

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**MODİFİYE BİTÜM VE METAL ATIĞI İÇEREN BİTÜMLÜ
SICAK KARIŞIMLARIN KAR/BUZLA MÜCADELEYE
ETKİSİNİN VE KENDİNİ İYİLEŞTİRME ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

İremgöl ATICI

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ulaştırma Bilim Dalı

OCAK 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**MODİFİYE BİTÜM VE METAL ATIĞI İÇEREN BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN KAR/BUZLA MÜCADELEYE ETKİSİNİN VE
KENDİNİ İYİLEŞTİRME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
İremgöl ATICI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erkut YALÇIN

OCAK 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Modifiye Bitüm ve Metal Atığı İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların
Kar/Buzla Mücadeleye Etkisinin ve Kendini İyileştirme Özelliklerinin
Araştırılması

Yazarı: İremgül ATICI

İlk Teslim Tarihi: 13.12.2021

Savunma Tarihi: 14.01.2022

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.

İmza

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erkut YALÇIN
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Onayladım

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

Onayladım

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Sercan SERİN
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Onayladım

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

İmza

Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Modifiye Bitüm ve Metal Atığı İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Kar/Buzla Mücadeleye Etkisinin ve Kendini İyileştirme Özelliklerinin Araştırılması” 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.

14.01.2022

İremgöl ATICI



ÖNSÖZ

Bitümlü sıcak karışımlarda zamanla trafik ve çevre koşulları nedeniyle bozulmalar meydana gelmektedir. Bozulma meydana geldiği zaman çeşitli iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını ve performansını artırarak üstyapının servis ömrünü uzatmak amacıyla çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir.

Bu çalışmanın amacı, metal atıklarının asfalt kaplamalarda kullanılarak atıkların geri dönüşümünü sağlamak, indüksiyon yöntemiyle asfalt kaplamaların kendini iyileştirmesine yardımcı olmaktır. Bir diğer amacımız ise indüksiyon yöntemi ile kendini onaran asfaltlarda modifiye bitüm kullanımının indüksiyon ile asfaltın kendini onarması üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Bu yöntem, kaplamaların servis ömrünü uzatmak amacıyla günümüzde sıklıkla kullanılan pahalı çözümlere de ekonomik bir alternatif olacaktır.

Yüksek lisans tezimi hazırlama süresince değerli bilgilerini, tecrübelerini, zamanını ve güler yüzünü esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Erkut Yalçın'a teşekkür ederim. Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca derin bilgilerinden yararlanma şansını yakaladığım her türlü desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet YILMAZ'a ve 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 lisans eğitimime başladığım ilk günden bu yana yardımlarını esirgemeyen her zorluğu beraber çözdüğümüz en kötü anlarımda bana en büyük desteği sağlayan Arş. Gör. Özge ERDOĞAN YAMAÇ hocama, laboratuvarındaki destekçim İnş. Müh. Hakan YURDAKUL'a ve çalışmalarım boyunca her zorlukta yanımda olan desteğini hep hissettiğim Arş. Gör. Esmâ Sarışın Bakır'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca ve her zaman beni en çok destekleyen bana inancını hiç yitirmeyen her zorlukta yanına koştuğum benimle beraber çözüm bulmaya çalışan sevgili eşim Furkan ATICI'ya, son olarak sevgisini desteğini her zaman yanımda hissettiğim canım aileme sonsuz teşekkürler.

İremgöl ATICI
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLOLAR LİSTESİ	xii
SİMGELER	xiii
KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Asfalt Kaplama Yapıları	3
2.2. Asfalt Malzemelerin Mekanikliği	4
2.2.1. Bitüm Kavramı	4
2.2.2. Bitümün Yapısı	4
2.2.3. Bitümün Yaşlanması	5
2.2.4. Bitümün Adezyonu	6
2.2.5. Asfalt Karışımların Sertliği	8
2.2.6. Kalıcı Deformasyon Yoluyla Kopma Mekanizmaları	8
2.2.7. Yorulma ve Kırılma Yoluyla Kopma Mekanizmaları	8
3. KENDİNİ İYİLEŞTİREBİLEN MALZEMELER	10
3.1. Kendini İyileştirme Kavramı	11
3.2. Asfalt Betonun Kendini İyileştirmesi	13
3.3. Bitüm ve Asfalt Karışımlarının Kendini İyileştirmesi	13
3.4. Asfalt Betonun Kendini İyileştirmesini Etkileyen Faktörler	15
3.4.1. Bitümün Özellikleri	15
3.4.2. Bitüm Bileşimleri	16
3.4.3. Çevresel Faktörler	17
3.5. Asfalt Kaplamada Yeni Kendini İyileştirme Teknikleri	20
3.5.1. Mikrodalga Isıtma İle Kendini İyileştiren Asfalt Kaplamalar	21
3.5.2. Kapsüllü Gençleştiriciler ile Kendini İyileştiren Asfalt Kaplamalar	22
3.5.3. İndüksiyon Isıtma İle Kendini İyileştiren Asfalt Kaplamalar	23
4. MATERYAL VE METOT	28
4.1. Bitüm	28
4.2. Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	28
4.3. Atık Tüfallar ve Agregalar	29
4.4. Modifiye Bitüm Hazırlanması	32
4.5. Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması	33
4.6. Bağlayıcılara Uygulanan Deney Yöntemleri	35
4.6.1. Penetrasyon Deneyi	35
4.6.2. Yumuşama Noktası Deneyi	36
4.6.3. Penetrasyon İndeksi (PI) Yöntemi	37
4.6.4. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi (ASTM D 4402)	38
4.6.5. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi	40

4.7. Karışımlar Üzerine Uygulanan Deneyler	41
4.7.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	41
4.7.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi.....	43
4.7.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi	45
4.7.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi.....	46
4.7.5. Dinamik Sünme Deneyi.....	48
4.7.6. Asfalt Karışımlarının Çatlak-İyileştirme Özellikleri	51
4.7.7. İndüksiyon Isıtması.....	53
4.7.8. Buz Eritme Deneyi	53
4.7.9. Kar Eritme Deneyi.....	54
4.7.10. Eritme Verimliliği Analizi	55
4.7.11. Buz için Üç Noktalı Eğilme Deneyi	56
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	57
5.1. Bağlayıcı Deney Sonuçları.....	57
5.1.1. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları	57
5.1.2. Dönel Viskozite (RV) Deney Sonuçları	58
5.1.3. Kompleks Kayma Modülü (G^*) ve Faz Açısı (δ) Sonuçları.....	60
5.1.4. Dinamik Mekanik Analiz Deney Sonuçları.....	63
5.2. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları	65
5.2.1. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları.....	65
5.2.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım (Çekme Dayanımı Oranı) Deney Sonuçları	68
5.2.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları.....	71
5.2.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları.....	72
5.2.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları.....	82
5.2.6. Atık Metal İçeren Karışımların İndüksiyonla Isıtma Özellikleri	90
5.2.7. Metalik Atıkların Asfalt Karışımlarının Isınma ve Çatlak İyileştirme Özelliklerine Etkisi .	93
5.2.8. Asfalt Karışımların Isıtma Yöntemleriyle Buz Eritme Özellikleri	102
5.2.9. Asfalt Karışımların Isıtma Yöntemleriyle Kar Eritme Özellikleri	104
5.2.10. Buz Eritme Deneyi Sırasında Asfalt Karışımlarının İyileştirme Performansı	105
6. SONUÇLAR	107
KAYNAKLAR.....	110
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Modifiye Bitüm ve Metal Atığı İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Kar/Buzla Mücadeleye Etkisinin ve Kendini İyileştirme Özelliklerinin Araştırılması

İremgöl ATICI

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ocak 2022, Sayfa: xiv + 115

Bu tez çalışmasında, indüksiyonla ısıtmasının atık metal ve stiren-butadien-stiren (SBS) modifiyeli bitüm içeren asfalt karışım test numunelerinin kendini iyileştirmesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca asfalt karışımlarda agrega yerine kullanılan atık metallerin, asfalt karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri de belirlenmiştir. Bu amaçla, prizmatik ve Marshall asfalt test numuneleri oluşturmak için iki farklı yüzdede (50% ve 100% agrega yerine) iki farklı (sıcak tüfal (HMS) ve soğuk tüfal (CMS)) atık metal ve iki farklı yüzdede (%2 ve %3) SBS kullanılarak asfalt karışımlar hazırlanmıştır. Kendini iyileştirme özelliklerini belirlemek için indüksiyon ısıtması sistemleri kullanılmıştır. Numuneler her iki yöntem için de 40sn, 60sn, 80sn, 100sn ve 120sn olmak üzere beş farklı ısıtma süresinde ısıtılmıştır. İyileşme işleminin verimliliğini ölçmek için, her asfalt numunesi için beş iyileşme döngüsü gerçekleştirilmiştir.

Ana sonuçlara göre, asfalt karışımların içerisindeki atık metal kullanım oranı arttıkça karışımların sertliği, yük tekrar sayıları ve yorulma ömürlerinde azalma meydana gelmektedir. Ayrıca, asfalt karışımlara uygulanan her iyileştirme döngüsünde iyileştirme seviyesi azalmıştır. Isıtma işlemi, bitümün iç basıncını ve hareketliliğini arttırırken; karışımındaki hava boşluklarının da asfalt karışımların kendini iyileştirmesinde önemli bir rol oynadığı varsayılmıştır. İlâveten laboratuvarında hazırlanmış atık metal içeren karışım numuneleri yüzeyinde 2 farklı kalınlıkta (5mm ve 10mm) buz ve tek (15mm) kalınlıkta kar oluşturularak bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki kar ve buzun erimesine etkisi belirlenmiştir. Buz yaklaşık 10°C'de kalmıştır. 120 s indüksiyonla ısıtmadan sonra, asfalt karışımının üst yüzeyindeki en yüksek sıcaklık 55,2°C'ye ulaşmıştır. Bu sonuç, indüksiyonla ısıtmanın buz üzerinde hiç veya çok az ısıtma etkisine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Kar eritme testi söz konusu olduğunda, eritme sürecinde en etkili tüfalin soğuk tüfal olduğu belirlenmiştir. 2CMS5 karışımının ortalama erime hızı 0,3300 gr/dk iken 3CMS5 karışımının ortalama erime hızı ise 0,3383 gr/dk'dır. En yüksek ortalama erime hızını 3CMS10 karışımı verirken, en düşük ortalama erime hızını ise 2HMS5 karışımı vermiştir. Son olarak SBS modifiyeli bağlayıcıların genel bağlayıcı ve reolojik özellikleri değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İndüksiyon ısıtması, Atık metal, Mekanik performans, SBS, Kar, Buz

ABSTRACT

Investigation of the Effect of Hot Mix Asphalt Containing Modified Bitumen and Metal Waste on Snow/Ice Fighting and Self-Healing Properties

İremgöl ATICI

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

January 2022, Pages: xiv + 115

In this thesis, the effect of induction heating on the self-healing of asphalt mixture test specimens containing waste metal and styrene-butadiene-styrene (SBS) modified bitumen was evaluated. In addition, the effects of waste metals used instead of aggregate in asphalt mixtures on the mechanical properties of asphalt mixtures were determined. For this purpose, two different (hot scaling (HMS) and cold scaling (CMS)) waste metal in two different percentages (instead of 50% and 100% aggregate) and two different percentages (2% and 100% aggregate) were used to create prismatic and Marshall asphalt test samples. Asphalt mixtures were prepared using 3% SBS. Induction heating systems were used to determine self-healing properties. The samples were heated in four different heating times as 40sec, 60sec, 80sec, 100sec and 120sec in both methods. To measure the efficiency of the recovery process, five recovery cycles were performed for each asphalt sample. The main results are that the hardness, load repetitions and fatigue life of the mixtures decrease as the waste metal usage ratio in the asphalt mixtures increases. In addition, the improvement level decreased with each improvement cycle applied to asphalt mixtures. It is assumed that air voids in the mixture also play an important role in the self-healing of asphalt mixtures, while increasing the internal pressure and mobility of the bitumen during the heating process. In addition, 2 different thicknesses (5mm and 10mm) of ice and a single (15mm) thickness of snow were formed on the surface of the mixture samples containing waste metal prepared in the laboratory, and the effect of snow and ice on the melting of the hot bituminous mixtures was determined. Ice remained at about 10°C. After 120 s of induction heating, the highest temperature on the upper surface of the asphalt mixture reached 55.2°C. This result proved that induction heating has no or little heating effect on ice. When it comes to the snow melting test, it has been determined that the most effective scale in the melting process is cold scale scale. While the average melting rate of the 2CMS5 mixture is 0.3300 g/min, the average melting rate of the 3CMS5 mixture is 0.3383 g/min. While 3CMS10 mixture gave the highest average melting rate, 2HMS5 mixture gave the lowest average melting rate. Finally, the general binding and rheological properties of SBS modified binders were evaluated.

