciklerin kaybını ve oluşabilecek çatlakları azaltmak amacı ile kullanılmıştır. Ancak, iyileştiricilerin etkili olabilmesi için kaplama yüzeyinden alta doğru nüfuz etmesi gerektiği ve bu durumun da kayma direncini azaltmasından dolayı bu iyileştiriciler kapsüllenmiş ve asfalt betonu içerisine karıştırılmıştır. Bu uygulamanın ardındaki düşünce kapsüllerdeki basıncın belirli bir sınır değerin üzerine çıkması sonucu kapsülün kırılması ve iyileştiricinin salınmasıdır. Çalışmada, bu kapsüllerin özellikleri üzerine odaklanılmıştır. Dört farklı iyileştirici tipi kapsüllenmiş ve kapsüllerin etkileri incelenmiştir. Diğer yandan, kapsüllerin salım mekanizmaları çözümlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mikrokapsüllerin bitümü gençleştirmedeki etkisi ve mikrokapsüllerin optimum kabuk kalınlığı belirlenmiştir (Garcia ve diğ., 2011c).

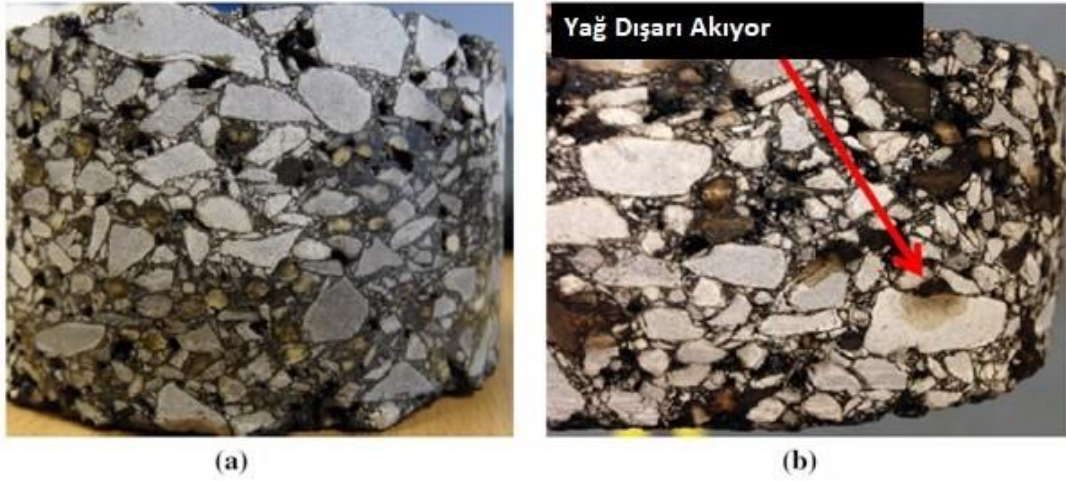
Melamin-formaldehit (MF) mikrokapsülleri birçok malzemeye ilave edilmiştir. Mikromekanik özellikler, üretim ve uygulama sırasında mikrokapsüllerin dayanıp dayanamayacağını belirleyen önemli özelliklerdir. Nanoiz yöntemi, Lv ve ekibinin çalışmasında parafin içeren mikrokapsüllerin mikromekanik özelliklerini ölçmede etkin bir yöntem olarak başarıyla kullanılmıştır. Sonuçlar, MF kabuklu daha büyük bir mikrokapsülün daha yüksek bir Young modülüne ve daha kalın bir kabuğa sahip olmasının, mikrokapsüllerin deformasyona direnme kabiliyetini ve çekirdek/kabuk ağırlığı oranlarını (1:1, 1:2 ve 1:3) arttırabileceğini doğrulamıştır. Yük-deplasman eğrileri, MF kabuklarının elastik-plastik deformasyon kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir (Lv ve diğ., 2016).

Xue ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, mikrokapsüller yerinde polimerizasyon yöntemi ile hazırlanmış, optimum hazırlama koşulları dikkatle incelenmiş ve mikrokapsüllerin morfolojisi, parçacık boyutu, kaplama hızı, termal stabilitesi ve moleküler yapısı kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca, düşük sıcaklık ve yorulma yükü koşulları altında mikrokapsül içeren asfaltların kendini iyileştirme kabiliyeti tamamen incelenmiştir. Sonuçlar, mikrokapsüllerin, eritme işlemi sırasında sağlam kalabildiğini ve düşük sıcaklık ve yorulma yükü koşulları altında iyi bir iyileştirme performansı gösterdiğini, ancak iyileşme verimliliğinin ilk olarak arttığını ve

daha sonra ilave mikrokapsül miktarı ile azaldığını ve en uygun ilave mikrokapsül miktarının asfaltın ağırlıkça %0.3-0.5'i kadar olduğunu ortaya koymuştur (Xue ve diğ., 2017).

Günümüzde, sıcak karışım asfaltta (HMA) geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) malzemesinin kullanımına ilişkin ana problem, uygulanan RAP yüzdesinin sınırlanmasını gerektiren bitümün yaşlanması olayıdır. Bu bağlamda, bitümlü bağlayıcıların gençleştirilmesi, geri dönüşümün en önemli fakat en maliyetli kısmıdır. Bu çalışmada, bitümlü bağlayıcıyı gençleştirmek için gıda endüstrisinden gelen ve sıklıkla çöp sahalarında ve nehirlerde kirletici bir atık malzeme olarak görülen atık pişirme yağı (WCO) kullanımı yeni bir yöntem olarak incelenmiştir. Orijinal bitüm, yaşlanmış bitüm ve yenilenmiş bitümün fiziksel özellikleri ölçülmüş, yumuşama noktası, penetrasyon ve Brookfield viskozitesi gibi geleneksel bitümlü bağlayıcı testleriyle karşılaştırılmış ve sonuçları değerlendirmek için istatistiksel analizler yapılmıştır. Genel olarak sonuçlar, yaşlanmış bitümün WCO tarafından gençleştirildiğini göstermiştir. 50/60, 40/50 ve 30/40 gençleşmiş bitüm gruplarına yönelik optimum atık pişirme yağı yüzdesi sırasıyla %1, %3-4, ve %4-5 olarak seçilmiştir. İstatistiksel analizler, orijinal bitüm ve gençleşmiş bitüm arasında kayda değer bir fark olmadığını göstermektedir (Aslı ve diğ., 2012).

Garcia ve ekibi, yapmış oldukları çalışmada, asfalt karışımında bulunan akışkan yağ (düşük viskoziteli) içeren kapsüllerin, simule edilen trafik yükleri altında kırıldıklarında ortaya çıkan etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, ayçiçek yağı içeren kapsüller imal edilmiş ve kapsüllerin mekanik kompozisyonu ve dayanımı nitelendirilmiştir. Daha sonra kapsüller agrega olarak bitümlü sıcak karışıma eklenmiş ve sıkıştırılmıştır. Bitümlü sıcak karışıma eklenen kapsüllerin etkisini ölçmek için numuneler farklı sayılarda periyodik yüklemeye tabi bırakılmış, dinlendirilmiş ve tekrar test edilmiştir. Deney öncesi ve dinlenme süreci sonrasındaki yüklemeler arasındaki büyüklük ve farklılıklar asfalt karışım içerisindeki kapsüllerin etkisini belirlemeye olanak tanımıştır. Buna ek olarak, çatlakların açılma ve iyileşme süreci, asfalt karışımın bilgisayarlı tomografi taraması kullanarak test öncesi, periyodik yükleme sonrası ve dinlenme süreci sonrası incelenmesi yoluyla gözlemlenmiştir. Sonuç olarak kapsüllerin kademeli olarak periyodik basınç uygulanırken kırıldığı ve dinlenme süreçlerinde kapsülden salınan yağın asfalt karışımındaki bitümü yumuşattığı (gençleştirdiği) gözlenmiştir (Şekil 2.11) (Garcia ve diğ., 2015).



Şekil 2.11. (a) Testten önce asfalt numunesi, (b) Kırılmış kapsüllerle birlikte testten sonra asfalt numunesi (Garcia ve diğ., 2015)

Norambuena-Contreras ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada farklı yüzdelerde kapsüller asfalt karışımına ilave edilmiştir. Kapsüllerin yoğunluk, indirekt çekme dayanım, parçacık kaybı, yorulma ömrü ve kendi kendini iyileştirme gibi özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. % 0.5 kapsül içeren asfalt karışımının, kapsül içermeyen veya kapsüllerin % 0.75 ve % 1.00 yüzdelere bulunduğu asfalt karışımından daha yüksek İndirekt Çekme Dayanımı'na sahip olduğu bulunmuştur. Karışıma daha fazla kalsiyum aljinat kapsülü eklendiğinde, karışımın hava boşluğu içeriği artmıştır ve kapsüllerden daha fazla yağ serbest bırakılmıştır, bu da asfalt karışımlarının rijitliğini azaltmıştır (Norambuena-Contreras ve diğ., 2019).

Micaelo ve ekibinin yaptığı çalışmada kapsül içeren ve içermeyen karışımlar mekanik özellikleri bakımından değerlendirilmiştir. Kapsül içermeyen asfalt karışımlarının rijitlikleri sürekli artmıştır. Kapsül içeren numunelerin rijitlikleri ilk 500 döngüden sonra azalmıştır, bu test sırasında kapsüllerin kırıldığını göstermektedir. Dinlenme süresinden sonra, kapsül içermeyen asfalt karışımlarının rijitlikleri sabit kalırken, kapsül içeren asfalt karışımlarının rijitlikleri artmıştır. Bu durum karışımdaki çatlakların kendi kendine iyileşmesine atfedilmiştir (Micaelo ve diğ., 2016).

Garcia ve ekibi yaptıkları çalışmada gençleştirici içeren mikrokapsüller üreterek bitümlü sıcak karışım numunelerine ilave etmiş ve kapsüllerin numunelerin dolaylı çekme dayanımı, rijitlik modülü ve yorulma ömrü gibi mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kapsüller asfalt karışımlarına homojen olarak dağılmamıştır. Numunenin belirli derinliğe sahip kısımlarında yoğunlaşma eğilimi göstermişlerdir. Garcia ve ekibine göre kapsüller hasara daha yatkın alanlarda yoğunlaşmak üzere tasarlandığından kapsüllerin belirli derinliğe sahip olan yerlerde bulunması asfalt kaplamaların dayanıklılığını artırmak için bir avantaj olabilir. Kapsül içeren asfalt karışımının dolaylı çekme mukavemeti kontrol numunesine göre daha düşük olarak

bulunmuştur. Bu, kapsüllerin normal agregalara kıyasla daha düşük mukavemete sahip olmasına atfedilmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti testlerinden sonra kapsüller numunenin çatlak yüzlerinde kırılmıştır. Kapsüllerin teste dayanım göstermesi durumunda içerdikleri gençleştiriciyi bir çatlak varlığında salmaları zor olacaktır. Bitümlü sıcak karışım numunesinin rijitliği kullanılan kapsüllerin çapı ile azalmıştır. Yazarlara göre bunun sebebi tüm kapsüllerin karıştırma ve sıkıştırma işlemlerine dayanım gösterememesi ve kapsüllerden salınan yağın bitümlü bağlayıcıyı yumuşatmasıdır. Kapsüllerin varlığı bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımını etkilememiştir. Bu da yorulma çatlaklarının kapsüllerin kırılması için ana mekanizma olmadığını göstermiştir. Garcia ve ekibine göre dayanım için optimum kapsül çapını elde etmek yerine içerdikleri yağ miktarına odaklanmalıdır (Garcia ve diğ 2016).



3. MATERYAL

Bitümlü sıcak karışımların hazırlanması için gerekli bağlayıcı ve agreg, tez çalışmasının amacı doğrultusunda farklı etkenler dikkate alınarak seçilmiştir. Ayrıca, mikrokapsül elde etmek için gerekli polimerler, yağlar ve üretim aşaması şemaları bu kısımda verilmiştir.

3.1. Bağlayıcı Temini

Çalışma kapsamında bitümlü sıcak karışımda çatlak oluşturulması, bitümlü sıcak karışıma ilave edilen kapsüller içerisindeki atık yağların kapsüllerin kırılmasıyla serbest kalarak çatlakları onarması hedeflenmektedir. Bu nedenle iyileşmenin daha açık bir şekilde belirlenmesi için kıvamı yüksek bir kaplama sınıfı bitüm olan B 50/70 sınıfı bağlayıcı TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilmiştir.

3.2. Agreg Temini

Çalışmada agreg olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker (kireçtaşı) türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır (Şekil 3.1). Agreg karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış bir şekilde deneylerde kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılacak agreg yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, tasarım trafiği (15 milyon) ve kaplamanın kalınlığına (<100 mm) bağlı olarak Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı görülmüştür.

Çalışmada maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave gradasyonu kullanılmıştır. Kullanılan gradasyon Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan agreg gradasyonu

Elek (mm)	boyutu	Geçen (%)	Kontrol noktaları		Yasaklanmış Bölge	
			Min.	Maks.	Min.	Maks.
19 (3/4")		100	100			
12,5 (1/2")		95	90	100		
9,5 (3/8")		88		90		
4,75 (No. 4)		65				
2,36 (No. 8)		35	28	58	39,1	39,1
1,18 (No. 16)		23			25,6	31,6
0,6 (No. 30)		14			19,1	23,1
0,3 (No. 50)		10			15,5	15,5
0,15 (No. 100)		8				
0,075 (No. 200)		5	2	10		



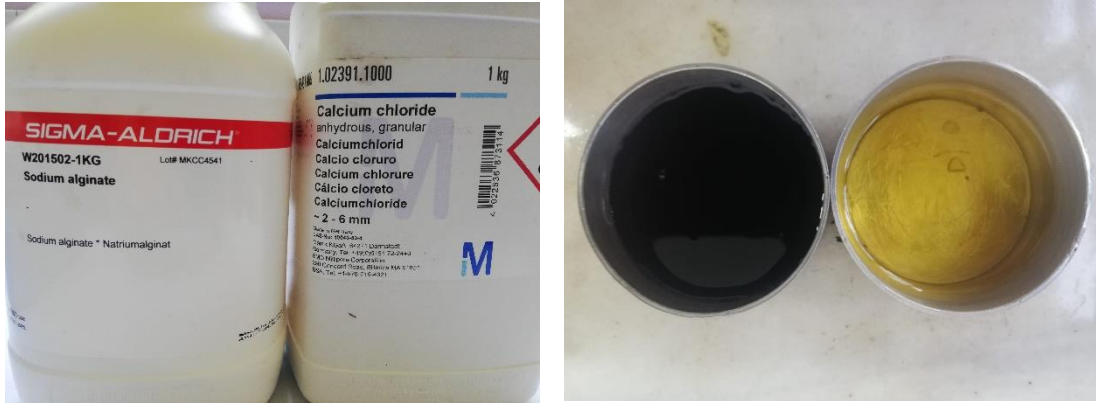
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan elenmiş agregalar

3.3. Kapsüllerin Üretimi

Kapsül içerisinde gençleştirici olarak kullanılacak bitkisel ve madeni yağların, ayrıca gerekli kimyasal malzemelerin özellikleri bu kısımda verilmiştir. Kapsül üretiminde gerekli olan ekipmanlar verilerek, üretim süreci şematize edilmiştir.

3.3.1. Kapsül Üretimi İçin Gerekli Malzemelerin Özellikleri ve Temini

Kapsül üretimi için gerekli olan gençleştirici malzemeler atık bitkisel ve atık madeni yağ, kalsiyum klorit ve sodyum aljinat temin edilmiştir (Şekil 3.2). Atık bitkisel yağ olarak mutfak atığı ayçiçek yağı, atık madeni yağ olarak ise araçların bakımı sonrası ortaya çıkan madeni yağlar kullanılmıştır. Temin edilen yağların viskoziteleri Tablo 3.2’te verilmiştir. Kapsül üretimi için gerekli olan dehidratör, manyetik ısıtıcılı karıştırıcı, beher ve damlatma hunisi Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.2. Kapsül üretiminde kullanılacak sodyum aljinat, kalsiyum klorit ve gençleştiriciler

Tablo 3.2 . Atık bitkisel ve atık madeni yağın viskozite değerleri

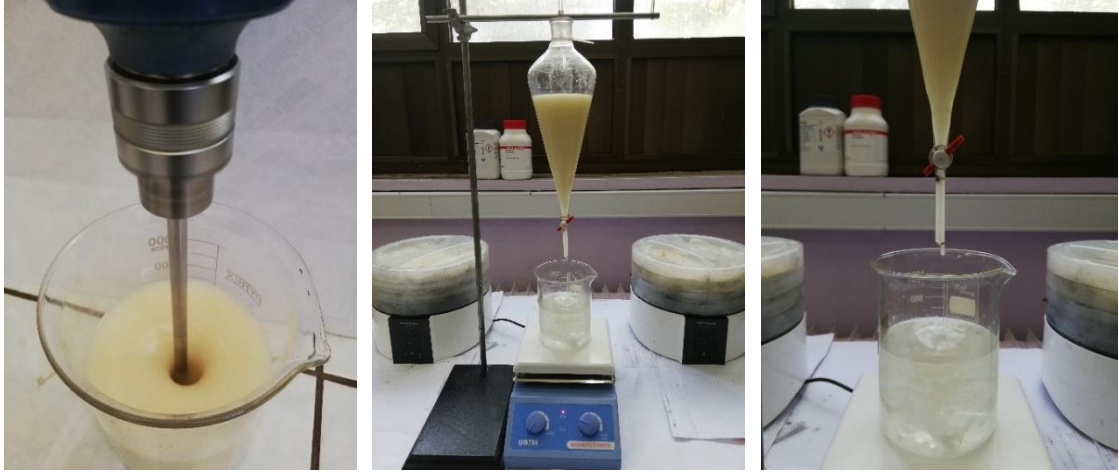
	25°C	40°C
Atık Bitkisel Yağ (cP)	62,5	37,5
Atık Madeni Yağ (cP)	200	87,5



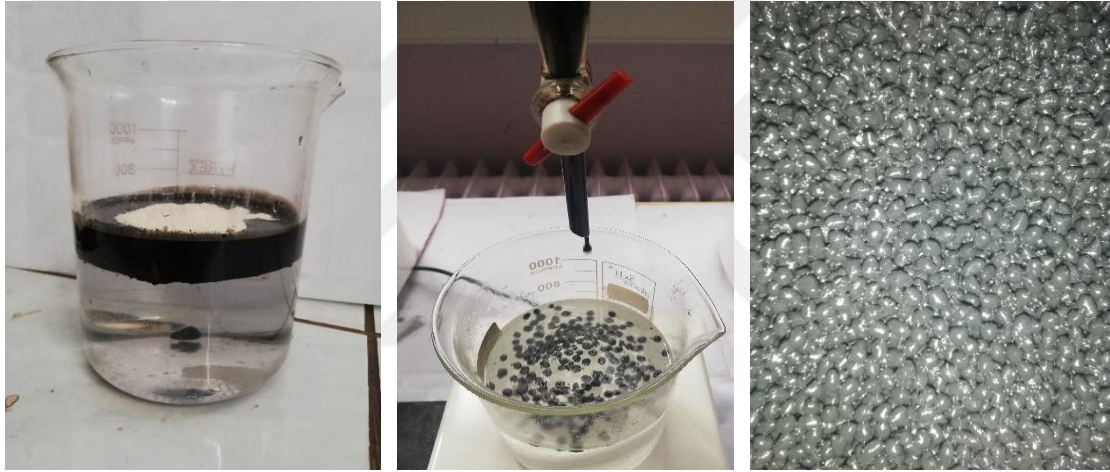
Şekil 3.3. Kapsül üretimi için gerekli olan dehidratör, manyetik ısıtıcılı karıştırıcı, beher ve damlatma hunisi

3.3.2. Kapsül Üretimi

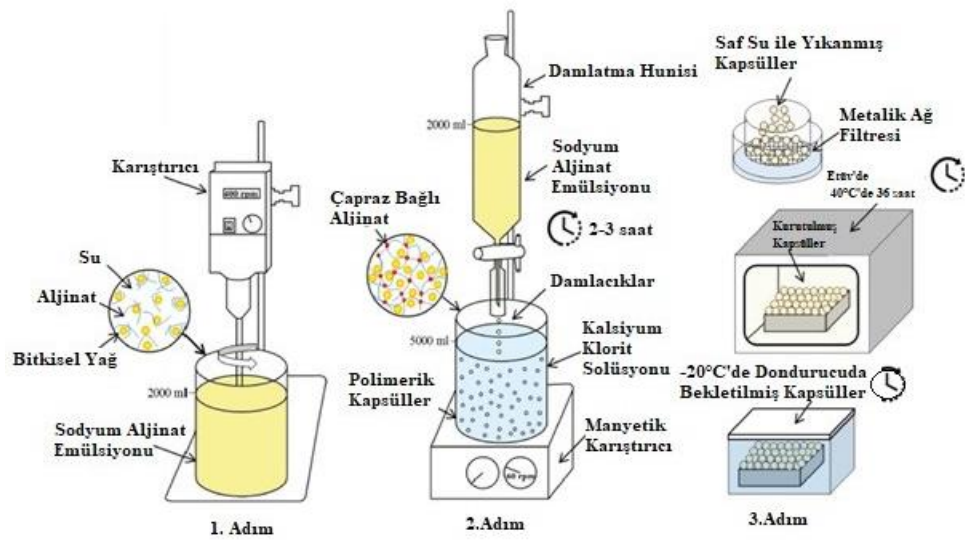
Kapsüller, iyonotropik katılaşılan aljinalardan oluşan özel kimyasallar kullanılarak oluşturulmuştur (Yalçın, 2018). Kalsiyum klorit kabuklu kapsüller elde etmek için, 20°C sıcaklıkta her iki atık yağdan 75 gr ve 525 gr su kullanılarak toplamda 600 gr emülsiyonlar hazırlanmıştır. Yağ ve su, literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak 1 dakika süreyle 400 rpm hızda karıştırılarak hazırlanmıştır. Ardından hazırlanan emülsiyonlara 17,5 gr sodyum aljinat ilave edilerek 10 dakika daha 400 rpm hızla karıştırılmıştır. Diğer tarafta 600 ml su içerisine 12 gr kalsiyum klorür ilave edilerek yağ/su emülsiyonu 3 mm soket boyutunda 1000 ml basınca sahip damlatma hunisinden kalsiyum klorür içerisine damlatılarak kapsüller oluşturulmuştur (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Kapsül üretiminin şematik bir gösterimi Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekillenen kapsüller çözeltiden süzülüp saf su ile yıkandıktan sonra 72 saat 40°C de kurutulmaktadır (Norambuena-Contreras ve diğ., 2018).



Şekil 3.4. Atık bitkisel yağ ile kapsül üretimi



Şekil 3.5. Atık madeni yağ ile kapsül üretimi



Şekil 3.6. Kapsül üretiminin şematik bir gösterimi

3.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması

Superpave karışım tasarımı, Superpave kriterlerini sağlayan uygun bitümlü bağlayıcı ve agreg a malzemesinin seçilmesini kapsamaktadır. Karışım tasarımı, Superpave gradasyon grafiğini ve sınırlarını sağlayan farklı agreg a deneme karışımlarının hazırlanması, deneme karışımlarının bitümlü bağlayıcı ile karıştırılarak kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutulması, yaşlandırılmış numunelerin sıkıştırılması, agreg a deneme karışımlarının hacimsel özellikleri tespit edilerek tasarım agreg a gradasyonunun belirlenmesi ve seçilen tasarım gradasyonu için gerekli olan tasarım bitüm içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli bitüm içeriklerinde karışım numunesi hazırlanarak bunların sıkıştırılması işlemlerini kapsamaktadır (McGennis vd., 1995).

Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcısı

Superpave karışım tasarımının en önemli cihazı Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısıdır. Bu cihaz, Superpave karışım numunelerini üretmek ve numuneler üretilirken sıkıştırma işlemi boyunca verileri kaydederek numunenin yoğunluğunu tayin etmek için kullanılır (Asphalt Institute, 1996).

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı, laboratuvarda sıcak karışımların arazideki sıkışmasını en iyi temsil edecek sıkışmayı sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Cihazın 150 mm (6 inç) iç çapa sahip kalıbı sayesinde maksimum tane boyutu 50 mm (nominal maksimum 37.5mm) olan agreg a içeren karışım numuneleri hazırlanabilmektedir (Lavin, 2003; Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995; Alshamsi, 2006).

SHRP tarafından geliştirilen ve çalışmada kullanılan Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı

Yükleme başlığı numune üzerine 600 ± 18 kPa ($6,12 \text{ kg/cm}^2$)'lik sabit bir basınç uygularken numune kalıbı altındaki döner taban $1,25 \pm 0,02^\circ$ 'lik açı ile dakikada $30 \pm 0,5$ dönüş yapmaktadır. %4 boşluk oranına sahip numunelerin sıkıştırılması için 100 devir uygulanmaktadır. Numune yüksekliğinin ölçümü yoğurmalı sıkıştırıcının en önemli özelliklerinden biridir. Numunenin ağırlığı, numune kalıbının iç çapı ve numunenin yüksekliği bilindiğinden numune yoğunluğu hesaplanabilmektedir (Tunç, 2007; Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995; Alshamsi, 2006; Kennedy vd., 1994).

3.5. Kapsüllerin Bitümlü Sıcak Karışıma İlave Edilmesi

Çalışmada atık bitkisel yağ ve atık madeni yağ kullanılarak kapsüller hazırlanmıştır. 75 ml atık bitkisel veya atık madeni yağ, 525 ml saf su ve 17,5 gr sodyum aljinat içeren kapsüller çalışmada kullanılmıştır. Hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsüllerden agrega ağırlığınca 4 farklı oranda (%0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0) bitümlü sıcak karışımlara ilave edilerek kapsül içeren karışım numuneleri elde edilmiştir. Bütün karışımlar 170°C sıcaklıkta karıştırılmış, 158°C sıcaklıkta ise sıkıştırılmıştır.

Bitümlü bağlayıcı ile belirli bir gradasyonda elde edilmiş agrega yığını karıştırıldıktan sonra kapsüller ilave edilmiş ve 1 dakika kadar daha karıştırılmıştır. Bu şekilde karışım elde edilmiştir.

4. METOT

Elde edilen kapsüller karışıma ilave edildikten sonra sıkıştırılmış ve kapsül ilavesinin bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla hacimsel özellikler belirlenerek, Marshall Stabilite ve Akma, Çekme Dayanımı Oranı, İndirekt Çekme Yorulma, İndirekt Çekme Rijitlik Modülü, Dinamik Sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yarım daire numuneleri elde edilerek bu numuneler üzerinde farklı yaklaşımlarla iyileşme miktarları belirlenmeye çalışılmıştır.

4.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi (TS EN 12697-34, 2012)

Bitümlü sıcak karışım (BSK) numuneleri üzerinde uygulanan Marshall Stabilite ve Akma Deneyi, numunelerin deformasyona karşı maksimum dayanımını (stabilite) ve maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen düşey deformasyonu (akma) tespit etmek için yapılmaktadır. Deneye başlamadan önce sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilir. Daha sonra numuneler $60\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 40-60 dk arasında bekletilir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kırma çenesini ortalayacak biçimde yerleştirilir ve numuneye 50 ± 2 mm/dk hızla yükleme yapılır. Marshall stabilite ve akma deney düzeneği Şekil 4.1'de, deneye tabi tutulmuş numuneler Şekil 4.2'da görülmektedir.



Şekil 4.1. Marshall stabilite ve akma deney düzeneği



Şekil 4.2. Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuş BSK numuneleri

Deneyde, maksimum yük ve bu yüke ulaşıldığı andaki deformasyon değerleri kaydedilir. Numune sudan çıkarıldıktan sonra 40 sn içerisinde deney bitirilmelidir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63,5 mm olduğu kabul edilir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları kullanılmaktadır.

Deney sonunda elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınır. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılır. Geriye kalan numunelerin tekrar ortalaması alınır ve aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa bu numune serisi iptal edilerek yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanır.

Marshall stabilite değerinin akma değerine bölünmesi ile karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir (Zoorob ve Suparna, 2000; Çolak, 2006; Yılmaz ve Kök, 2008).

4.2. Çekme Dayanımı Oranı Deneyi (AASHTO T 283, 2018)

Çekme dayanımı oranı deneyi, karışımın nem hasarına karşı dayanımını belirlemede ve kullanılan katkı maddesinin etkisini incelemeye kullanılmaktadır. Deney için 7 ± 0.5 hava boşluğuna sahip en az 6 adet numune yoğurmalı pres ile sıkıştırılmaktadır. Nem hasarı numunelerinin hazırlanmasında tek fark kısa dönem yaşlandırma sırasında numunelerin 16 saat süresince 60°C sıcaklıkta, ardından 2 saat süresince karıştırma sıcaklığındaki etüvde bekletilmesidir. Hazırlanan numuneler iki gruba ayrılmakta ve birinci grupta bulunan numuneler saf su içeren piknometre içerisine konulup 13-67 kPa vakum uygulanarak koşullandırılmaktadır. Vakum işlemi, numunelerdeki hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar devam etmektedir. Boşlukların su ile dolma oranının %70'ten az olması durumunda vakum işlemine

devam edilmeli, %80'den fazla olması durumunda ise bu numuneler deneylerde kullanılmamalıdır (AASHTO T 283, 2018). Piknometre ve vakum aleti Şekil 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüller yardımıyla bulunmaktadır:

$$J = B' - B \quad (4.1)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (4.2)$$

$$S' = J / I * 100 \quad (4.3)$$

J : Absorbe su hacmi (cm³)

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

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

I : Hava boşluğu hacmi (cm³)

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

V : Numune hacmi (cm³)

S' : Doygunluk derecesi (%)

Vakum işleminden sonra numuneler streç film ile kaplanarak ağzı kapanabilen plastik torbaların içine konulmaktadır. Numuneler öncelikle -18°C sıcaklıkta 16 saat ardından 60°C suda 24 saat bekletilmektedir. Bu sürenin sonunda numuneler poşet ve streç filmden çıkarılmaktadır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numuneler 25°C'deki suda 2 saat bekletilmekte ve ardından 50±2 mm/dk hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır (Şekil 4.4). Deneye tabi tutulmuş numuneler Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.4. Çekme dayanımı deney düzeneği



Şekil 4.5. Çekme dayanımı deneyine tabi tutulmuş numuneler

Deney sonunda çekme dayanımı değerleri aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenmektedir. Superpave şartnamesine göre çekme dayanımı oranının (TSR) minimum %80 olması istenmektedir.

$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (4.4)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (4.5)$$

TS : Çekme dayanımı (kPa)
 Pmak : Kırılmaya neden olan maksimum yük (kN)
 t : Ortalama numune yüksekliği (m)
 d : Numune çapını (m)
 TSR : Çekme dayanımı oranı (TSR)
 TSyaş : Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerleri (kPa)
 TSkuru : Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerleri (kPa)

4.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

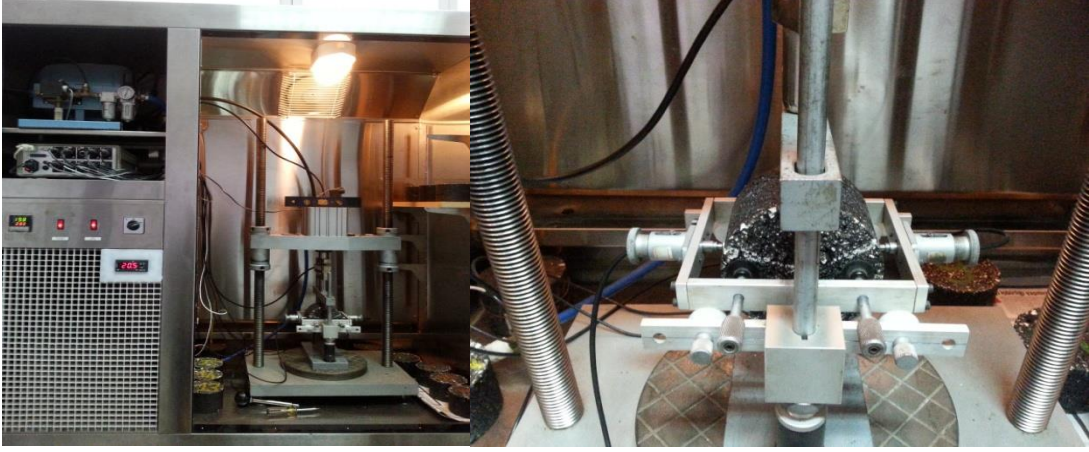
Bitümlü sıcak karışımların en önemli performans özelliklerinden biri olan rijitlik modülü, bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümlerinin en yaygın şekli rijitlik modülünün indirekt çekme modunda ölçülmesidir. Rijitlik modülü, uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır.