Keywords: Induction Heating, Waste Metal, Mechanical Performance, SBS, Snow, Ice

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Esnek üstyapı tipik tabakaları	3
Şekil 2.2. Bitümün görünümü	5
Şekil 2.3. Agregâ parçacıklarını birbirine bağlayan asfalt kaplamalar	7
Şekil 2.4. Kırılım bölgesinde gerilme dağılımı	9
Şekil 3.1. (Solda) Çatlakları onarmak ve doldurmak için polimerize olabilen kimyasalların zamanlanmış salınımı için yapılan tasarım	12
Şekil 3.2. Mikrokapsüllerle kendini iyileştirme yöntemi	12
Şekil 3.3. Asfalt betonunda iyileşme ve sıcaklık ilişkisi	18
Şekil 3.4. Farklı sıcaklıklarda iyileşme seviyesi ve zaman ilişkisi	19
Şekil 3.5. Asfalt karışımlarının iyileşmesini etkileyen faktörler	20
Şekil 3.6. Mikrodalga (solda) ve geleneksel (sağda) ısıtma sisteminin karşılaştırılması	22
Şekil 3.7. Mikrokapsül ve mikrovasküler iyileşme sistemleri	23
Şekil 3.8. İndüksiyon ısıtmasının şematik gösterimi	24
Şekil 4.1. SBS katkı maddesi	28
Şekil 4.2. Atık metal kullanımı	29
Şekil 4.3. Tüfâllerin X-ışını kırınım grafiğı	30
Şekil 4.4. SEM/EDS sonuçlarıyla HMS yüzeyinin harita taraması	31
Şekil 4.5. SEM/EDS sonuçlarıyla CMS yüzeyinin harita taraması	31
Şekil 4.6. Mekanik karıştırıcı ile modifiyeli bağlayıcı hazırlama işlemi	33
Şekil 4.7. Numunelerin kesilmesi	34
Şekil 4.8. Asfalt karışımlarında atık metallerin dağılımı	34
Şekil 4.9. Penetrasyon deney aleti	36
Şekil 4.10. Yumuşama noktası deney aleti	37
Şekil 4.11. Dönel viskozimetre (RV) deneyinin yapılışı	38
Şekil 4.12. Viskoz ve elastik davranış	40
Şekil 4.13. Dinamik kayma reometresi (DSR) deney cihazı	41
Şekil 4.14. Numunelerin 60±1°C sıcaklığa sahip su banyosunda bekletilmesi	42
Şekil 4.15. Marshall stabilite ve akma deneyinin yapılışı	42
Şekil 4.16. Numunelerin streç film ile sarılıp bekletilmesi	44
Şekil 4.17. Vakum işlemi ve nem hasarına karşı dayanım deneyi	45
Şekil 4.18. İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinin yapılışı	46

Şekil 4.19.	Yorulma deney düzeneği	47
Şekil 4.20.	Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiği.....	47
Şekil 4.21.	Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi	49
Şekil 4.22.	Dinamik sünme deney düzeneği	50
Şekil 4.23.	Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi	50
Şekil 4.24.	Akma sayısının bulunması.	51
Şekil 4.25.	Çatlak iyileştirme döngülerinin şematik gösterimi ve test numunelerinin indüksiyonla ısıtma yoluyla sıcaklık dağılımının ölçümü.....	52
Şekil 4.26.	İndüksiyon ısıtması düzeneği.....	53
Şekil 4.27.	Buz eritme deneyi için örnek	54
Şekil 4.28.	Kar eritme deneyi için örnek.....	55
Şekil 4.29.	Kendini iyileştirme (sol) ve buz eritme deneyinin (sağ) şematik diyagramı.....	56
Şekil 5.1.	Saf ve modifiyeli bitümlerin penetrasyon deney sonuçları	57
Şekil 5.2.	Saf ve modifiye bitümlerin yumuşama noktası değerleri.....	57
Şekil 5.3.	Saf ve modifiye bitümlerin penetrasyon indeksi değerleri.....	58
Şekil 5.4.	Saf ve modifiye bitümlerin dönel viskozite deney sonuçları	59
Şekil 5.5.	Bağlayıcıların PVN değerlerindeki değişim	60
Şekil 5.6.	SBS modifikasyonunda kompleks modül (G^*)-sıcaklık ilişkisi	61
Şekil 5.7.	SBS modifikasyonunda faz açısı (δ)-sıcaklık ilişkisi.....	61
Şekil 5.8.	SBS modifikasyonunda $G^*/\sin\delta$ -sıcaklık ilişkisi	62
Şekil 5.9.	SBS modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan bağlayıcıların kompleks kayma modülü değerlerinin frekansla değişimi.....	63
Şekil 5.10.	SBS modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan bağlayıcıların kompleks kayma modülü – faz açısı ilişkisi (siyah diyagramlar)	64
Şekil 5.11.	SBS modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan bağlayıcıların elastik modül – viskoz modül ilişkileri (cole-cole diyagramları).....	65
Şekil 5.12.	Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmının görünüşü	66
Şekil 5.13.	Karışımların Marshall stabilite değerlerinin değişimi.....	66
Şekil 5.14.	Karışımların akma değerlerinin değişimi.....	67
Şekil 5.15.	Karışımların Marshall oranı değerleri.....	68
Şekil 5.16.	Nem hasarı deneyine tabi tutulan numunelerin bir kısmının görünüşü.....	69
Şekil 5.17.	Koşullandırma öncesi ve sonrası karışımların çekme dayanımı değerleri	70
Şekil 5.18.	Karışımların çekme dayanımı oranlarının değişimi	71
Şekil 5.19.	Karışım numunelerinin ITSM değerleri.....	72
Şekil 5.20.	ITFT deneyi sonunda numunelerin görünüşü	73

Şekil 5.21.	Karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	77
Şekil 5.22.	Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) – karışım türü ilişkisi	78
Şekil 5.23.	Yorulma ömrü (N_f) – karışım türü ilişkisi	79
Şekil 5.24.	Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) – karışım türü ilişkisi.....	79
Şekil 5.25.	Maksimum yük tekrar sayısı – karışım türü ilişkisi	80
Şekil 5.26.	Deformasyon değerlerinin karışım türüne göre değişimi.....	81
Şekil 5.27.	$N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı – karışım türüne ilişkisi	82
Şekil 5.28.	Saf karışımın akma sayısının bulunmasına bir örnek	83
Şekil 5.29.	%2 SBS içeren karışımların kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi	86
Şekil 5.30.	%3 SBS içeren karışımların kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi	86
Şekil 5.31.	Tüfal ve SBS içeren karışımların akma sayısı değerleri	87
Şekil 5.32.	Tüfal ve SBS içeren karışımların 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri	88
Şekil 5.33.	Tüfal ve SBS içeren karışımların 10.000 yük tekrarındaki esneklik modülü değerleri	89
Şekil 5.34.	Tüfal ve SBS içeren karışımların 10.000 yük tekrarındaki esneme modülü değerleri.....	89
Şekil 5.35.	İndüksiyon ısıtma süresinin test numunelerinin yüzey sıcaklığına etkisi	91
Şekil 5.36.	İndüksiyon ısıtma ısısının test numunelerinin maksimum sıcaklığına ısıtma süresinin etkisi .	92
Şekil 5.37.	Tüfalı ve SBS’li asfalt test numunelerinin indüksiyonla ısıtma sonrası termografik görüntüleri.....	93
Şekil 5.38.	40 saniye indüksiyon ısısının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi	94
Şekil 5.39.	60 saniye indüksiyon ısısının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi	95
Şekil 5.40.	80 saniye indüksiyon ısısının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi	96
Şekil 5.41.	100 saniye indüksiyon ısısının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi	97
Şekil 5.42.	120 saniye indüksiyon ısısının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi	98
Şekil 5.43.	(a) %2 SBS ve (b) %3 SBS için 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında farklı içerikler için elde edilen Atık Tipi Oranı (WTR).....	102
Şekil 5.44.	5mm kalınlığında buz içeren 3CMS10 karışımının indüksiyon ısıtılmalı buz eritme performansı	103
Şekil 5.45.	5mm kalınlığında buz içeren 3CMS10 karışımının indüksiyon ısıtılmalı buz eritme sonucu..	103
Şekil 5.46.	İndüksiyon ısıtılmalı 2HMS10 içerikli asfalt karışımının kar eritme performansı.....	105

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Yeni kendini iyileştiren materyallerde onarım stratejileri.....	10
Tablo 4.1. Bitümün genel özellikleri.....	28
Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan karışımların kısa isimleri	29
Tablo 4.3. Asfalt karışımında kullanılan agrega gradasyonu	29
Tablo 4.4. HMS'deki ana elementlerin kütle konsantrasyonu.....	31
Tablo 4.5. CMS'deki ana elementlerin kütle konsantrasyonu	31
Tablo 4.6. Penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük farklar	35
Tablo 5.1. Saf ve modifiye bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralık değerleri	59
Tablo 5.2. Saf ve modifiye bitümlerin PG yüksek sıcaklık değerleri.....	63
Tablo 5.3. %2 SBS içeren asfalt karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları	74
Tablo 5.4. %3 SBS içeren asfalt karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları	75
Tablo 5.5. %2 SBS içeren numunelerin dinamik sünme deney sonuçları.....	84
Tablo 5.6. %3 SBS içeren numunelerin dinamik sünme deney sonuçları.....	85
Tablo 5.7. Çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi.....	99
Tablo 5.8. Farklı yüzdede atık metal ve 2 farklı yüzdede SBS içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi	100
Tablo 5.9. 5 mm buz kalınlığı için asfalt karışımlarının üst yüzeyindeki ısıtma performansı	104
Tablo 5.10. 10 mm buz kalınlığı için asfalt karışımlarının üst yüzeyindeki ısıtma performansı	104
Tablo 5.11. Asfalt karışımlarının üst yüzeyde ısıtma performansı.....	105
Tablo 5.12. Buz eritme işleminden sonra örneklerin iyileşme oranı	106

SİMGELER

FeO	: Wüstit
Fe₂O₃	: Hematit
Fe₃O₄	: Magnetit
O₂	: Oksijen
FeS₂	: Pirit
Ω	: Sabit mil hızı
Rc	: Numune kabının çapı
Rs	: Milin çapı
M	: Uygulanan burulma
L	: Milin efektif uzunluğu
G*	: Kompleks kayma modülü
δ	: Faz açısı
C	: düzeltme katsayısı
J	: Absorbe su hacmi
B'	: Vakum işleminden sonra numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı
B	: Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı
I	: Hava boşluğu hacmi
Va	: Hava boşluğu yüzdesi
V	: Numune hacmi
S'	: Doymuşluk derecesi
S_m	: Esneklik modülü
P	: Maximum yük
t	: Numune kalınlığı
D	: Yatay deformasyon
μ	: Poisson oranı
rp	: Çatlak ilerleme oranını (darbe sayısı/mm),
Np	: Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısını,
δi	: Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu (mm),
δf	: Yorulma ömründeki toplam deformasyonu
Ec	: Sünme modülü
Er	: Esneklik modülü
εc	: Toplam plastik eksenel birim şekil değiştirme
εr	: Toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme
L1	: LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı
L2n	: n darbe sayısındaki maksimum deplasman
L3n	: (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman
G	: Numunenin başlangıç yüksekliği
σ	: Maksimum düşey gerilme
F	: Maksimum düşey yük
A	: Numunenin kesit alanı
rf	: Çatlak ilerleme oranı
Ni, Nf, Nmak	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayıları
δmak	: Maksimum yük tekrar sayılarına karşılık gelen deformasyon miktarları

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CMS	: Soğuk Tüfal
DS	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kesme Reometresi)
HL	: İyileşme Oranı
HMS	: Sıcak Tüfal
IHAP	: İndüksiyonlu Isıtma Asfalt Kaplaması
ITFT	: İndirekt Çekme Yorulma Deneyi
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü)
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
PAV	: Pressure Aging (Basınçlı Yaşlandırma Kabı)
PI	: Penetrasyon İndeksi
RAP	: Geri Dönüşüm Asfalt Kaplama
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
SBS	: Stiren-Butadien-Stiren
SK	: Saf Karışım
TS	: Çekme Dayanımı
TSR	: Çekme Dayanımı Oranı
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
UMATTA	: Universal Material Testing Apparatus
UTM	: Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)
WTR	: Atık Tip Oranı

1. GİRİŞ

Karayolları ulaştırması en fazla kullanılan ulaştırma türlerindendir. Esnek ve hızlı ulaşım sağlanması, ekonomik olması, düzgün ve konforlu bir sürüş sağlaması sürücülerin en çok tercih ettiği ulaşım türü olmasında etkilidir. Karayolları  styapısında en sık kullanılan kaplama türü bitümlü sıcak karışımlardır. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik ve  evre koşulları nedeniyle tekerlek izi, nem hasarı, düşük ısı ve yorulma çatlakları gibi bozulmalar meydana gelmektedir [1]. Bozulma meydana geldiği zaman çeşitli iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Böylece üstyapının servis kabiliyetinin arttırılması sağlanmaktadır. Gerekli bakım ve onarım çalışmalarını geciktirmek amacıyla malzeme özellikleri iyileştirilmektedir. Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını ve performansını arttırarak üstyapının servis ömrünü uzatmak amacıyla çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifiye bitümler veya karışımlar kullanılmaktadır [2]. Fakat katkı kullanımı ile servis süresi arttırılmasına rağmen bu yöntem bakım ve onarım çalışmalarını sadece bir kaç yıl erteleme mantığı üzerine kuruludur.

Oluşan bozulmalar için diğer bir yöntem; kendini onarabilen malzemelerin kullanılmasıdır. Kendini onaran malzemelerin çıkış noktası doğa olup, vücuttaki kesikler gibi kendini iyileştirme mekanizmalarını yapı malzemelerine uygulayabilmek için ne tür bir ilave işlemin yapılması gerektiği araştırılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda kendini onarma yöntemi olarak iki farklı seçenek ön plana çıkmaktadır. Bunlardan birincisi, içerisinde çatlak dolgu malzemesi veya gençleştirici kapsüller içeren karışımlar hazırlamaktır. İkinci yöntemde ise oluşan çatlakları gidermek için ısıdan faydalanılmaktadır. Asfalt kaplamalar yalıtkan olduğundan indüksiyon ısısı uygulanması halinde verilen ısı yüzeyde kalmakta ve yüzeyin altına sıcaklık nüfuz etmemektedir. Bu nedenle bu tür karışımlarda  elik lif veya  elik yönlü lif karışıma ilave edilmektedir. Böylece karışımın iletkenliği arttırılarak, uygulanan indüksiyon ısısının kaplamanın daha alt kesimlerine ulaşması sağlanmaktadır. Bu çalışmada indüksiyonla ısıtma yönteminde tercih edilen  elik tel veya  elik yönlü lif yerine metal atıkları kaba agrega yerine kullanılarak kaplama tabakasının iletkenliği arttırılacaktır.

Bu  alışma, metal atıklarının asfalt kaplamalarda kullanılarak bertaraf edilmesi, bunun yanı sıra indüksiyon yöntemiyle asfalt kaplamaların kendini iyileştirmesi sayesinde faydalı bir alanda kullanılmasını amaçlamaktadır. Bir diğer amacımız ise indüksiyon yöntemi ile kendini onaran asfaltlarda modifiye bitüm kullanımının indüksiyon ile asfaltın kendini onarması üzerindeki etkisinin belirlenmesidir.

Metal atıklarının kullanılması ile çevreye verilecek zararın önlenmesinin yanı sıra yol yapım maliyetlerinin azaltılması ve yolların servis ömrünün arttırılması hedeflenmektedir. Asfalt kaplamaların indüksiyon yöntemiyle kendini iyileştirmesi, elektriksel olarak iletken atık metalik partiküllerin (metal atıkları gibi) kullanımıyla asfaltın ısıtılması ile sağlanacaktır. Isıtılan metal

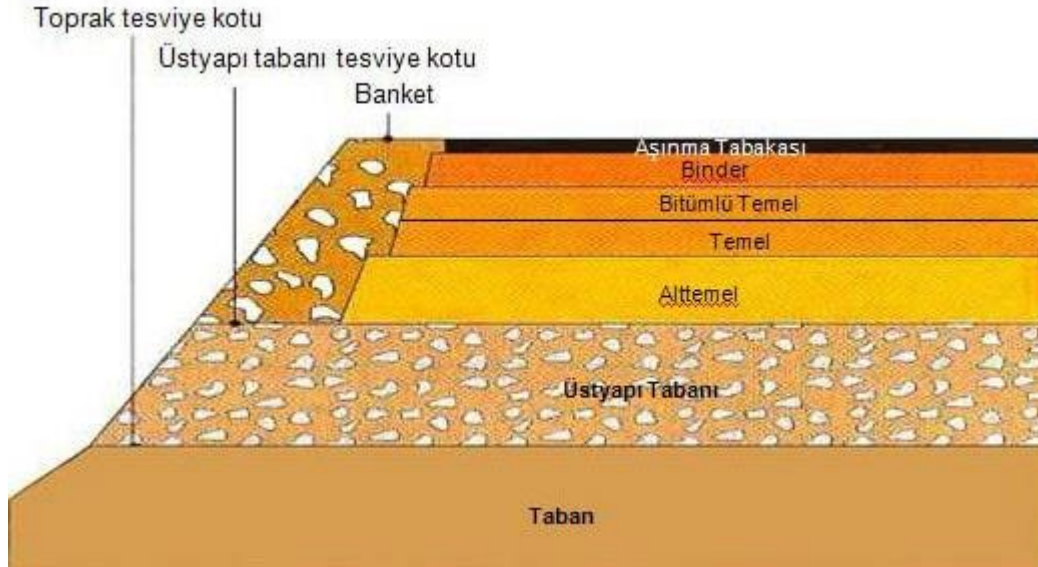
atıkları sayesinde karışımında bulunan bitüm yumuşayarak çatlağı dolduracak, böylece kaplamanın geçirimsizliği ve taşıma gücü yeniden sağlanacaktır. Bu yöntem, kaplamaların servis ömrünü uzatmak amacıyla günümüzde sıklıkla kullanılan pahalı çözümlere (katkı kullanımı gibi) de ekonomik bir alternatif olacaktır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Asfalt Kaplama Yapıları

Asfalt kaplama tabakaları ile oluşturulan üstyapıya “esnek üstyapı” denir. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyiyle sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alttemel tabakaları yoluyla taban zeminine dağıtan bir üstyapı şekli olup stabilizesi, adezyon, tane sürtünmesi ve kohezyon gibi kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır [3]. Esnek üstyapı denildiğinde sıkıştırılmış taban zemin üzerine inşa edilen ve dingil yüklerini taban zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde aktaran aşınma tabakası (asfalt betonu), binder tabakası (asfalt betonu), temel tabakası (asfalt betonu ya da granüler malzeme) ve alttemel tabakalarından (granüler malzeme) oluşan bir üstyapı tipi anlaşılmalıdır (Şekil 2.1) [3].



Şekil 2.1. Esnek üstyapı tipik tabakaları [3]

Tabakalı bir sistem olan esnek üstyapının yük taşıma kapasitesi, sistemi oluşturan tabakaların üstyapı direncine katkısı ve yükü yayma özelliklerine dayanır. İyi projelendirilmiş bir üstyapıda tabakalar tarafından yayılan yük, tabana ulaştığında tabanın, büyük deformasyonlara maruz kalmadan taşıyabileceği bir düzeye düşürülmüş olur. Üstyapıdaki tabakaları oluşturan malzemeler değişik özelliklere sahiptir. Alttemel ve temel tabakalarında granüler malzemeler kullanılırken kaplama tabakasında, özellikleri sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olan, viskoelastik davranış gösteren bitümlü karışımlar kullanılmaktadır. Bir üstyapı yapılmadan önce altyapı, üstyapıya istenilen desteği sağlayacak şekilde şartnamelere uygun olarak hazırlanır. Üstyapının performansı taban zemininin fiziksel özellikleri ve durumu ile doğrudan ilgilidir [3].

2.2. Asfalt Malzemelerin Mekaniki

Asfalt; bileşimi, üretim süreci, kullanım ortamı ve performansı veya hata türleri nedeniyle karmaşık, benzersiz bir malzemedir. Asfalt tipik olarak bir bitümlü bağlayıcı, dereceli agrega ve hava boşluklarından oluşur. Malzemenin özellikleri, bağlayıcının tipi ve derecesi ile agreganın tipi ve derecesine bağlıdır. Diğer bileşenler, asfalt karışımının özelliklerini geliştirmek için sıklıkla kullanılan dolgu maddeleri, kauçuklar ve plastikler gibi katkı maddelerini içerir. Isacson ve Lu, bitüm katkı maddeleri ve bunların kaplamanın fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak açıklamış ve yeni test yöntemleri sunmuşlardır [4].

2.2.1. Bitüm Kavramı

Bitüm, petrolün rafine edilmesi sırasında gerçekleştirilen bir dizi damıtma işlemi ile ham petrolden üretilen karmaşık, viskoelastik bir malzemedir. Farklı petrol kaynakları ve arıtma prosedürleri, farklı moleküler yapı ve bileşimlere sahip bağlayıcılarla sonuçlanmaktadır [5]. Bu karmaşıklık, Birleşik Krallık'ta ampirik ve reolojik testlerin bir kombinasyonu ile ölçülebilen çok çeşitli fiziksel özelliklerle sonuçlanır; ancak bu özellikler, İngiliz Standardı BS EN12591: 2009 [6] tarafından belirtilen şartname gereksinimlerini de karşılamalıdır. Daha önce bahsedildiği gibi esnek kaplamalar, aşırı gerilmeyi önlemek için bitüme bağlı katmanlardan alttaki bağlı olmayan malzemeye yükleri yayarak çalışır, ayrıca sertlik ve taşıma kapasitesi sağlar. Asfaltın mekanik özellikleri büyük ölçüde bağlayıcının özelliklerine bağlıdır; bu nedenle bitümün reolojik ve mekanik özelliklerini anlayabilmek ve ölçebilmek önemlidir [7].

2.2.2. Bitümün Yapısı

Reoloji, maddenin akışının ve deformasyonunun incelenmesidir; bir malzemenin yapısındaki değişiklikler, reolojinin değişmesine neden olacaktır. Bu nedenle, bitümün yapısını ve reolojisini etkilemek için nasıl etkileşime girdiğini anlamak önemlidir. Bitüm, ağırlıklı olarak az miktarda heterosiklik türe sahip hidrokarbonlar ve kükürt, nitrojen ve oksijen atomlarının yanı sıra eser miktarda nikel ve magnezyum gibi metaller içeren fonksiyonel gruplardan oluşan karmaşık bir molekül karışımıdır [8].

Bitüm bileşimi, ham petrolün kaynağına ve üretim sürecine bağlı olarak değişir; kimyagerler, bitümün kimyasal bileşimini çözücü ekstraksiyonu, absorpsiyonu, kromatografisi ve moleküler damıtmaya dayalı olarak daha homojen fraksiyonlara basitleştirmiştir [9]. Bitüm iki kimyasal gruba ayrılabilir: asfaltenler ve maltenler. Maltenler ayrıca doymuşlar, aromatikler ve reçinelere ayrılabilir. Asfaltenler, bitümün reolojik özelliklerini etkiler; asfalten içeriğinin artırılması, daha yüksek cam geçişli yapı (tipik olarak asfalt bağlayıcılar -40 °C ila 0 °C arasında değişir) [10] ile

daha sert, daha viskoz bitüm üretir [10]. Reçineler, asfaltlenler için dağıtıcı maddeler veya peptizatörlerdir; bunların asfaltlenlere oranı, bitümün yapısal karakterini, bitümün çözelti (SOL) veya jelatinimsi (GEL) tipi karakterini belirler. Reçinelerin eklenmesi bitümü sertleştirir [10].

Peptize (inceltilmiş) asfaltlenler için ana dağıtıcılar aromatiklerdir. Doymuşlar polar olmayan viskoz yağlardır; doymuş içeriğin artırılması bitümü yumuşatır. Bitümün yapısı, düşük moleküler ağırlıklı yağlı bir ortamda dağılmış veya çözülmüş yüksek moleküler ağırlıklı asfaltlen miselleri olan bir kolloidal sistem olarak kabul edilir [10]. Kolloidal stabilite indeksi (CI), asfaltlenlerin ve doymuş maddelerin reçinelere ve aromatlara oranıdır, kolloidal yapının stabilitesini tanımlamak için kullanılır; CI değeri ne kadar büyük olursa, bitüm o kadar fazla GEL tipi bitüm olarak kabul edilir, CI değeri ne kadar düşük olursa kolloidal yapı o kadar kararlı olur [7]. Bitümün görünümünü Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Bitümün görünümü

2.2.3. Bitümün Yaşlanması

Diğer birçok organik malzeme gibi bitümün özellikleri oksijen, ultraviyole radyasyon ve sıcaklık değişimlerinin varlığında değişir. Malzeme üzerindeki bu dış etkiler, reolojik ve mekanik özelliklerini etkileyen kimyasal bileşiminde değişikliklere neden olabilir. Bu süreç yaşlanma olarak bilinir ve bitümün sertleşmesine, viskozitesinin ve sertliğinin artmasına neden olabilir. Yaşlanma, yapısal performansta bir gelişme olarak görülebilir; örneğin, zaman içinde bitümün kürlenmesi olarak da bilinen sertleşmesi, hizmetin ilk birkaç yılında yoğun bitümlü makadamin (DBM) elastik sertliğinde %200'lük bir artışa neden olacaktır [11]. Yaşlanma aynı zamanda zararlı olabilir, üstyapı esnekliğini azaltır, dolayısıyla kırılma gerilme seviyesini ve gerilme gevşeme davranışını azaltır, aşınma ve çatlamaya karşı hassasiyeti artırır [12]. Traxler (1963), en önemlilerini oksidasyon, buharlaşma, sterik veya fiziksel faktörler ve yağların eksüdasyonu olarak

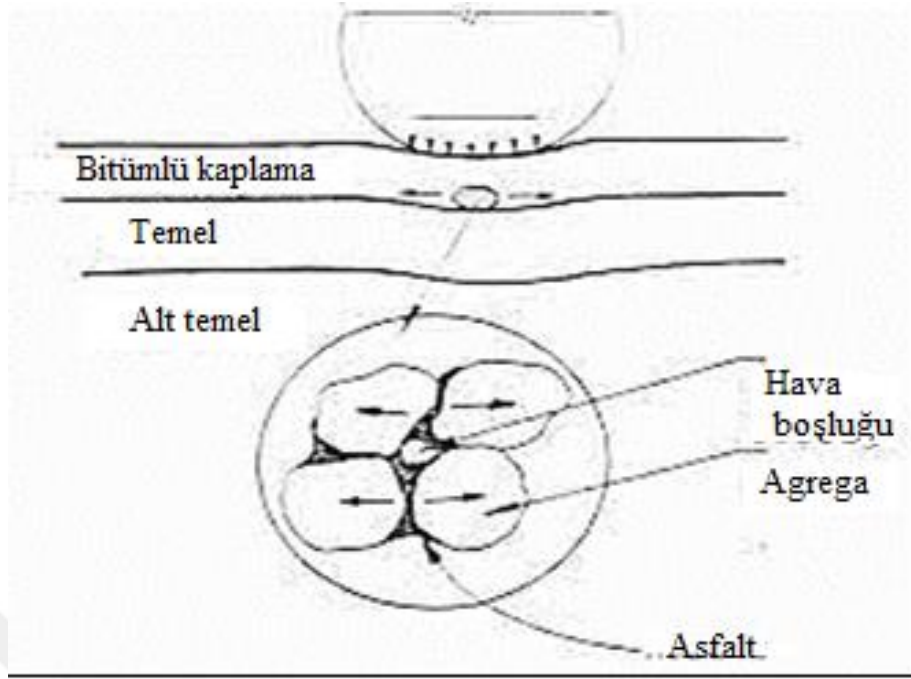
belirtmekle yaşlanmaya neden olabilecek çeşitli faktörleri tablolastırmıştır [8]. Bitüm, atmosferik oksijen ile temas halinde ise zamanla oksitlenir, üstyapı ne kadar geçirgen olursa, yapı bu işleme o kadar duyarlı olur. Oksidasyon, uzun süreli yaşlanma olarak bilinir. Bitüm içindeki polar moleküller, bitümün viskozitesini artıran daha yüksek misel ağırlıklı misellerle birleşebilen oksijen ile birleşir [10].