Deney öncesinde numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. İklimlendirme kabini sayesinde deney standardın dışında farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Numune yüksekliği, numune çapı, tahmini poisson oranı, yük etki süresi, yük artış süreleri, hedef yatay deformasyon ve tahmini rijitlik modülü gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler uygun konuma getirilmektedir (Şekil 4.6). Öncelikle numunelere 5 defa tekrarlanan ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. Böylece cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye cihazın belirlediği yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşağıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

$$S_m = \frac{F(R + 0.27)}{LH} \quad (4.6)$$

Sm : İndirekt çekme rijitlik modülü (MPa)
 F : Maksimum dikey yük (N)
 H : 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm)
 L : Ortalama numune yüksekliği (mm)
 R : Poisson oranı (0,35)

Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmakta, iki değer arasındaki fark %10'dan fazla olursa bu işlem yenilenmektedir. Numunenin ITSM değeri, aralarında %10'dan az sapma olan iki değer ortalaması alınarak belirlenmektedir.



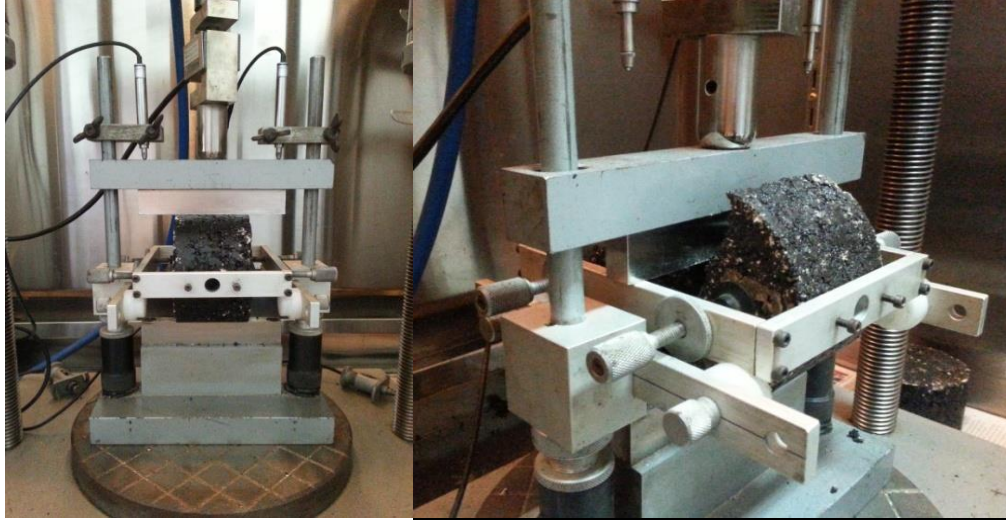
Şekil 4.6. UTM cihazı ve ITSM deney düzeneği

4.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler, üzerinden geçen her taşıtta kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, malzemede mikro hasarlara, mikro hasarlar da uzun dönemde yorulma çatlaklarına neden olmaktadır (Francken, 1998). Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en sık görülen ve tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artan bir bozulma türüdür (Kök, 2007).

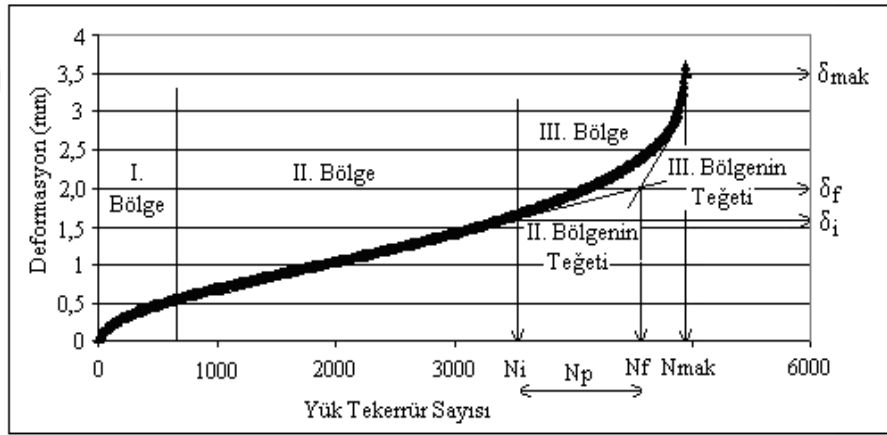
İndirekt çekme yorulma deneyinde silindirik şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik çekme gerilmeleri oluşturmakta ve numunenin düşey doğrultuda orta kısmından yarılmasına neden olmaktadır.

İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme kontrollü olarak UTM deney aleti ile yapılmaktadır (Şekil 4.7). İklimlendirme kabini sayesinde deney standart deney sıcaklığından farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, numune çapı, yük periyodu, yük artış süreleri ve uygulanacak gerilme gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilir, düşey deformasyonu okuyacak LVDT olarak adlandırılan doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Numuneler tam olarak kırılana kadar deneye devam edilmektedir.



Şekil 4.7. Yorulma deney düzeneği

Yorulma deneyi sonucunda Şekil 4.8'de temsili olarak görülen yük tekerrür sayısı-deformasyon grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, yük tekerrür sayısı-deformasyon grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. bölge ve III. bölgeye çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır (Subagio ve diğ., 2003; Aragao ve diğ., 2010).



Şekil 4.8. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiği

Çatlak ilerleme oranı (r_p), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının deformasyon miktarına oranını ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı Formül 4.7 ile hesaplanmaktadır (Subagio ve diğ., 2003). Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (4.7)$$

Burada;

r_p : Çatlak ilerleme oranını (darbe sayısı/mm),

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısını,

δ_i : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu (mm),

δ_f : Yorulma ömründeki toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.

4.5. Dinamik Sünme Deneyi

Atık bitkisel ve madeni yağ içeren kapsül kullanımının bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisini daha geniş bir aralıkta değerlendirebilmek, kalıcı deformasyon oluşumuna karşı karışımların dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla çalışmada dinamik sünme deneyi uygulanmıştır.

Tekerlek izi, tekrarlı trafik yükleri altında üstyapıdaki tabakaların her birinde kalıcı deformasyonun kademeli olarak artması ile meydana gelmektedir (Tayfur ve diğ., 2007). Trafik yüklerine direkt maruz kalan kaplama tabakası kalıcı deformasyondan en çok etkilenen tabakadır (Khodaii ve Mehrara, 2009).

Bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan deneylerden biri dinamik sünme deneyidir. Bu deneyde sabit değerdeki yük, silindirik numunenin yüzeyine belirli bir periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır (Şekil 4.9). Numunenin yüzeyine yerleştirilen metal plak üzerine dik olarak ayarlanan LVDT'ler yardımıyla her bir yük tekrarında oluşan plastik ve elastik deformasyonlar tespit edilebilmektedir. Sünme ve esneklik modülleri aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenebilmektedir (ELE, 1994).

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (4.8)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n) / (G - (L3_n - L1)) \quad (4.11)$$

$$\sigma = F / A \quad (4.12)$$

Burada;

E_c : Sünme modülü (MPa),

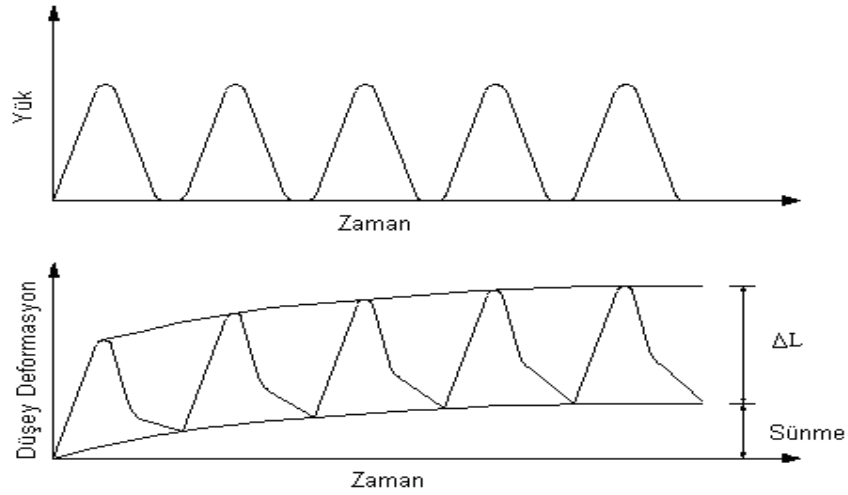
E_r : Esneklik modülü (MPa),

ε_c : Toplam plastik eksenel birim şekil değiştirme,

ε_r : Toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme,

- $L1$: LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm),
 $L2_n$: n darbe sayısındaki maksimum deplasman (mm) (elastik + plastik),
 $L3_n$: (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman (mm) (plastik),
 G : Numunenin başlangıç yüksekliği (mm),
 σ : Maksimum düşey gerilme (kPa),
 F : Maksimum düşey yük (N),
 A : Numunenin kesit alanını (cm^2) ifade etmektedir.

Formül 4.8 ve 4.9'da görüldüğü üzere plastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda sünme modülü düşük, elastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda esneklik modülü düşük olmaktadır.



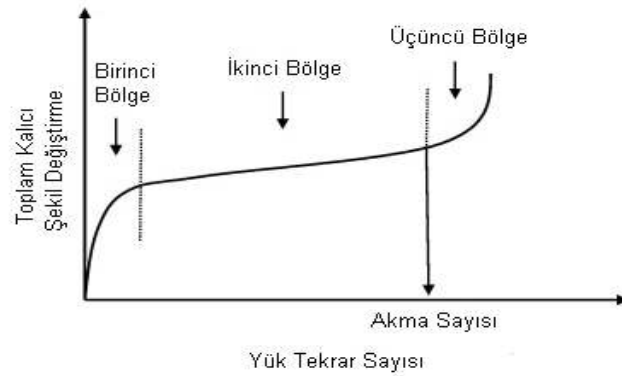
Şekil 4.9. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi

Dinamik sünme deneyi, UTM deney aleti ile yapılmaktadır (Şekil 4.10). İklimlendirme kabini sayesinde deney istenilen sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler en az 4 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, numune çapı, ön yükleme gerilmesi, ön yükleme süresi, yük periyodu, yük artış süreleri ve uygulanacak gerilme gibi değerler yazılıma girildikten sonra, numune yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Deneyde öncelikle ön yükleme uygulanarak birincil oturmanın oluşması hedeflenmektedir. Ön yüklemenin sonunda sisteme girilen gerilme seviyesinde tekrarlı yük uygulanarak numuneler kırılincaya kadar deney devam etmektedir.



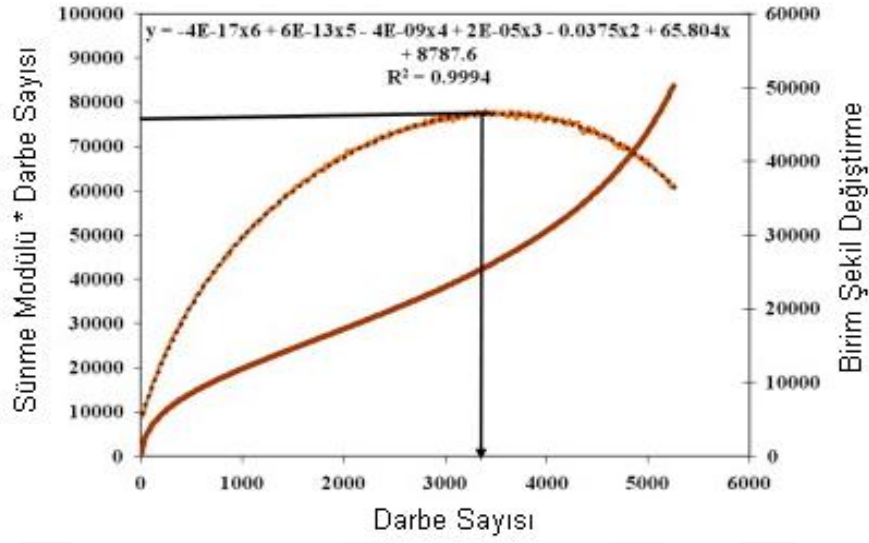
Şekil 4.10. Dinamik sünme deney düzeneği

Deney sonucunda yük tekrar sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere eğri üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede, konsolidasyon meydana gelerek hacim azalmakta ve şekil değiştirme başlangıçta hızla artarken daha sonra artış hızı düşmektedir. İkinci bölgede toplam şekil değiştirme lineere yakın bir değişim göstermektedir. Üçüncü bölgede ise kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir. Witczak'ın teorisine göre üçüncü bölgenin başladığı noktadaki yük tekrar sayısı "akma sayısı" olarak tanımlanmış ve akma sayısının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımın bir göstergesi olduğu çeşitli çalışmalarla belirlenmiştir (Witczak ve diğ., 2002).



Şekil 4.11. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi

Akma sayısını tespit etmek için bir diğer yöntem de Bausano ve Williams tarafından geliştirilmiştir (Bausano ve Williams, 2007). Bu yöntemde yatay eksen darbe sayısı, dikey eksen ise sünme modülü ile darbe sayısının çarpımı olmak üzere grafik çizilerek ve grafiğin pik noktası akma sayısı olarak bulunmaktadır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Akma sayısının bulunması (Bausano ve Williams, 2007).

4.6. Kırılma Mekanikliği Yaklaşımlarıyla Yarım Daire Şeklindeki BSK'ların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi

Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan bozulmalar; şekil değiştirme, kırılma (çatlama) ve ayrışma olarak üç ana grupta toplanabilir. Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan çatlaklar ise trafik etkisine bağlı olan ve olmayan çatlamlar olarak iki kısımda incelenmektedir. Çatlak oluşumuna üstyapı tabakalarının kalınlığı ve bitümlü sıcak karışımların malzeme özellikleri gibi birçok faktör etki etmektedir (Jajliardo, 2003; Garcia, 2002). Trafik etkisine bağlı çatlamlar ya ağır dingil yüklerinin tek veya birkaç kez geçmesi sonucunda ya da taşıtların tekrarlı olarak kaplamanın üzerinden geçmeleri sonucunda oluşmaktadır. Taşıtların çok sayıda geçmesi sonucu oluşan çatlaklara yorulma çatlakları denilmektedir. Birinci durumda çatlak, ağır dingil yükünün oluşturduğu gerilmenin asfalt betonunun eğilme-çekme direncini aşmasından kaynaklanmaktadır. Yorulmada ise dingil yüklerinin tekrarlı geçişi sonrasında oluşan kalıcı deformasyonların birikimiyle yorulma çatlakları oluşmaktadır. Çatlamlar, trafik yüklerine bağlı olmadan çevre etkisi, sıcaklık ve nem etkisiyle de oluşabilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan çatlamlar;

- Timsah sırtı çatlaklar (yorulma çatlakları)
- Büzülme çatlakları
- Kenar çatlakları
- Derz çatlakları
- Enine çatlaklar
- Yansıma çatlakları

- Öteleme çatlakları şeklinde sınıflandırılmaktadır (Ağar ve Umar, 1991; KGM, 2008).

Karayollarında oluşan çatlaklar nedeniyle kırılma mekaniği prensiplerinin bitümlü sıcak karışımlara uygulanması üzerine son dönemde birçok çalışma yapılmaktadır. Kırılma, malzemelerin gerilme altında birden fazla parçaya ayrılmasıdır. Kırılmanın türü malzemeden malzemeye değişir ve genellikle tatbik edilen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma başlıca iki safhadan oluşur. Birinci safha “çatlak teşekkülü”, ikinci safha ise “çatlağın ilerlemesi”dir (Özdemir, 2006). Makroskopik açıdan kırılma tipleri gevrek, sünek ve sürüntü kırılmasıdır. Gevrek kırılmalarda hiçbir plastik deformasyon meydana gelmeden kırılma oluşmaktadır. Sünek malzemelerde ise kırılmadan önce önemli oranda plastik deformasyon meydana geldikten sonra malzeme kırılmaktadır. Sürüntü kırılmasında ise yüksek sıcaklıklarda sabit gerilme veya sabit yük altında malzemelerin sürünme deformasyonu sonucunda kırılma meydana gelmektedir. Makroskopik açıdan bakıldığında, sürünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluşur, bu sebeple sünek kırılmaya benzer. Mikroskopik açıdan ise; sürünme kırılması, sünek kırılmadan farklıdır (Özdemir, 2006). Taneleri kesip kesmemeye göre ise intergranüler (taneler arası) kırılma ve transgranüler (taneleri keserek) kırılma olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

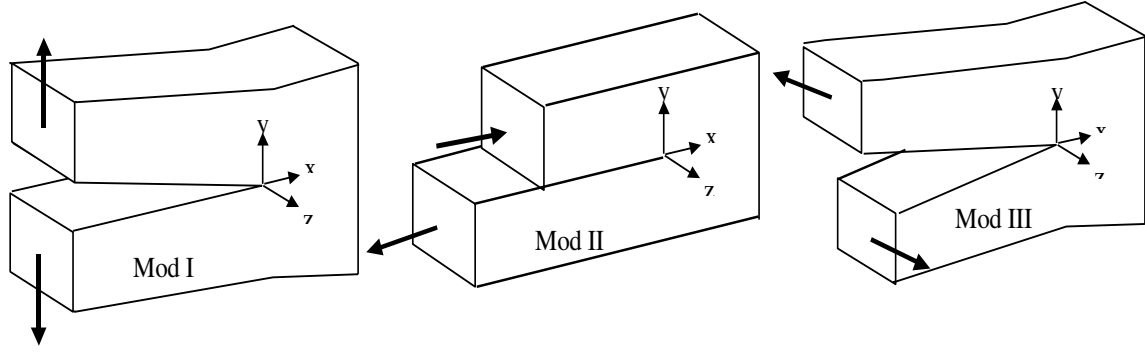
Kırılma mekaniği ise malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yığılmasını arttıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceleyen bir bilim dalıdır (Alyamaç, 2008). Kırılma mekaniğinin temelleri, 1920’li yıllarda malzemelerde oluşan çatlakların ilerleyişini açıklamak amacıyla Griffith tarafından atılmıştır. Griffith enerji dengesine dayalı olarak kırılğan malzemeler için kırılma mekaniğini formüle etmiştir. Griffith, potansiyel enerjinin cismin yüzey enerjisinden büyük olması durumunda çatlak boyutunun artacağını ifade etmiştir. 1957’de Irwin kırılma mekaniğinde yeni bir dönem başlatmıştır. Griffith’in teorisi cam gibi tam gevrek malzemelerde çatlağın yayılması için gerekli gerilmeyi belirlemesine rağmen çatlağın yayılmadan önce veya sonrası için herhangi bir bilgi vermemektedir. Irwin, teoriyi plastik şekil değiştirme gösteren malzemeleri de içine alacak şekilde geliştirmiş, daha sonra sırasıyla çekme, kesme ve burulma durumlarına karşılık gelen üç yükleme durumu Mod I, Mod II ve Mod III genel kırılma modlarını (Şekil 4.13) ve K adı verilen gerilme şiddet çarpanını ortaya koymuştur (İnce, 1998).

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.13)$$

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (4.14)$$

$$K_{III} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (4.15)$$

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



Şekil 4.13. Kırılma modları

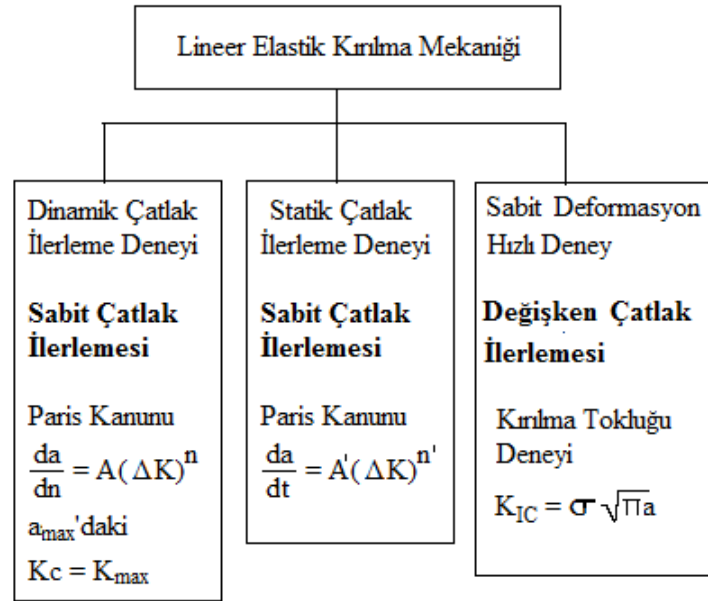
Gerilme şiddet çarpanı (K), geometriye ve yükleme durumuna bağlı bir sabittir. Yani her malzeme aynı geometriye ve yükleme durumuna maruz kalırsa bu değer sabit olacaktır. Dolayısıyla gerilme şiddet çarpanı bir malzeme sabiti değildir. K, belirli bir kritik değer olan K_c değerine ulaştığında kırılma tokluğu veya kritik gerilme şiddet çarpanı adını almakta ve bu değer her malzeme için farklı bir değer olmaktadır.

Şekil 4.13’de görülen Mod I kırılma, çatlak düzlemi boyunca uygulanan yükler sonucu oluşmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik yükleri ve termal gerilmeler sonucunda bu tür kırılmalar meydana gelmektedir. Mod II kırılma aynı zamanda düşey yönde kesmeye dayanım modu olarak isimlendirilmekte olup gerilmenin kayma bileşeni, çatlaka x eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik yüklerinden ötürü bu tip kırılmalar oluşabilmektedir. Mod III kırılmada burulma etkisi söz konusu olup gerilmenin kayma bileşeni, çatlaka z eksenine doğrultusunda, çatlakın dip kenarına paralel olarak etki etmektedir. Bu tip kırılma bitümlü sıcak karışımlarda ihmal edilebilmektedir (Hajj ve diğ., 2008). Mod I durumu için kritik gerilme şiddet çarpanı aşağıdaki formülle belirlenebilmektedir:

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (4.16)$$

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

Irwin’in ortaya koyduğu çalışmalar lineer elastik kırılma mekaniğinin temelini oluşturmuştur. Bitümlü sıcak karışımlarda lineer elastik kırılma mekaniği çeşitli deney yöntemleriyle uygulanabilmektedir. Dinamik çatlak ilerleme deneyi, statik çatlak ilerleme deneyi ve sabit deformasyon hızlı deney ile bitümlü sıcak karışımlarda lineer elastik kırılma mekaniği uygulanabilmektedir (Şekil 4.14) (Molenaar, 2003).



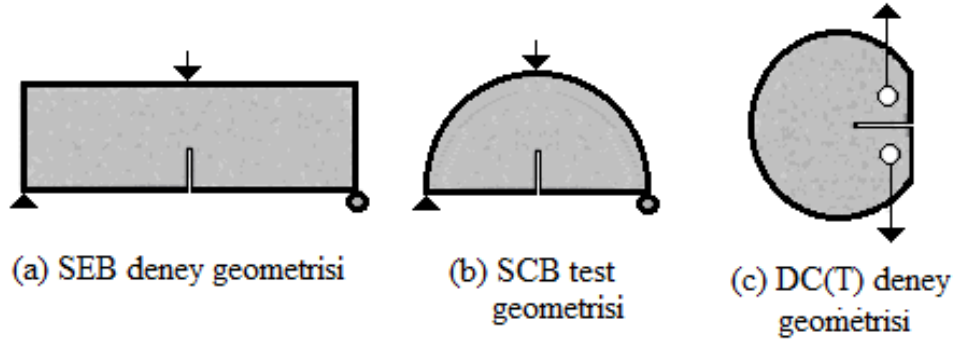
Şekil 4.14. BSK'lara uygulanan lineer elastik kırılma mekanikliği deneyleri (Molenaar, 2003).

Dinamik çatlak ilerlemesi deneyinde önceden çentik açılmış numuneye periyodik olarak yük uygulanmaktadır. Sabit deformasyon hızlı deneyde adından da anlaşılacağı gibi sabit deformasyon hızında numuneye yük etki ettirilmektedir. Kırılma tokluğu deneyi ve çekme dayanımı deneyleri olmak üzere iki farklı sabit deformasyon hızlı deney bulunmaktadır. Kırılma tokluğunu belirlemek için uygulanan deneylerde numunelere çentik açılmakta, çekme deneylerinde ise numuneler çentik açılmadan doğrudan deneye tabi tutulmaktadır. Özel bir deney olan statik çatlak ilerleme deneyinde önceden oluşturulmuş çatlakla sahip olan numuneye sabit çatlak ilerlemesi sağlayacak şekilde yük uygulanmaktadır. Şekil 4.14'de görüldüğü üzere dinamik çatlak ilerleme deneyinde çatlak ilerlemesi karakterize edilirken sabit deformasyon hızlı deney ile kırılmaya karşı dayanım belirlenebilmektedir. Çatlak ilerlemesi deneyinde çatlaktaki ilerleme sabittir. Kırılma tokluğu deneyinde çatlaktaki açılma düzenli değildir. Dinamik çatlak ilerleme davranışı, Paris kanunu ile karakterize edilebilmektedir. Dinamik çatlak ilerleme deneyinde A ve n sabitler olup kritik gerilme şiddet çarpanı deney sırasındaki gerilme ve çatlak ilerleyişinden elde edilmektedir. Çatlak ilerleme deneyleri zor ve pahalı ekipmanlar gerektirdiğinden asfalt karışım dizaynı gibi rutin uygulamalar için uygun değildir. Paris kanununa uygun çatlak ilerleme deneyleri yerine kırılma tokluğu yönteminin kullanılması daha kolay ve etkin bir yöntemdir.

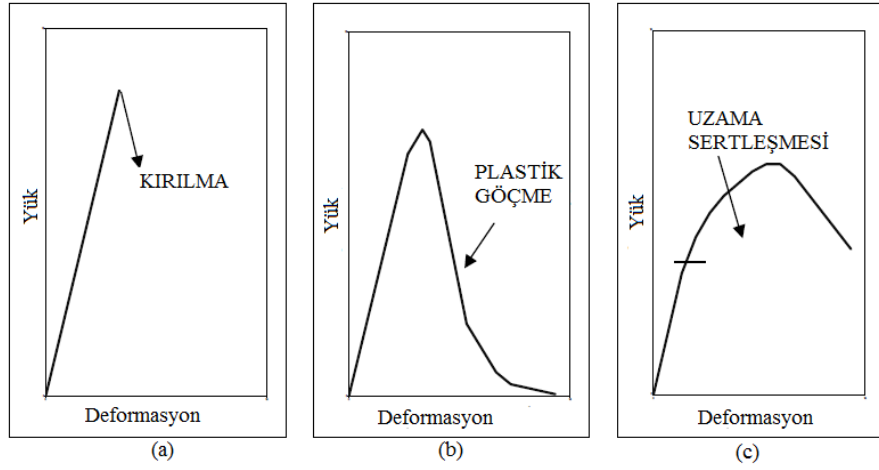
Sabit deformasyon hızlı deneyde farklı numune geometrileri kullanılabilir. Şekil 4.15'te en sık kullanılan numune geometrileri gösterilmiştir. Kiriş numuneler hazırlanması zor olması ve kiriş boyutları için herhangi bir standart bulunmaması gibi dezavantajlara sahiptir (Wagoner ve diğ., 2005). Disk şeklinde çekme deneyinde de numunenin kesilmesinde ve delik açılmasında zorluk yaşanmaktadır. Yarım daire eğilme deneyinde numuneler hem arazide hem de

laboratuvarda kolayca elde edilebilmektedir. Ayrıca hazırlanma sırasında numunede meydana gelen homojenliğin azalması ihtimali numunenin ortadan ikiye bölünmesi ile azalmaktadır (Huang ve diğ., 2005). Numunedeki çentiğin açısına bağlı olarak Mod I ve Mod I ile Mod II türü kırılmanın birlikte olduğu durumlar için kritik gerilme şiddet çarpanı değerleri belirlenebilmektedir (Marasteanu ve diğ., 2004).

Bitümlü sıcak karışımlar sıcaklık ve yükleme hızına bağlı olarak elastik ve viskoz davranış gösterebilmektedirler. Normal şartlarda ise bitüm viskoelastik davranış göstermektedir. Yarım daire numunelerde sıcaklıkla yük-deformasyon eğrisinin değişimi Şekil 4.16’te verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu başlıca üç yük-deformasyon diyagram şekli olduğu belirlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda (1°C veya daha düşük) asfalt karışımlar tamamen elastığe yakın davranış sergilerler. Bu nedenle uygun yükleme hızlarında 1°C veya daha düşük sıcaklıklarda lineer elastik kırılma mekaniği bitümlü sıcak karışımlara uygulanabilmektedir.



Şekil 4.15. Kırılma deneylerinde en çok kullanılan deney geometrileri; (a) Tek çentikli kiriş eğilme deneyi, (b) Yarım daire eğilme deneyi, (c) Disk şeklinde numune çekme deneyi (Wagoner ve diğ., 2005).



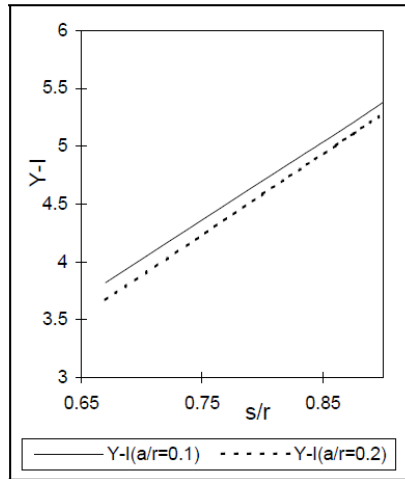
Şekil 4.16. SCB deneyinde asfalt karışımların elde edilen başlıca yük-deformasyon diyagram türleri: (a) - 10°C veya 1°C sıcaklıktaki elastik kırılma, (b) 15°C sıcaklıktaki plastik göçme (uzama sertleşmesi yok), (c) 25°C veya daha yüksek sıcaklıkta oluşan uzama sertleşmesi (Molenaar, 2003).

Lim ve diğ. tarafından yarım daire numune şekline sahip bitümlü sıcak karışımlar üzerinde lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) uygulanmıştır (Lim ve diğ., 1993). Yapılan çalışma sonucunda Mod I kırılma için kritik gerilme şiddet çarpanının (Y_1) ($\text{N/mm}^{3/2}$) aşağıdaki formül yardımıyla belirlenebileceğini belirtmişlerdir:

$$K_{IC} = \sigma_0 \sqrt{\pi a} Y_1 \quad (4.17)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{BD} \quad (4.18)$$

Burada P_0 , uygulanan maksimum yükü (N); B, numune yüksekliğini (mm); D, numune çapını (mm) ifade etmektedir. Y_1 değeri Lim ve diğ. tarafından belirlenerek grafik halinde verilmiştir (Şekil 4.17). Şekilde 2S mesnetler arası yatay açıklığı, $2r$ numune çapını (mm), a çentik boyunu (mm) ifade etmektedir (Lim ve diğ., 1993).



Şekil 4.17. Y_1 değerinin belirlenmesi (Lim ve diğ., 1993).

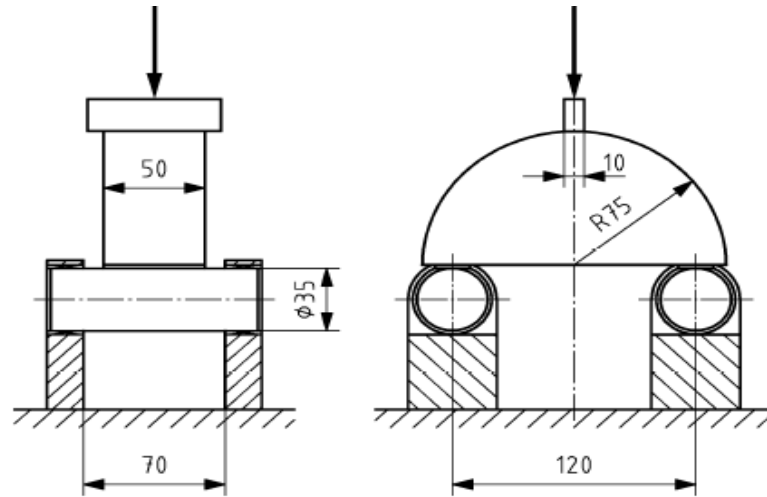
Hoffman ve ekibi, yapmış oldukları çalışmada deney sıcaklığı olarak $0\pm1^{\circ}\text{C}$ 'yi ve 5,1 mm/dk yükleme hızını kullanarak bitümlü sıcak karışımlar üzerinde yarım daire eğilme deneyini uygulamışlardır (Hoffman ve diğ., 2003). Aşağıdaki formül yardımıyla kritik gerilme şiddet çarpanı (K_{IC}) değerlerini belirlemişlerdir.