Asfalt üretimi, nakliyesi ve döşenmesi sırasında bitüm uçucu maddelerin kaybı nedeniyle önemli ölçüde kütle kaybeder (kısa süreli yaşlanma); yüksek sıcaklık uçucu bir kayba neden olur ve bitüm bileşenleri ile oksijen reaksiyonunun doğasını değiştirir [7]. Ancak Hagos (2008), üstyapı ömrü boyunca uçucu madde kaybının önemsiz olduğunu bildirmektedir. Yerinde koşulları simüle etmenin zorluğu nedeniyle uzun vadeli yaşlanmayı incelemek zordur; basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) gibi laboratuvar yöntemleri tamamen doğru kabul edilmez ve daha karmaşık bir modelde revize edilmesini gerektirir [7, 10, 12].

2.2.4. Bitümün Adezyonu

Bitümün yapışkan özellikleri, agrega parçacıklarını birbirine bağlayan asfalt kaplamalar için esastır. Bitüm-agrega yapışmasını etkileyebilecek birçok faktör vardır, ancak bu faktörlerin çoğu üretim sırasında kontrol edilebilir. Ana faktörlerden biri mineralojik bileşimdir. Kimyasal bileşimi, şekli/boyutu/dokusu ve yapısı gibi bitüm yapışmasını etkileyebilen agreganın fiziko-kimyasal özellikleridir [10]. Agreganın türü, bitüme olan afinitesine bağlı olarak yapışmayı etkileyebilir; örneğin silisli agregalar, yüksek silikon oksit içeriği nedeniyle yapışma hatalarına neden olma eğilimindedir, bu da bitümle kaplanmalarını zorlaştırır. Agreganın kaplanmasındaki zorluk ayrıca agregaların hidrofilik ve oleofobik olma eğiliminde olmaları ve bitüm yerine suyu tercih etmelerinden kaynaklanmaktadır; bu, artık değerlik veya bir agreganın yüzey yükü ile gösterilebilir. Bir agreganın dengesiz yüzey yükleri, zıt polariteye sahip sıvıları çekebilen ve aralarında yapışkan bir bağ oluşturan yüzey enerjisine sahiptir. Agregada, birden fazla sıvı içerisinde enerji ihtiyacını en iyi karşılayan sıvı ile daha iyi yapışacaktır.

Bitümün fizyomekanik absorpsiyon özellikleri, bitüm-agrega yapışmasının bir diğer önemli faktörüdür. Bitümün emilimi, agreganın petrografik özelliklerine bağlıdır. Domone ve Illston (2010), gözeneklerin, boşlukların ve mikro çatlakların ince bir mikro yapısının, bitüm için mevcut olan yüzeyi önemli miktarda artıracağını belirtmektedir Genel bir varsayım, daha pürüzlü yüzeylerde daha iyi bir yapışma olduğu yönündedir [7]. İyi bir yapışma için, agreganın ıslanabilirliği ile bitümün agregayı kaplamasına izin veren (yani pürüzsüz bir yüzey) ve ıslanıldığında bağlayıcıyı kavrayan pürüzlü bir yüzey dokusu arasında bir denge olmalıdır. Agregada parçacıklarını birbirine bağlayan asfalt kaplamaların bir kesitini Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Agregat parçacıklarını birbirine bağlayan asfalt kaplamalar [13]

Yapışma kusuru suyun etkilerinden kaynaklanan hasarın bir sonucudur; bağlayıcı içindeki gerilme seviyeleri mukavemeti aştığında yapışma kusuru meydana gelir. Suyun etkisi, bağlayıcıyı ‘yumuşatarak’ yapısal bütünlüğünü ve mukavemetini azaltarak kohezyon hatasına neden olabilir. Alternatif olarak, bağlayıcı yaşlanıp sertleştikçe, suyun yapışma gücü üzerindeki etkilerine daha iyi dayanabilir; ancak çatlama olasılığı da daha yüksektir. Kanitpong ve Bahia (2003), bağlayıcıların adezyon ve kohezyon özellikleri ile ilgili olarak suyun bu zararlı etkisini araştırmışlardır. Bağlayıcılardaki su hasarının soyulma (adezyon hatası) veya trafik kaynaklı gerilimlere karşı azalan direnç (kohezyon hatası) olarak görülebileceğini bulmuşlardır [14]. Yapışma kaybına ve dolayısıyla bitüm ve agreganın ayrılmasına neden olan, çoğu su hareketini içeren bir dizi mekanizma vardır. Read ve Whiteoak (2003), mekanizmaların her biri hakkında ayrıntılı bilgi verir: Agregat/bitüm/suyun termodinamik dengesiyle ilgili yer değiştirme, ayrılma, kabarma ve oyuklaşma, kendiliğinden emülsifikasyon, hidrolik temizleme ve boşluk basıncı [10].

Bitüm ve agreganın yapışmasını iyileştirmeye gelince, birkaç seçenek vardır. Hidratlı kireç, asfalt kaplamalarda, yaşlanmayı tersine çeviren ve yorulma direncini artıran kanıtlanmış bir katkı maddesidir. Yapılan çalışmalar ile, kaplamada kireç kullanmanın faydalarını ayrıntılı olarak araştırılmıştır [15]. Hidratlı kireç iki şekilde yapışmayı arttırmak için kullanılır: Kireçte bulunan ketonlar agregaya yapışarak soyulma etkilerini önler ve kireçte bulunan kalsiyum iyonları suyu iten hidrofobik bir yüzey oluşturur [10]. Alternatif yöntemler; gençleştiricilerin kullanımı, agreganın daha iyi nemlendirilmesi ve bitüm ile agregat arasında güçlü iyonik olarak bağlı çapraz bağlar oluşturabilen yağ aminlerinin kullanılması yoluyla bitümün viskozitesini değiştirmek olabilir.

2.2.5. Asfalt Karışımların Sertliği

Agrega ve bitümün bileşiminden oluşan asfalt, taşıtların teması için uygun bir yüzey sağlar ve alttaki malzemeleri hem çevre koşullarından hem de taşıtlardan kaynaklı yüklerden korur. Asfaltın yüklere karşı koyabilmesi için yeterli rijitlik modülüne sahip olması gerekir. Rijitlik, uygulanan stres koşulları altında deformasyona karşı dirençtir. Asfalt karışımı visko-elastik bir malzeme olduğundan, asfalt karışımının rijitliği normalde elastik ve viskoz bileşenleri içerir. Her bileşenin oranları öncelikle sıcaklığa ve yükleme süresine bağlıdır. Düşük sıcaklık ve kısa yükleme süresi altında asfalt karışımı elastik davranacaktır. Aksine, yüksek sıcaklık ve uzun yükleme süresi altında gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişki daha viskoz olacaktır [10]. Asfalt karışımlarının rijitliği, bir üstyapının ne kadar iyi performans gösterdiğini belirlemede ve üstyapıların trafik yüküne tepkisini analiz etmede oldukça önemlidir. Ayrıca bitüm yaşlandıkça ve viskozitesi arttıkça asfaltın rijitliği artacaktır. [16]

2.2.6. Kalıcı Deformasyon Yoluyla Kopma Mekanizmaları

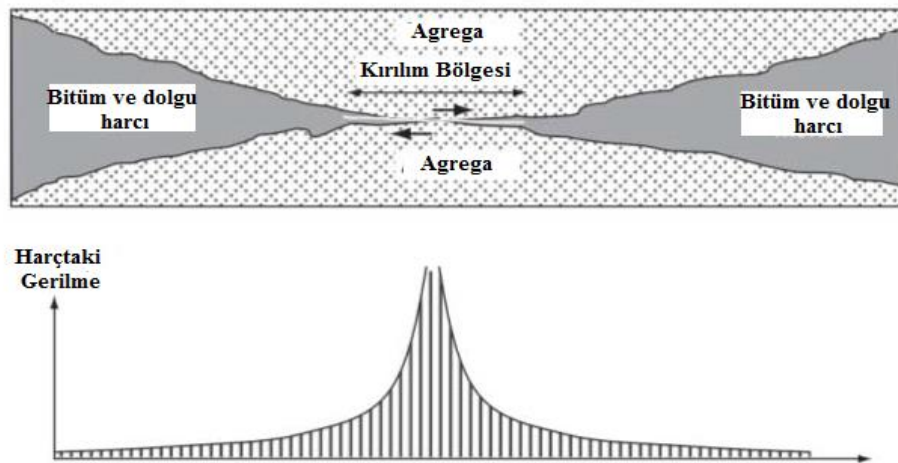
Kalıcı deformasyon veya tekerlek izi, asfalt kaplama üzerindeki trafik yüklemesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, tekerleklerin yoğun olarak geçtiği kesimlerin kenarları boyunca bir dizi çöküntü ve kabarma oluşmaktadır. Kalıcı deformasyon ancak agrega iskeleti deforme olursa meydana gelebilir; bu nedenle, örneğin artan agrega içeriği ve parçacık teması gibi düşük plastik gerilme ile sonuçlanan özellikler, kalıcı deformasyona direnmek için uygundur. Düşük sıcaklıklarda, agrega partiküllerindeki plastik gerilme önemsizdir çünkü bitümlü bağlayıcı bunu engeller ve parçacık temaslarından stresi uzaklaştırır. Artan sıcaklıklarla, parçacık temasındaki stres, parçacık kaymasına ve dolayısıyla agrega iskeleti açısından kalıcı deformasyona neden olabilecek bir noktaya kadar artar. Düşük hava boşluğu içeriği, bağlayıcıda ekstra basınç gerilmelerine neden olabilir, bu da parçacık temaslarında daha az normal gerilme olduğu anlamına gelir ve parçacık kayma şansını arttırmaktadır [17].

2.2.7. Yorulma ve Kırılma Yoluyla Kopma Mekanizmaları

Asfalt, agrega iskeleti, bitümlü bağlayıcı ve bir miktar hava boşluğu içerir. Gerilme altında, agrega iskeleti Thom (2014) tarafından özetlenen iki mekanizma yoluyla deforme olur: parçacık temaslarında sıkıştırma ve parçacıklar arası kayma (dönme ve ayrılma ile birlikte) [17]. Parçacıklar arası kayma yoksa, malzemenin rijitliğinin kullanılan agreganınkiyle aynı olduğu varsayılır (temas yasasının eklenmesi ve bağlayıcının etkileri ile). Trafik yükü altında asfalta uygulanan gerilme (ince agrega/kum/dolgu-bitüm) taneler arası kaymaya neden olabilir. Thom (2014), bu kaymayı Şekil 2.4'de parçacık temas noktalarında göstermektedir. Agreganın tanecikleri arasındaki temasa yaklaştıkça asfalttaki gerilme sonsuz olacak şekilde artar; sonsuz gerilim sadece kırılma olarak

tanımlanabilir [17], bu da parçacık kaymasına ve ayrılmanın oluşmasına neden olur. Çatlaklar, gerilmenin yeterince düşük olduğu bir bölgeye ulaşana kadar yayılarak yapının kademeli olarak zayıflamasına neden olabilir. Yorulma, karışım içindeki gerinim tarafından kontrol edilen parçacık temaslarında bu kırılma bölgelerinin yayılması ve genişlemesidir. Little (1997), yorgunluğun iki aşamalı bir süreç olduğunu belirtmektedir: (a) mikro çatlak büyümesi ve iyileşmesi ve (b) makro çatlak büyümesi ve iyileşmesi [18]. Mikro çatlakların yayılmasının daha büyük ve daha ciddi makro çatlaklara yol açabileceği bilinmektedir. Kırılma mekaniği, sıcaklığa ve yükler arasındaki dinlenme sürelerine bağlıdır, kritik durum düşük sıcaklık ve kısa dinlenme süreleri olduğu zamandır. Birbirini takip eden tekerlek yükü uygulamaları arasındaki dinlenme süreleri, bitümün viskoz akışı nedeniyle kırık bölgelerinin iyileşmesi ve gerilmelerin/gerinimlerin gevşemesi için önemlidir [19]. Düşük sıcaklıkta bitüm, parçacıklar arası hareketi kısıtlayan ve artan bir sertliğe sahiptir; daha fazla sertlik ile bağlayıcıdan geçen artan stres kırılma olasılığını artırmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda, bağlayıcıda çok daha az stres olur ve bitümün daha az viskoz hale geldiği ve herhangi bir çatlığa aktığı iyileşme olgusu meydana gelebilir. Thom (2014), düşük sıcaklıklarda yüksek sertlik ve artan hasarın olduğu ve yüksek sıcaklıklarda düşük sertlik ve aynı zamanda iyileşmenin olduğu bir “dinamik akı durumu” olduğunu öne sürmektedir [17]. Hem sıcaklık hem de döngüsel yüklemenin birleşik etkilerine ilişkin çok az araştırma vardır; Osman (2004), “daha yüksek bir sıcaklık, daha uzun bir dinlenme süresi bitümün iyileşme kapasitesini artırır” şeklinde basit bir analiz yapmıştır; ancak sıcaklık ve dinlenme süreleri birbirinden bağımsızdır, yüksek sıcaklığın olduğu yerlerde kısa dinlenme süreleri olabilir [19]. Tamamen yola ve farklı zamanlardaki trafik hacmine bağlı olduklarından, kendini iyileştirmenin etkileri düşünüldüğünde dinlenme sürelerini modellemek özellikle zordur [20]. Agrega ile bitüm arasındaki kırılma bölgesini Şekil 2.4’te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Kırılma bölgesinde gerilme dağılımı [17]

3. KENDİNİ İYİLEŞTİREBİLEN MALZEMELER

Kendini iyileştirme kavramı, organizmaların çatlakları iyileştirmesine, onarmasına ve ömrünü uzatmasına yardımcı olan biyolojik ve doğal olaylardan geliştirilmiştir. Benzer şekilde, bilim adamları, kendini iyileştiren birçok türde yeni materyal geliştirmek için araştırma yapmaktadır. Tablo 3.1, doğayı taklit eden gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan yeni kendini iyileştirme mekanizmalarını listelemektedir [21]. Sıvı bazlı ve katı bazlı kendini iyileştiren sistemler olmak üzere başlıca iki tür yeni kendini iyileştiren malzeme sistemi vardır [22].

Kendini iyileştiren malzeme kavramı yeni bir kavram değildir. Romalılar 2000 yıl önce havanlarında kireç kullanmışlardır; kireç yağmur suyunda çözülür ve su buharlaştığında onları dolduran çatlaklara sızarak "çatlakları iyileştirir". İyileşme, malzemelerin uzun bir ömür boyunca güvenilir ve dayanıklı kalabilmesi için önemlidir. Bir malzemenin birden fazla kullanımıyla, yorulma ve mikro çatlamanın başlaması nedeniyle özellikleri zamanla azalacaktır; yorulma ve çatlaklar çoğalarak malzemenin bozulmasına yol açacaktır. Kendini iyileştiren materyal, zaman içinde kendini onarma yeteneğine sahiptir [22].

Tablo 3.1. Yeni kendini iyileştiren materyallerde onarım stratejileri

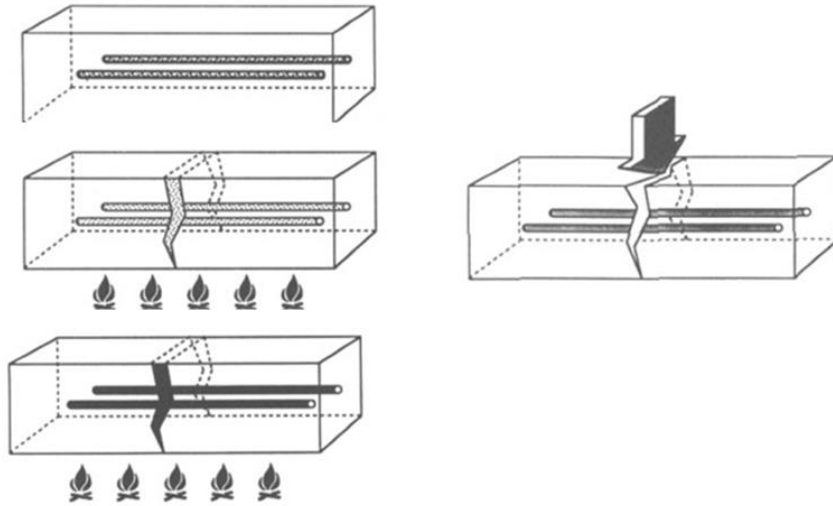
Biyolojik Bağlanma	Kompozit/Polimer Mühendislik	Sistemler	Sistemler Biyomimetiği Kendini İyileştirme veya Onarım Stratejisi
Terleme (sızma ya da kusma)	Kapsüller	Sıvı Bazlı	Yapı içinde yer alan bir depolama ortamından terleme işlemi, Enzim "şelale" reaksiyonu yerine 2 fazlı polimerik kütleme işlemi
Terleme (sızma ya da kusma)	İçi boş lifler	Sıvı Bazlı	Yapı içinde yer alan bir depolama ortamından terleme işlemi, Enzim "şelale" reaksiyonu yerine 2 fazlı polimerik kütleme işlemi
Kan akışı Damar ağı	İçi boş lifler	Sıvı Bazlı	2D veya 3D ağı, iyileştirici etkenin yenilenmesine ve yapının ömrü boyunca yenilenmesine izin verecektir
Kanın pıhtılaşması	Şifalı reçine	Sıvı Bazlı	Hasar bölgesine lokal olarak pıhtılaşmak üzere tasarlanmış sentetik kendini iyileştiren reçine sistemleri. Hasar bölgesinden uzakta pıhtılaşma engellenir ve ağ akmaya devam eder
Kendini iyileştirme kavramı	İyileştirilebilir polimerler	Katı bazlı	Onarımı başlatmak için harici müdahale gerektiren biyo-ilham iyileşmesi
Kan hücreleri	Nano parçacıklar	Katı bazlı	Nanoparçacıkları hasar bölgelerine bırakan yapay hücreler
İskelet/kemik iyileşmesi	Güçlendirici lifler	Katı bazlı	Kırık takviye liflerinin biriktirilmesi, emilmesi ve yeniden şekillendirilmesi
Güçlendirici liflerde elastik/plastik davranış	Güçlendirici lifler	Katı bazlı	Birden fazla yükleme döngüsü için kurban bağlarının tekrar tekrar kırılması ve yeniden oluşturulmasının meydana gelebileceği, byssal ipliğine benzer onarım stratejisi
Ağaç kabuğu iyileşmesi	-	Katı bazlı	Hasarlı yapıyı korumak için iç geçirimsiz sınır duvarlarının oluşturulması

3.1. Kendini İyileştirme Kavramı

Kendini iyileştirme, bir malzemenin hizmet ömrü boyunca meydana gelen hasarı otomatik olarak iyileştirme (onarma) yeteneğine sahip olması olarak tanımlanabilmektedir [23]. Mikroskobik ölçekte hasar (mikro çatlaklar gibi) nedeniyle zamanla bir malzemenin özellikleri bozulur. Bu çatlaklar büyüyebilir ve nihayetinde tam ölçekli kopmaya yol açabilir. Çatlaklar genellikle tamir edilebilir ancak bu zor bir süreçtir çünkü mikro çatlakları tespit etmek genellikle zordur. Malzeme bilimi alanında araştırmacılar, malzemelerin hizmet ömrünü iyileştirmek ve kendini iyileştiren bir sistem elde etmek için normal malzemelere kendini iyileştiren bileşenler eklemeye çalışmışlardır. Normal kullanımın neden olduğu hasarı özünde düzeltebilen bir malzeme, daha uzun malzeme ömrü yardımıyla bir dizi farklı endüstriyel işlemin üretim maliyetlerini düşürebilir, bozulmanın neden olduğu verimsizliği azaltabilir ve ayrıca malzeme arızasından kaynaklanan maliyetleri önleyebilir [24-26].

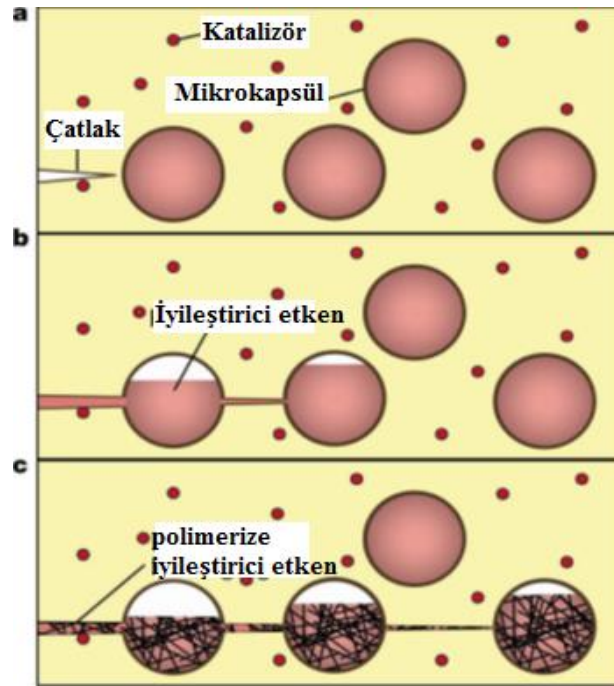
Kendini iyileştiren malzemeler üzerinde çoğu araştırma polimer alanında yapılmıştır. Kendini iyileştirme özelliklerine sahip bir polimerin ilk patenti 1966'ya kadar uzanmaktadır. Craven, yoğunlaşma polimerlerinden, maleimidlerle çapraz bağlanmış gruplar ile tersinir çapraz bağlı polimerler geliştirmiştir [27]. Bu polimerler çatlamadan sonra çapraz bağlı durumlarına geri dönebilir. Ne yazık ki bu yöntem çok fazla benimsenmemiştir.

1994 yılında Dry, gözenekli ve kırılğan içi boş liflerden çimento matrislerine polimerize edilebilir kimyasalların akıllı zamanlanmış salınımı yoluyla aktif ve pasif çatlama onarım yöntemi geliştirmiştir [26]. Şekil 3.1'de (solda) gösterildiği gibi, aktif çatlama onarım sistemi, mumla kaplanmış ve metil metakrilat ile doldurulmuş gözenekli lifler içermektedir. Bir çatlak oluştuğunda, çimento matrisine düşük ısı uygulanır, mum eritilir ve metil metakrilat matrise bırakılır. Daha sonra ısıtma, metil metakrilatın çatlağı kapatmak için polimerize olmasını sağlar. Pasif çatlak doldurma yönteminde ise, çimento matrisinde mikro çatlamalara neden olan yükleme, kırılğan içi boş cam elyafı kırarak kimyasalları serbest bırakır (Şekil 3.1 (sağda)).



Şekil 3.1. (Solda) Çatlakları onarmak ve doldurmak için polimerize olabilen kimyasalların zamanlanmış salınımı için yapılan tasarımda gözenekli lifler üzerindeki kaplamanın erimesiyle çatlak doldurulur, (sağda) kırılğan lif yük altında kırılır [28]

İlk tamamen bağımsız sentetik kendini iyileştiren materyal, White ve diğerleri (2001) tarafından mikrokapsüllü bir polimer kompozit örneği ile rapor edilmiştir. Bu iyileştirme kavramı Şekil 3.2'de gösterilmiştir [23]. Mikrokapsüllenmiş bir iyileştirici madde, iyileştirici maddeyi polimerize edebilen bir katalizör ile yapısal bir kompozit matrise gömülür. Yaklaşan bir çatlak, gömülü mikrokapsülleri kırar ve iyileştirici maddeyi kılcal etki yoluyla çatlak düzlemine bırakır. İyileştirici maddenin polimerizasyonu, gömülü katalizör ile temas ederek çatlak yüzlerini kapatır.



Şekil 3.2. Mikrokapsüllerle kendini iyileştirme yöntemi [23]

O zamandan beri, kendini iyileştiren materyaller oluşturma konusunda giderek daha fazla araştırma başarıyla yürütülmüştür. Kendini iyileştiren malzemelere örnek olarak beton, asfaltten, polimer ve kompozitler verilebilir [29-32].

3.2. Asfalt Betonun Kendini İyileştirmesi

Diğer kendini iyileştiren malzemelerle benzer şekilde, asfalt betonu hasarı bağımsız olarak kendini onarabilir. Asfalt betonu, dinlenme sürelerine maruz kaldığında sertliğini ve mukavemetini geri kazanma potansiyeline sahiptir. Asfalt betonun bu kendini iyileştirme kabiliyeti, 1960'lardan beri hem laboratuvar testlerinde hem de sahada gösterilmiştir [33-35]. Bazin ve Saunier (1967), tek eksenli çekme yükleri altında bozulana kadar test edilen asfalt beton kirişlerin, 25°C'lik bir sıcaklıkta basınç altında dinlenmeye bırakıldıklarında orijinal dirençlerinin %90'ını geri kazandıklarını bulmuşlardır [33]. Bunun yanı sıra, yorulma hasarlı kiriş numunelerinin, hatalı olan numunelerine bir günlük dinlenme süresi uygulandıktan ve bu dinlenme süresi boyunca çatlak yüzlerine küçük bir basınç uygulandıktan sonra orijinal yorulma ömürlerinin yarısından fazlasını geri kazanabileceklerini buldular. Hem dayanım hem de yorulma ömrünün iyileşmesi, dinlenme sürelerinin neden olduğu iyileşmenin kanıtıdır. Bundan sonra, yüklemeler arasına dinlenme süreleri eklendiğinde bir asfalt karışımının mukavemet geri kazanımı ve yorulma ömrünün uzatılmasını incelemek için daha fazla laboratuvar deneyi yapılmıştır.

Castro ve Little tarafından yapılan laboratuvar deneyleri, bir asfalt karışımının yorulma ömrünün, normalde sürekli yükleme testine dinlenme süreleri eklendiğinde uzatılabileceğini göstermiştir [31, 36]. Asfalt betonunun iyileşmesi saha deneyleriyle de gösterilmiştir: Si ve diğerleri (2002), bir kaplamanın sertliğini yükleme geçişlerinden önce, hemen sonra ve 24 saat sonra değerlendirmek için yüzey dalgası ölçümlerini kullanmıştır [37]. 24 saat dinlenmenin ardından sertlik tamamen iyileşmiştir. Kışın gözlenen çatlakların yaz aylarında ortadan kalktığı birçok araştırmacı tarafından da bildirilmiştir. Sonuç olarak, iyileşme, laboratuvar yorulma ömrünü sahadaki yorulma ömrüne çevirmek için gereken kayma faktöründe önemli bir rol oynar [38].