$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * F_{mak}}{D * t} \quad (4.19)$$

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (4.20)$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = -0,623 + 29,29 * \left(\frac{a}{w}\right) - 171,2 * \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 457,1 * \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 561,2 * \left(\frac{a}{w}\right)^4 + 265,54 * \left(\frac{a}{w}\right)^5 \quad (4.21)$$

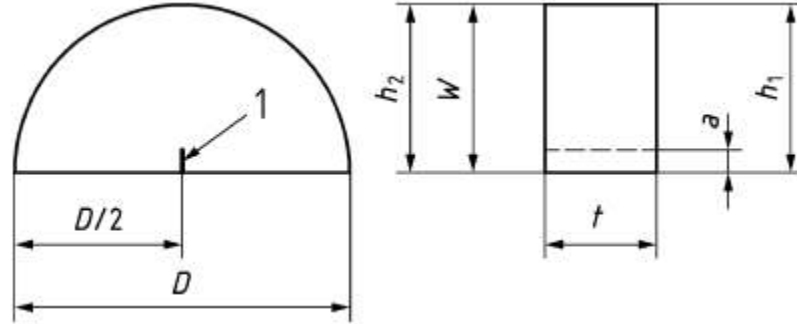
Bitümlü sıcak karışımların Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği'ne göre değerlendirilmesiyle ilgili Bakker tarafından Hollanda'da yapılan çalışmalarda farklı bitümler içeren araziden alınan ve laboratuvarında hazırlanan numuneler üzerinde yarım daire eğilme deneyleri uygulanmış ve bu deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak EN 12697-44 standardı hazırlanmıştır (Bakker, 2001). Ağustos 2010'da standartlaşan deneyde yarım silindir şeklindeki deney numunesinin alt yüzeyinin ortasına çentik açılmakta ve üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmaktadır. Deney süresince deformasyon 5 mm/dk sabit hızla artmaktadır. Standartta göre maksimum yük, malzemenin çatlak ilerleyişine karşı dayanımıyla doğrudan ilişkilidir. Deney aparatları ve numune şekli ile ilgili örnek bir resim aşağıda verilmiştir (Şekil 4.18) (BS EN 12697-44, 2019).



Şekil 4.18. Yarım daire eğilme deney düzeneği

Deney araziden alınan veya laboratuvarında hazırlanan numuneler üzerinde uygulanabilmektedir. Numuneler 150 ± 1 mm çapında ve 50 ± 3 mm kalınlığında kesilmektedir. Kesme işlemi sırasında yüzeylerin düzgün ve birbirine paralel olmasına dikkat edilmelidir.

Ardından numuneler ortadan ikiye bölünerek yarım daire şeklinde iki numune elde edilmektedir. Yarım daire numunelerin düz kısmının ortasına genellikle 10 ± 1 mm yüksekliğinde çentik açılmaktadır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Numuneye çentik açılması

Deney sırasında numune kuru olmalıdır. Kesme işlemi su ile yapıldığı için numune kesme işleminden hemen sonra kullanılmamalı 15°C 'den daha düşük bir sıcaklıkta düz bir yüzeyde bekletilmelidir. Numuneler havada kurutulmalı, 30 dakika içinde ağırlık değişimi 0,1 gr'dan az olduğunda numuneler deney işlemlerine tabi tutulmalıdır. Şekil 4.19'de görülen h_1 ve h_2 numune yükseklikleri arasındaki fark 0,5 mm'den az olmalı, fazla olan numuneler kullanılmamalıdır. Aynı şekilde düzgün yüzeyin iki uç noktasından ölçülen taban kalınlıkları arasındaki fark 0,5 mm'den fazla ise numune kullanılmamalıdır.

Numune, genellikle kullanılan deney sıcaklığı olan $0\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta en az 4 saat bekletilmelidir. Sürenin sonunda numune iklimlendirme kabininden çıkarılarak deney düzeneğine yerleştirilmeli, kısa bir süre içinde numunenin mesnetler üzerinde ortalanması sağlanmalıdır. $5\pm 0,2$ mm/dk hızla yükleme yapılarak düşey deformasyonun 0,01 mm hassasiyetle yükün ise 1 N hassasiyetle kayıt altına alınması sağlanmalıdır. Numunenin iklimlendirme kabininden çıkarılışı ile numunenin kırılması 60 sn içerisinde tamamlanmalıdır. Çatlak ilerleyişi numunenin merkezinden ± 15 mm den fazla saparsa numune geçersiz sayılmalıdır.

Deney sonucunda maksimum yük (F_{mak}) ve maksimum düşey deformasyon (ΔW) değerleri elde edilmektedir. Maksimum yük anındaki şekil değiştirme aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir:

$$\varepsilon_{\text{mak}} = \frac{\Delta W}{W} * 100 \quad (4.22)$$

Burada W, numunenin yüksekliğini (mm); ΔW , maksimum yük sırasındaki deformasyonu (mm); ε_{mak} , maksimum birim şekil değiştirmeyi (%) ifade etmektedir.

Kırılmaya neden olan maksimum gerilme (σ_{mak}) aşağıdaki formül ile belirlenmektedir:

$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * F_{mak}}{D * t} \quad (4.23)$$

Burada D, numunenin çapını (mm); t, numunenin kalınlığını (mm); F_{mak} , maksimum yükü (N); σ_{mak} , maksimum gerilmeyi (N/mm^2) ifade etmektedir.

Kırılma tokluğu (K_{IC}) ise aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir:

$$K_{IC} = \sigma_{mak} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.24)$$

Burada W, numune yüksekliğini (mm); a, çentik yüksekliğini (mm); σ_{mak} , maksimum gerilmeyi (N/mm^2); K_{IC} , kırılma tokluğunu ($N/mm^{3/2}$); , numunenin geometrik faktörünü ifade etmektedir. Geometrik faktör birimsiz olup virgülden sonra üç hane olacak şekilde yuvarlanmaktadır. Çatlak yüksekliği $9 \text{ mm} < a < 11 \text{ mm}$ ve numune yüksekliği $70 \text{ mm} < W < 75 \text{ mm}$ ise $f\left(\frac{a}{W}\right) = 5,956$ olarak alınmaktadır. Eğer deneyde daha farklı çentik yükseklikleri kullanılmışsa veya numune yüksekliği farklı ise geometrik faktör aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmektedir:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = -4,9965 + 155,58 * \left(\frac{a}{W}\right) - 799,94 * \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 2141,9 * \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 2709,1 * \left(\frac{a}{W}\right)^4 + 1398,6 * \left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (4.25)$$

Çentiksiz numunelerde çekme dayanımı Formül 4.23'ten elde edilen maksimum gerilmeye eşit olmaktadır.

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

Kırılma mekaniği yaklaşımlarına göre numunedeki çatlağın ucunda, yükleme durumunda plastik deformasyona uğramış bir bölge bulunur. Plastik deformasyona uğramış bu bölge kırılma tokluğu deneyi sonuçlarını önemli ölçüde etkiler, çünkü kırılma tokluğu deneyi malzemenin çatlama direncinin bir ölçümüdür, plastik deformasyona uğramış malzemenin çatlama direncinin ölçümü değildir. Bu sebeple numunedeki plastik deformasyon bölgesi büyüdükçe deneyin anlamı, dolayısıyla deney sonuçlarının geçerliliği azalır. LEKM ile incelenemeyecek kadar büyük ölçüde çatlak ucu plastik deformasyona sahip malzemelerde ise elastik-plastik kırılma mekaniği kullanılmaktadır (Özdemir, 2006). Elastik-plastik kırılma mekaniğine uygun olarak çeşitli yöntemlerle malzemelerin davranışları incelenebilmektedir. Elastik-plastik kırılma mekaniği yöntemlerinden biri olan kritik çatlak ucu açılımı (COD) kullanılarak sünek malzemeler için kırılma parametresi belirlenmektedir. Çatlak ucunda büyük plastik bölge oluşması durumunda (COD)'un yerinin tayini büyük zorluklar gösterdiğinden COD'a alternatif olarak Rice tarafından

1968 yılında J integral yöntemi geliştirilmiştir (URL-1, 2019). Fiziksel açıdan J, yüklenmiş bir yapıda çatlak uzunluğu “a” dan “a+da” olurken meydana gelen potansiyel enerji farkı olarak tanımlanabilmektedir (İnce, 1994). Diğer bir deyişle çatlak uzunluğunun “da” kadar artması için gerekli olan enerjidir (Uğuz, 1996). Bu yöntem kritik enerji salıverme hızı (kritik J-integral değeri veya J_c) olarak adlandırılan kırılma mekaniği kavramına dayanmaktadır. J_c değerinin büyük olması malzemenin kırılmaya karşı dayanımının büyük olacağını göstermektedir (Haryanto ve Takahashi, 2007). Deney süresince çentik içeren numunelere sabit bir hızla yük uygulanmakta ve yük-deformasyon değerleri sürekli kaydedilerek J_c değeri aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir:

$$J_c = -\left(\frac{1}{b}\right) \frac{dU}{da} \quad (4.26)$$

Burada; b, numune kalınlığını (mm); a, çentik yüksekliğini (mm) ve U, maksimum yük-deformasyon eğrisi altında kalan alandan elde edilen kırılmaya neden olan toplam şekil değiştirme enerjisini ifade etmektedir.

Bir bitümlü sıcak karışımın yarım daire eğilme deneyiyle kritik enerji salıverme hızını (J_c) belirlemek amacıyla en az iki farklı yükseklikte çentik içeren numuneler üzerinde deney prosedürünün uygulanması gerekmektedir. İki farklı çentik yüksekliği kullanılması durumunda aşağıdaki formülden faydalanarak J_c değeri hesaplanmaktadır. Daha fazla çentik yüksekliği kullanılması durumunda ise çentik yüksekliği-J grafiği çizilerek noktalardan faydalanarak doğru geçirilmekte ve bu doğruların türevi J_c değeri olarak belirlenmektedir.

$$J_c = \left(\frac{U_1}{b_1} - \frac{U_2}{b_2}\right) * \frac{1}{a_2 - a_1} \quad (4.27)$$

Bitümlü sıcak karışımların viskoelastik sınırlar içerisinde J integral yöntemi ile kırılma parametrelerinin bulunmasında en çok yarım daire numune geometrisi kullanılmaktadır. Önceden yapılmış olan çalışmalarda kiriş numunelerle yapılan üç nokta eğilme deneylerinde kiriş numunelerin kendi ağırlığından dolayı çökmelerin meydana geldiği belirtilmiştir (Kabir, 2008). Yarım daire eğilme deneylerinde ise arazi verileriyle yüksek bir uyum sağlandığı, deney numunesi hazırlama veya elde etmenin kolay olduğu, deney süresince veri toplamanın kolay olduğu belirtilmiştir (Walubita, 2010). Bu deney geometrisinin en büyük dezavantajları ise elastik-plastik kırılma mekaniğiyle J-integral yöntemi kullanılarak bitümlü sıcak karışımların dayanım özelliklerinin belirlenmesinde standart bir numune boyutu ve deney prosedürünün bulunmamasıdır. Bitümlü sıcak karışımlarda J-integral yöntemi ile kırılmaya karşı dayanımların yarım daire numuneler ile belirlenmesiyle ilgili birçok çalışma yapılmış ve çeşitli deney hızları,

numune kalınlıkları ve çentik boyları kullanılmıştır. Genellikle 150 mm çapında numuneler kullanılmasına rağmen bazı çalışmalarda 100 mm çapında numuneler kullanılmıştır.

Mull, yapmış olduğu çalışmada kimyasal modifiyeli atık lastik içeren karışımların kırılma dayanımlarını incelemiştir. Yaklaşık 24°C’de yapılan yarım daire eğilme (SCB) deneylerinde 75 mm numune yüksekliği, 57 mm numune kalınlığı, 0,5 mm/dk yükleme hızı, 25,4-31,8 ve 38 mm çentik yükseklikleri kullanılmıştır (Mull ve diğ., 2002). Othman, bitümlü sıcak karışımların kırılma tokluğu üzerinde düşük yoğunluklu polietilenin etkisini incelemiştir. 20°C’de yapılan SCB deneylerinde 75 mm numune yüksekliği, 57 mm numune kalınlığı, 2,5 mm/dk yükleme hızı, 25,4 ve 31,8 mm çentik yükseklikleri kullanılmıştır (Othman, 2010). Chen ve ekibi, epoksi asfalt karışımların kırılma özelliklerini yarım daire eğilme deneyi ile belirlemişlerdir. -10 ve 20°C’de yapılan SCB deneylerinde 50 mm numune yüksekliği 30 mm numune kalınlığı, 12-18-24 mm çentik yüksekliği ve 1 mm/dk yükleme hızı kullanılmıştır (Chen ve diğ., 2009). Haryanto ve Takahashi, agrega gradasyonundan yola çıkarak aşınma tabakalarındaki çatlak başlangıcını ve sünek kırılma özelliklerini incelemişlerdir. Marshall tokmağıyla hazırlanan numuneler ile 30°C’de yapılan deneylerde 50 mm numune yüksekliği, yaklaşık 45 mm numune kalınlığı, 15 ve 22,5 mm çentik yükseklikleri, 2,4 mm/dk yükleme hızı kullanılmıştır (Haryanto ve Takahashi, 2007). Vukosavljevic, araziye uygulanan geri dönüşümü sağlanmış asfalt malzemesi içeren bitümlü sıcak karışım kaplamalardan elde ettiği karışımların kırılma özelliklerini incelemiştir. Çalışmada 25°C’de yapılan deneylerde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 25,4 mm numune kalınlığı, 12,5-25,4 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dk yükleme hızı kullanmıştır (Vukosavljevic, 2006). Alshamsi, analitik olarak incelenmiş agrega yapısından yola çıkarak yeni bir karışım tasarım metodolojisi geliştirmeye çalışmıştır. 25°C’de yapılan deneylerde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 57 mm numune kalınlığı, 25,4-31,8 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dk yükleme hızı kullanılmıştır (Alshamsi, 2006). Kingery, laboratuvarında hazırlanan geri dönüşümü sağlanmış malzeme içeren bitümlü sıcak karışımların yorulma özelliklerini incelemiştir. 25°C’de yapılan SCB deneylerinde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 25,4 mm numune kalınlığı, 12,5-25,4 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dk yükleme hızı kullanmıştır (Kingery, 2004). Kabir, hidrate kirecin Superpave yöntemine göre hazırlanan BSK numuneleri üzerine etkilerini incelediği tez çalışmasında SCB deneyi yapmıştır. 25°C’de yapılan deneylerde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 57 mm numune kalınlığı, 25,4-31,8 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dk yükleme hızı kullanmıştır (Kabir, 2008). Mohammad ve diğ., yapmış oldukları çalışmada ılık karışım asfalt katkı maddesi olan Sasobit içeren karışımları değerlendirmişlerdir. Çalışmada yapılan SCB deneyi 25°C’de yapılmış, deneyde 57 mm kalınlığında 75 mm yüksekliğinde numuneler kullanılmıştır. 0,5 mm/dk hızla yükleme yapılan deneyde çentik yüksekliği olarak 25,4-31,8 ve 38,0 mm kullanılmıştır (Mohammad ve diğ., 2008). Shu ve diğ., yapmış oldukları çalışmada geri dönüşümü sağlanmış karışımların kırılmaya

karşı dayanımlarını SCB deneyi ile değerlendirmişlerdir. 25°C’de yapılan SCB deneylerinde 75 mm numune yüksekliği, yaklaşık 25,0 mm numune kalınlığı, 12,5-25,4 ve 38,0 mm çentik yükseklikleri, 0,5 mm/dk yükleme hızı kullanmıştır (Shu ve diğ., 2010).

Yapılan literatür çalışması sonucunda J-integral yöntemi için kesin bir deney standardının bulunmadığı belirlenmiştir. Fakat çalışmaların çoğunda deney sıcaklığının 25°C ve yükleme hızının 0,5 mm/dk olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada 25°C deney sıcaklığı, 0,5 mm/dk yükleme hızı, 50 mm numune kalınlığı, 75 mm numune yüksekliği ve 1 ve 2 cm çentik yüksekliği değerleri kullanılmıştır. Çentik yüksekliğinin 1 ve 2 cm seçilmesinin nedeni çentik ilerlemesi için daha fazla mesafenin kalması düşüncesidir.



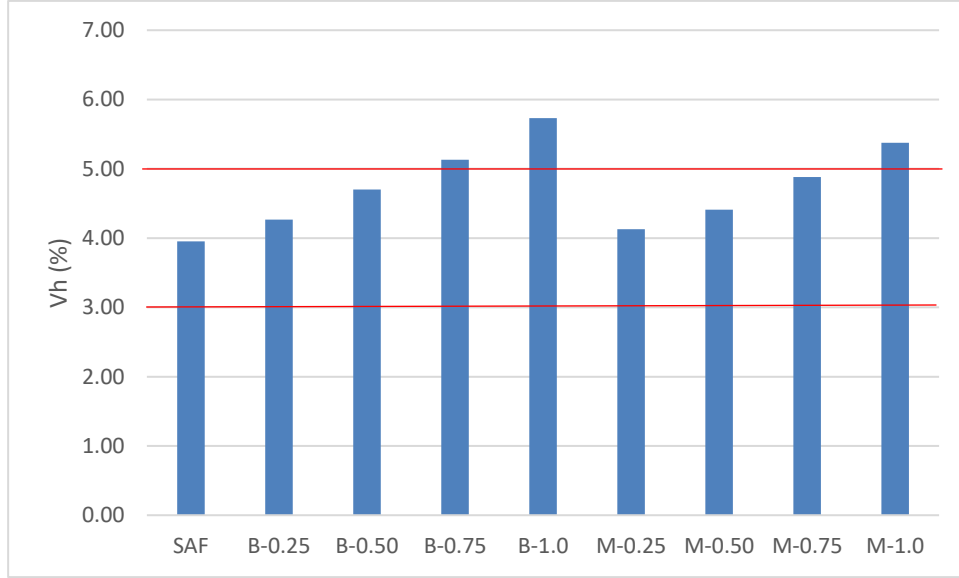
5. DENEY SONUÇLARI

Mekanik özellikler üzerindeki etkileri değerlendirmek amacıyla yapılan deneylerin sonuçları derlenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Farklı oranlarda ilave edilen kapsüllerin her bir orandaki etkileri belirlenmiş ve değerlendirilmiştir.

5.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Hacimsel Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Çalışmada öncelikle kalker türü agrega ve B 50/70 sınıfı bitüm kullanılarak kapsül içermeyen bitümlü sıcak karışım numuneleri üretilmiştir. Çalışmada kullanılan agrega, seçilen gradasyona uygun olarak elenerek kullanılmıştır. Kapsül içermeyen karışımın tasarım bitüm içeriği Superpave yöntemine göre belirlenmiş, hacimsel özellikleri şartname limitleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda saf karışımın tasarım bitüm içeriği %4,67 olarak belirlenmiştir.

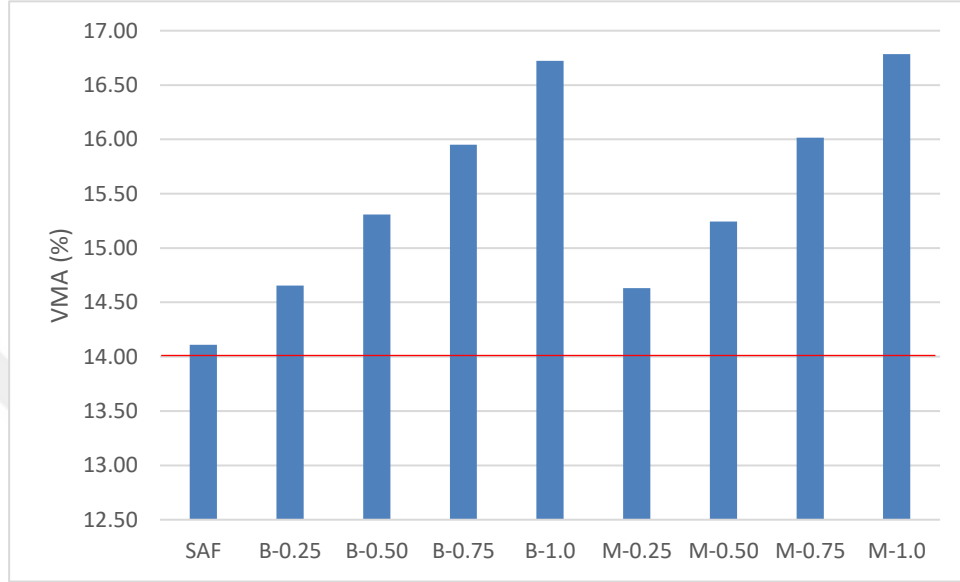
Çalışmada atık bitkisel yağ ve atık madeni yağ kullanılarak kapsüller hazırlanmıştır. Kapsül deneyleri ve analizler sonucunda 75 ml atık bitkisel veya atık madeni yağ, 525 ml saf su ve 17,5 gr sodyum aljinat içeren kapsüller çalışmada kullanılmıştır. Hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsüllerden agrega ağırlığına 4 farklı oranda (%0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0) bitümlü sıcak karışımlara ilave edilerek kapsül içeren karışım numuneleri elde edilmiştir. Bağlayıcı miktarının karışımların mekanik özelliklerine etki etmesini engellemek amacıyla 4 farklı oranda atık bitkisel yağ içeren kapsül ve 4 farklı oranda atık madeni yağ içeren kapsül (agrega ağırlığına %0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0) kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri kapsül içermeyen karışımla aynı bitüm içeriğinde (%4,67) hazırlanmıştır. Bütün karışımlar 170°C sıcaklıkta karıştırılmış, 158°C sıcaklıkta ise sıkıştırılmıştır. Hazırlanan karışımların boşluk oranı (V_h) değerleri Şekil 5.1'de, agregalar arası boşluk oranı (VMA) Şekil 5.2'de ve bitümle dolu boşluk oranı değerleri (V_{fa}) değerleri ise Şekil 5.3'de görülmektedir. Şekillerde B, atık bitkisel yağ içeren kapsüllerle hazırlanmış karışımları, M ise atık madeni yağ içeren kapsüllerle hazırlanmış karışımları ifade etmektedir. 0,25; 0,5; 0,75 ve 1,0 değerleri ise agrega ağırlığına karışıma ilave edilen kapsül yüzdesini ifade etmektedir.



Şekil 5.1. Karışımların boşluk oranı (Vh) değerlerinin kapsül içeriği ile değişimi

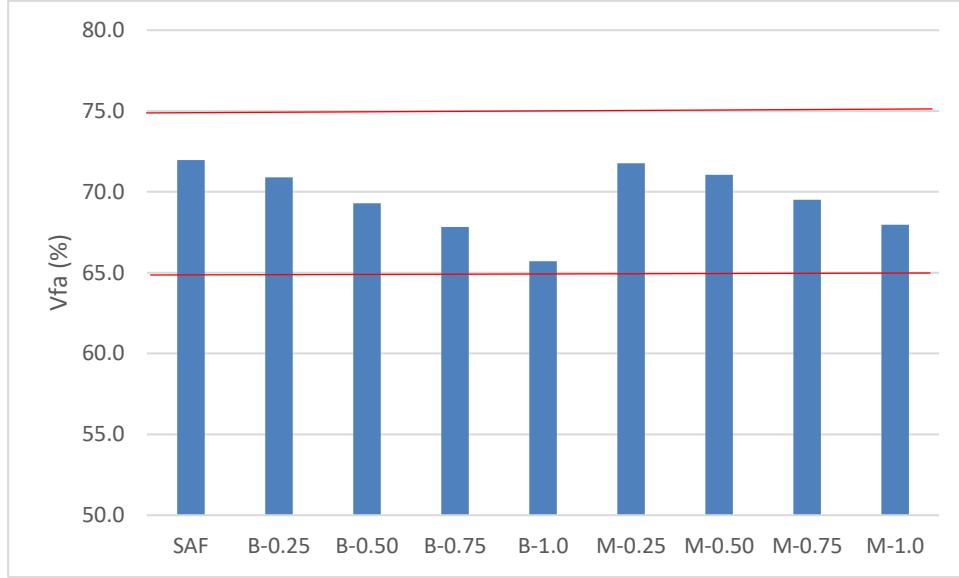
Şekil 5.1’te görüldüğü üzere kapsül içeriği arttıkça boşluk oranı değerleri artmıştır. Bitümlü sıcak karışımlarda agregalara bitüm ilave edildiğinde bitüm öncelikle agregaları ıslatarak kaplamakta sonra agregalar arasındaki efektif bitüm içeriğini teşkil etmektedir. Çalışmada bütün karışımlarda aynı bitüm içeriği kullanıldığından kapsül ilave edildiğinde katı parçacıkları ıslatmak için daha fazla bitüm gerekmiş, dolayısıyla efektif bitüm içeriği azalmış, bu nedenle de hava boşluğu oranı artmıştır. Superpave tasarım yönteminde %4 hava boşluğu hedeflenmekte olup sınır değerler bulunmamaktadır. Türkiye Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)’nde (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013) ise aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü sıcak karışımların hava boşluğunun %3-%5 aralığında olması gerektiği belirtilmiştir. Bitümlü sıcak karışımlarda hava boşluğu %5’ten düşük ise karışım geçirimsiz olurken, hava boşluğu miktarı %15’den fazla olduğunda poroz (geçirgen) kabul edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar için esas risk teşkil eden hava boşluğu %5 ile %15 arasındadır. Bu hava boşluğuna “pesimum hava boşluğu” denilmekte olup, bu oranlarda hava boşluğuna sahip olan karışımlarda karışım bünyesine giren su tahliye edilememekte ve bünyede kalmaktadır. Karışımın donma çözülme periyotlarına maruz kalması durumunda önemli oranda bozulmalar meydana gelebilmektedir (Terrel ve Al-Swailmi, 1993). Bu nedenle karışımlar için hava boşluğunun %5’in üzerinde olmaması önem arz etmektedir. Karışımlar değerlendirildiğinde atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,75 ve %1,0 ve atık madeni yağ içeren kapsüllerden %1,0 oranında kullanılan bitümlü sıcak karışımlar KTŞ gereksinimini sağlayamamıştır. Diğer karışımların hepsi şartname gereksinimini karşılamıştır. Kapsül türleri karşılaştırıldığında atık madeni yağ içeren kapsüller kullanılan karışımlarda hava boşluğu değerleri atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlara göre daha düşüktür. Bu durum, atık madeni yağ içeren kapsüllerin özgül ağırlığının

daha yüksek olmasından dolayı ağırlık olarak aynı miktarda koyulmasına rağmen hacim olarak daha düşük oranda karışıma ilave edilmesinden kaynaklanmıştır. Kapsül hacmi az olduğundan bitüm tarafından ıslatılacak yüzey azalmış dolayısıyla atık madeni yağ içeren bitümlü sıcak karışımlarda efektif bitüm içeriği yüksek dolayısıyla hava boşluğu miktarı daha düşük çıkmıştır.



Şekil 5.2. Karışımların agregalar arası boşluk oranı (VMA) değerlerinin kapsül içeriği ile değişimi

Şekil 5.2’te görüldüğü üzere kapsül içeriği arttıkça agregalar arası boşluk oranı (VMA) değerleri artmıştır. Agregalar arası boşluk oranı değerleri hava boşluğu ile efektif bitüm içeriği değerlerinin toplamından oluşmaktadır. Karışımlara kapsül ilave edildiğinde yüzey alanı arttığından agregalar arasındaki efektif bitüm içeriği azalmış ve bitüm içeriğinin düşük olmasından ötürü hava boşluğu miktarı artmıştır. Bitüm, bitümlü sıcak karışımlarda yağlama etkisiyle agregaların birbiri üzerinden kayarak boşlukları doldurmasını sağlamaktadır. Bitüm içeriğinin düşük kalması nedeniyle yağlama etkisi yetersiz kalmış dolayısıyla kapsül içeren karışımlardaki hava boşluğu oranı artmıştır. Efektif bitüm içeriği bitümlü sıcak karışımın durabilitesini sağlarken hava boşluğu ise kuma oluşmasına engel olmaktadır. Bu nedenle gradasyona bağlı olarak Superpave şartnamesine göre en büyük boyutu 19 mm, nominal maksimum agrega boyutu 12,5 mm olan karışımlar için agregalar arası boşluk oranı değerinin en az %14 olması istenmektedir. Karışımlar incelendiğinde bütün karışımlar bu değeri karşılamıştır. Fakat hava boşluğunun yüksek olması kalıcı deformasyon ve nem hasarı gibi olumsuzluklar açısından risk teşkil etmektedir.



Şekil 5.3. Karışımların bitümle dolu boşluk oranı (Vfa) değerlerinin kapsül içeriği ile değişimi

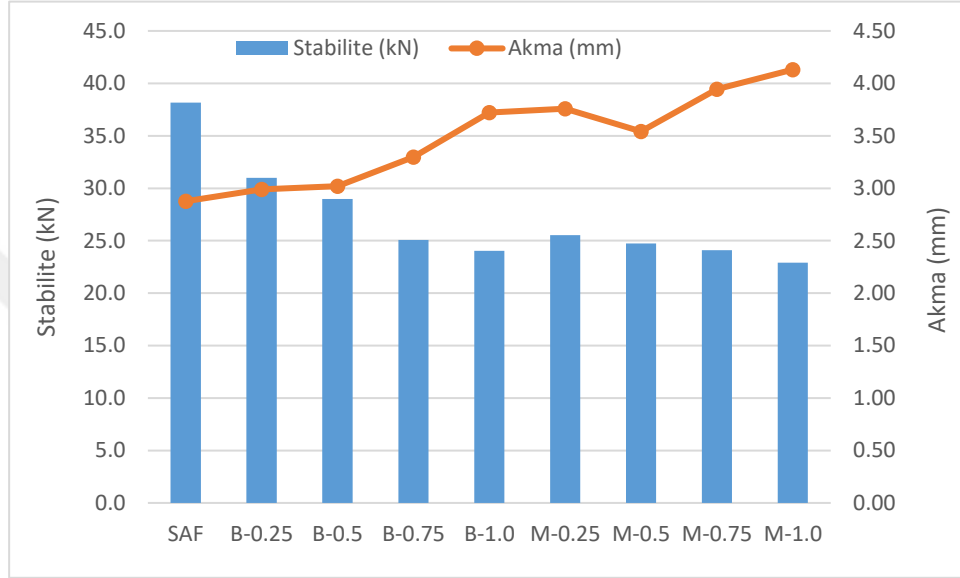
Şekil 5.3'te görüldüğü üzere karışımlarda kullanılan kapsül içeriği arttıkça bitümle dolu (efektif) bitüm içeriği azalmıştır. Efektif bitüm içeriğinin az olması karışımın durabilitesini olumsuz etkilerken yüksek olması ise kuma açısından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle Superpave şartnamesinde Vfa değerinin %65 ile %75 arasında olması istenmiştir. Karışımların bitümle dolu boşluk oranı değerleri değerlendirildiğinde bütün karışımların şartname gereksinimini sağladığı belirlenmiştir. Aynı bitüm içeriğindeki karışımlara kapsül ilave edilmesi durumunda bitümün önce katı danelerin yüzeyini ıslatmasından kaynaklı agregalar arasındaki bitüm miktarı azalmıştır.

Karışımların hacimsel özellikleri değerlendirildiğinde kapsül içermeyen karışımın tasarım bitüm içeriğinin %4,67 olduğu, aynı bitüm içeriğinde kapsül içeren karışımlarda hava boşluğunun ve agregalar arası boşluğun arttığı, bitümle dolu boşluk içeriğinin azaldığı belirlenmiştir. Karışımlar hacimsel olarak değerlendirildiğinde atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,75 ve %1,0 oranlarında, atık madeni yağ içeren kapsüllerden ise %1,0 oranında kullanılması durumunda şartname gereksinimlerinin sağlanmadığı belirlenmiştir. Diğer bütün karışımların hacimsel değerlendirme sonucunda uygun olduğu tespit edilmiştir.

5.2. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

Kapsül içermeyen ve agregalar ağırlığınca 4 farklı oranda atık bitkisel ve atık madeni yağ muhteva eden kapsül kullanılan toplam 9 bitümlü sıcak karışım grubu üzerinde EN 12697-34 standardına uygun olarak Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanmıştır. Her bir karışım için %4,67 bitüm içeriğinde 3 adet olmak üzere toplam 27 numune hazırlanmıştır. Numuneler,

yoğurmalı pres kullanılarak sıkıştırılmış, 60°C suda 40 dakikada bekletilmiş ve 50,8 mm/dk yükleme hızında kırılmıştır. Karışımların stabilite değerlerinin akma değerlerine oranlarından Marshall oranı (MQ) değerleri belirlenmiştir. Karışımların Marshall stabilite ve akma değerleri Şekil 5.4'te görülmektedir. Grafiklerde “B” atık bitkisel yağı, “M” ise atık madeni yağı ifade etmektedir. “0,25; 0,5; 0,75 ve 1,0” ise agreg ağırlığınca karışıma ilave edilen kapsül miktarını göstermektedir.



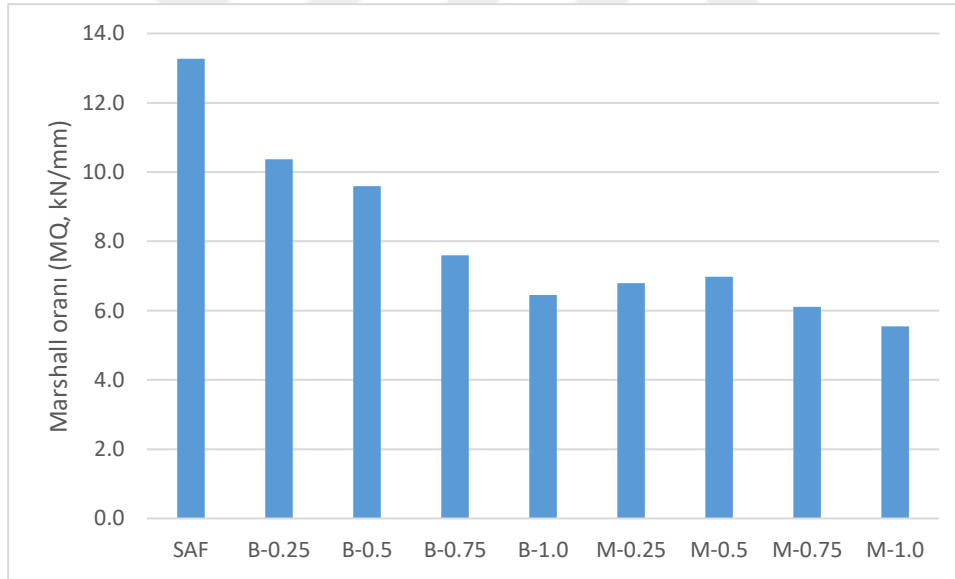
Şekil 5.4. Karışımların Marshall stabilite ve akma değerlerinin değişimi

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere karışımlar içerisinde en yüksek stabilite değerine kapsül içermeyen karışım sahip olup, kapsül kullanımı ile Marshall stabilitesi değerleri azalmıştır. Superpave şartnamesinde Marshall stabilite ve akma deneyi şartname kriteri olarak bulunmamaktadır. Ülkemizde Karayolları Teknik Şartnamesi'nde ise aşınma tabakası için en az stabilite değerinin 900 kg (8,826 kN) olması istenmektedir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere kapsül kullanımı ile karışımların stabilite değerleri azalmasına rağmen bütün karışımlar KTŞ limit değerini sağlamıştır.

Kapsül içeriğinin artması ile stabilite değerleri kapsül içermeyen karışıma göre sürekli olarak azalmıştır. Karışıma, agreg ağırlığınca atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0 oranlarında ilave edilmesi durumunda Marshall stabilite değeri kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %18,76; %24,09; %34,34 ve %37,05 oranlarında azalmıştır. Bitümlü sıcak karışımlara atık madeni yağ içeren kapsüllerden %0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0 oranlarında ilave edilmesi durumunda ise stabilite değeri sırasıyla %33,11; %35,20; %36,88 ve %39,99 oranlarında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan atık madeni yağ içeren kapsüller kullanılması durumunda

karışım stabiliteilerinin atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanımına göre daha fazla olumsuz etkileneceği söylenebilmektedir.

Şekil 5.4'te çizgi grafik olarak verilen karışımların akma değerleri incelendiğinde hem atık bitkisel yağ içeren hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanımı ile karışımların akma değerlerinin arttığı, karışımdaki kapsül içeriğinin artması ile akma değerlerindeki artışın süreklilik gösterdiği tespit edilmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük akma değerine kapsül içermeyen karışım sahipken en yüksek akma değerine atık madeni yağ içeren kapsülden agrega ağırlığınca %1,0 oranında kullanılarak hazırlanan karışımın sahip olduğu gözlenmiştir. Atık madeni yağ içeren kapsüllerle hazırlanan karışımların akma değerlerinin atık bitkisel yağ içeren kapsüller kullanılarak hazırlanan karışımlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesine göre aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü sıcak karışımların akma değerleri 2-4 mm arasında olması gerekmektedir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere atık madeni yağ içeren kapsüllerden %1,0 oranında içeren karışım dışında bütün karışımlar akma şartını sağlamıştır. Karışımların Marshall oranı değerleri Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5. Karışımların MQ değerlerinin kapsül kullanımı ile değişimi

Şekil 5.5'te görüldüğü üzere kapsül kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımının bir göstergesi olan Marshall oranı değerleri azalmıştır. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda kapsül içeriğinin artması ile azalma süreklilik gösterirken atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25 ve %0,50 oranlarında kapsül kullanılan karışımların MQ değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Karışımlar içerisinde en yüksek MQ değerine kapsül kullanılmayan karışımın, en düşük Marshall oranı değerine ise atık

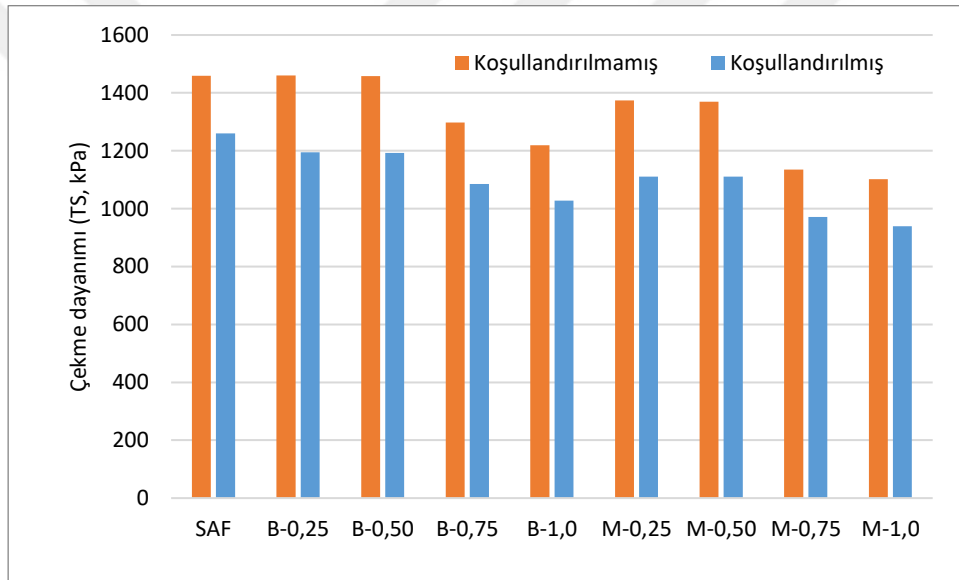
madeni yağ içeren kapsüllerden %1,0 oranında kullanılan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. MQ deney sonuçlarından atık yağ içeren kapsül kullanılarak bitümlü sıcak karışım hazırlanması durumunda karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının önemli oranda azalacağı söylenebilmektedir.

Marshall stabilite ve akma deney sonuçları değerlendirildiğinde kapsül kullanımı ile Marshall stabilite değerleri azalırken akma değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Stabilite değerlerindeki azalma ve akma değerlerindeki artışa bağlı olarak Marshall oranı değerlerinin azaldığı dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir. Stabilite değerleri azalmasına rağmen bütün karışımlar KTŞ şartname gereksinimini sağlamıştır. Akma değerlerinden ise atık madeni yağ içeren kapsüllerden %1,0 oranında kullanılması durumunda KTŞ aşınma tabakası akma şartının (en fazla 4 mm) sağlanamadığı belirlenmiştir. Kapsül türleri karşılaştırıldığında stabilite, akma ve Marshall oranı açısından atık madeni yağ içeren kapsüllerin atık bitkisel yağ içeren kapsüllere göre daha fazla olumsuzluğa neden olduğu belirlenmiştir. Bu duruma atık madeni yağ içeren kapsüllerin yüzey özelliklerinden ötürü bitümle iyi bir adezyon ve kohezyon sergilememesinden kaynaklanabileceği veya kapsül yüzeyinde bulunabilecek atık madeni yağ nedeniyle bitümle iyi bir adezyon sergileyememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Marshall stabilite ve akma deney sonuçlarından kapsül kullanılması ile stabilite açısından olumsuzluk meydana geleceği görülmektedir. Bu durum karışımlarda kapsül kullanılması durumunda bitümlü sıcak karışımların diğer mekanik özelliklerinin derinlemesine analiz edilerek kullanılacak malzemelere, kapsül içeriğine ve bitüm türüne göre tasarım yapılması gerektiğini göstermektedir.

5.3. Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları

Saf karışım ile 4 farklı oranda atık bitkisel yağ içeren kapsül (agrega ağırlığına %0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0) ve 4 farklı oranda atık madeni yağ içeren kapsül (agrega ağırlığına %0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0) kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin indirekt çekme dayanımları AASHTO T 283 standardına göre belirlenmiştir. Bu amaçla her bir karışım türünden 6 numune yoğurmalı pres ile 7 ± 0.5 boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. %4,67 bitüm içeriğinde hazırlanan numuneler standarda uygun olarak 16 saat süresince 60°C sıcaklığa sahip etüvde, ardından sıkıştırma sıcaklığında iki saat kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Sıkıştırılan numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ertesi gün karışımların hacimsel özellikleri belirlenmiştir. 6 numune, yakın boşluk oranına sahip olacak şekilde 2 ayrı gruba ayrılmıştır. Bu numunelerden 3 tanesi (1. grup) 25°C sıcaklıktaki suda 2 saat bekletilmiş ve sıkıştırma yüzeyine dik düzlemde 50,8 mm/dk hızla yükleme yapılarak kırılmıştır. Diğer gruptaki numunelere vakum uygulanarak su emdirilmiş ve

%70-80 oranında boşlukların su dolması sağlanmıştır. Boşluk oranı $\%7\pm0,5$ 'den farklı olan ve boşlukları %80'den fazla su dolan numuneler iptal edilerek yerine yeni numuneler hazırlanmıştır. Su emdirilen numuneler streç film ile kaplanarak emdirilen su oranının değişimi engellenmiştir. Streç film ile kaplanan numuneler koşullandırma işlemine tabi tutulmuştur. Koşullandırma işleminde numuneler öncelikle -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat, ardından 60°C 'deki suda 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra numuneler 25°C sıcaklıktaki suda en az 2 saat bekletildikten sonra koşullandırılmamış numunelerde olduğu gibi 50,8 mm/dk yükleme hızında kırılmıştır. Hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numunelerde çekme dayanımı değerinden %10 farklı değere sahip olan numuneler değerlendirmeden çıkarılarak yerine yeni numuneler hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Karışımların koşullandırma işleminden önce ve sonra çekme dayanımı değerleri Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. Karışımların çekme dayanımı (TS) değerlerinin kapsül türü ve koşullandırma ile değişimi

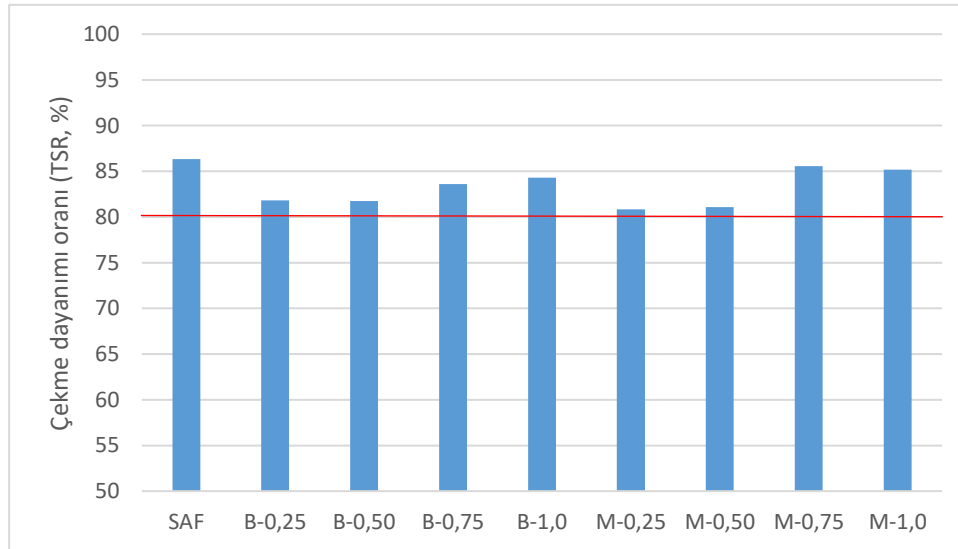
Şekil 5.6'da görüldüğü üzere kapsül kullanımı ile hem koşullandırma öncesi hem de koşullandırma sonrasında çekme dayanımı değerleri azalmıştır. Koşullandırma nedeni ile çekme dayanımı değerleri azalmıştır. Çekme dayanımı değerleri içerisinde hem koşullandırma öncesinde hem de koşullandırma sonrasında en yüksek çekme dayanımı değerine kapsül içermeyen saf karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük çekme dayanımı değerlerine hem koşullandırma öncesinde hem de koşullandırma sonrasında atık madeni yağ içeren kapsülden %1,0 oranında kullanılan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırma öncesinde kapsül içermeyen, atık bitkisel yağ içeren kapsülden %0,25 ve %0,50 oranında kullanılan karışımların çekme dayanımı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca atık

madeni yağ içeren kapsülden %0,25 ve %0,50 oranında kullanılan kapsüller içeren karışımların çekme dayanımı değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.

Koşullandırma öncesinde atık bitkisel yağ içeren kapsülden %0,75 ve %1,0 oranında karışımda kullanılması ile çekme dayanımı değeri kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %11,1 ve %16,5 oranlarında azalmıştır. Koşullandırma öncesinde atık madeni yağ içeren kapsülden %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranında karışımda kullanılması ile çekme dayanımı değeri kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %5,8; %6,1; %22,2 ve %24,5 oranlarında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan atık madeni yağ içeren kapsül kullanımının atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanımına göre koşullandırma öncesinde saf karışıma göre çekme dayanımı değerini daha fazla olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

Koşullandırma sonrasında atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden agrega ağırlığınca karışımda %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması durumunda çekme dayanımı değerleri kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %5,2; %5,4; %13,9 ve %18,4 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Koşullandırma sonrasında atık madeni yağ içeren kapsülden %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması durumunda ise çekme dayanımı değerleri kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %11,8; %11,8; %22,9 ve %25,5 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. Koşullandırma öncesinde olduğu gibi koşullandırma sonrasında da atık madeni yağ içeren kapsüllerde çekme dayanımı oranındaki azalma, atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlara göre daha fazla olmuştur.

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımının bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı değerlerinin kapsül içeriği ile değişimi Şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5.7. Bitümlü sıcak karışımların çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri

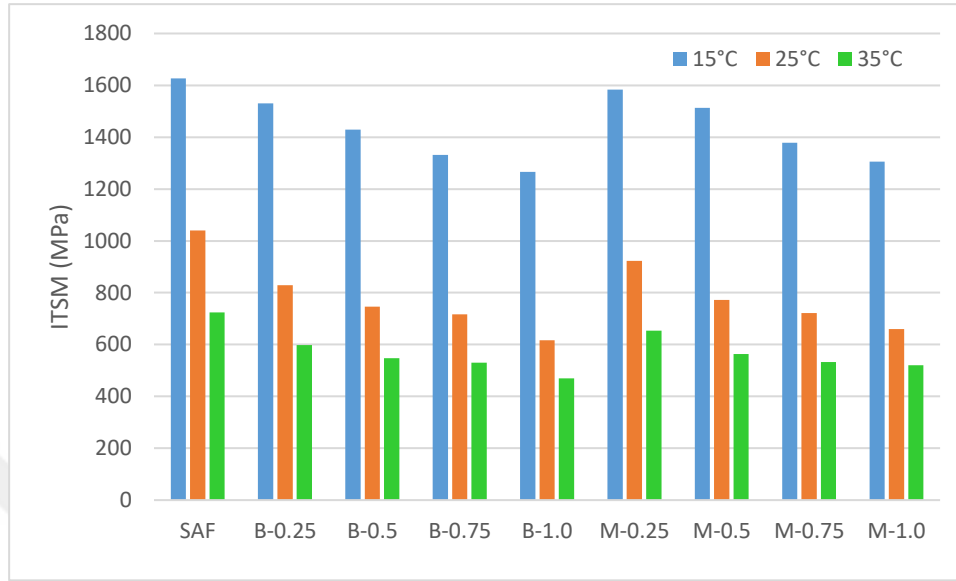
Şekil 5.7 incelendiğinde kapsül içermeyen karışımın çekme dayanımı oranı değerlerinin kapsül içeren karışımların tamamından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bütün karışımlar Superpave çekme dayanımı oranı şartname kriteri olan %80 şartını sağlamıştır. Bu durum nem hasarına karşı dayanım açısından bütün karışımların kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden agregaya ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması durumunda çekme dayanımı oranı (TSR) değerlerinin kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %5,2; %5,3; %3,1 ve %2,3 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Atık madeni yağ içeren kapsüllerden %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması durumunda ise çekme dayanımı oranı değerlerinin kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %6,4; %6,1; %0,9 ve %1,3 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. Çekme dayanımı oranı değerlerinin kapsül içeriğinin artması ile aşırı oranda değişmemesi, hem koşullandırma öncesinde hem de koşullandırma sonrasında kapsül içeriğinin artması ile çekme dayanımı değerlerinin benzer oranda azalmasından kaynaklanmıştır.

5.4. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları

Saf karışım ile 4 farklı oranda atık bitkisel yağ içeren kapsül (agrega ağırlığınca %0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0) ve 4 farklı oranda atık madeni yağ içeren kapsül (agrega ağırlığınca %0,25; %0,5; %0,75 ve %1,0) kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) değerleri BS DD 213 standardına göre belirlenmiştir. Bu karışım numunelerine ITSM deneyi 15°C, 25°C ve 35°C sıcaklıklarda uygulanmıştır. ITSM deneyi 5kN kapasiteli üniversal deney aleti (UTM) kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin deney sıcaklığına tam olarak ulaşması amacıyla numuneler deneyden 3 saat önce UTM'nin iklimlendirme kabineye yerleştirilmiştir. Daha sonra deney yazılımına numune adı, numune yüksekliği, tahmini rijitlik değeri, tahmini poisson oranı, yük artış süresi ve hedef deformasyon değerleri girilmiştir. Çalışmada tahmini poisson oranı 0,35; yük artış süresi 124 ms ve hedef deformasyon 5 µm olarak seçilmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deneydir. Bu nedenle ITSM deneyine tabi tutulan numuneler daha sonra Marshall stabilite ve akma deneylerinde kullanılmıştır. Çalışmada her bir karışımdan 3 adet numune ITSM deneyine tabi tutulmuş, Formül (4.6) kullanılarak ITSM değerleri hesaplanmıştır. Her bir numune deneye tabi tutulduktan sonra 90 derece döndürülmüş ve deney tekrarlanmıştır. İki deney sonucunda ITSM değerleri arasındaki farkın %10'dan fazla olması durumunda numune 90 derece daha döndürülerek 3. ölçüm yapılmıştır. ITSM değerleri arasında %10'dan daha az fark olması durumunda iki değer ortalaması numunenin ITSM değeri olarak alınmıştır. Kapsül kullanımının bitümlü sıcak karışımların ITSM değerleri üzerindeki etkisi Şekil 5.8'de görülmektedir. Grafiklerde “B” atık

bitkisel yağı, “M” ise atık madeni yağı ifade etmektedir. “0,25; 0,5.; 0,75 ve 1,0” ise agrega ağırlığınca karışıma ilave edilen kapsül miktarını göstermektedir.



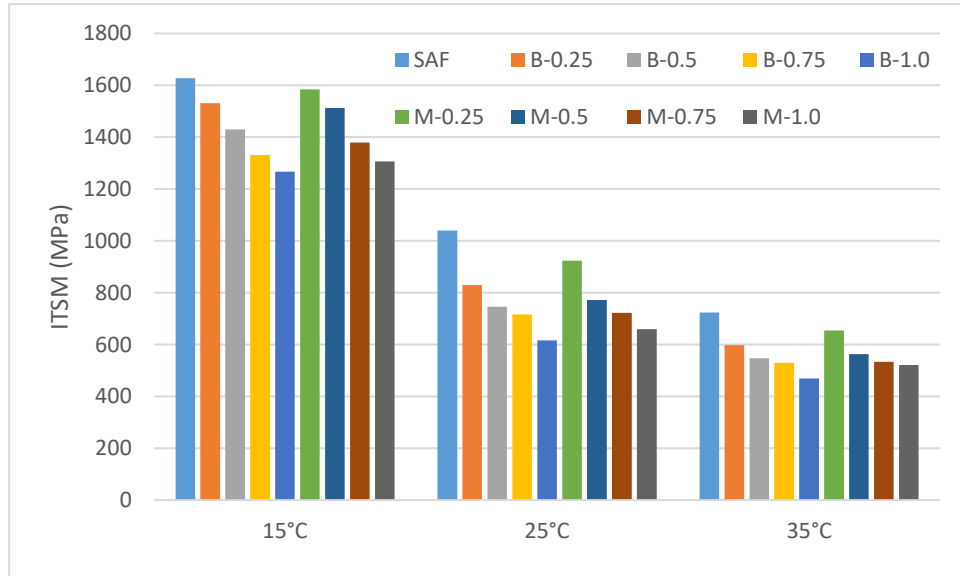
Şekil 5.8. Kapsül kullanımının ITSM değerleri üzerindeki etkisi

Şekil 5.8'de görüldüğü üzere bütün sıcaklıklarda kapsül içeriğinin artması ile ITSM değerleri azalmıştır. Bütün sıcaklıklarda en yüksek ITSM değerlerine kapsül içermeyen karışımların sahip olduğu, en düşük ITSM değerlerine ise atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %1,0 oranında kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Bütün sıcaklıklarda aynı oranda kapsül içeren atık madeni ve bitkisel yağ kullanılan karışımlar değerlendirildiğinde atık bitkisel yağ içeren kapsüller kullanılan karışımların atık madeni yağ içeren kapsüller kullanılan karışımlardan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kapsül içeriğinin artması ile ITSM değerlerinde sürekli bir azalma gözlenmiştir. Kapsül kullanımı ile karışımların kapsül içermeyen karışıma göre ITSM değerlerindeki azalış oranları Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kapsül kullanımı ile ITSM değerlerindeki azalma miktarları

Karışım Türü	ITSM (MPa)			Kapsül içermeyen karışımlara göre ITSM değerlerindeki azalış (%)		
	15°C	25°C	35°C	15°C	25°C	35°C
SAF		1040,0	724,0	0	0	0
B-0,25	1530,6	829,3	597,6	5,94	20,26	17,46
B-0,5	1429,4	745,9	547,5	12,15	28,28	24,37
B-0,75	1331,2	716,1	529,6	18,19	31,15	26,84
B-1,0	1266,7	616,2	469,7	22,16	40,75	35,12
M-0,25	1583,8	923,1	653,8	2,66	11,24	9,69
M-0,5	1513,0	771,8	563,1	7,02	25,79	22,23
M-0,75	1378,7	721,7	533,0	15,27	30,61	26,38
M-1,0	1305,9	659,8	520,9	19,74	36,56	28,06

Tablo 5.1’de görüldüğü üzere hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsüller kullanılarak hazırlanan karışımların ITSM değerlerinde saf karışıma göre azalma meydana gelmiştir. En fazla azalmanın bütün kapsül içeriklerinde 25°C sıcaklıkta meydana geldiği belirlenmiştir. En az azalmanın ise 15°C sıcaklıkta meydana geldiği tespit edilmiştir. Sıcaklığın karışımların ITSM değerleri üzerindeki etkileri Şekil 5.9’da görülmektedir.



Şekil 5.9. Sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkisi

Şekil 5.9’da görüldüğü üzere bütün karışımlarda sıcaklığın artması ile ITSM değerleri azalmıştır. Sıcaklığın 15°C’den 25°C’ye yükselmesi ile ITSM değerlerindeki değişim kapsül

içeriğinin artması ile düzenli bir değişim göstermemesine rağmen en fazla değişim %1,0 kapsül içeren karışımlarda meydana gelmiştir. Sıcaklığın 15°C sıcaklıktan 35°C'ye çıkması durumunda ITSM değerlerinde en fazla azalma atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %1,0 kapsül içeriğinde, atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda ise %0,5 kapsül içeriğinde meydana gelmiştir. En az değişim ise hem sıcaklığın 15°C'den 25°C'ye yükselmesi durumunda hem de 15°C'den 35°C'ye yükselmesi durumunda kapsül içermeyen karışımda meydana gelmiştir.

ITSM deney sonuçlarından kapsül kullanımı ile ITSM değerlerinin azaldığı, kapsül içeriğinin artması ile sürekli bir azalmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsüller kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışımların atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlara göre rijitliği daha fazla azalttığı belirlenmiştir. Rijitlikte en fazla azalma 25°C sıcaklıkta meydana gelmiştir. Sıcaklığın artması ile ITSM değerleri azalmıştır. En fazla azalma %1,0 oranında atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda meydana gelirken sıcaklıktaki değişimden en az etkilenen ise kapsül içermeyen karışım olmuştur. Elde edilen sonuçlardan kapsül kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların rijitliklerinin azalacağı, özellikle yüksek oranda kapsül kullanılması durumunda bu azalmanın etkisinin artacağı, ayrıca yüksek oranda kapsül içeren karışımların ITSM değerlerinin sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkileneceği söylenebilmektedir.

5.5. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

İndirekt çekme yorulma deneyi, PG 70-28 saf bitümü ile hazırlanan karışım ile atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) ve atık madeni yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) içeren 9 farklı karışım türü üzerinde uygulanmıştır. Her bir karışım türünden en az 3 numune deneye tabi tutulmuş olup numunelere 450 kPa gerilme uygulanmıştır.

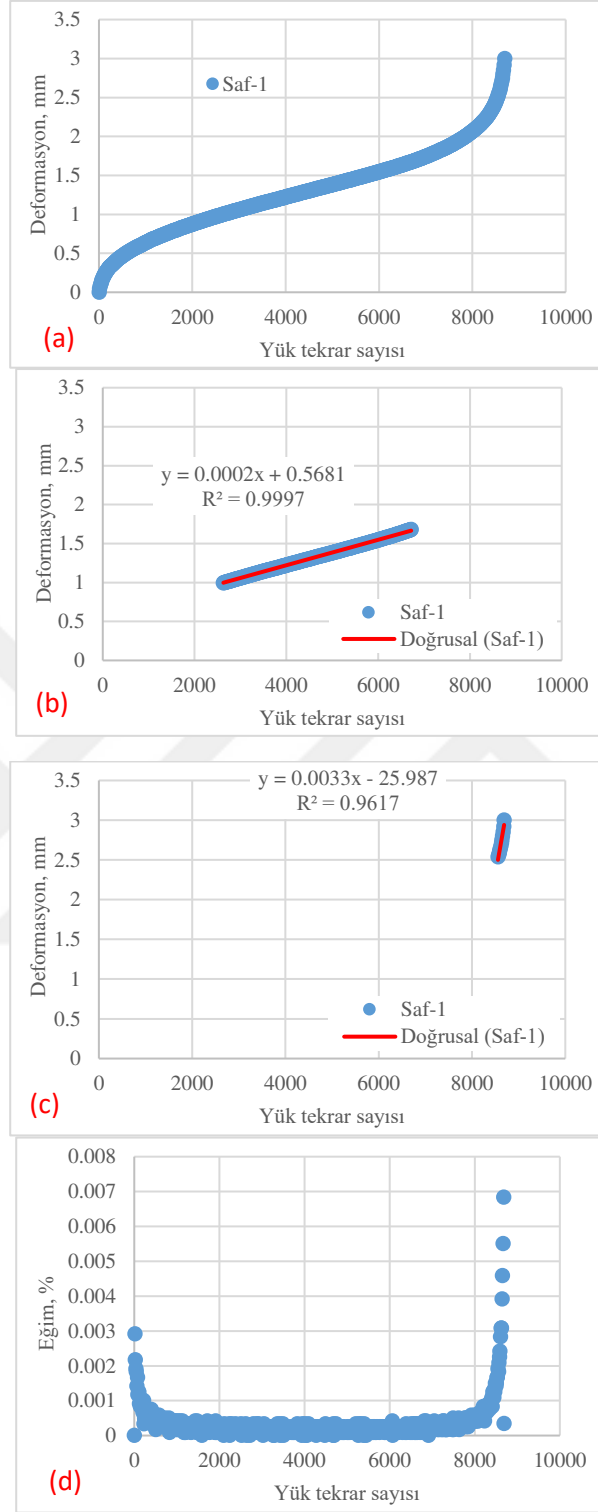
Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1,5 sn olarak alınmış bu sürenin 0,124 saniyesi ITSM deneyinde olduğu gibi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla dinlenme periyodu (rest period) 1,376 saniye olmuştur. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10. Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü

İndirekt çekme yorulma deneylerinde numunelerde 3 mm deformasyon oluşuncaya kadar tekrarlı yük uygulanmaya devam edilmiş, 3 mm deformasyon meydana gelmesi için uygulanması gereken yük tekrar sayıları (N_{3mm}) belirlenmiştir. 3 mm deformasyon oluşumunda karışımlarda yük-deformasyon eğrilerinde her üç bölgede meydana geldiğinden bu deformasyon seviyesi kullanılmıştır.

Yük-deformasyon eğrisinde II. ve III. kısımların teğetlerin kesişimlerinden yorulma ömürleri belirlenmiştir. III. Kısımda teğet, eğimin dönüş yaptığı noktadan itibaren alınmıştır. Excel formatında eğrinin II. ve III. kısımları iki ayrı kısma ayrılmış belirlenen yerlerden geçirilen teğetlerin formülleri belirlenmiştir. İki teğet birbirine eşitlenerek karışımların yorulma ömürleri (N_f) belirlenmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Deformasyon yük tekrar sayısı grafiklerinden yorulma ömrü (Nf) ve çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarının (Ni) belirlenmesi

Eğride eğimin arttığı nokta (II. ve III. bölge sınırı) çatlak başlaması için gerekli yük tekrerrür sayısı (Ni) olarak elde edilmiştir. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısının belirlenmesi için eğim-yük tekrar sayısı grafiği çizilmiş eğimin artmaya başladığı nokta çatlak başlangıcı yük

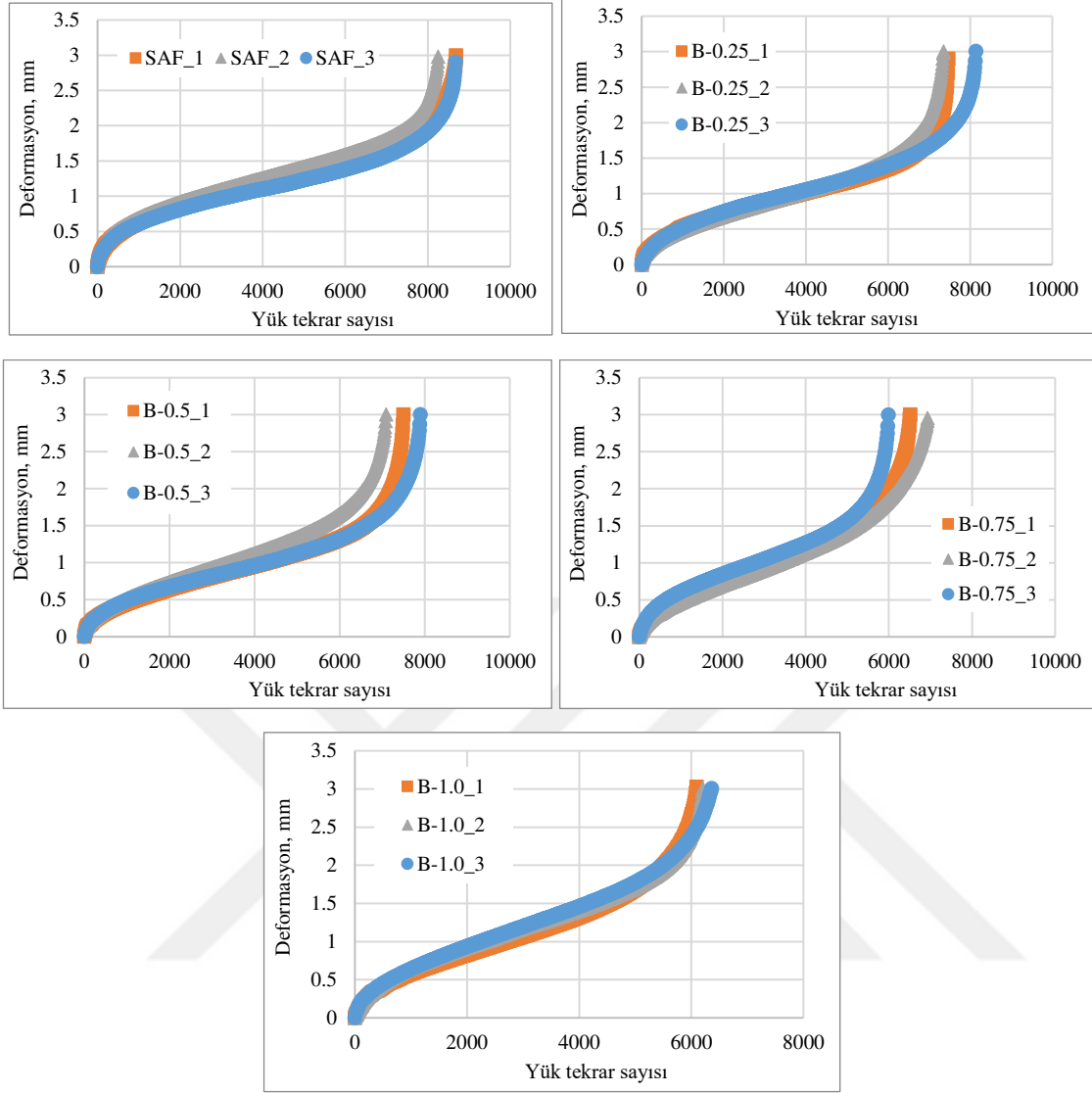
tekrar sayısı (N_i) olarak alınmıştır (Şekil 5.11(d)). Yorulma ömrü (N_f) ile çatlak başlangıcı yük tekrür sayısı (N_i) arasındaki farktan çatlak ilerlemesi yük tekrür sayısı (N_p) değerleri elde edilmiştir. Formül 4.7 kullanılarak N_i ile N_f arasında her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayıları (r_p) belirlenmiştir. Karışımların yük tekrar sayısı-deformasyon grafikleri Şekil 5.12-5.13'te verilmiştir. Numunelere 450 kPa gerilme seviyelerinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen N_f , N_{3mm} , δf ve r_p değerleri Tablo 5.2-5.3'te verilmiştir. Ayrıca 450 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–yük tekrür sayısı ilişkisine birer örnek Şekil 5.14-5.15'te çizilmiştir.