3.3. Bitüm ve Asfalt Karışımlarının Kendini İyileştirmesi

Bir asfalt karışımının iyileşmesi, içindeki çatlakların kapanması nedeniyle sertliğinin ve mukavemetinin geri kazanılmasıdır. Pekçok araştırmacı, asfalt betonunun iyileştirici mekanizmalarını incelemiştir. İyileşmenin genellikle bitümün sol-jel özellikleriyle ilişkili olduğuna inanılmaktadır. Bitüm, geleneksel olarak, düşük moleküler ağırlıklı yağlı maltenlerde dağılmış veya çözünmüş yüksek moleküler ağırlıklı asfaltten misellerden oluşan bir koloidal sistem olarak kabul edilir [39]. Bitümün sol-jel sistemi içinde, soldan jele veya jelden sola dönüşüm, sıcaklık, gerilme vb. değişiklikler nedeniyle tersine çevrilebilir şekilde gerçekleşir. Bir bitüm sisteminin

koloidal özellikleri, düşük sıcaklıkta jel benzeri tipten yüksek sıcaklıkta sol benzeri türe dönüşür. Sıcaklık düştüğünde, bitümün koloidal özelliği sol-benzeri durumdan jel-benzeri hale dönecektir. Yükleme, bitümün tıpkı su gibi sol benzeri davranmasına neden olur. Yükleme sona erdiğinde bitümün özellikleri hemen jele dönüşür. Castro ve Sánchez, dinlenme dönemlerinde asfalt karışımlarının iyileşmesini sol-jel teorileri ile açıklamışlardır. Yüksek sıcaklıkta, bitümün bir sol yapısından jel yapısına dönüşmesi nedeniyle iyileşme gerçekleşir. Dinlenme süresi yeterliyse, bu neredeyse tamamlanmış olacaktır. Düşük sıcaklıkta, dinlenme süreleri yükleme döngülerinin yarattığı yapısal hasarın iyileşmesine izin vermez ve iyileşme sadece kısmi olacaktır [36].

Phillips (1998), bitümün iyileşmesini açıklamak için üç aşamalı bir difüzyon modeli önermiştir: (1) birleştirme gerilmeleri ve bitüm akışı nedeniyle yüzey yaklaşımı, (2) ıslatma (yüzey enerjisi yoğunluğu tarafından tahrik edilen iki çatlamış yüzeyin birbirine yapışması) ve (3) asfalt yapılarının difüzyonu ve rastgele hale getirilmesi. İlk iki adım, sertlik modülünün geri kazanılmasına neden olur. Üçüncü adım ise dayanımın geri kazanılmasına neden olur [40].

Little ve Bhasin (2007), asfalt malzemelerinin iyileşme sürecini açıklamak için benzer 3 aşamalı bir model önermiştir: (1) bir çatlağın iki yüzünün ıslatılması, (2) moleküllerin bir yüzden diğerine difüzyonu ve (3) malzemenin orijinal dayanımına ulaşmaya çalışmak için dağınık moleküllerin rastgele hale getirilmesi [31]. Islatma, bitümün mekanik ve viskoelastik özellikleri ve malzeme sabitleri (gerilme mukavemeti, kohezyon ve yüzey serbest enerjisi) ile belirlenir. Mukavemetin daha sonra geri kazanılması, asfalt bağlayıcının yüzey serbest enerjisi ve asfalt moleküllerinin çatlak arayüzü boyunca kendine difüzyonu ile belirlenir [41].

Little ve arkadaşları (2001) dinlenme dönemlerinde iyileşmeyi kısa süreli iyileşme oranı ve uzun süreli iyileşme oranı olarak ayırmıştır. Kısa süreli iyileşme ve uzun süreli iyileşme, sırasıyla malzemenin Lifshitz van der Waals yüzey enerjisi bileşeni ve asit-baz yüzey enerjisi bileşeni ile olan ilişkilerine göre ayırt edilmiştir [42]. Kısa süreli iyileşme, yüzey enerjisinin Lifshitz van der Waals bileşeniyle ters orantılıyken, uzun süreli iyileşme asit-baz bileşeniyle doğru orantılıdır.

Kringos ve diğerleri (2011), bitümün iyileşmesini simüle etmek için mekanik bir model kullanmıştır [43]. Bitüm, mekanik veya çevresel yükler altında faz ayrımı eğilimi gösterir ve bu fazlar sonucunda ortaya çıkan arayüzler yüksek gerilmeleri çeker ve çatlamaya meyillidir. Sıcaklığı artırarak veya mekanik enerji ekleyerek, fazlar kendilerini yeni bir konfigürasyonda yeniden düzenlerler veya kendilerini daha homojen bir durumda karıştırarak tek bir fazın var olduğu görüntüsünü verirler. Böylece malzeme mikro çatlakları kapatacak ve bu durum mekanik özelliklerin geri kazanılmasıyla sonuçlanacaktır.

3.4. Asfalt Betonun Kendini İyileştirmesini Etkileyen Faktörler

Asfalt betonunun kendini iyileştirme oranını birçok faktör etkileyebilir. Bu faktörler üç kategoriye ayrılabilir: Bitüm özellikleri, asfalt karışım bileşenleri ve çevre.

3.4.1. Bitümün Özellikleri

Asfalt betonunun, içindeki bitümün iyileştirme potansiyeli sayesinde kendini yenileyebileceği düşünüldüğünde, asfalt betonunun kendini iyileştirme potansiyellerinde bitüm özelliklerinin önemli bir rol oynadığı inkar edilemez. Birçok araştırmacı, bitüm özelliklerinin iyileştirme potansiyelini nasıl etkilediğini açıklamıştır.

Bitümün Tipi

Van Gooswilligen ve diğerleri (1994), bitüm içeriğinin ve bitümün viskozitesinin, 25'e eşit yük süresi boyunca dinlenme süresi oranı için yoğun bir asfalt betonunun iyileşmesi üzerindeki etkisini incelemiştir [44]. Asfalt betonunun iyileşme hızı, bitüm içeriğinin artmasıyla artmıştır ve yumuşak bitümün (80/100) iyileşme kapasitesi, sert bitümün (50/60) iyileşme kapasitesinden daha yüksektir.

Viskoelastik Özellikler

Sol-jel teorisi genellikle bitümün kendini iyileştirmesini açıklamak için kullanıldığından, bitümün sol-jel yapısı kendini iyileştirme oranını etkiler. Bitümün sol-jel yapısını yansıtan viskoelastik özelliklerin, bitümün kendini iyileştirme oranını etkilediği yaygın bir görüş birliğidir. Birçok araştırmacı, daha düşük bir sertliğe ve daha yüksek bir faz açısına sahip, sol benzeri bir bitümün daha yüksek bir kendini iyileştirme kapasitesi gösterdiğini kanıtlamıştır [44].

Yüzey Enerji Yoğunluğu

Lytton ve diğerleri (2001), bitüm ve asfalt betonunun mikro hasar iyileştirmesini incelemiş ve asfalt betonu için bir iyileştirme modeli oluşturmuştur [45]. Bu modelde, kısa vadeli iyileşme hızı, yüzey enerjisi yoğunluğu Lifshitz-van der Waals bileşeniyle ters orantılıdır. Uzun vadeli iyileşme hızı, yüzey enerji yoğunluğunun asit-baz bileşeniyle doğru orantılıdır.

Si ve diğerleri (2002) asfalt betonunun iyileşme oranını (sözde-gerinim enerji geri kazanım oranı açısından) yüzey enerji yoğunluğu ile ilişkilendirmiştir [37]. Yüzey enerji yoğunluğunun Lifshitz-van de Waals bileşeni ile asfalt betonunun kısa süreli iyileşme hızı (dinlenme sürelerinin ilk 10 saniyesinde iyileşme) arasındaki ters orantı belirlenmiştir. Lifshitz-van de Waals davranışlarının, bağlayıcının iyileşmesine elverişli olmadığı açıktır. Ayrıca, yüzey enerji yoğunluğunun asit-baz bileşeninin asfalt betonunun iyileşme oranını arttırdığını da bulmuşlardır.

3.4.2. Bitüm Bileşimleri

Si ve diğerleri (2002) bitümün kimyasal bileşiminin kendini iyileştirme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [37]. Aromatiklerin aromatik halkaların pi-pi etkileşimi için iyileşmeyi teşvik ettiği sonucuna vardılar. Ek olarak, heteroatom içeriği de iyileşmeyi destekler çünkü kükürt, oksijen ve nitrojen bitümün polaritesini desteklemektedir [37,46].

Difüzyon

Difüzyon, asfalt betonunun iyileşmesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. İyileşme mekanizmalarından biri, moleküllerin çatlak yüzeyinde kendine yayılmasıdır [47]. Bu nedenle, iyileşme hızı difüzyon hızı (yüksek konsantrasyonlu bir bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye moleküler hareket hızı) tarafından belirlenir. Phillips ayrıca, asfaltın yapısının difüzyonla sınırlı birikiminin iyileşmede güç kazanımını kontrol ettiği sonucuna varmıştır [40].

Yaşlanma

Ofori-abebrasse (2006), yüzey enerji yoğunluğunun Lifshitz-van der Waals bileşeninin yaşlanma ile arttığını, yüzey enerji yoğunluğunun asit-baz bileşeninin yaşlanma ile azaldığını bulmuştur [48]. Yüzey enerji yoğunluğunun Lifshitz-van Der Waals bileşeni, kısa vadeli iyileşme oranı ile ters ilişkilidir ve yüzey enerji yoğunluğunun asit-baz bileşeni, uzun vadeli iyileşme oranı ile ilgilidir. Sonuç olarak, hem kısa süreli iyileşmenin hem de uzun süreli iyileşmenin büyüklüğü yaşlanma ile azalacaktır. Bu nedenle, toplam iyileşme kapasitesi yaşlanma ile azalmıştır.

Modifiyeler

Modifiye edilmiş bitümlü bir asfalt kaplama genellikle çok iyi yorulma ve tekerlek izi direncine sahiptir. Bununla birlikte, modifiye edicinin dinlenme dönemlerinde bitümün kendini iyileştirme hızı üzerindeki etkisi açık değildir. Farklı araştırmacılar, modifiyerlerin bitümün kendini iyileştirmesi üzerindeki farklı etkilerini açıklamışlardır [22, 46].

Asfalt Karışımı Bileşimi

Bitüm içeriği, agrega yapısı özellikleri ve gradasyon dahil olmak üzere asfalt karışımı bileşimi, asfalt betonunun kendini iyileştirme oranını etkiler.

Bitüm İçeriği

Asfalt betonu kendini iyileştirebilir çünkü içindeki bitüm kendini iyileştirir. Bu nedenle, bitüm içeriği asfalt betonunun iyileşmesinde önemli bir rol oynar. Van Gooswilligen ve arkadaşları (1994), daha yüksek bitüm içeriğine sahip bir asfalt betonunun daha yüksek iyileşme oranları sergilediğini göstermiştir [44].

Karışım Gradasyonu

Abo-Qudais ve Suleiman (2005), asfalt betonunun yorulma hasarını ve çatlak iyileşmesini ultrason dalga hızı ile izlemiştir [49]. Ultrason dalga hızı, yorulma testinden önce, sonra ve dinlenme sürelerinden sonra silindirik asfalt numunesi üzerinde ölçülmüştür. Dinlenme sürelerinin neden olduğu ultrason dalga hızındaki artış çatlama ve iyileşmeyi tahmin etmek için kullanılmıştır.

Daha iri agregalarla hazırlanan numune, daha yüksek bir iyileşme oranı göstermiştir, çünkü daha az yüzey alanına sahip kaba gradasyon, daha kalın asfalt film kalınlığına ve agregaya ile asfalt arasında daha az geçiş bölgesine sahip olup, bu da asfaltın çatlaklarında iyileşme eğilimini arttırmaktadır.

Yapısal Özellikler

Kim ve Roque (2006) çalışmalarında, asfalt karışımlarının iyileştirici özelliklerinin, polimer modifikasyonundan daha çok agregaya yapısı özelliklerinden (agregaların birbirine bağlanması, film kalınlığını ve agregadaki boşlukları etkiler) etkilendiği sonucuna varmışlardır [50].

Asfalt Tabakası Kalınlığı

Bir asfalt tabakasının kalınlığı da iyileşme açısından çok önemlidir. Theyse ve diğerleri (1996), kayma faktörünün asfalt tabakasının kalınlığı ile belirlendiğini, daha kalın bir asfalt tabakasının iyileşme için elverişli olduğunu, asfalt tabakasının kalınlığının artmasıyla kayma faktörü arttığını belirtmiştir [51].