Tablo 5.2. Saf ve atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları

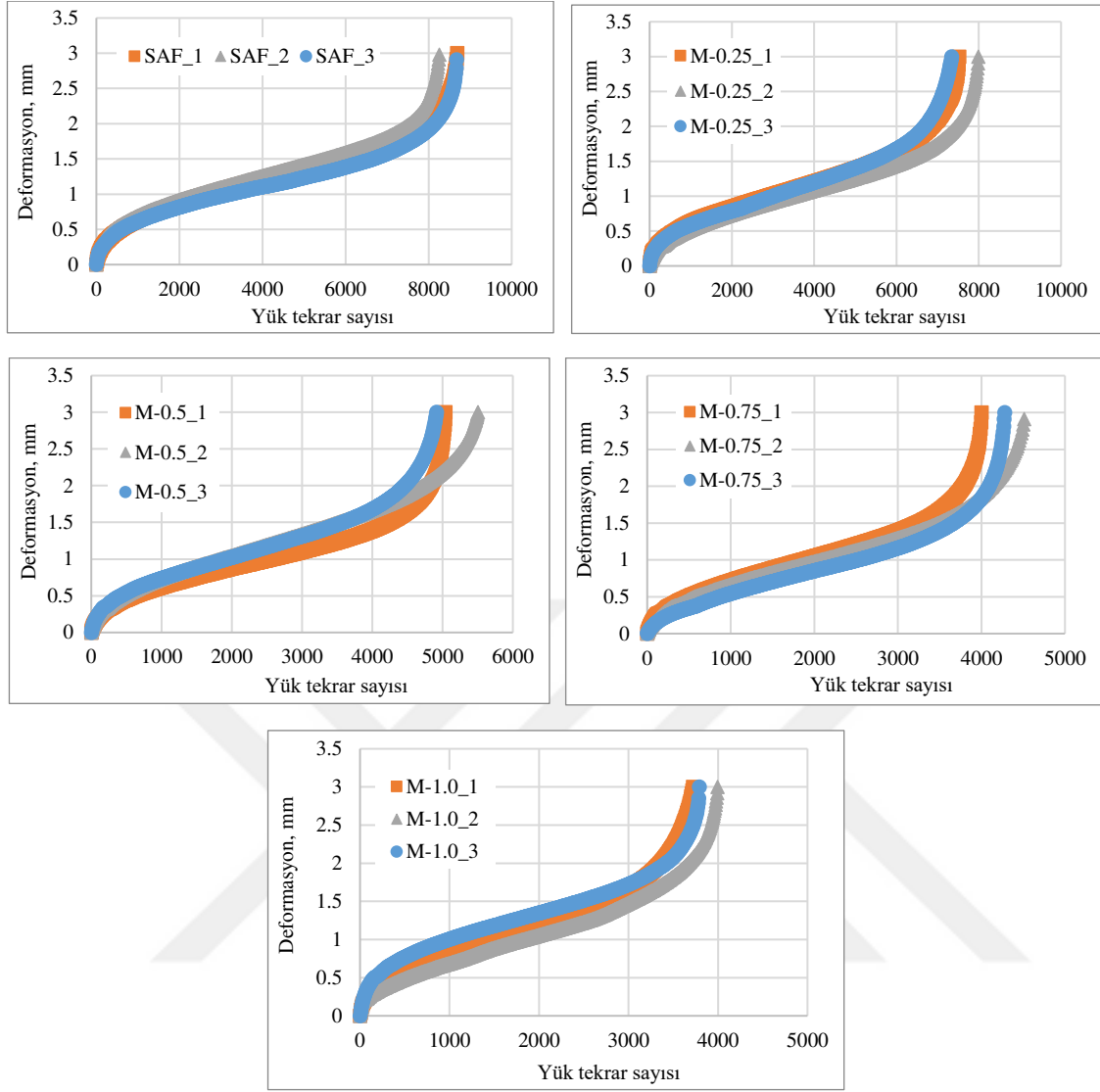
Karışım türü	Num. No	II.Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	Ni	δ_i	N _f	δ_f	N _p	N _{3mm}	r _p
PG 70-28	1	$y = 0,0002x + 0,5681$	$y = 0,0033x - 25,987$	7632	1,922	8566	2,561	934	8688	1462
	2	$y = 0,0002x + 0,5921$	$y = 0,0025x - 17,518$	7380	1,929	7874	2,217	494	8256	1715
	3	$y = 0,0001x + 0,562$	$y = 0,0033x - 25,549$	7440	1,698	8160	2,007	720	8676	2329
	Ort.			7484	1,850	8200	2,262	716	8540	1835
B-%0,25	1	$y = 0,0002x + 0,417$	$y = 0,0045x - 31,222$	6384	1,463	7062	1,757	678	7464	2307
	2	$y = 0,0002x + 0,3489$	$y = 0,0042x - 27,617$	5628	1,371	7016	2,095	1388	7356	1918
	3	$y = 0,0001x + 0,4548$	$y = 0,0059x - 44,726$	6792	1,600	7671	2,017	879	8136	2107
	Ort.			6268	1,478	7250	1,956	982	7652	2111
B-%0,50	1	$y = 0,0002x + 0,3409$	$y = 0,0055x - 38,254$	6252	1,389	7282	2,086	1030	7500	1478
	2	$y = 0,0002x + 0,3356$	$y = 0,0036x - 22,356$	6000	1,654	6338	1,825	338	7092	1979
	3	$y = 0,0001x + 0,3779$	$y = 0,004x - 28,48$	6924	1,617	7399	1,909	475	7896	1628
	Ort.			6392	1,553	7007	1,940	615	7496	1695
B-%0,75	1	$y = 0,0002x + 0,3271$	$y = 0,0037x - 21,057$	5076	1,481	6110	2,059	1034	6516	1788
	2	$y = 0,0002x + 0,2191$	$y = 0,0021x - 11,711$	5712	1,694	6279	2,044	567	6936	1620
	3	$y = 0,0002x + 0,3634$	$y = 0,0049x - 26,333$	4728	1,468	5680	2,035	952	5988	1679
	Ort.			5172	1,548	6023	2,046	851	6480	1696
B-%1,0	1	$y = 0,0002x + 0,3466$	$y = 0,0034x - 17,467$	4860	1,629	5567	2,041	707	6096	1715
	2	$y = 0,0002x + 0,4375$	$y = 0,0038x - 20,88$	4752	1,626	5922	2,279	1170	6204	1791
	3	$y = 0,0003x + 0,4181$	$y = 0,0023x - 11,923$	5208	1,862	6171	2,589	963	6360	1324
	Ort.			4940	1,706	5886	2,303	946	6220	1610

Tablo 5.3. Saf ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları

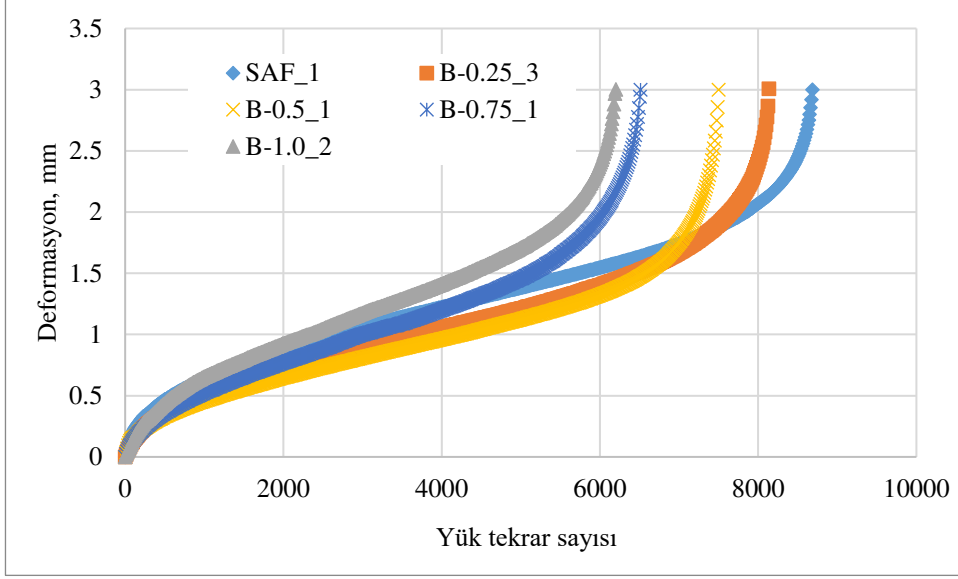
Karışım türü	Num. No	II. Kısım Teğet Denklemleri	III. Kısım Teğet Denklemleri	N _i	δ_i	N _f	δ_f	N _p	N _{3mm}	r _p
PG 70-28	1	$y = 0,0002x + 0,5681$	$y = 0,0033x - 25,987$	7632	1,922	8566	2,561	934	8688	1462
	2	$y = 0,0002x + 0,5921$	$y = 0,0025x - 17,518$	7380	1,929	7874	2,217	494	8256	1715
	3	$y = 0,0001x + 0,562$	$y = 0,0033x - 25,549$	7440	1,698	8160	2,007	720	8676	2329
	Ort.			7484	1,850	8200	2,262	716	8540	1835
M-%0,25	1	$y = 0,0002x + 0,476$	$y = 0,0035x - 23,093$	6444	1,796	7142	2,216	698	7524	1662
	2	$y = 0,0002x + 0,4119$	$y = 0,0033x - 23,227$	6756	1,656	7625	2,148	869	7992	1767
	3	$y = 0,0002x + 0,3781$	$y = 0,0025x - 15,446$	6312	1,795	6880	2,161	568	7344	1552
	Ort.			6504	1,749	7216	2,175	712	7620	1660
M-%0,50	1	$y = 0,0003x + 0,3775$	$y = 0,0083x - 39,027$	4308	1,535	4926	2,222	618	5040	899
	2	$y = 0,0003x + 0,4456$	$y = 0,0023x - 9,7074$	4878	2,104	5077	2,265	199	5502	1233
	3	$y = 0,0003x + 0,4551$	$y = 0,004x - 16,527$	4284	1,852	4587	2,141	303	4914	1049
	Ort.			4490	1,830	4863	2,209	373	5152	1060
M-%0,75	1	$y = 0,0003x + 0,3794$	$y = 0,0066x - 23,71$	3378	1,584	3824	2,078	446	4002	902
	2	$y = 0,0003x + 0,336$	$y = 0,0045x - 17,572$	3300	1,416	4264	2,195	964	4512	1237
	3	$y = 0,0003x + 0,261$	$y = 0,0112x - 45,05$	3528	1,411	4157	2,169	629	4278	830
	Ort.			3402	1,470	4081	2,147	679	4264	990
M-%1,0	1	$y = 0,0004x + 0,4695$	$y = 0,0049x - 15,186$	2862	1,573	3479	2,195	617	3720	992
	2	$y = 0,0003x + 0,3913$	$y = 0,0072x - 25,768$	3324	1,686	3791	2,184	467	3996	938
	3	$y = 0,0003x + 0,6852$	$y = 0,0065x - 21,69$	3282	1,892	3609	2,236	327	3792	950
	Ort.			3156	1,717	3626	2,205	470	3836	960



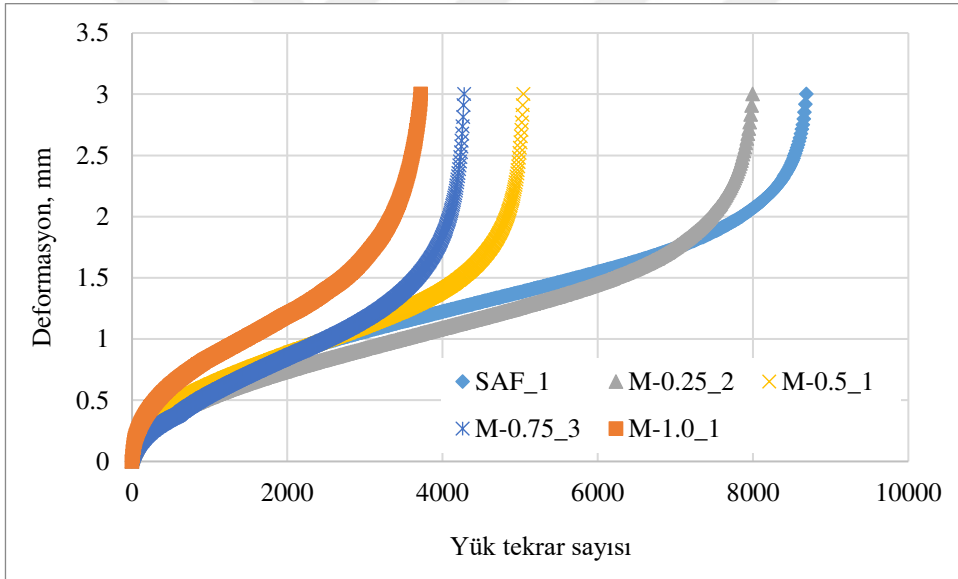
Şekil 5.12. Saf ve atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 5.13. Saf ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 5.14. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 450 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

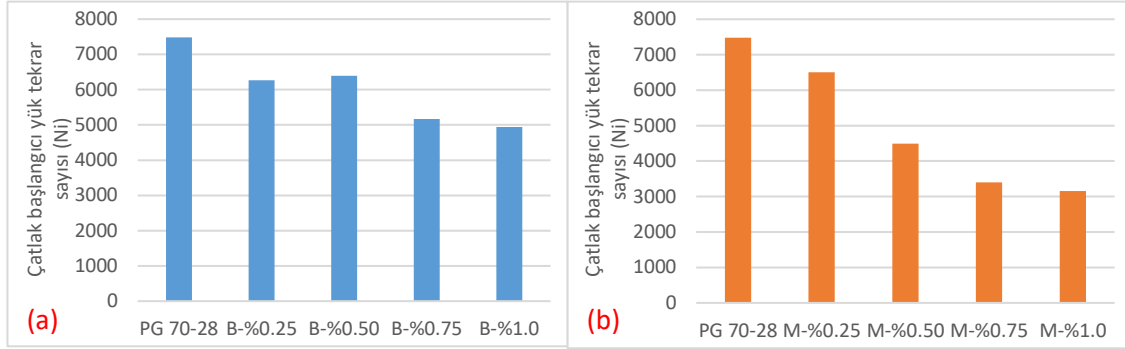


Şekil 5.15. Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 450 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 5.14-5.15'te görüldüğü üzere karışımlarda kullanılan kapsül içeriği arttıkça 3 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayısı azalmıştır. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda özellikle %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül kullanımında yorulma ömrü önemli oranda azalırken atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,50; %0,75 ve %1,0 kapsül kullanımında yorulma ömrü büyük oranda azalmıştır.

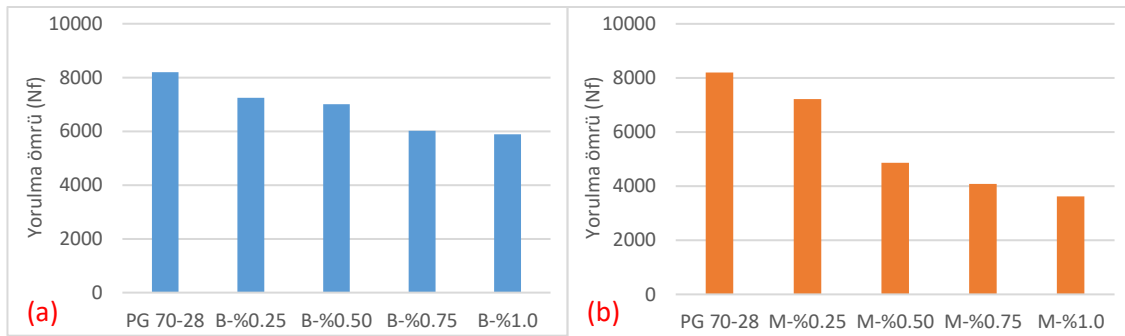
450 kPa gerilme seviyelerinde üç numuneden elde edilen çatlağın oluştuğu yük tekrar sayılarının (N_i) ortalamasının kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.16'da, yorulma ömrü (N_f)

değerlerinin ortalamasının kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.17’de, çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı (N_p) değerlerinin ortalamasının kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.18’de, 3 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayılarının (N_{3mm}) ortalamasının kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.19’de verilmiştir.



Şekil 5.16. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) – kapsül içeriği ilişkisi

Şekil 5.16’da görüldüğü üzere bitümlü sıcak karışımlarda kapsül kullanımı ile karışımların çatlak başlangıcına neden olan yük tekrar sayısı (N_i) değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile N_i değeri saf karışıma göre %16,25; %0,50 oranında kapsül içeren karışımlarda %14,59; %0,75 oranında kapsül içeren karışımlarda %30,89 ve %1,0 oranında kapsül içeren karışımlarda %33,99 oranında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsüllerin karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması ile çatlak başlangıcı yük tekrar sayısının kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %13,09; %40,01; %54,54 ve %57,83 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir.

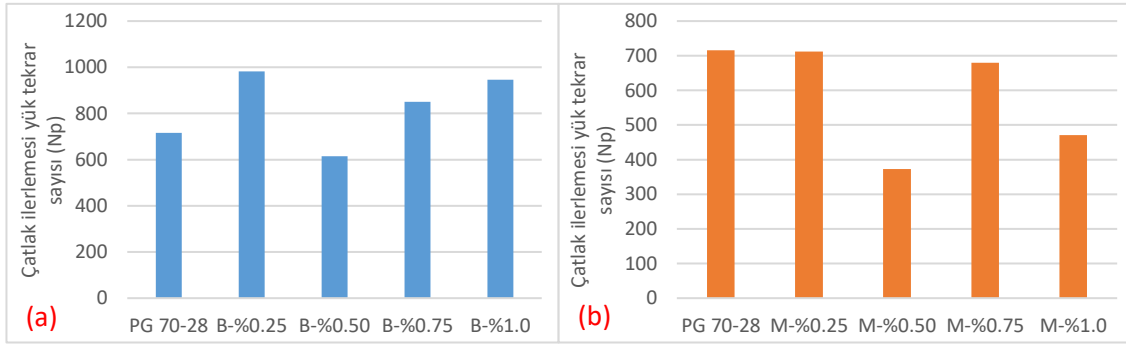


Şekil 5.17. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların yorulma ömrü (N_f) – kapsül içeriği ilişkisi

Yük tekrar sayısı - deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilen yorulma ömrü değerlerine göre çizilen grafiklerden, çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarında olduğu gibi kapsül kullanımı ile yorulma ömrü (N_f) değerlerinin azaldığı

belirlenmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile Nf değeri kapsül içermeyen karışıma göre %11,59; %0,50 oranında kapsül içeren karışımlarda %14,55; %0,75 oranında kapsül içeren karışımlarda %26,55 ve %1,0 oranında kapsül içeren karışımlarda %28,22 oranında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsüllerin karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması ile yorulma ömrünün kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %12,00; %40,69; %50,23 ve %55,78 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Deney sonuçlarından atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda özellikle %0,75 ve %1,0 içeriklerinde, atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda ise %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül içeren karışımların yorulma ömrünün önemli oranda azaldığı söylenebilmektedir.

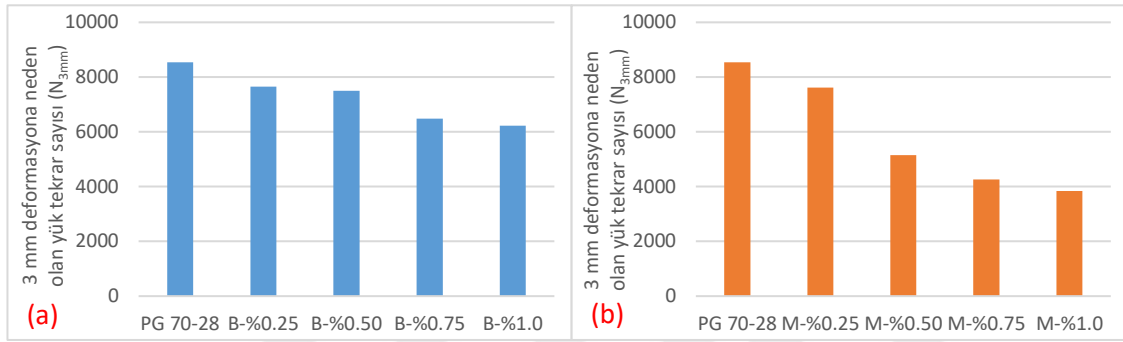
Literatürle karşılaştırıldığında benzer şekilde Norambuena ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışma da yoğun gradasyonlu bitümlü sıcak karışımlarda özellikle yüksek oranlarda (%0,75 ve %1,0 gibi) kapsül kullanımının karışımların yorulma ömrünü önemli oranda azalttığı belirtilmiştir. Taş mastik asfalt karışımlarda ise kapsül kullanımı mekanik özelliklerin önemli oranda değişmediği tespit edilmiştir (Norambuena-Contreras ve diğ., 2019). Bu duruma kapsül yüzey pürüzlülüğünün düşük olmasından ötürü içsel sürtünmeyi azaltmasının neden olduğu düşünülmektedir. Taş mastik asfalt karışımlarda ince agrega oranı düşük olduğundan kapsüllerin boşlukları doldurduğu, ana iskeleti ve içsel kenetlenmeyi sağlayan kaba agregaya etki etmediğinden dolayı mekanik özelliklerin önemli oranda etkilenmediği düşünülmektedir.



Şekil 5.18. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (Np) – kapsül içeriği ilişkisi

Şekil 5.18’de görülen çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (Np) değerleri Nf ile Ni değerlerinin farkından elde edilmiştir. Bu değerlerin yüksek olması çatlak oluşumu başlamasına rağmen bitümlü sıcak karışımın yorulma dayanımının devam ettiğini göstermektedir. Hem atık bitkisel hem de madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda en düşük değere %0,50 oranında kapsül kullanılan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek değere ise %0,25 kapsül kullanılan karışımların sahip olmuştur. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların Np değerlerinin atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların bu

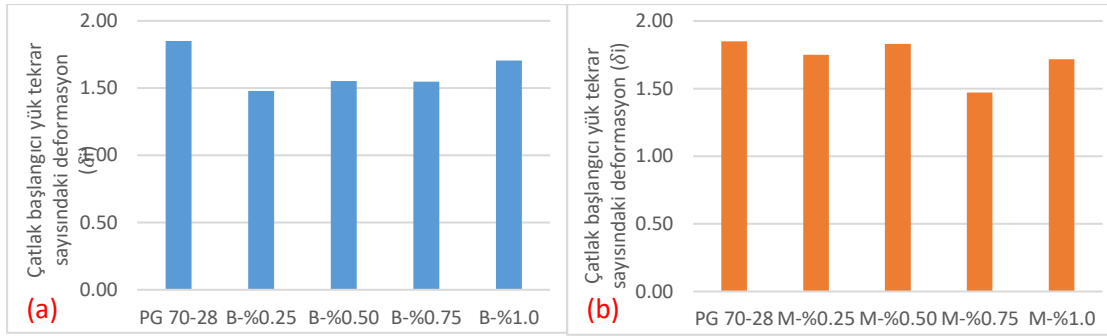
değerlerinden önemli oranda yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, yorulma açısından atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlara göre daha olumlu sonuçlara sahip olduğunu göstermektedir. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması ile kapsül içermeyen karışıma göre N_p değerleri %37,14; %18,86 ve %32,17 oranlarında artmıştır. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,50 oranında kullanılması ile kapsül içermeyen karışıma göre N_p değeri %14,15 oranında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsüllerden ise karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması ile kapsül içermeyen karışıma göre N_p değerleri %0,57; %47,89; %5,09 ve %34,30 oranlarında azalmıştır.



Şekil 5.19. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda 3mm deformasyona neden olan yük tekrar sayısı – kapsül içeriği ilişkisi

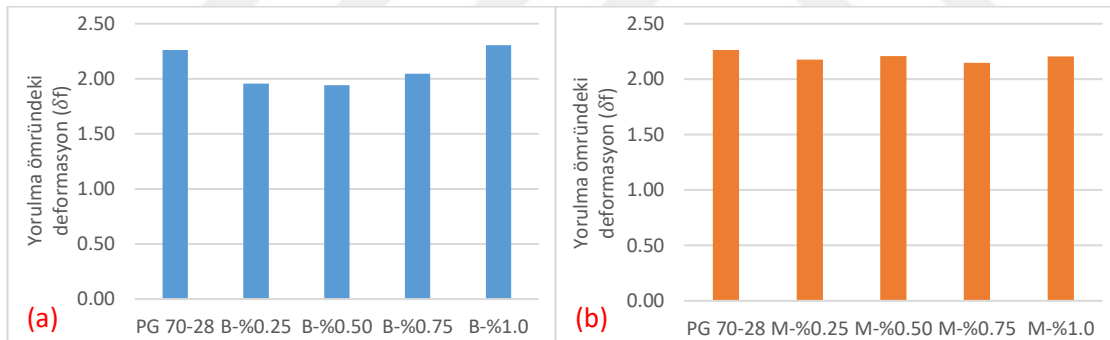
Şekil 5.19’da görüldüğü üzere, yorulma ömrü değerleriyle benzer şekilde karışımlarda kullanılan kapsül içeriğinin artması ile 3 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayıları azalmıştır. Atık bitkisel ve madeni yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile 3 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayısı %10,40 ve %10,77 oranlarında azalırken %0,50 oranında kapsül kullanımında %12,22 ve %39,67 oranlarında azalmıştır. %0,75 oranlarında atık bitkisel ve madeni yağ kullanımı durumunda bu değer %24,12 ve %50,07 oranlarında azalırken %1,0 oranında kapsül kullanılması durumunda %27,17 ve %55,08 oranlarında azalmıştır. 3 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayılarında görüldüğü üzere özellikle %0,50 oranında kapsül kullanımından itibaren atık bitkisel ve madeni yağ içeren kapsül kullanımı arasında önemli oranda fark olduğu, atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanımının atık madeni yağ içeren kapsül kullanımına göre daha uygun olduğu söylenebilmektedir.

Çatlak oluşumundaki deformasyon değerlerinin (δ_i) ortalamasının kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.20’te, yorulma ömrü (N_f) değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_f) ortalamasının kapsül kullanımı ile değişimi ise Şekil 5.21’te verilmiştir.



Şekil 5.20. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda Ni değerindeki deformasyon miktarı – kapsül içeriği ilişkisi

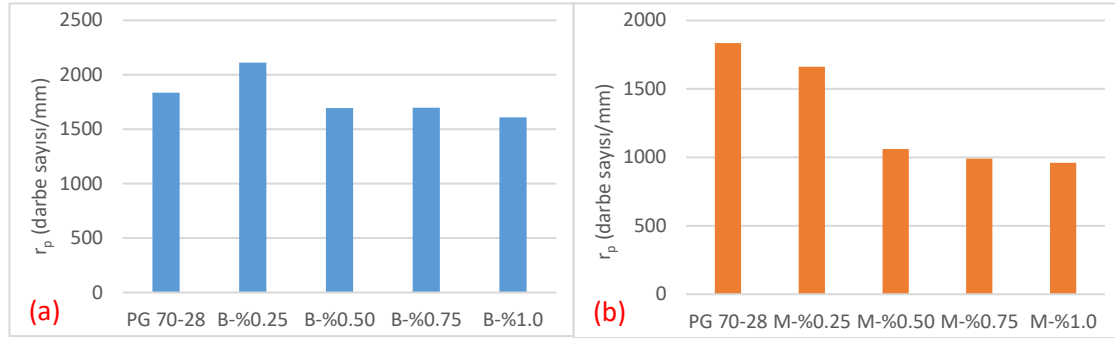
Ni değerindeki deformasyon miktarları (δ_i) incelendiğinde (Şekil 5.20) atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanımı ile genel olarak deformasyon miktarlarının azaldığı, atık madeni yağ içeren kapsül kullanımı ile %0,75 oranı dışında benzer deformasyon değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlar karşılaştırıldığında %0,25; %0,50 ve %0,75 oranında kapsül içeren karışımların çatlak başlangıcındaki deformasyon değerlerinin benzer olduğu, atık madeni yağ içeren karışımlar değerlendirildiğinde ise; %0,25; %0,50 ve %1,0 oranlarında kapsül içeren karışımların kapsül içermeyen karışımla benzer deformasyon değerlerine sahip oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 5.21. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda Nf değerindeki deformasyon miktarı – kapsül içeriği ilişkisi

Şekil 5.21'te görülen Nf değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) incelendiğinde kapsül kullanımı ile δ_i değerlerinde olduğu gibi atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25; %0,50 ve %0,75 oranlarında benzer deformasyon değerleri elde edilmiştir. %1,0 atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlar en yüksek deformasyon değerine sahip olmuş ve kapsül kullanılmayan karışımla benzer deformasyon değerleri vermiştir. Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların hepsinin kapsül kullanılmayan karışım ile benzer deformasyon değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çatlak oluşuktan sonra yorulma ömrüne kadar her 1

mm deformasyon için gerekli yük tekrar sayını ifade eden çatlak ilerleme oranı değerlerinin (r_f) kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.22. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda Ni – Nf arası çatlak ilerleme oranı – kapsül türü ilişkisi

Şekil 5.22’te görülen Ni – Nf arası çatlak ilerleme oranı (r_p) değerlerinin kapsül kullanımı ile değişimi incelendiğinde atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25 oranı dışında bütün karışımların bu değerinin kapsül içermeyen karışımdan düşük olduğu belirlenmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda karışım ağırlığınca %0,25 oranında kapsül kullanılması durumunda r_p değeri kapsül içermeyen karışıma göre %15,00 oranında artmıştır. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması durumunda r_p değeri kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %7,64; %7,60 ve %12,27 oranlarında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda ise karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül kullanımı ile r_p değeri kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %9,53; %42,24; %46,07 ve %47,69 oranlarında azalmıştır. Bu durum, B-%0,25 dışında kapsül kullanımının Ni – Nf arası çatlak ilerleme oranı (r_p) açısından olumsuzluğa neden olduğunu göstermektedir. N_p değerleri ile kıyaslandığında r_p değerlerinin azalması, kapsül kullanılan karışımlarda Ni – Nf arası deformasyon farklarının fazla olmasından kaynaklanmıştır.

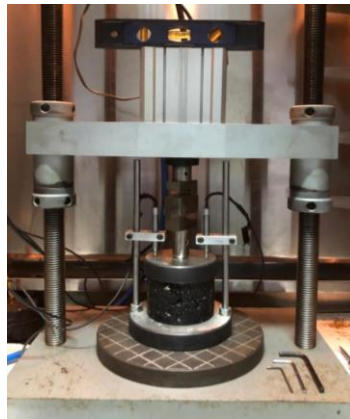
Yorulma deney sonuçları değerlendirildiğinde indirekt çekme modunda gerçekleştirilen yorulma deneyleri sonucunda hem atık bitkisel hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan yoğun gradasyonlu karışımlarda yorulma dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların literatürle uyum olduğu gözlenmiştir. Yorulma ömrü açısından her ne kadar kapsül kullanımı ile yorulma ömrü azalsa da atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25 ve %0,50; atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda ise %0,25 oranının en uygun değerler olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak, laboratuvar yorulma deneylerinde numunelere gerilme veya şekil değiştirme kontrollü olarak dinamik yükleme yapılmaktadır. Şekil değiştirme kontrollü deneylerde

numunelere sabit ve tekrarlı bir deformasyon meydana gelecek şekilde dinamik yük uygulanmaktadır. Gerilme kontrollü deneylerde ise numunelere sabit bir gerilme veya yük uygulanarak deformasyon meydana getirilmektedir. Kalın tabaka kalınlıkları veya rijitliği yüksek olan asfalt malzemelerin uygulanması durumunda gerilme kontrollü, ince veya rijitliği düşük tabakaların uygulanması durumunda ise şekil değiştirme kontrollü yorulma deneylerinin uygulanması daha uygundur (Adedimila ve Kennedy, 1975; Porter ve Kennedy; 1975). Çalışma kapsamında saf bağlayıcı kullanılmış olup kapsül kullanımı ile karışımların rijitlikleri azalmıştır. İndirekt çekme yorulma deneyi gerilme kontrollü olarak uygulanmıştır.

5.6. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

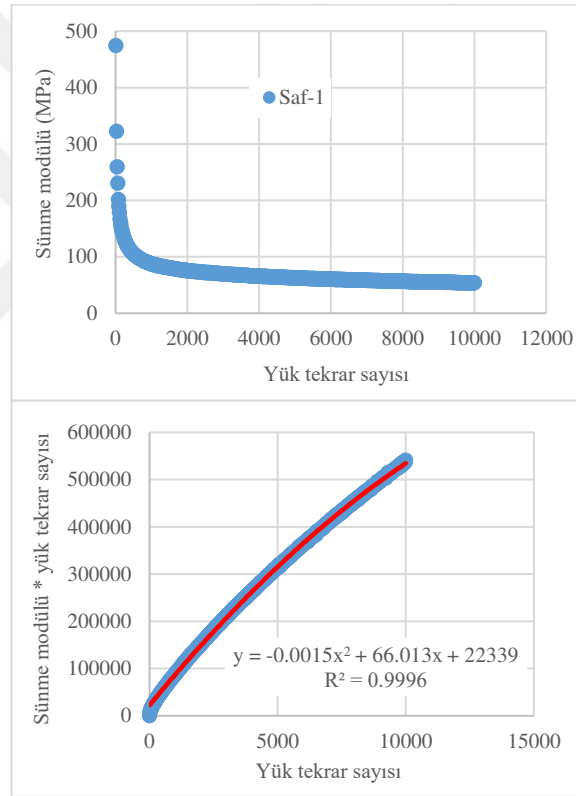
Dinamik sünme deneyi, PG 70-28 saf bitümü ile hazırlanan karışım ile atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) ve atık madeni yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) içeren 9 farklı karışım türü üzerinde UTM deney aleti kullanılarak uygulanmıştır. Her bir karışımdan en az üç numune deneye tabi tutulmuştur. Deney 50°C sıcaklıkta ve 450 kPa gerilme seviyesinde uygulanmıştır. Deney öncesinde numunelerin deney sıcaklığına tam olarak ulaşabilmesi için numuneler UTM iklimlendirme kabininin içerisinde 4 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, deney aparatına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Deneye başlanmadan önce numunelere 90 saniye süresince 10 kPa gerilme altında statik bir ön yükleme yapılmıştır. Yükleme periyodu 1,0 sn olarak alınmıştır. Bu sürenin 500 ms'si yük etki süresi, 500 ms'si ise dinlenme süresi olarak seçilmiştir. Dinamik sünme deneyine tabi tutulan bir numune Şekil 5.23'da görülmektedir.



Şekil 5.23. Dinamik sünme deneyine tabi tutulan bir numune

Çalışmada numunelere 10.000 yük tekrarına kadar dinamik yükleme uygulanmıştır. Toplam kalıcı birim şekil değiştirme, sünme ve esneklik modülü değerleri UTM cihazının

yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Akma sayısı değerleri ise Bausano ve Williams tarafından önerilen şekilde hesaplanmıştır (Bausano ve Williams, 2007). Bausano ve Williams, yapmış oldukları çalışmada 6. derece polinom fonksiyonu uygulandığında “sünme modülü * yük tekrar sayısı – yük tekrar sayısı” grafiğine en uygun denklemin elde edildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmada ikinci derece polinom fonksiyonu uygulandığında da 6. derece polinom fonksiyonundan elde edilen değerlere yakın akma sayısı değerlerinin elde edildiği belirlenmiş ve 2. derece polinom fonksiyonunun da kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu yöntemle göre düşey eksenle “sünme modülü * yük tekrar sayısı” yatay eksenle ise yük tekrar sayısı olacak şekilde grafikler çizilmiştir. Grafiğe 2. derece polinom fonksiyonu uygulanarak eğri modellenmiş ve modellere uygun denklemler tespit edilmiştir. Denklemin türevi alınıp sıfıra eşitlenerek akma sayısı olarak ifade edilen pik noktaya karşılık gelen yük tekrar sayıları belirlenmiştir. Saf karışımın akma sayısının bulunmasına bir örnek Şekil 5.24'te görülmektedir.



Şekil 5.24. Karışımların akma sayısının bulunmasına bir örnek

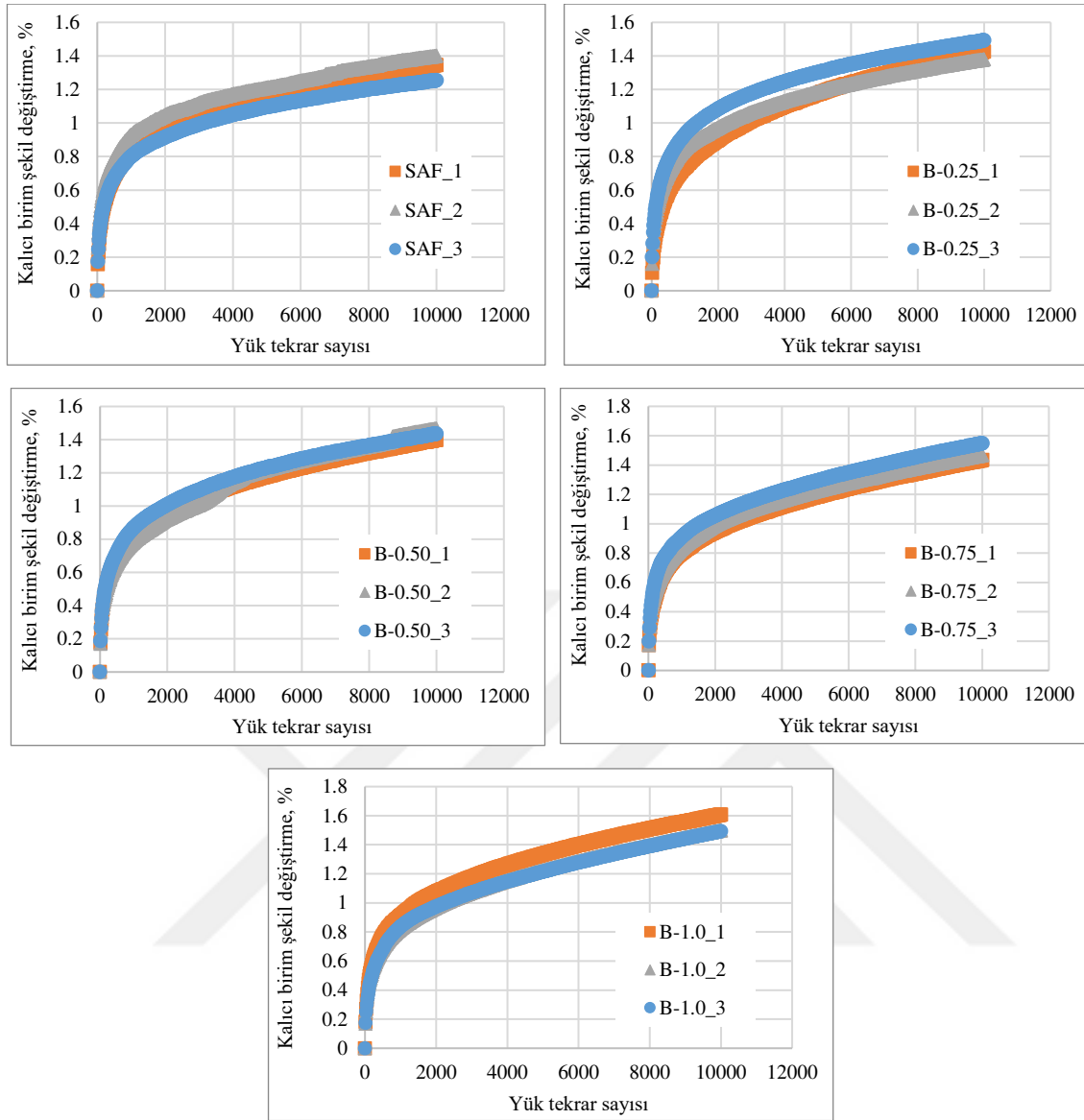
Çalışmada 10.000 yük tekrar sayısı ve akma sayısı dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Bütün karışımların akma sayılarının yanı sıra 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme, esneklik ve sünme modülü değerleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.4-5.5'te verilmiştir. Karışımların yük tekrar sayısı-kalıcı birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 5.25-5.26'da verilmiştir.

Tablo 5.4. Saf ve atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışım numunelerinin dinamik sünme deney sonuçları

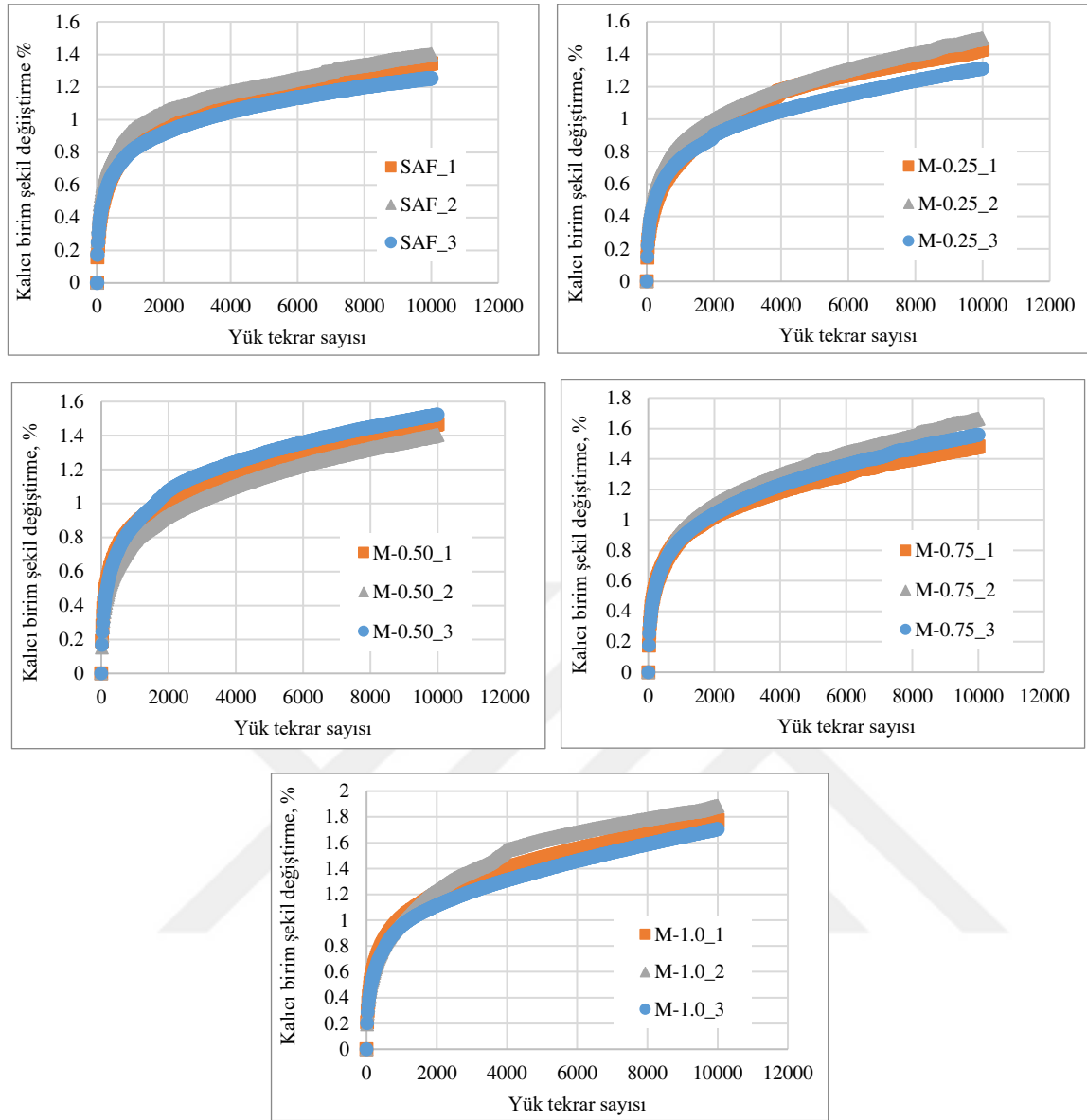
Karışım türü	Numune No	Akma Sayısı Denklemi	Akma Sayısı	10.000 yük tekrarındaki ϵ_c (%)	10.000 yük tekrarındaki Esneklik Modülü (MPa)	10.000 yük tekrarındaki Sünme Modülü (MPa)
PG 70-28	1	$y = -0,0015x^2 + 66,013x + 22339$	22004	1,344	672,1	54,09
	2	$y = -0,0014x^2 + 64,071x + 14620$	22883	1,402	706,5	51,82
	3	$y = -0,0014x^2 + 68,954x + 22331$	24626	1,255	702,4	58,13
	Ort.		23171	1,334	693,7	54,68
B-%0,25	1	$y = -0,0017x^2 + 63,676x + 34591$	18728	1,426	681,3	51,10
	2	$y = -0,0014x^2 + 63,652x + 23124$	22733	1,380	683,4	52,50
	3	$y = -0,0011x^2 + 57,442x + 20228$	26110	1,493	650,0	48,59
	Ort.		22524	1,433	671,6	50,73
B-%0,50	1	$y = -0,0016x^2 + 64,475x + 23586$	20184	1,397	687,3	51,83
	2	$y = -0,0017x^2 + 62,832x + 30580$	18480	1,467	686,1	49,32
	3	$y = -0,0013x^2 + 60,775x + 22571$	23375	1,436	616,2	50,33
	Ort.		20680	1,433	663,2	50,49
B-%0,75	1	$y = -0,0018x^2 + 65,034x + 24626$	18065	1,434	626,7	50,05
	2	$y = -0,0016x^2 + 62,639x + 23604$	19575	1,468	624,4	49,00
	3	$y = -0,0016x^2 + 60,411x + 19083$	18878	1,547	619,9	46,70
	Ort.		18839	1,483	623,7	48,58
B-%1,0	1	$y = -0,0015x^2 + 57,387x + 21664$	19029	1,608	577,1	44,67
	2	$y = -0,0018x^2 + 63,135x + 24660$	17538	1,499	609,0	47,90
	3	$y = -0,0019x^2 + 64,227x + 22951$	16902	1,494	642,1	48,24
	Ort.		17823	1,534	609,4	46,94

Tablo 5.5. Saf ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışım numunelerinin dinamik sünme deney sonuçları

Karışım türü	Numune No	Akma Sayısı Denklemi	Akma Sayısı	10.000 yük tekrarındaki ϵ_c (%)	10.000 yük tekrarındaki Esneklik Modülü (MPa)	10.000 yük tekrarındaki Sünme Modülü (MPa)
PG 70-28	1	$y = -0,0015x^2 + 66,013x + 22339$	22004	1,344	672,1	54,09
	2	$y = -0,0014x^2 + 64,071x + 14620$	22883	1,402	706,5	51,82
	3	$y = -0,0014x^2 + 68,954x + 22331$	24626	1,255	702,4	58,13
	Ort.		23171	1,334	693,7	54,68
M- %0,25	1	$y = -0,0011x^2 + 58,461x + 35939$	26573	1,430	666,4	50,70
	2	$y = -0,0016x^2 + 61,515x + 23008$	19223	1,496	669,7	48,23
	3	$y = -0,0017x^2 + 68,81x + 26528$	20238	1,312	683,1	54,87
	Ort.		22011	1,413	673,1	51,27
M- %0,50	1	$y = -0,0016x^2 + 62,199x + 21751$	19437	1,469	647,2	49,30
	2	$y = -0,0016x^2 + 64,57x + 28393$	20178	1,403	633,3	51,66
	3	$y = -0,0012x^2 + 56,459x + 23678$	23525	1,523	661,3	47,20
	Ort.		21047	1,465	647,3	49,39
M- %0,75	1	$y = -0,0015x^2 + 60,695x + 21529$	20232	1,482	644,6	48,73
	2	$y = -0,0015x^2 + 55,804x + 20823$	18601	1,665	603,1	42,73
	3	$y = -0,0016x^2 + 58,918x + 23428$	18412	1,450	646,9	46,49
	Ort.		19082	1,532	631,5	45,98
M- %1,0	1	$y = -0,0014x^2 + 51,763x + 19503$	18487	1,776	583,6	40,45
	2	$y = -0,0009x^2 + 34,138x + 27132$	18966	1,885	663,7	38,35
	3	$y = -0,0018x^2 + 62,092x + 22191$	16605	1,705	611,1	42,38
	Ort.		18019	1,789	619,5	40,39

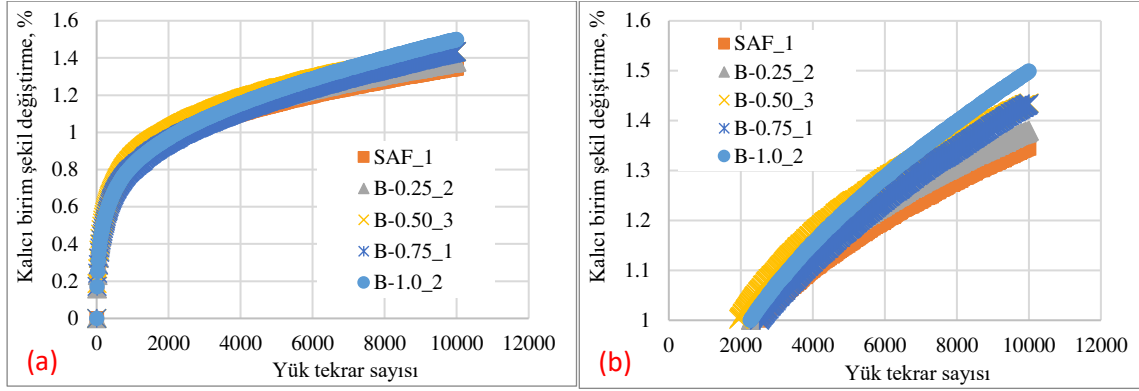


Şekil 5.25. Saf ve atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

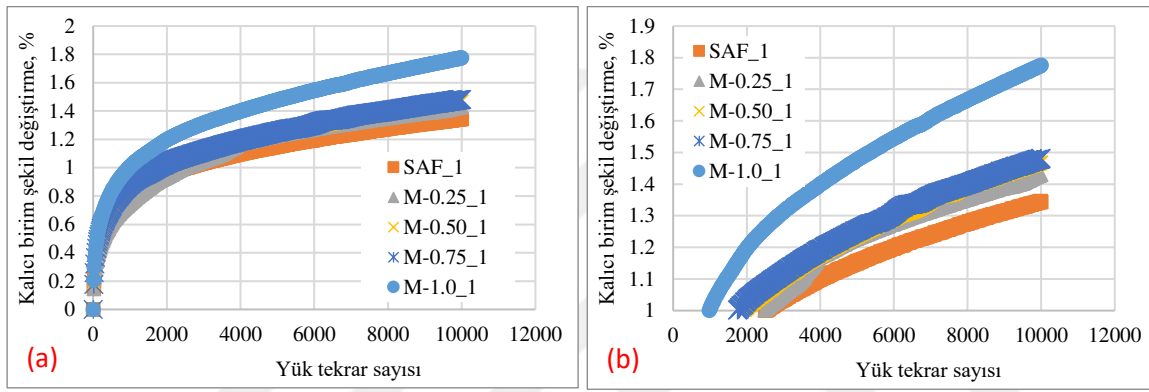


Şekil 5.26. Saf ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değişimi-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 5.27(a)'da görülmektedir. Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değişimi-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 5.28(a)'da görülmektedir. Grafiklerin daha rahat görülebilmesi amacıyla dikey eksen büyütülerek (Şekil 5.27(b)-5.28(b))'de verilmiştir.

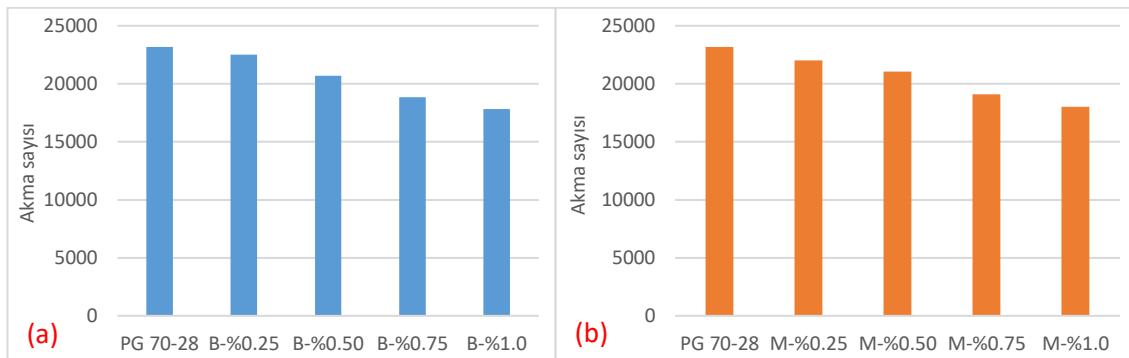


Şekil 5.27. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 5.28. Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarına kadar kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’de görüldüğü üzere kapsül kullanımı ile kalıcı birim şekil değiştirme miktarları artmıştır. Ayrıca şekillerde görüldüğü üzere hiçbir karışımda 3. bölgeye geçilmemiştir. Karışımların dinamik sünme deney sonuçlarını daha rahat değerlendirebilmek amacıyla karışımların akma sayısı değerleri Şekil 5.29’da, 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri Şekil 5.30’da, esneklik modülü değerleri Şekil 5.31’de ve sünme modülü değerleri Şekil 5.32’de görülmektedir.

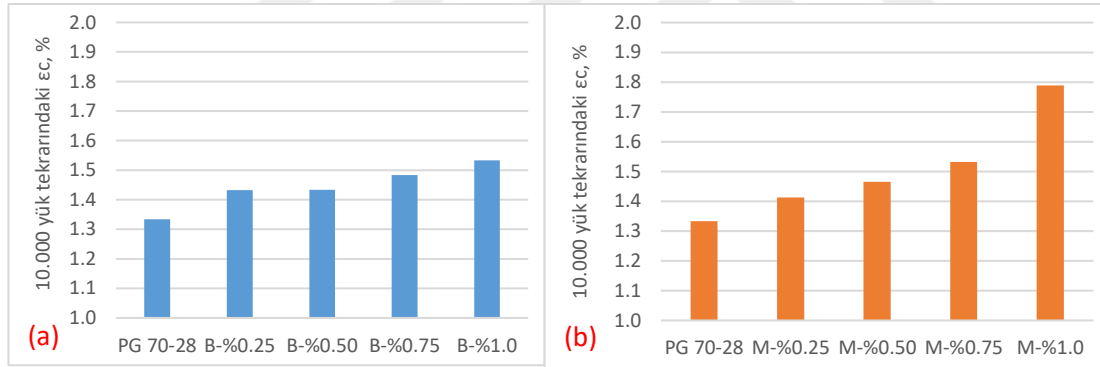


Şekil 5.29. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların akma sayısı değerleri

10.000 yük tekrarı sonucunda karışımlarda üçüncü bölgeye geçiş olmamasına rağmen çizilen “yük tekrar sayısı-sünme modülü*yük tekrar sayısı” grafiğine uygulanan 2. derece polinom denkleminde faydalanılarak akma sayısı değerleri belirlenmiştir. Şekil 5.29 incelendiğinde hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda kapsül içeriği arttıkça akma sayısı değerleri dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımları azalmıştır.

Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile akma sayısı saf karışıma göre %2,79; %0,50 oranında kapsül içeren karışımlarda %10,75; %0,75 oranında kapsül içeren karışımlarda %18,69 ve %1,0 oranında kapsül içeren karışımlarda %23,08 oranında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsülden karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması ile akma sayısının kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %5,00; %9,17; %17,65 ve %22,23 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir.

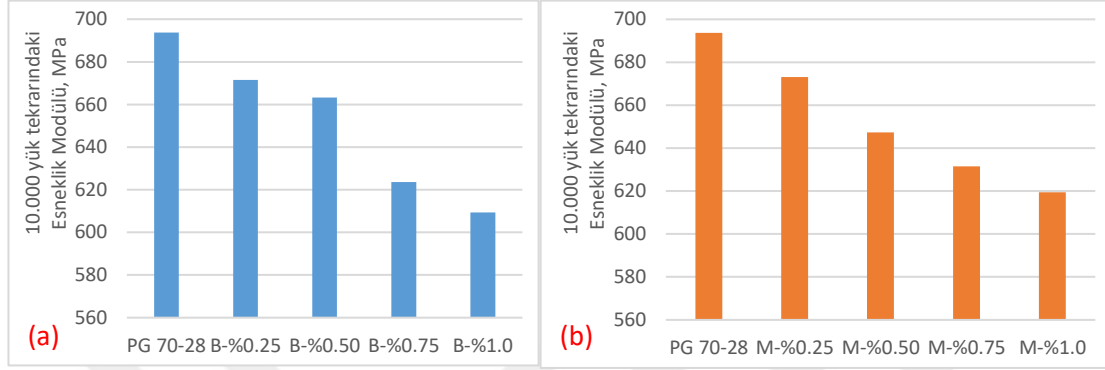
Kapsül türü ve oranı değerlendirildiğinde kapsül kullanımı ile özellikle %0,75 ve %1,0 içeriklerinde akma sayılarının önemli oranda azaldığı, yüksek kapsül içeriklerinde atık madeni yağ içeren kapsüllerin bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımı daha fazla olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.



Şekil 5.30. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri

Karışımların 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri incelendiğinde kapsül kullanımı ile karışımlarda oluşan kalıcı deformasyon oluşumunun arttığı belirlenmiştir. Bitümlü sıcak karışımlara 10.000 yük tekrarı uygulanması ile en fazla kalıcı birim şekil değiştirme hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %1,0 içeriğinde meydana gelmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül kullanılması ile 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirmenin kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %7,45; %7,47; %11,20 ve %15,00 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Atık madeni yağ içeren

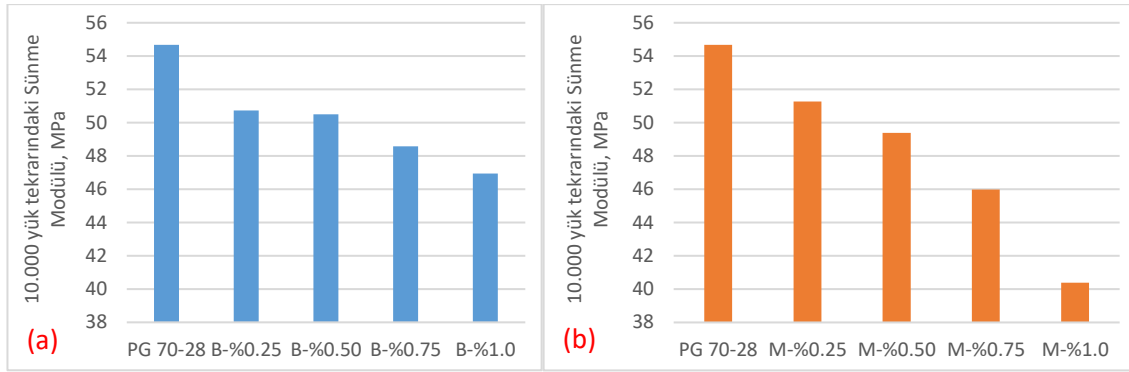
kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme saf karışıma göre %5,92; %0,50 oranında kapsül içeren karışımlarda %9,85; %0,75 oranında kapsül içeren karışımlarda %14,90 ve %1,0 oranında kapsül içeren karışımlarda %34,12 oranında artmıştır.



Şekil 5.31. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarındaki esneklik modülü değerleri

Elastikiyetin bir göstergesi olan esneklik modülü değerleri incelendiğinde (Şekil 5.31) ise en yüksek esneklik modülü değerine saf karışımın, en düşük değerlere ise hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %1,0 kapsül içeriğinde hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Esneklik modülünün yüksek olması elastik birim şekil değiştirmelerin düşük olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla esneklik modülü düşük olan karışımlar daha elastik davranış sergilemektedir.

Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile esneklik modülü değeri saf karışıma göre %3,19; %0,50 oranında kapsül içeren karışımlarda %4,39; %0,75 oranında kapsül içeren karışımlarda %10,09 ve %1,0 oranında kapsül içeren karışımlarda %12,15 oranında azalmış dolayısıyla esneklik miktarı artmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsülde karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması ile esneklik modülü değeri kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %2,97; %6,69; %8,96 ve %10,70 oranlarında azalmış dolayısıyla esneklik miktarı artmıştır.



Şekil 5.32. Atık bitkisel (a) ve madeni (b) yağ içeren kapsül kullanılan karışımların 10.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerleri

Sünme modülü değerleri gerilmenin kalıcı birim şekil değiştirme değerlerine oranlanması ile elde edilmektedir. Bu nedenle Şekil 5.30'da verilen kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin yüksek olduğu karışımların sünme modülü değerleri düşük çıkmıştır. Şekil 5.32'de görüldüğü üzere en yüksek sünme modülü değerine dolayısıyla en yüksek kalıcı deformasyon karşı dayanıma saf bitüm ile hazırlanan karışımın en düşük değere dolayısıyla kalıcı deformasyon oluşumuna karşı en düşük dayanıma ise %1,0 oranında atık bitkisel ve madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül kullanılması ile 10.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerinin kapsül içermeyen karışıma göre sırasıyla %7,22; %7,66; %11,15 ve %14,16 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Atık madeni yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile 10.000 yük tekrarındaki sünme modülü değeri saf karışıma göre %6,24; %0,50 oranında kapsül içeren karışımlarda %9,68; %0,75 oranında kapsül içeren karışımlarda %15,90 ve %1,0 oranında kapsül içeren karışımlarda %26,13 oranında azalmıştır.

Dinamik sünme deneylerinden elde edilen akma sayıları ve sünme modülü değerleri incelendiğinde kapsül kullanımı ile karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Kapsül türleri karşılaştırıldığında atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda kalıcı deformasyona karşı dayanımın atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlara göre daha fazla azaldığı belirlenmiştir. Kapsül kullanım oranları değerlendirildiğinde karışım ağırlığınca %0,25 ve %0,50 içeriklerinde saf karışıma göre kalıcı deformasyona karşı dayanım parametrelerindeki azalmanın %10'un altında olduğu, %0,75 ve %1,0 kapsül içeriklerinde ise kalıcı deformasyona karşı dayanım parametrelerinde önemli oranda düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Dinamik sünme deneylerinden hem atık bitkisel yağ içeren hem de atık madeni yağ içeren kapsüllerden en fazla %0,50 oranında kullanılabileceği söylenebilmektedir. Elastik modül değerlerinden kapsül kullanımı ile karışımların elastikiyetinin arttığı, bu durumun kapsüllerin polimerik yapısından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

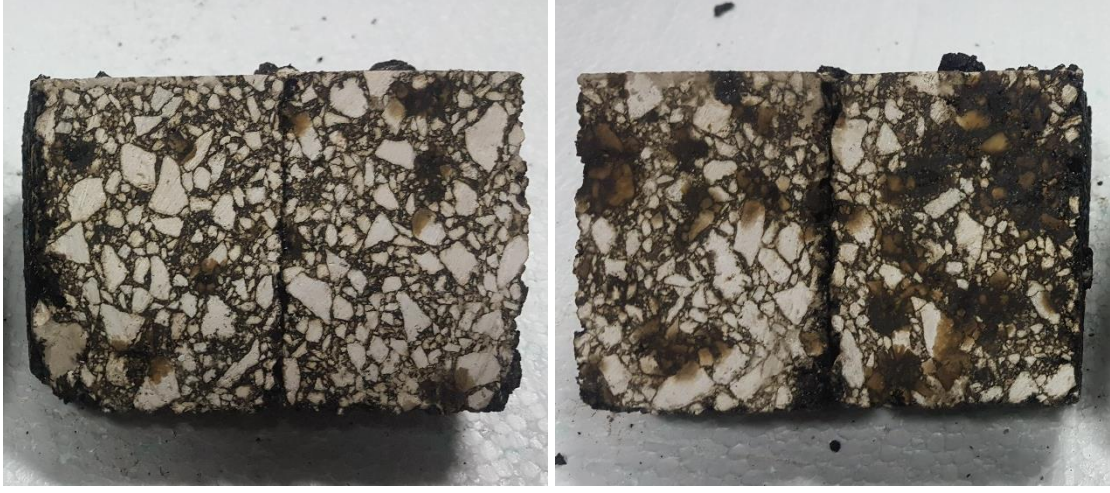
5.7. Yarım Daire Numunelerinin Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi

Çalışmada, lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve elastik-plastik kırılma mekaniği (EPKM) prensiplerine göre deneyler yapılarak karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları değerlendirilmiştir. LEKM prensiplerine uygun olarak EN 12697-44 standardına göre yarım daire numuneler 0°C sıcaklıkta 5 mm/dk deformasyon hızında kırılmıştır. EPKM yaklaşımına göre ise yarım daire numuneler 25°C sıcaklıkta 0,5 mm/dk deformasyon hızında kırılmıştır. Çalışmada, PG 70-28 saf bitümü ile hazırlanan karışım ile atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) ve atık madeni yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) kullanılan 9 farklı karışım yoğurtmalı pres ile 150 mm çapında, 5 cm yüksekliğe ve ± 1 boşluk oranına sahip olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Numuneler, döner testere ile yarım daire şekline sahip iki parçaya bölünmüştür. Ardından tezgah tipi testere kullanılarak numunelere 1 ve 2 cm yüksekliğinde çentikler açılmıştır (Şekil 5.33).