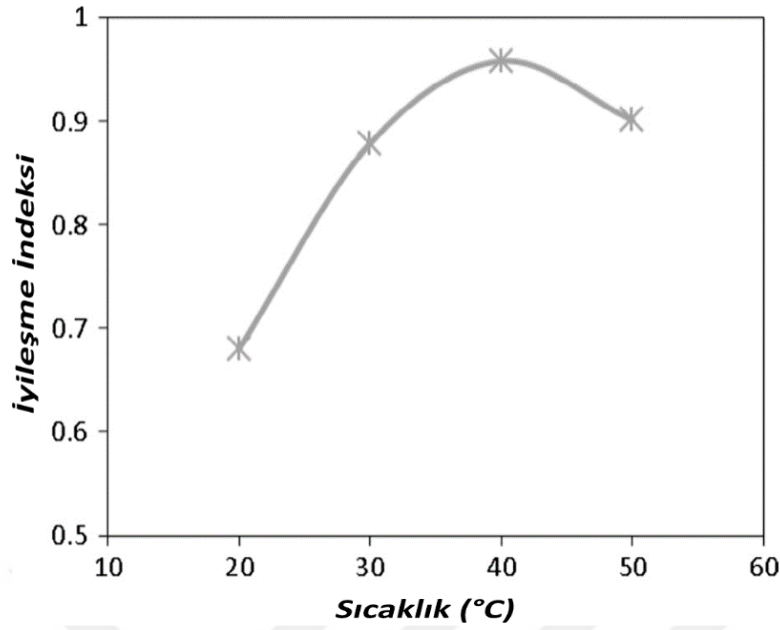
3.4.3. Çevresel Faktörler

Sıcaklık

Asfalt betonunun kendini iyileştirmesi, sıcaklığa bağlı bir olgudur. Si ve arkadaşları çalışmalarında, sıcaklığın artmasının asfalt betonunun iyileşme hızında önemli bir artışa neden olduğunu belirlemişlerdir [37].

Grant, sıcaklığın artmasının geri kazanım oranını artırdığı ve hem kaba hem de ince karışımlar için tam geri kazanım için gereken süreyi kısalttığı sonucuna varmıştır. İyileşmenin belirli bir sıcaklığın biraz üzerinde olduğunu öngörmüştür [52].

Kim ve Roque (2006) ayrıca çalışmalarıyla, kendini iyileştirme oranının sıcaklık duyarlılığının oldukça doğrusal olmadığını ve sıcaklığın artmasıyla iyileşmenin arttığını göstermiştir (Şekil 3.3) [50].



Şekil 3.3. Asfalt betonunda iyileşme ve sıcaklık ilişkisi [53]

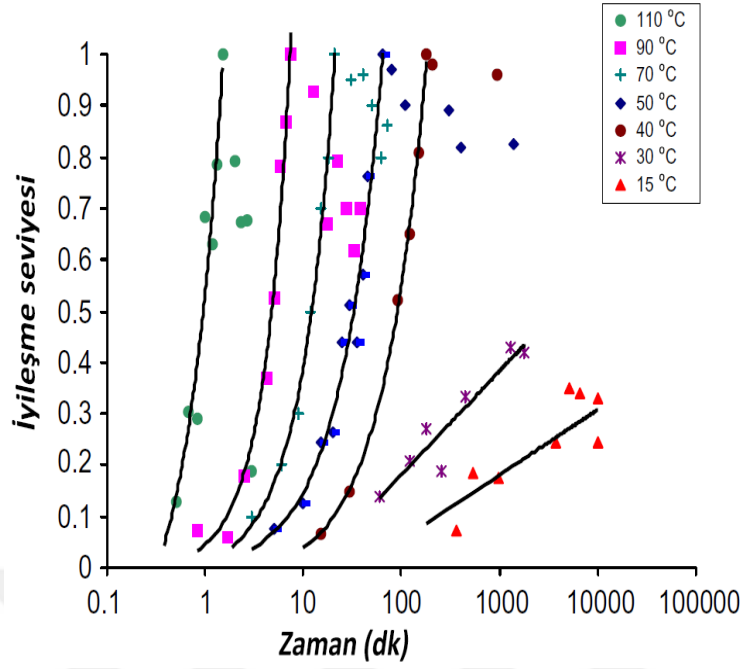
Yükleme Geçmişi

Yükleme geçmişi, asfalt betonunda iyileşmeyi etkileyen en önemli faktörlerden biridir [54]. Kim ve Little, iyileştirme potansiyelini belirlemek için çentikli asfalt beton kirişler üzerinde değişen dinlenme süreleri ile farklı türlerde döngüsel yüklemeye testi gerçekleştirmiştir [55]. Yüklemeye geçişinin asfalt kirişlerin iyileşmesi üzerinde etkisi olduğu gösterilmiştir [55,56]. Lytton ve diğerleri (2001), asfalt betondaki hasar artışını ve iyileşmeyi tahmin etmek için yapısal bir model geliştirmişlerdir [45]. Bu model, farklı yüklemeye hızları ve değişen dinlenme süreleri ile rastgele uygulanan çok düzeyli yüklemeye oluşturan hem kontrollü gerilim hem de kontrollü gerilim modlarında karmaşık yüklemeye geçmişlerinden kaynaklanan hasar büyümesini ve iyileşmeyi başarıyla öngörmüştür.

Dinlenme Süreleri

Dinlenme sürelerine tabi tutulduğunda asfalt betonu, içerisindeki çatlakları kapatarak hasarı iyileştirme, mekanik özelliklerini geri yüklemeye ve dayanıklılığını artırma potansiyeline sahiptir. Dinlenme sürelerinin iyileşme üzerindeki faydalı etkileri birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir [31, 33-35, 45, 50]. Dinlenme süreleri, asfalt betonunun sertliğini ve mukavemetini geri kazanmaya ve yorulma ömrünü uzatmaya yardımcı olur. Ancak iyileşme, dinlenme süreleri olmadan da gerçekleşir [57].

Garcia, asfaltın iyileşmesi için farklı sıcaklıklarda gerekli dinlenme süresini, Arrhenius eşitliğini kullanarak matematiksel olarak hesaplamıştır (Şekil 3.4) [58].

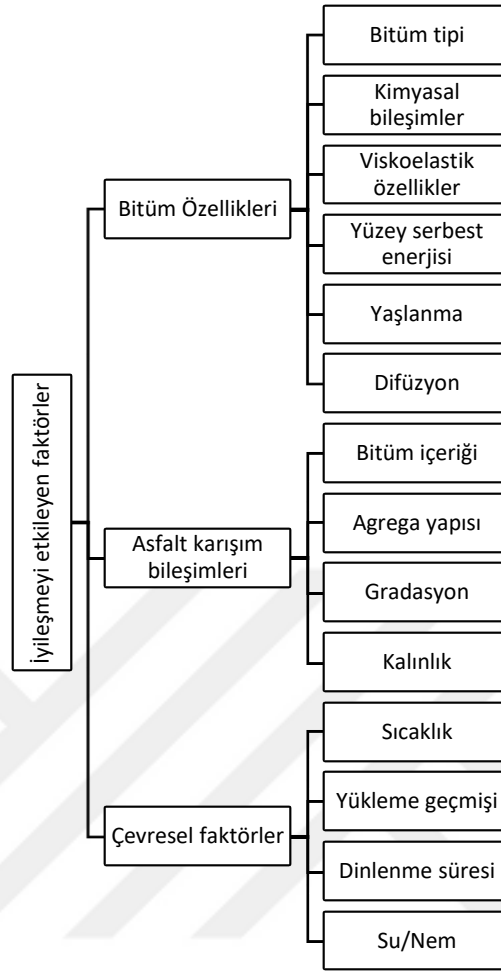


Şekil 3.4. Farklı sıcaklıklarda iyileşme seviyesi ve zaman ilişkisi [58]

Su

Su aynı zamanda iyileşmede de rol oynar. Hefer'e (2004) göre su, yapışkan bağın iyileşmesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir, çünkü su, agregalara bitümden daha büyük bir afiniteye sahiptir ve bu nedenle kırılmayı teşvik eder ve iyileşmeyi önlemektedir [59]. Bununla birlikte, Zollinger (2005) tezinde suyun bitümün uzun süreli iyileşme kabiliyetini arttırdığı (asit-baz bileşeninde bir artış) ve kırılmaya karşı direncini (toplam kırılma bağ enerjisinde bir azalma) azalttığı sonucuna varmıştır [60]. Cheng (2002) tarafından açıklandığı üzere, sudaki hidrojen atomları, Lewis asidi ve bitümün yüzey enerji yoğunluğunun baz bileşenleri ile iyi bir etkileşime veya afiniteye sahiptir; dolayısıyla su, hidrojen bağlarını daha güçlü hale getirir ve iyileştirme kabiliyetini artırır [61]. Bu hidrojen atomlarının bağlanması zaman aldığından asfaltın uzun süreli iyileşmesi ile ilişkilendirilir [62].

Önceki literatür incelemesine dayanarak, asfalt karışımlarının iyileşme oranını etkileyen faktörler Şekil 3.5'te özetlenmiştir.



Şekil 3.5. Asfalt karışımlarının iyileşmesini etkileyen faktörler [16]

Daha önce tartışıldığı gibi, asfalt betonu kendini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, iyileşme hızı ortam sıcaklıklarında, özellikle düşük sıcaklıklarda yeterli değildir. Ayrıca, tam iyileşmeye izin vermek için yoldaki trafik dolaşımını durdurmak akıllıca değildir. Bu nedenle, yol mühendisliğinde asfalt betonunun kendini iyileştirme oranını arttırmak zor bir iştir. Literatürden, iyileşmenin sıcaklığa bağlı doğasının, bitüm difüzyonu ve yüksek sıcaklıklarda akış yoluyla asfalt kaplamadaki hasarı iyileştirme potansiyeli sunduğu açıktır.

3.5. Asfalt Kaplamada Yeni Kendini İyileştirme Teknikleri

Asfalt kaplamaların kendini iyileştirme yetenekleri, yaşlanma ve çevre gibi dış etkenlerin neden olduğu yorgunluğu onarma yeteneği ile yaklaşık elli yıldan beri bilinmektedir. Kendini iyileştirme süreci basitleştirilebilir; bir mikro çatlakın yüzleri temas halindeyken, yüzey enerjileri tarafından aktive edilen kılcal hareket meydana gelir ve moleküllerin bir yüzden diğerine difüzyonu gerçekleşir, ardından dağınık moleküllerin rastgele hale getirilmesi ve dolanması gerçekleşir.

Asfalt kaplamalarda kendini iyileştirme birkaç gün sürer ancak bu sürekli trafik akışı nedeniyle pratikte imkansızdır. Araştırmacılar, asfalt kaplamaların iyileşme oranını artıran ve kaplamanın daha fazla bozulmasını ve çatlak yayılmasını önleyecek teknolojileri hedeflemektedirler [63].

Asfalt özelliklerinin zamanla bozulması, kaplamada çatlamalara neden olabilir. Sürekli yüklem altında dinlenme süreleri olmadan asfalt kendini iyileştiremez ve düşük sıcaklıkların ve bağlayıcının yaşlanması etkisiyle çatlaklar yayılabilir ve kaplamanın yapısal bozulmasına neden olabilir. Yaşlanma, asfalt bağlayıcının sertliğinde bir artış ve gevşeme gerilimlerinde bir azalmadır, bu da bağlayıcıyı kırılgan hale getirir. Bunun nedeni, asfalt içeriği artan ve malten içeriği azalan karışımın agrega parçacıklarının arayüzünde mikro çatlaklar oluşturan oksidasyondur [10].

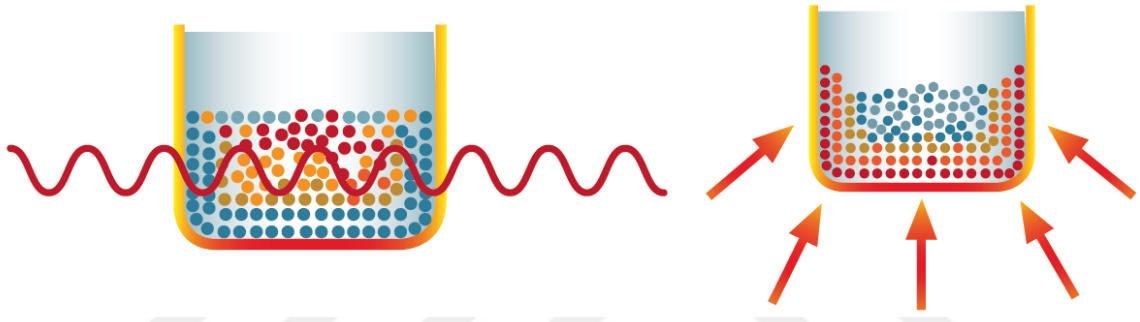
Kaplama bakımı için, tarihsel olarak, mevcut çatlaklarda daha fazla çevresel zararı önlemek için sızdırmazlık malzemeleri gibi yüzey teknolojilerinin kullanıldığını görülmüştür. İyileştiriciler de (ABD'de yaygın olarak [64]) bitümün kimyasal bileşimini değiştiren onarıcı maddeler olarak yorulmuş kaplamaları iyileştirmek için kullanılmıştır. Bununla birlikte, bu tekniklerin her ikisi de, kullanımdan sonra kaplamanın ömrünü birkaç yıl uzatabilen yüzey işlemleridir. Ancak bunlar yüzeyden yalnızca birkaç santimetre derinlikte etkilidir ve kaplama içindeki derin köklü çatlakları etkilemez. Chiu ve Lee (2006) tarafından yapılan bir deney bunu doğrulamaktadır. Etkinliklerini değerlendirmek için 12 yıllık bir otoparkta üç çeşit canlandırıcı kullanmışlardır; neredeyse %10'luk oldukça yüksek bir boşluk içeriğine rağmen, üç canlandırıcıdan hiçbirinin kaplamanın içine iki santimetreden fazla nüfuz etmediği görülmüştür [65]. Dahası, iyileştiriciler yolların kayma direncini azaltır ve çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir.