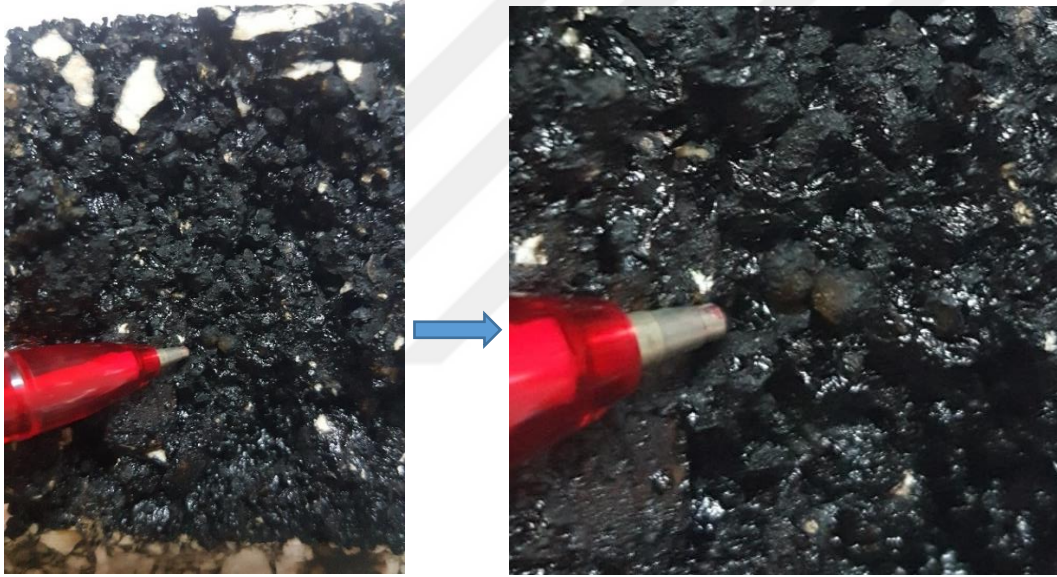


Şekil 5.33. Numunelerin yarım daire şekline getirilmesi ve çentik açılması

Numuneler kesilirken ısınmayı engellemek amacıyla su ile soğutulduğundan kesme işleminden sonra 2 gün oda şartlarında güneş görmeyecek şekilde kurumaya bırakılmıştır. Ağırlık kontrolü ile 2 günlük beklemenin kuruma için yeterli olduğu belirlenmiştir. Daha sonra numunelerin bir kısmı lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımlarına uygun olarak EN 12697-44 standardında tanımlanan yarım daire eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Ardından 1 ve 2 cm çentik derinliğine sahip numuneler elastik-plastik kırılma mekaniği yaklaşımlarına uygun olarak J-integral deneyine tabi tutulmuştur. Deneylerden sonra %0,25 ve %1,00 kapsül içeren numunelerin kesit görüntüleri Şekil 5.34, örnek bir numune içindeki kapsül görüntüsü ve büyütülmüş hali Şekil 5.35’de verilmiştir.



Şekil 5.34. %0,25 (a) ve %1,0 (b) kapsül içeren numunelerin kesit görüntüleri



Şekil 5.35. Örnek bir numune içindeki kapsül görüntüsü ve büyütülmüş hali

Deney numunelerinin bir kısmı Şekil 5.36, 1 ve 2 cm çentik içeren numuneler Şekil 5.37’de verilmiştir.



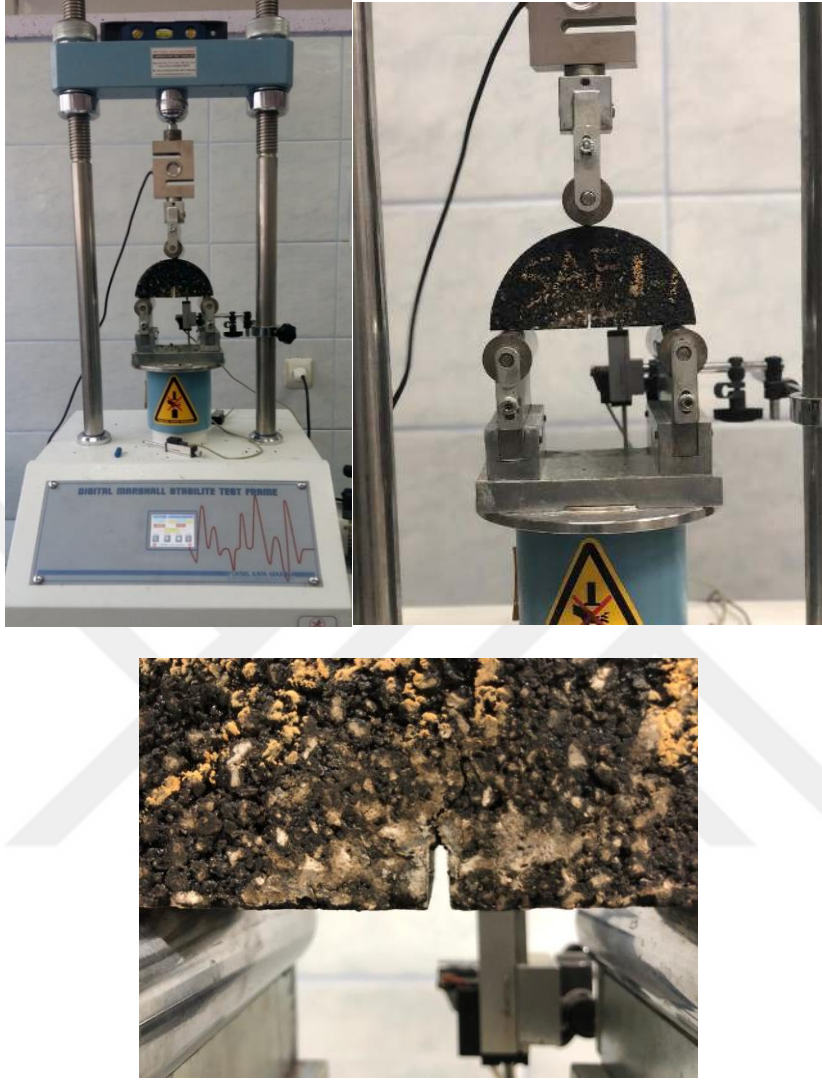
Şekil 5.36. Deney numunelerinin bir kısmı



Şekil 5.37. Değişik yükseklikte çentiğe sahip numuneler

Deneylerde hızı ayarlanabilen Marshall stabilite aleti kullanılmıştır. Cihaz 50 kN kapasiteli olup hızı 0,000 ile 75,000 aralığında ayarlanabilmektedir. Dijital ekranı sayesinde hız ayarlanabilmekte, geri kalan bütün kontrol cihazın kendi yazılımından yapılabilmektedir. Cihazda bulunan veri toplama sistemi sayesinde her bir değerden saniyede yaklaşık 10 veri bilgisayara

aktarılabilmektedir. Cihaz ve deney düzeneği Şekil 5.38’de, dijital ekran ise Şekil 5.39’da görülmektedir.

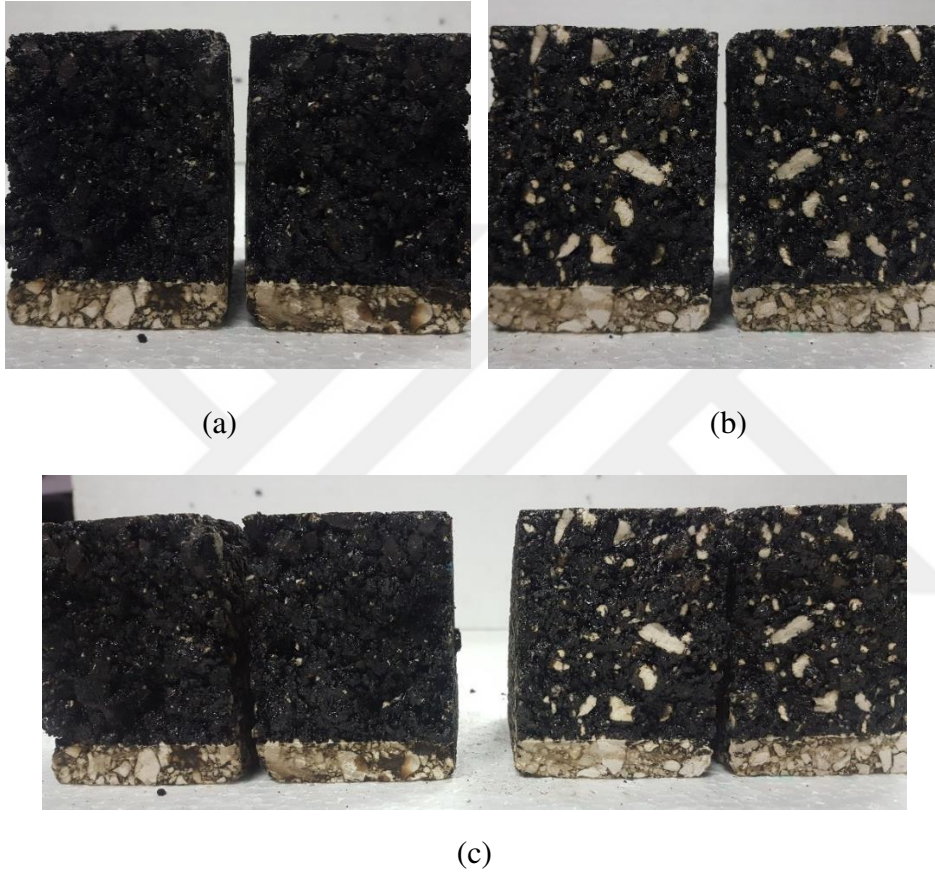


Şekil 5.38. Yarım daire eğilme deney düzeneği



Şekil 5.39. Hızı ayarlanabilir Marshall cihazının dijital göstergesi

Deneylerden sonra kırılmanın meydana geldiği yüzeyler incelendiğinde yükleme hızı ve sıcaklığa bağlı olarak 25°C’de yapılan SCB deneylerinde intergranüler (taneler arası) kırılma meydana gelirken 0°C’de yapılan yarım daire eğilme deneylerinde transgranüler (taneleri keserek) kırılma meydana gelmiştir. Şekil 5.40(a)’da görülen numuneler 25°C’de denenen numunelere, Şekil 5.40(b)’de görülen numuneler ise 0°C’de denenen numunelere örnek olarak verilmiştir. Şekil 5.40(c)’de görüldüğü üzere düşük sıcaklıklarda (0°C) transgranüler, 25°C’de ise intergranüler kırılma meydana gelmiştir.



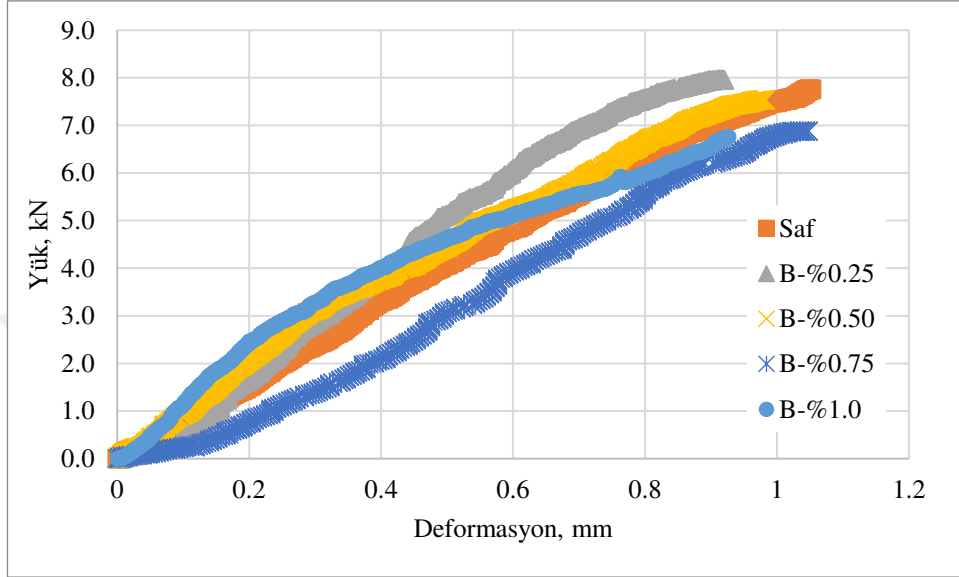
Şekil 5.40. Numunelerde görülen intergranüler (a) ve transgranüler (b) kırılmalar

5.7.1. LEKM Yaklaşımıyla Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımın Tespiti (EN 12697-44, 2019)

PG 70-28 saf bitümü ile hazırlanan karışım ile atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) ve atık madeni yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) içeren 9 farklı karışımlardan üçer numune 6 saat süresince 0°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Ardından, 1 cm çentik derinliğine sahip olan bu numuneler, yükleme aletinde 5 mm/dk yükleme hızında kırılmıştır. Elde edilen verilerden maksimum düşey deformasyon ve maksimum yük değerleri elde edilmiştir. Maksimum şekil değiştirme (ϵ_{mak}) Formül 4.22 kullanılarak, maksimum gerilme değeri (σ_{mak})

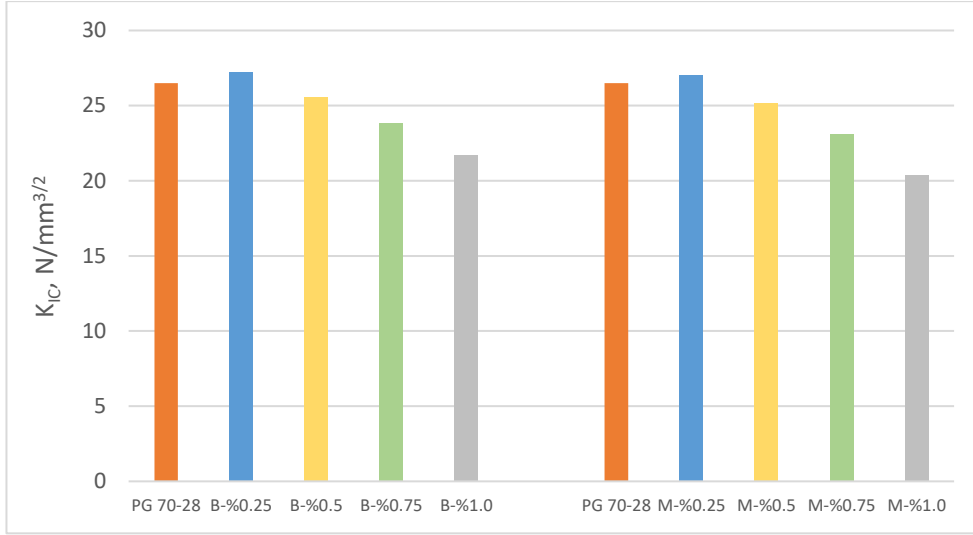
Formül 4.23 kullanılarak, kırılma tokluğu değerleri (K_{IC}), Formül 4.24 kullanılarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu hesabında çatlak yüksekliği $9 \text{ mm} < a < 11 \text{ mm}$ ve numune yüksekliği $70 \text{ mm} < W < 75 \text{ mm}$ olduğundan $f\left(\frac{a}{W}\right) = 5,956$ olarak alınmıştır.

Örnek olarak atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlardan elde edilen yük-deformasyon eğrilerine örnek Şekil 5.41’de verilmiştir.



Şekil 5.41. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların yük-deformasyon eğrileri

Elde edilen değerlerden yük-deformasyon eğrisine doğru parçası modeli uygulayarak karışımlardan elde edilen en düşük belirtme katsayısının (R^2) 0,95’in üzerinde olduğu belirlenmiştir. Yük artışı ile deformasyon arasında lineer yakın bir değişimin olması ayrıca bütün numunelerde Şekil 4.16(a)’da olduğu gibi maksimum yükte kırılmanın gerçekleşmesi, lineer elastik kırılma mekaniğinin uygulanabileceğini göstermektedir. Kapsül kullanımı ile kırılma tokluğu (K_{IC}) arasındaki ilişki Şekil 5.42’de ve kapsül kullanımı ile maksimum şekil değiştirme arasındaki ilişki ise Şekil 5.43’te verilmiştir.

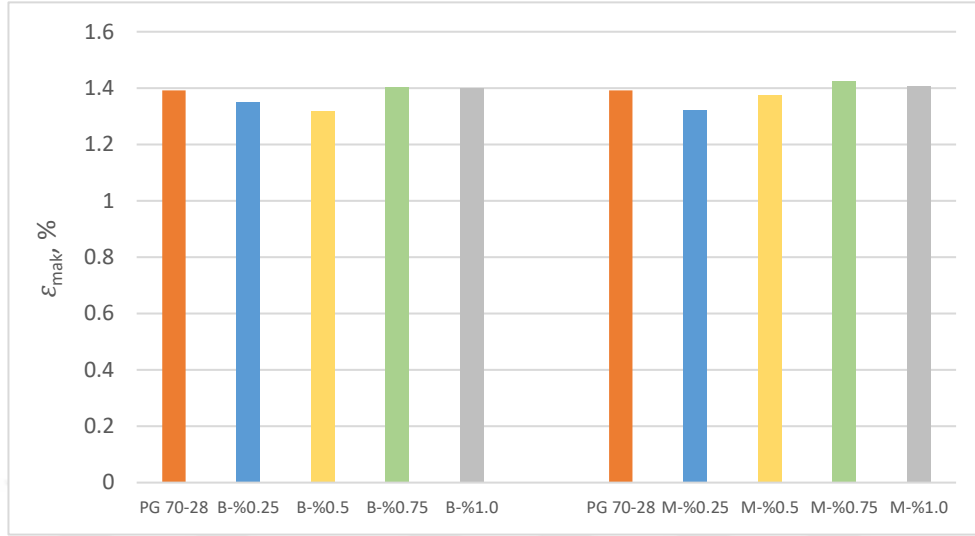


Şekil 5.42. Karışımların kırılma tokluğu (K_{IC}) değerleri

Şekil 5.42 incelendiğinde hem atık bitkisel hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25 kapsül içeriğinde kırılma tokluğu değerlerinin saf karışımdan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Saf karışım, %0,25 ve %0,50 oranlarında atık bitkisel yağ ve atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların kırılma tokluğu değerlerinin 25 N/mm² değerinin üstünde olduğu tespit edilmiştir. Hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsüllerden yüksek oranlarda (karışım ağırlığınca %0,75 ve %1,0) kullanılması durumunda kırılma tokluğu değerlerinin saf karışıma göre önemli oranda düşmüştür. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile kırılma tokluğu değeri saf karışıma göre %2,61 oranında artarken atık madeni yağ içeren kapsüllerden aynı oranda kullanılması durumunda %2,08 oranında artış meydana gelmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,50, %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması durumunda kırılma tokluğu değeri saf karışıma göre sırasıyla %3,63; %10,08 ve %18,14 oranlarında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması durumunda ise kırılma tokluğu değeri saf karışıma göre sırasıyla %5,08; %12,78 ve %23,26 oranlarında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanımının atık madeni yağ içeren kapsül kullanımına göre kırılma tokluğu açısından daha olumlu sonuçlar sağladığı tespit edilmiştir. Hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsüllerden en fazla %0,50 oranında kullanılmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

Yarım daire numuneler üzerinde yapılan kırılma tokluğu deneyi ile bitümlü sıcak karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları belirlendiğinden deney sıcaklığı ve malzeme davranışı göz önüne alındığında düşük ısı çatlaklarının ilerleyişine karşı veya çeşitli nedenlerle oluşmuş çatlakların düşük sıcaklıklarda ilerleyişine karşı en yüksek dayanımın atık bitkisel ve

madeni yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması durumunda elde edilebileceği söylenebilmektedir.



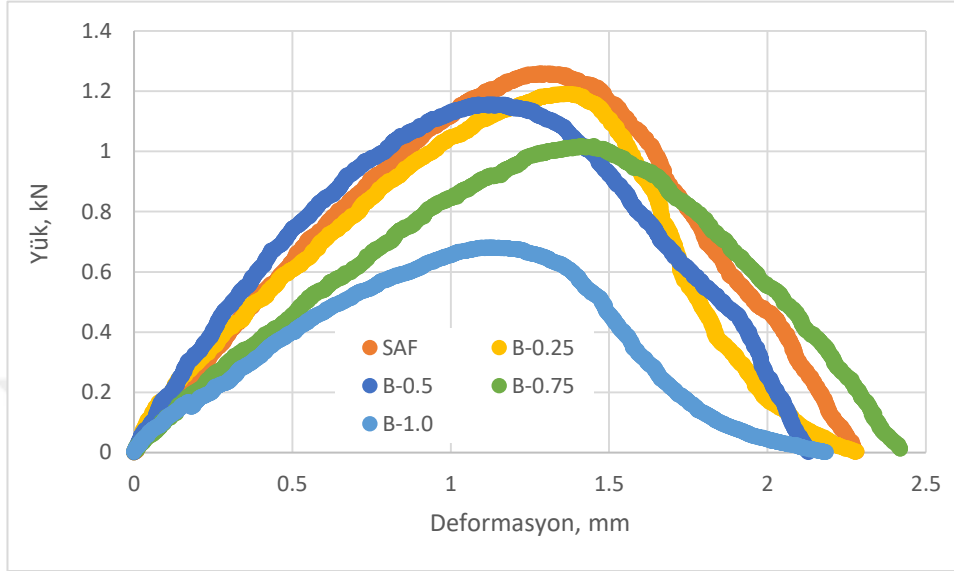
Şekil 5.43. Kapsül kullanımı ile maksimum şekil değiştirme (ϵ_{mak}) ilişkisi

Şekil 5.43 incelendiğinde bütün karışımların maksimum şekil değiştirme değerlerinin birbirine yakın olduğu, genel olarak %1,2-%1,4 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Hem atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda en yüksek şekil değiştirme değerlerine %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük şekil değiştirme değerlerine ise atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,50 kapsül içeren karışımların, atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda ise %0,25 kapsül içeren karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan karışımlarda düşük sıcaklık çatlağı meydana gelinceye kadar benzer deformasyon oluşacağı, en yüksek deformasyona yüksek oranda kapsül içeren karışımların sahip olacağı belirlenmiştir.

5.7.2. EPKM Yaklaşımıyla Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımın Tespiti (J-İntegral Yöntemi)

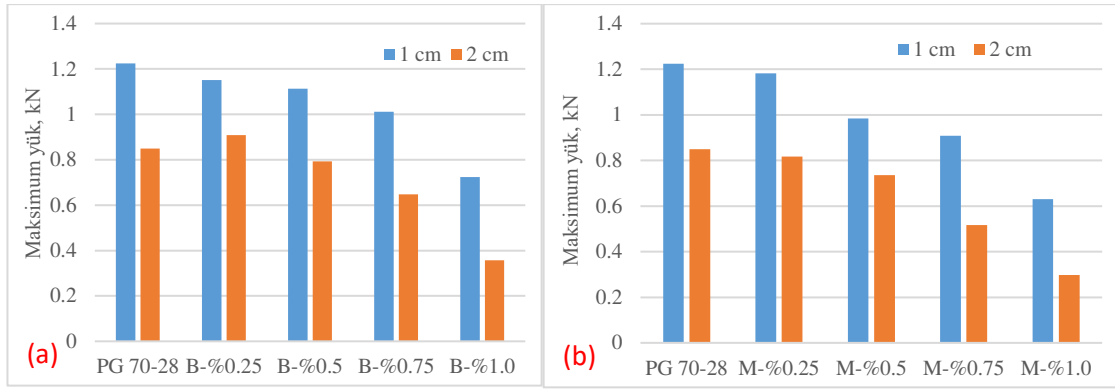
PG 70-28 saf bitümü ile hazırlanan karışım ile atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) ve atık madeni yağ içeren kapsüllerden 4 farklı oranda (karışım ağırlığınca %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0) içeren 9 farklı karışım numunelerinden 1 ve 2 cm çentik yüksekliğine sahip üçer numune 4 saat süresince 25°C sıcaklığa sahip hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmiştir. Ardından yükleme aletinde 0,5 mm/dk yükleme hızında kırılmıştır. Deney süresince hızı ayarlanabilir Marshall cihazında bulunan veri toplama sistemi sayesinde her saniyedeki düşey deformasyon ve yük değerleri elde edilmiştir. Bu

değerler yardımıyla yük–deformasyon eğrileri altında kalan alan (kırılmaya neden olan toplam şekil değiştirme enerjisi) elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen verilere örnek olarak 1 cm çentiğe sahip atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan numunelerin yük–deformasyon eğrileri Şekil 5.44’de verilmiştir.



Şekil 5.44. Atık bitkisel yağ kullanılan kapsül içeren 1 cm çentiğe sahip numunelerin yük deformasyon ilişkisi

1 ve 2 cm çentik yüksekliğine sahip, atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların maksimum yük değerlerinin kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.45(a)’da, atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların maksimum yük değerlerinin kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.45(b)’de verilmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların yük boşaldığı andaki deformasyon değerlerinin kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.46(a)’da, atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların yük boşaldığı andaki deformasyon değerlerinin kapsül kullanımı ile değişimi Şekil 5.46(b)’de verilmiştir. Atık bitkisel ve madeni yağ içeren karışımların yük–deformasyon eğrisi altındaki toplam alanın kapsül kullanımıyla değişimi Şekil 5.47(a) ve Şekil 5.47(b)’de verilmiştir.



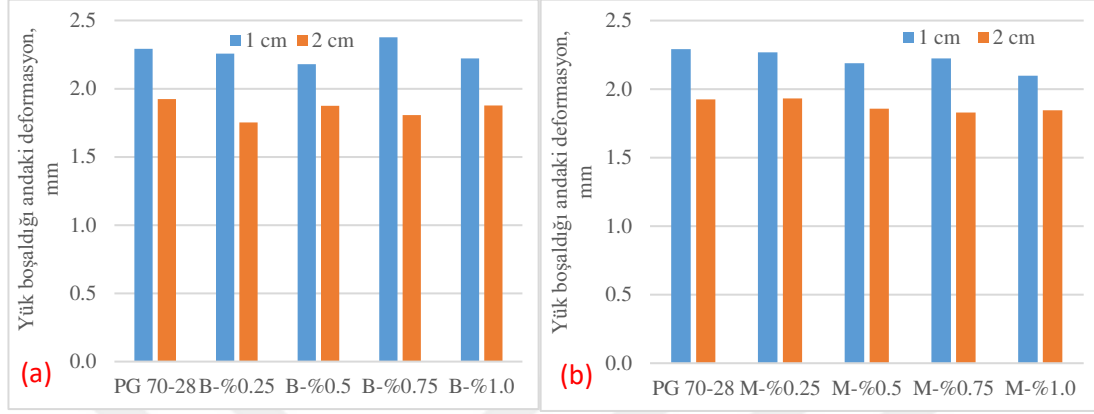
Şekil 5.45. Atık bitkisel yağ içeren (a) ve atık madeni yağ içeren (b) kapsül kullanılan karışımların maksimum yük – kapsül içeriği ilişkisi

Şekil 5.45'te görüldüğü üzere 1 cm çentik derinliğinde kapsül kullanımı ile elde edilen maksimum yük değerleri azalmıştır. Ayrıca çentik yüksekliği 1 cm'den 2 cm'ye çıktığında maksimum yük değerleri azalmıştır. 1 cm çentik derinliğinde atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında saf karışıma göre maksimum yük değerleri %6,0; %9,1; %17,4 ve %40,8 oranlarında azalmıştır. 1 cm çentik derinliğinde atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25 oranında kapsül kullanımı ile saf karışıma göre maksimum yük değeri %3,5, %0,50 oranında kapsül kullanımı ile %19,6; %0,75 oranında kapsül kullanımı ile %25,8 ve %1,0 oranında kapsül kullanımı ile %48,5 oranında maksimum yük değeri azalmıştır.

2 cm çentik derinliğine sahip numunelerde sadece %0,25 oranında atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda maksimum yük değeri artmıştır (saf karışıma göre %7,0 artış). Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül kullanımı ile 2 cm çentik derinliğinde maksimum yük değerleri saf karışıma göre sırasıyla %6,6; %23,7 ve %58,0 oranlarında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül kullanımı ile 2 cm çentik derinliğinde maksimum yük değerleri saf karışıma göre %3,9; %13,4; %39,1 ve %65,0 oranlarında azalmıştır.

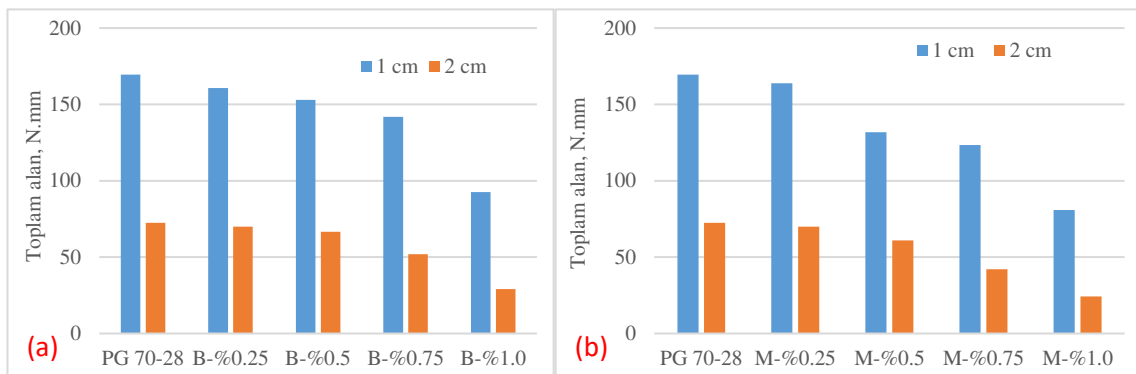
Elde edilen sonuçlardan genellikle çentik yüksekliğinin artması ile maksimum yük değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Atık bitkisel ve madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlar karşılaştırıldığında 1 cm çentik derinliğinde %0,25 kapsül içeriğinde atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımların atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlara göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Diğer bütün kapsül içeriklerinde hem 1 cm hem de 2 cm çentik derinliklerinde atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımların maksimum yük değerinin atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlara göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda

%0,25 ve %0,50 oranlarında atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda ise %0,25 kapsül oranında maksimum yük değerindeki azalmanın saf karışıma göre %10'un altında olduğu belirlendiğinden bu oranların maksimum yük değerleri açısından en uygun oranlar oldukları düşünülmektedir.



Şekil 5.46. Atık bitkisel yağ içeren (a) ve atık madeni yağ içeren (b) kapsül kullanılan karışımlarda yükün boşaldığı andaki deformasyon – kapsül içeriği ilişkisi

Yükün boşaldığı andaki deformasyon değerlerinin kapsül kullanımı ile değişimi (Şekil 5.46) incelendiğinde hem atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda (Şekil 5.46(a)) hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda (Şekil 5.46 (b)) görüldüğü üzere 1 cm çentik derinliğinde yük boşaldığı andaki deformasyon değerlerinin 2-2,5 cm aralığında olduğu, 2 cm çentik derinliğinde ise 1,5-2,0 cm aralığında olduğu belirlenmiştir. Kapsül türü ve kapsül oranının yük boşaldığı andaki deformasyon değerleri üzerinde düzenli ve önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 5.47. Atık bitkisel yağ içeren (a) ve atık madeni yağ içeren (b) kapsül kullanılan karışımlarda yük – deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan – kapsül içeriği ilişkisi

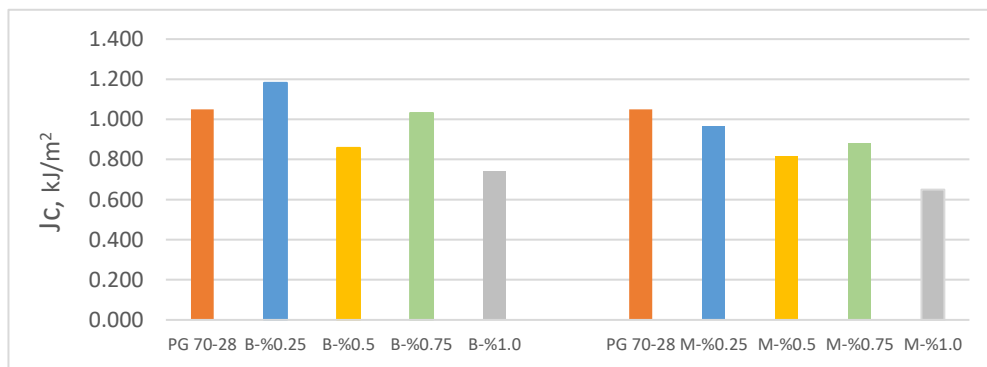
Yük–deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan değerleri incelendiğinde en yüksek toplam alan değerlerine bütün çentik yüksekliklerinde kapsül içermeyen karışımların, en düşük

değerlere ise hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsüllerden %1,0 oranında kullanıldığı karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. 1 cm çentik derinliğinde %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kapsül kullanımı ile yük-deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %5,2; %9,8; %16,3 ve %45,4 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. 2 cm çentik derinliğinde ise bu azalma oranlarının sırasıyla %3,4; %7,9; %28,4 ve %59,7 olduğu belirlenmiştir.

Atık madeni yağ içeren kapsülün karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması durumunda yük-deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan değeri kapsül içermeyen karışıma göre 1 cm çentik derinliğinde %3,3 oranında azalırken 2 cm çentik derinliğinde %3,4 oranında azalmıştır. Aynı kapsüllerden %0,50 oranında kullanılması durumunda 1 cm çentik derinliğinde %22,3; 2 cm çentik derinliğinde ise %15,8 oranında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,75 oranında kullanılması durumunda 1 cm çentik derinliğinde %27,2 oranında azalma meydana gelirken 2 cm çentik derinliğinde %42,0 oranında azalmıştır. %1,0 oranında atık madeni yağ içeren kapsül kullanılması ile 1 cm çentik derinliğinde %52,3; 2 cm çentik derinliğinde ise %66,6 oranında saf karışıma göre toplam alan değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

Yük deformasyon eğrisi altında kalan toplam alan değerleri değerlendirildiğinde hem atık madeni yağ hem de atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanımı ile toplam alan değerlerinin azaldığı, kapsül içeriğinin artması ile bu alan değerlerinin sürekli olarak azaldığı belirlenmiştir. Yük deformasyon eğrisi altında kalan alan değeri numunenin yük taşıma kapasitesi sonlanıncaya kadar enerji depolama yeteneği (tokluk) ile ilgili olduğundan özellikle atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,75 ve %1,0 içeriklerinde atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda ise %0,50; %0,75 ve %1,0 kapsül içeriklerinde çatlak ilerlemesine karşı dayanımın önemli oranda azaldığı belirlenmiştir.

Formül 4.26 yardımıyla kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri belirlenmiştir. Çalışmada 1–2 cm çentik yükseklik aralığı kullanılarak kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen değerler Şekil 5.48’de verilmiştir.

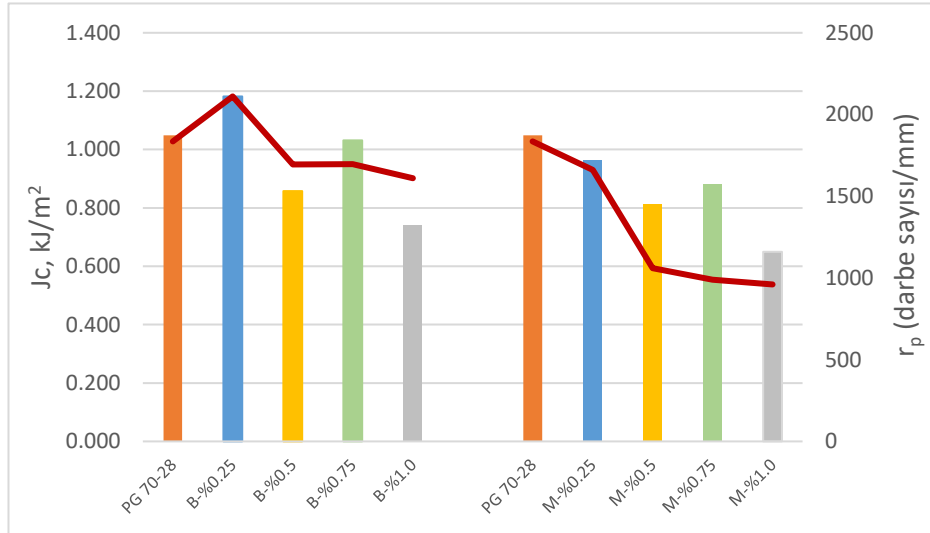


Şekil 5.48. Karışımların J_c değerleri

Şekil 5.48 incelendiğinde bütün karışımlar içerisinde en yüksek J_c değerine atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlardan %0,25 oranında kapsül kullanıldığı karışımın sonrasında ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda kritik enerji salıverme hızlarının önemli oranda azaldığı belirlenmiştir. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,25 oranında kullanılan karışımda J_c değeri saf karışıma göre %12,7 oranında artmıştır. Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması ile J_c değerleri saf karışıma göre sırasıyla %18,3; %1,7 ve %29,3 oranlarında azalmıştır. Atık madeni yağ içeren kapsüllerden %0,25; %0,50; %0,75 ve %1,0 oranlarında kullanılması ile J_c değerleri saf karışıma göre sırasıyla %8,1; %22,4; %15,9 ve %38,1 oranlarında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan en etkin karışımın atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,25 oranında kullanılması ile elde edildiği, en olumsuz sonucun ise atık madeni yağ içeren kapsüllerden %1,0 oranında kullanılması ile meydana geldiği tespit edilmiştir.

Elastik-plastik kırılma mekanizması yaklaşımı deney sonuçları değerlendirildiğinde kapsül kullanımı ile genel olarak karışımların çatlak oluşumuna karşı dayanımlarının azaldığı, atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,25 ve %0,50, atık madeni yağ içeren kapsüllerden ise en fazla %0,25 oranında kullanılabileceği tespit edilmiştir.

İndirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda elde edilen çatlak ilerleme oranı (r_p) değerleri ile kritik enerji salıverme hızı (J_c) değerleri bitümlü sıcak karışımların çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile ilgili olduklarından karşılaştırma yapmak için bu değerler Şekil 5.49'da gösterilmiştir.



Şekil 5.49. Karışımların J_c ve r_p değerlerinin karşılaştırılması

Karışımların J_c ve r_p değerleri değerlendirildiğinde her iki değerde de atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25 kapsül içeriğinde artış meydana geldiği sonrasında

ise elde edilen değerlerin saf karışma göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışimlarda kapsül içeriğinin artması ile her iki değerin saf karışma göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Her iki deneyden elde edilen sonuçlardan 25°C sıcaklıkta karışimlar çatlak ilerlemesi açısından değerlendirildiğinde en uygun sonuca atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden karışim ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması ile elde edileceği belirlenmiştir. Bütün deney sonuçlarından, atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden %0,25 ve %0,50, atık madeni yağ içeren kapsüllerden ise %0,25 oranında kullanılması ile kabul edilebilir karışimlar elde edilebileceği söylenebilmektedir.



6. SONUÇLAR

Tez çalışmasında bitümlü sıcak karışımların kendi kendini iyileştirmesi için tercih edilen yöntemlerden mikrokapsül ilavesi ile iyileştirme yönteminde, gençleştirici olarak agrega ağırlığınca %0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 oranlarında atık bitkisel ve atık madeni yağ kullanılarak bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan bitkisel yağ, yemeklik ayçiçek yağının atığı olarak temin edilirken, madeni yağ ise otomobillerin periyodik bakımları sonrası açığa çıkan atık motor yağı olarak elde edilmiştir. Kapsül üretimi için sodyum aljinat ve kalsiyum klorit polimerleri kullanılmıştır.

Seçilen kapsüllerden 4 farklı oranda (agrega ağırlığınca %0,25; %0,50; %75 ve %1,0) kullanılarak 8 farklı bitümlü sıcak karışım numunesi ve kapsül içermeyen karışımla birlikte toplam 9 bitümlü sıcak karışım türü yoğurmalı pres kullanılarak hazırlanmıştır. Elde edilen BSK'ların hacimsel özellikleri belirlenerek bu numuneler üzerinde, Marshall stabilite ve akma, çekme dayanımı oranı, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı çapta dairesel numuneler elde edildikten sonra bu numuneler kesilmiş, 1 cm ve 2 cm boyunda çentikler açılarak yarım daire numuneleri elde edilmiştir. Bunlar üzerinde Marshall cihazı ile yarım daire eğilme deneyi gerçekleştirilmiş ve farklı yaklaşımlar ile çatlak ilerleyişine karşı dayanımları da ayrıca değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Atık bitkisel yağ içeren kapsüllerden 0.75% ve 1.0% oranlarında, atık madeni yağ içeren kapsüllerden 1.0% oranında bitümlü sıcak karışımlarda kullanılması durumunda hacimsel olarak şartname kriterlerinin sağlanmadığı, diğer karışımların ise şartname gereksinimlerini sağladığı belirlenmiştir.
- Marshall stabilite ve akma deney sonuçları değerlendirildiğinde kapsül kullanımı ile Marshall stabilite değerleri azalırken akma değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Stabilite değerlerindeki azalma ve akma değerlerindeki artışa bağlı olarak Marshall oranı değerlerinin azaldığı dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir. Stabilite değerleri azalmasına rağmen bütün karışımlar KTŞ şartname gereksinimini sağlamıştır.
- Atık madeni yağ içeren kapsüllerin kullanılması durumunda karışım stabilitelerinin atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanımına göre daha fazla olumsuz etkileneceği söylenebilmektedir. Bu duruma atık madeni yağ içeren kapsüllerin yüzey özelliklerinden ötürü bitümle iyi bir adezyon ve kohezyon sergilememesinden kaynaklanabileceği veya kapsül yüzeyinde bulunabilecek atık madeni yağ nedeniyle bitümle iyi bir adezyon sergileyememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- ITSM deneyinden elde edilen sonuçlardan kapsül kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların rijitliklerinin azalacağı, özellikle yüksek oranda kapsül kullanılması durumunda bu azalmanın etkisinin artacağı, ayrıca yüksek oranda kapsül içeren karışımların ITSM değerlerinin sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkileneceği söylenebilmektedir.
- Çekme dayanım oranı deneylerinde kapsül içeriğinin artması ile karışımların çekme dayanımı değerlerinin azalmasına rağmen bütün karışımların nem hasarına karşı dayanımın göstergesi olan çekme dayanım oranı değerlerinin şartname limitini sağladığı belirlenmiştir.
- İndirekt çekme yorulma deney sonuçları değerlendirildiğinde hem atık bitkisel hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanımının bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımını azalttığı belirlenmiştir. Yorulma ömrü açısından, her ne kadar kapsül kullanımı ile yorulma ömrü azalsa da atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25 ve %0,50; atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda ise %0,25 oranının en uygun değerler olduğu tespit edilmiştir.
- Dinamik sünme deneyleri sonucunda akma sayıları ve sünme modülü değerleri incelendiğinde kapsül kullanımı ile karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Kapsül türleri karşılaştırıldığında atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda kalıcı deformasyona karşı dayanımın atık bitkisel yağ içeren kapsül kullanılan karışımlara göre daha fazla azaldığı belirlenmiştir. Kapsül kullanım oranları değerlendirildiğinde karışım ağırlığınca %0,25 ve %0,50 içeriklerinde saf karışıma göre kalıcı deformasyona karşı dayanım parametrelerindeki azalmanın %10'un altında olduğu, %0,75 ve %1,0 kapsül içeriklerinde ise kalıcı deformasyona karşı dayanım parametrelerinde önemli oranda düşüş meydana geldiği belirlenmiştir.
- Yarım daire şeklindeki numunelere 0°C sıcaklıkta uygulanan 3 nokta eğilme deneyi sonucunda hem atık bitkisel hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılan karışımlarda %0,25 kapsül içeriğinde kırılma tokluğu değerlerinin saf karışımdan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Hem atık bitkisel yağ hem de atık madeni yağ içeren kapsüllerden yüksek oranlarda (karışım ağırlığınca %0,75 ve %1,0) kullanılması durumunda kırılma tokluğu değerleri saf karışıma göre önemli oranda düşmüştür. Bu deney sonuçlarından yola çıkarak düşük ısı çatlaklarının ilerleyişine karşı en yüksek dayanımın, atık bitkisel ve madeni yağ içeren kapsüllerden karışım ağırlığınca %0,25 oranında kullanılması durumunda elde edilebileceği söylenebilmektedir.
- Yarım daire şeklindeki numunelere 25°C sıcaklıkta uygulanan elastik-plastik kırılma mekanikliği deney sonuçları değerlendirildiğinde, kapsül kullanımı ile genel olarak karışımların çatlak oluşumuna karşı dayanımlarının azaldığı, atık bitkisel yağ içeren

kapsüllerden %0,25 ve %0,50; atık madeni yağ içeren kapsüllerden ise en fazla %0,25 oranında kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Son olarak, hem atık bitkisel hem de atık madeni yağ içeren kapsül kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneylerin sonuçlarına dayanarak optimum kapsül içeriği 0.5% olarak tavsiye edilmiştir. Ayrıca bitümlü sıcak karışımlarda mikrokapsül kullanımının atık bir malzemenin geri dönüşümü olarak değerlendirildiğinde çevresel ve ekolojik açıdan büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- AASHTO T 283. 2018. "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage", American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC.
- Adedimila, A.S., Kennedy, T.W., 1975. "Fatigue and Resilient Characteristic of Asphalt Mixtures by Repeated Load Indirect Tensile Test", Research Report 183-5 Center for Highway Research, University of Texas at Austin.
- Ağar, E., Umar, F., 1991. "Yol Üst Yapısı", İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası Yayını, 339 s., İstanbul.
- Agzenai, Y., Pozuelo, J., Sanz, J., Perez, I., Baselga, J. 2015. "Advanced Self-Healing Asphalt composites in the Pavement Performance Field: Mechanisms at the Nano Level and New Repairing Methodologies", Recent Patents on Nanotechnology, 9(1), 43.
- Alshamsi, K.S., 2006. "Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures", PhD Thesis, Louisiana State University, Louisiana.
- Alyamaç, K.E., 2008. "Kendiliğinden Yerleşen Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekanik Prensipleriyle İncelenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Amir, E., Schlangen, E., 2015. "Self-Healing Technology for Asphalt Pavements", Advanced Polymer Science, 273, 285-306.
- Aragao, F.T.S., Lee J., Kim, Y.R., Karki, P., 2010. "Material Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behaviour of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavements", Construction and Building Materials, 24(4), 538-544.
- Ashouri, M. 2014. "Modeling Microdamage Healing in Asphalt Pavements Using Continuum Damage", North Carolina: North Carolina State University.
- Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R. 2012. "Investigation on Physical Properties of Waste Cooking Oil-Rejuvenated Bitumen Binder", Construction and Building Materials, 37, 398-405.
- Asphalt Institute. 1996. "Superpave Mix Design", Superpave Series No. 2 (SP-2), Lexington, KY.
- Bakker, M., 2001. "SCB Test Results, Statistical Analysis", TNO (Dutch Organisation for Applied Scientific Research) Report, TNO-report FSP-RPT-010048, Netherlands.
- Bausano, J., Williams, C., 2007. "A New Approach to Calculating Flow Number", Unpublished Paper.
- Boyer, R.E., 2000. "Asphalt Rejuvenators Fact, or Fable", Transportation Systems 2000 (TS2K) Workshop San Antonio, Texas.
- BS EN 12697-44, 2019. "Bituminous Mixtures - Test Methods - Crack Propagation by Semi-Circular Bending Test", British Standards Institution, London.
- Canestrari, F., Virgili, A., Graziani, A., Stimilli, A. 2015. "Modeling and Assessment of Self Healing and Thixotropy Properties for Modified Binders", International Journal of Fatigue, 70(1), 351-360.
- Chen, X. Li, H., Qian, Z., 2009. "On the Fracture Properties of Epoxy Asphalt Mixture with SCB Test", Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Taylor and Francis Group, 531-540, London.
- Chung, K., Lee, S., Park, M., Yoo, P., Hong, Y. 2015. "Preparation and Characterization of Microcapsule-Containing Self-Healing Asphalt", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 29, 330-337.
- Çolak, K.M. 2006. "Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması", Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- De Gennes, P.G. 1971. "Reptation of a Polymer Chain in the Presence of Fixed Obstacles", The Journal of Chemical Physics, 55(2), 572-579.

- ELE, 1994. "Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens", Reference and Operating Manual, ELE International Ltd, Hertfordshire, UK.
- European Union Road Federation. 2012. "European Road Statistics", European Union Road Federation (ERF), Brussels, Belgium.
- Ezekoye, O.A., Lowman, C.D., Fahey, M.T., Hulme-Lowe, A.G. 1998. "Polymer Weld Strength Predictions Using a Thermal and Polymer Chain Diffusion Analysis", *Polymer Engineering and Science*, 38(6), 976-991.
- Francken, L., 1979. "Fatigue Performance of a Bituminous Road Mix Under Realistic Best Conditions", *Transportation Research Record*, 712, 30-34.
- Francken, L., 1998. "Bituminous Binders and Mixes", London, Rilem Reports, E&FN Spon, 352p.
- Gallego, J., del Val Miguel, A., Contreras, V., Paez, A. 2013. "Heating Asphalt Concrete with Microwaves to Promote Self-Healing", *Construction and Building Materials* 42, 1-4.
- Garcia, A., Austin, C.J., Jelfs, J. 2016. Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules. *Journal of Cleaner Production*, 118, 124-132.
- Garcia, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N. 2013. "Induction Healing of Dense Asphalt Concrete", *Construction and Building Materials*, 49, 1-7.
- Garcia, A., Jelfs, J., Austin, C.J. 2015. "Internal Asphalt Mixture Rejuvenation Using Capsules", *Construction and Building Materials*, 101, 309-316.
- Garcia, A., Norambuena-Contreras, J., Bueno, M., Partl, M.N. 2014. "Single and Multiple Healing of Porous and Dense Asphalt Concrete", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(4), 425-433.
- Garcia, A., Schlangen, E., Van De Ven, M., Liu, Q. 2012. "A Simple Model to Define Induction Heating in Asphalt Mastic", *Construction and Building Materials*, 31, 38-46.
- Garcia, A., Schlangen, E., Van De Ven, M., Van Vliet, D. 2011a. "Induction Heating of Mastic Containing Conductive Fibres and Fillers", *Materials and structures*, 44, 499-508.
- Garcia, A., Schlangen, E., Van De Ven, M., Van Vliet, D., 2011b. "Crack Repair of Asphalt Concrete with Induction Energy", *Heron*, 56(1), 33-43.
- Garcia, A., Schlangen, E., Ven, M. 2011c. "Properties of Capsules Containing Rejuvenators for Their Use in Asphalt Concrete", *Fuel*, 90, 583-591.
- Garcia, O.F., 2002. "Asphalt Mixture and Loading Effects on Surface-Cracking of Pavements", Master Thesis, University of Florida, Florida.
- Garcia, S.J. 2014. "Effect of Polymer Architecture on the Intrinsic Self-Healing Character of Polymers", *European Polymer Journal*, 53, 118-125.
- Gaskin, J. 2013. "On Bitumen Microstructure and the Effects of Crack Healing", University of Nottingham.
- Gomez-Mejide, B., Ajam, H., Lastra-Gonzalez, P., Garcia, A., 2016. "Effect of Air Voids Content on Asphalt Self-Healing via Induction and Infrared Heating", *Construction and Building Materials*, 126, 957-966.
- Gonzalez, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., Schlangen, E. 2018. "Self-Healing Properties of Recycled Asphalt Mixtures Containing Metal Waste: An Approach Through Microwave Radiation Heating", *Journal of Environmental Management*, 214, 242-251.
- Hager, M.D., Greil, P., Leyens, C., Van der Zwaag, S., Schubert, U.S. 2010. "Self-Healing Materials", *Materials Today*, 22(47), 5424-5430.
- Hajj, E.Y., Sebaaly, P.E., Loria, L., 2008. "Reflective Cracking of Flexible Pavements Phase II: Review of Analysis Models and Evaluation Tests", Nevada Department of Transportation, Research Report No:12JF-1, 87 pp, Carson City, Nevada.
- Haryanto, I., Takahashi, O., 2007. "Crack Initiation Assessment of Wearing Course Asphalt Mixtures Using Aggregate Gradation Characteristic", *ITB Journal of Engineering Science*, 39(1), 28-42.

- Hoffman, R., Oosterbaan, B., Erkens, S.M.J.G., Kooij, J.V.D., 2003. "Semi-Circular Bending Test to Assess the Resistance Against Crack Growth, Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials", Proceedings of the 6. International RILEM Symposium, Zurich, April 13-16, 257-263.
- Huang, B., Shu, X., Tang, Y., 2005. "Comparison of Semi-Circular Bending and Indirect Tensile Strength Tests for HMA Mixtures", Geo-Frontiers 2005, Advances in Pavement Engineering, GSP 130, 155-169.
- İnce, R., 1994. "Çimento Bazlı Malzemelerin Kırılmasında Boyut Tesirinin (Non-Lineer Kırılma Mekanikliği) Yapay Sinir Ağları ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- İnce, R., 1998. "Betonarme Yapı Elemanlarında Basınç-Kesme Kırılmasının ve Boyut Etkisinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Jajliardo, A.P., 2003. "Development of Specification Criteria to Mitigate Top-Down Cracking", Master Thesis, University of Florida, Florida.
- Kabir, M.S., 2008. "Effect of Hydrated Lime on the Laboratory Performance of Superpave Mixtures", Master Thesis, Louisiana State University, Louisiana.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), 2008. "Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi", Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), 2013, Yollar Teknik Şartnamesi, Ankara, Türkiye
- Karayolları Genel Müdürlüğü
<http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/ButceOdenekHarcamaGelir/ButceDurumuVeOraniTR.pdf>. Son erişim tarihi: 13 Mayıs 2019.
- Kaşak, S. 2007. "Taş Mastik Asfalt Karışımında Katkı Maddesi Olarak Fiber Yerine Diatomitin Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- 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 the SHRP Asphalt Research Program", SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC.
- Khodaii, A., Mehrara, A., 2009. "Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test", Construction and Building Materials, 23(7), 2586-2592.
- Kim, Y.R., Lee, H., Little, D.N. 2001. "Microdamage Healing in Asphalt and Asphalt Concrete: A Viscoelastic Continuum Damage Fatigue Model of Asphalt Concrete with Microdamage Healing", Texas: Texas Transportation Institute, College Station.
- Kingery, W.R., 2004. "Laboratory Study of Fatigue Characteristics of HMA Surface Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP)", Master Thesis, The University of Tennessee, Knoxville.
- Kline, D.B., Wool, R.P. 1988. "Polymer Welding Relations Investigated by a Lap Shear Joint Method", Polymer Engineering and Science, 28(1), 52-57.
- Kök, B.V., 2007. "Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Kök, B.V., 2019. Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı, 1.Basım, Nobel Yayınları, Ankara.
- Lavin, P.G. 2003. Asphalt Pavements, London and New York. Spon Pres.
- Lim, I.L., Johnston, I.W., Choi, S.K., 1993. "Stress Intensity Factors for Semi-Circular Specimens Under Three-Point Bending", Engineering Fracture Mechanics, 44(3), 363-382.
- Liu, Q., 2012. "Induction Healing of Porous Asphalt Concrete", Ph.D. thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft, Netherlands.
- Lv, L., Schlangen, E., Yang, Z., Xing, F., 2016. "Micromechanical Properties of a New Polymeric Microcapsule for Self-Healing Cementitious Materials", Materials, 9(12), 1025.

- Lytton, R.L., Uzan, J., Fernando, E.G., Roque, R., Hiltunen, D., Stoffels, S.M. 1993. "Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes", Washington, DC, Strategic Highway Research Program.
- Marasteanu, M.O., Li, X., Clyne, T.R., Voller, V.R., Timm, D.H., Newcomb, D.E., 2004. "Low Temperature Cracking of Asphalt concrete Pavements", Minnesota Department of Transportation, MN/RC-2004-23, 229 p., Minnesota.
- Marshall, R.T. 2006. "Full-Depth Hma Pavement Design", Department of Civil Engineering University of Illinois. <http://www.il-asphalt.org/files/5314/4587/3850/2006Thompson.pdf>. Son erişim tarihi: 10 Mayıs 2019.
- 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.
- Micaelo, R., Al-Mansoori, T., Garcia, A. 2016. "Study of the Mechanical Properties and Self-Healing Ability of Asphalt Mixture Containing Calcium-Alginate Capsules", Construction and Building Materials, 123, 734-744.
- Mohammad, L., Saadeh, S., Cooper, S., 2008." Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Sasobit® Warm Mix Additive", Proceedings of GeoCongress 2008, March 9-12, 1016-1023, Orleans, Louisiana, USA.
- Molenaar, J.M.M., 2003. "Performance Related Characterisation of the Mechanical Behaviour of Asphalt Mixtures", Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat Road and Hydraulic Engineering Institute, 396 pp., Delfth, Netherlands.
- Mull, M. A., Stuart, K., Yehia, A., 2002. "Fracture Resistance Characterization of Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt Pavement", Journal of Materials Sciences, 37, 557–566.
- Norambuena-Contreras, J., Gonzalez-Torre, I. 2017. "Influence of the Microwave Heating Time on the Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures", Applied Sciences, 7(10), 1076.
- Norambuena-Contreras, J., Liu, Q., Zhang, L., Wu, S., Yalcin, E., Garcia, A. 2019. "Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures", Materials and Structures, 52(4), 78.
- Norambuena-Contreras, J., Yalcin, E., Garcia, A., Al-Mansoori, T., Yilmaz, M., Hudson-Griffiths, R. 2018. "Effect of Mixing and Ageing on the Mechanical and Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures Containing Polymeric Capsules", Construction and Building Materials, 175, 254-266.
- Othman, A.M., 2010. "Effect of Low-Density Polyethylene on Fracture Toughness of Asphalt Concrete Mixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, 22(10), 1019-1024.
- Özdemir, A., 2006. "Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Teorik Olarak Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Phillips, M.C. 1999. "Multi-Step Models for Fatigue and Healing, and Binder Properties Involved in Healing", Eurobitume Workshop 99, Performance Related Properties For Bituminous Binders, 115, Luxemborg.
- Qiu, J. 2012. "Self Healing of Asphalt Mixtures: Towards a Better Understanding of the Mechanism", TU Delft: Delft University of Technology.
- Read, J., Whiteoak, D., The Shell Bitumen Handbook, 5th ed., Thomas Telford Publishing, London, 2003.
- Schapery, R.A. 1989. "On the Mechanics of Crack Closing and Bonding in Linear Viscoelastic Media", International Journal of Fracture, 39(1-3), 163-189.
- Şengöz, B. 2003. "Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına ve Suya Duyarlılığına Etkisi", Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Shen, S., Carpenter, S.H. 2007. "Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing", Final Report (29), Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois.

- Shu, X., Huang, B., Vukosavljevic, D., 2010. "Evaluation of Cracking Resistance of Recycled Asphalt Mixture Using Semi-Circular Bending Test", *Paving Materials and Pavement Analysis*, GSP 203, 58-65.
- State of Wisconsin, Department of Transportation. 2010. "Evaluation of a Hot Mix Asphalt Perpetual Pavement: Final Report". <http://wisconsindot.gov/documents2/research/fep-0110hmaperppave.pdf>. Son Erişim Tarihi: 01 Mayıs 2019
- Su, J.F., Qiu, J., Schlangen, E. 2013b. "Stability Investigation of Self-Healing Microcapsules Containing Rejuvenator for Bitumen", *Polymer Degradation and Stability*, 98, 1205-1215.
- Su, J.F., Qiu, J., Schlangen, E., Wang, Y. 2015. "Experimental Investigation of Self-Healing Behaviour of Bitumen/Microcapsule Composites by a Modified Beam on Elastic Foundation Method", *Materials and Structures*, 48(12), 4067-4076.
- Su, J.F., Qiu, J., Schlangen, H. 2013a. "Self-Healing Bitumen by Microcapsules Containing Rejuvenator", *ICSHM 2013: Proceedings of the 4th International Conference on Self-Healing Materials*, Ghent, Belgium, June 16-20, Ghent University; Delft University of Technology.
- Subagio, B.S., Siswosoebrotho, B.I., Karsaman, R.H., 2003. "Development of Laboratory Performance of Indonesian Rock Asphalt (asbuton) in Hot Rolled Asphalt Mix", *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 4, 436-449.
- Sun, D., Lin, T., Zhu, X., Cao, L. 2015. "Calculation and Evaluation of Activation Energy as a Self Healing Indication of Asphalt Mastic", *Construction and Building Materials*, 95, 431-436.
- Sun, D., Sun, G., Zhu, X., Guarin, A., Li, B., Dai, Z., Ling, J. 2018. "A Comprehensive Review on Self-Healing of Asphalt Materials: Mechanism, Model, Characterization and Enhancement", *Advances in Colloid and Interface Science*, 256, 65-93.
- Sun, D., Sun, G., Zhu, X., Pang, Q., Yu, F., Lin, T. 2017. "Identification of Wetting and Molecular Diffusion Stages During Self-Healing Process of Asphalt Binder via Fluorescence Microscope", *Construction and Building Materials*, 132, 230-239.
- Tabakovic, A., Schlangen, E. 2015. "Self-Healing Technology for Asphalt Pavements", In: Hager M., van der Zwaag S., Schubert U. *Self-healing Materials*, *Advances in Polymer Science*, 273, 285-306.
- Tunç, A. 2007. *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları* (2. Basım). Ankara. Nobel Yayın Dağıtım.
- Uğuz, A. 1996. "Kırılma Mekaniğine Giriş", *Uludağ Üniversitesi Basımevi*, 160 s., Bursa.
- URL-1, <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/km/lecture5.pdf>, Prof. Dr. İrfan AY Kırılma Mekaniği Ders Notları, 01.10.2019.
- Vukosavljevic, D., 2006. "Fatigue Characteristics of Field HMA Surface Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP)", *Master Thesis*, The University of Tennessee, Knoxville.
- Wagoner, M.P., Butlar, W.G., Paulino, G.H., 2005. "Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture", *Society for Experimental Mechanics*, 45(3), 270-277.
- Walubita, L.F., Umashankar, V., Hu, X., Jamison, B., Zhou, F., Scullion, T., Martin, A.E., Dessouky, S., 2010. "New Generation Mix-Designs: Laboratory Testing and Construction of the APT Test Sections", *Texas Transportation Institute, FHWA/TX-10/0-6132-1*, p. 180, Texas.
- Witczak, M.W., Kaloush, K.E., Pellinen, T., El-Basyouny, M., Von Quintus, H., 2002. "Simple Performance Test for Superpave Mix Design", *The National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Rep 465*, 465p, Washington, DC.
- Wool, R.P., O'connor, K.M. 1981. "A Theory Crack Healing in Polymers", *Journal of Applied Physiology*, 52(10), 5953-5963.
- Wu, S., Pang, L., Mo, L., Qiu, J., Zhu, G., Xiao, Y. 2008. "UV and thermal aging of pure bitumen-comparison between laboratory simulation and natural exposure aging", *Road Mater. Pavement Des.*, 9, 103-113.
- Xue, B., Wang, H., Pei, J., Li, R., Zhang, J., Fan, Z. 2017. "Study on Self-Healing Microcapsule Containing Rejuvenator for Asphalt", *Construction and Building Materials*, 135, 641-649.

- Yahya, A., Javier, P., Javier, S., Ignacio, P., Juan, B. 2015. "Advanced Self-Healing Asphalt Composites in the Pavement Performance Field", Mechanisms at the Nano Level and New Repairing Methodologies, Recent Patents on Nanotechnology, 1, 43-50.
- Yalçın, E. 2018. "İyileştirici maddeler içeren kapsüller kullanılarak kendini onarabilen bitümlü sıcak karışımların geliştirilmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yihan, S., Quantao, L., Shaopeng, W.U., Fei, S. 2014. "Microwave Heating of Steel Slag Asphalt Mixture", Key Engineering Material, 599, 193-197.
- Yılmaz, M. 2011. "Asfaltitin Bitümlü sıcak karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yılmaz, M., Kök, B.V. 2008. "Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemlerine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesine ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(41), 811-819.
- Zoorob, S.E., Suparna, L.B. 2000. "Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt)", Cement&Concrete Composites, 22, 233-242.



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Münir ÖZDEMİR

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri: Elazığ

Doğum Yılı: 1995

Uyruğu: T.C.

Adres: Fırat Üniversitesi Rektörlük Lojmanları R/2 No:9 Merkez/ELAZIĞ

E-posta: ahmet.ozdemir@btu.edu.tr

Yabancı Diller: İngilizce

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans: Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2018

Lise: Elazığ Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesi, 2013

AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Özdemir, A.M., Yalçın, E., Arslanoğlu, H., Yılmaz, M., Kök, B.V. (2019) "Investigation of The Effect of Carbonation Cake on Rheological Properties of Bituminous Binders", The International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET 19).

Özdemir, A.M., Yalçın, E., Yılmaz, M., Kök, B.V. (2019) "Asphalt Pavement Materials for the Guidance of Autonomous Vehicles", 4th International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019).

Yalçın, E., Özdemir, A.M., Yılmaz, M., Kök, B.V. (2019) "Using of Microcapsules in Hot Mix Asphalts for Self-Healing", The International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET 19).

Baykara, A., Yalçın, E., Yılmaz, M., Kök, B.V., Özdemir, A.M. (2019) "Effect of Elastomeric Additives on The Rheological Properties of Bituminous Binders", 4th International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019).