Asfalt beton kaplamaların iyileştirme özelliklerini hızlandırmak için üç farklı yaklaşım vardır: indüksiyonla ısıtma, mikrodalga ısıtma ve kapsüllenmiş iyileştirici maddeler. Öte yandan, asfalt betonunda canlılığı henüz test edilmemiş farklı malzemeleri iyileştirmek için kullanılan farklı yöntemler vardır. Bunların örnekleri, kalsiyum karbonat üreterek çatlakları kapatabilen bakteriler veya su ile temas ettiğinde çatlakların yayılmasını durdurabilecek hidratsız çimentolu malzemelerdir [66]. Hidratsız çimentolu malzemeler, bağlanma yetenekleri ile kullanılabilir veya iyileşme sürecini tetikleyen ısı üretebilir.

3.5.1. Mikrodalga Isıtma İle Kendini İyileştiren Asfalt Kaplamalar

Mikrodalgalar, radyo, görünür ışık ve X-ışını dalgalarına benzer nitelikteki elektromanyetik dalgalardır. Onları diğerlerinden ayıran şey dalga boylarıdır (veya başka bir deyişle frekanslarıdır). Bu nedenle, örneğin, görünür ışık $4 \times 10^{-7} \text{m}$ (mor) ile $7 \times 10^{-7} \text{m}$ (kırmızı) arasında bir dalga boyuna sahipken, mikrodalgalar 100MHz ile 100GHz arasındaki frekanslara karşılık gelen 3mm ile 3m arasında dalga boylarına sahiptir. Bir mikrodalga fırın tipik olarak yaklaşık 120 mm'lik bir dalga boyuna karşılık gelen 2,45 GHz'de çalışır. Mikrodalgaların kullanımı, kaplama içindeki sıcaklığı

artırmak ve iyileşme sürecini başlatmak için geliştirilen bir tekniktir. İndüksiyonla ısıtma gibi mikrodalga ısıtmasında da, asfalt malzemeye karıştırılmış elektriksel olarak iletken malzemeler, dolgu maddeleri ve lifler kullanılır. Dalgalarla etkileşime girmek ve mikro çatlak çevresinde ısı üretmek için yeterince büyük hacimde iletken dolgu maddeleri / lifler olmalıdır [67, 68]. Geleneksel ısıtma yöntemlerinde ısı malzemenin yüzeyinden etki ederek iç kısımlarına doğru yayılır. Bu tür ısıtma sistemlerinde ısınmanın hızı ısıtılan malzemenin ve içinde bulunduğu kabın termal iletkenlik özelliklerine bağlı olduğu için hızlı ve etkin değildir. Mikrodalga ısıtmasında ise mikrodalgaların moleküller tarafından soğurulmasıyla, ısı moleküler düzeyde malzemenin içinde üretilir. Malzeme içindeki moleküllerden yayılan ısı, termal iletkenlik özelliklerinden bağımsız olduğu için sıcaklık artışı çok hızlı ve verimli gerçekleşir (Şekil 3.6) [69].



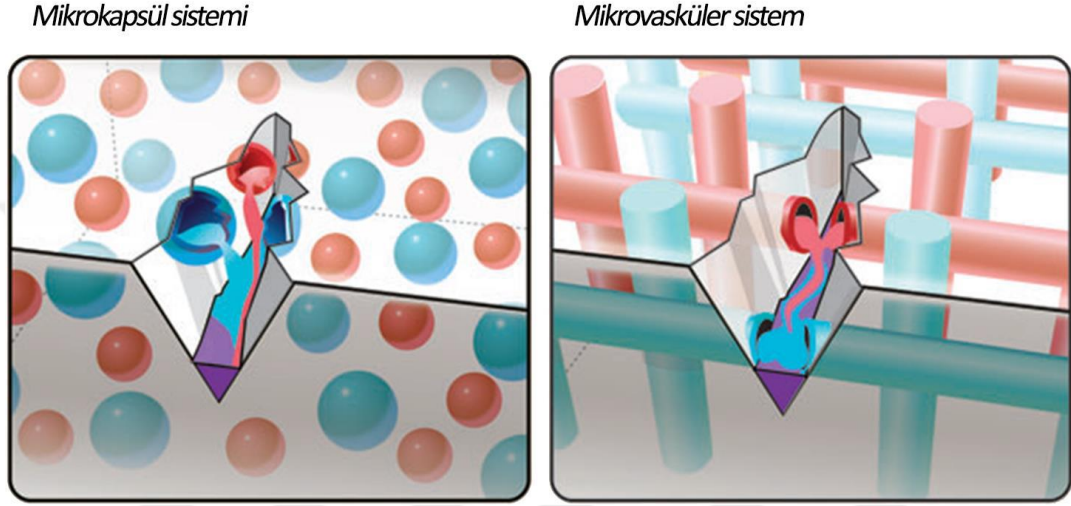
Şekil 3.6. Mikrodalga (solda) ve geleneksel (sağda) ısıtma sisteminin karşılaştırılması [69]

3.5.2. Kapsüllü Gençleştiriciler ile Kendini İyileştiren Asfalt Kaplamalar

Bir asfalt bağlayıcının yaşlanmasının kimyasal bileşimini değiştirebileceği ve böylece reolojik ve mekanik özelliklerini etkileyebileceği iyi bilinmektedir. Bir bağlayıcı zamanla oksitlendikçe, asfaltın içeriği artar ve malten içeriği azalır, bu da sert ve kırılgan bir bağlayıcıya yol açar ve agrega parçacık arayüzlerinde mikro çatlakların gelişmesine neden olur. Geçmişte, gençleştiriciler asfaltın ve maltenleri onarmak için kullanılmıştır. Bir kaplama yüzeyine gençleştiricilerin uygulanmasının birçok sonucu vardır: yolların kayma direncinin azalması, çevresel sorunlar ve işlemlerinin yüzeysel olması (Yorulmanın sadece bir kısmının olduğu sığ bir yüzey derinliğini etkiler).

Yakın zamana kadar, mikrokapsüllerin asfalt beton ortamındaki etkileri hakkında çok az araştırma vardı. Garcia, Schlangen, Ven, Su ve Qiu'nun öncülüğünde, asfalt kaplamalarda mikrokapsüllü gençleştiricilerin kullanılmasına yönelik çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Polimer mikrokapsülün kendini iyileştirme mekanizması gibi, buradaki prensip, trafik yükleri ile asfalt kaplama içine gömülü kapsülün kabuğu üzerindeki yüksek gerilimlerin indüklenmesidir, kapsül üzerindeki gerilimler belirli bir eşiğe ulaştığında, kapsül kırılacak ve asfaltın kimyasal dengesizliğini geri yükleyen iyileştirici maddeyi (gençleştirici) serbest bırakacaktır (Şekil 3.7).

Garcia ve arkadaşları tarafından belirlenen mikrokapsüller için tanımlamaya göre (2010b), “kapsüller çok viskoz hidrokarbon bazlı yağları kapsüllemeli, bitüm ile reaksiyona girmemeli, agregalar ve bitüm ile yaklaşık 180°C’de karıştırma işlemine direnmeli ve asla kırılmayacak kadar da dayanıklı olmamalıdır” [70]. Ayçiçek yağı veya atık yemeklik yağ içeren polimerik kapsüllerin kullanılmasının başarılı girişimleri araştırılmıştır, bu da umut verici düşük maliyetli uygulama ve yüksek performanslı kendini iyileştirmeyi sağlamıştır [70-73].



Şekil 3.7. Mikrokapsül ve mikrovasküler iyileşme sistemleri [74]

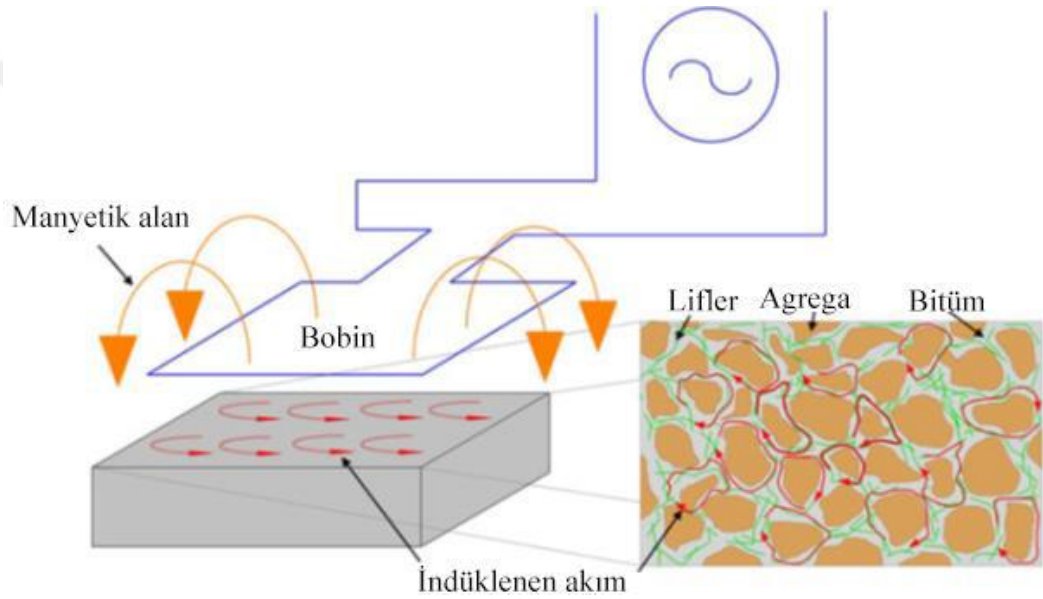
3.5.3. İndüksiyon Isıtma İle Kendini İyileştiren Asfalt Kaplamalar

İndüksiyonla Isıtma ve Uygulamaları

İngiliz fizikçi Michael Faraday 1831’de metali indüksiyonla ısıtmanın ilkelerini bulmuştur. Araştırma laboratuvarında bir demir çubuğun etrafına sarılmış iki tel bobinle test yaparken, ilk bobine bir pil bağlanırsa, ikinci bobinde ani geçen bir elektrik akışının ölçülebileceğini fark etmiştir. Pil bağlı kaldığında ikinci bobinde akım tespit edilememiştir. Pilin kesildiği noktada, ikinci döngüde, ilk akımın tersi yönde bir akım tekrar tespit edilmiştir. Faraday, alternatif bir manyetik alan tarafından bir elektrik akımının iletilebileceği sonucuna ulaşmıştır. İki bobin arasında fiziksel bir ilişki olmadığı için ikinci bobindeki akımın "indüklenen" bir voltaj tarafından oluşturulduğu söylenmiştir. Sonraki yıllarda, bu etkiler, bir devreden diğerine voltaj seviyesini değiştirmek amacıyla transformatörlerin ana hatlarını oluşturmak için kullanılmıştır. Bunun bir yan ürünü, transformatörün metal merkezinde oluşan ısıdır. On dokuzuncu yüzyılın sonlarında, metal ısıtma ve eritme için indüksiyonla ısıtma eylemini kullanmak için bunun tam tersi denenmiştir [75,76].

İndüksiyonla ısıtma, elektriksel olarak iletken bir metal nesnenin elektromanyetik indüksiyonla ısıtılması işlemidir (Şekil 3.8). İndüksiyon kısmı, bir elektromanyetik bobin ve

yüksek frekanslı bir alternatif akım (AC) üreten bir elektronik osilatörden oluşur. Alternatif manyetik alan, iletken içinde girdap akımları adı verilen elektrik akımları üretir. Malzemelerin mevcut akış direnci nedeniyle, Joule ısıtma kanunu tarafından ısı üretilir. Ferromanyetik malzemelerde manyetik histerezis kayıpları ile ısı da üretilir. İndüksiyonlu ısıtmanın en önemli özelliği, ısıtmanın harici bir ısı kaynağı yerine nesnenin içinde üretilmesidir. Metal nesne çok hızlı bir şekilde ısıtılabilir. Ayrıca, herhangi bir dış temasa gerek yoktur. Kullanılan akımın frekansı ve gücü, nesne boyutuna, malzeme tipine ve penetrasyon derinliğine bağlıdır. İndüksiyonla ısıtma, metalurjide ısıl işlem ve çok yüksek sıcaklıklar gerektiren metalleri eritmek gibi birçok endüstriyel işlemde kullanılmaktadır. [75-77].



Şekil 3.8. İndüksiyon ısıtmasının şematik gösterimi [78]

Asfalt Kaplamaların İndüksiyon Isıtma ile Kendini İyileştirmesi

Asfalt kaplamalardaki doğal iyileşmenin analizi, ortamdaki sıcaklık artışlarının asfalt bağlayıcının viskozitesini azaltabileceğini ve bu nedenle çatlaklara akarak onları “iyileştirdiğini” kanıtlamıştır. Bir Newton akışkanı gibi davranan bitümün viskozitesi, bilinen bir referans viskoziteye ulaşma süresi ve aktivasyon enerjisi parametreleriyle Arrhenius denklemi ile hesaplanabilir [66]; bu tahmin edilecek iyileşme zamanı hakkında bilgi verir. Bununla birlikte, çoğu durumda sıcaklık, tam bir iyileşme elde etmek için yeterince yüksek değildir. İndüksiyonla ısıtma, kaplama içindeki sıcaklığı ve dolayısıyla iyileşme oranını artırmak için kullanılan bir tekniktir. İndüksiyonla ısıtmada asfalt malzemeye karıştırılmış elektriksel olarak iletken ve manyetik olarak hassas malzemeler, dolgu maddeleri ve lifler kullanılır. Mikro çatlak çevresinde kapalı döngü devreleri oluşturmak için yeterince büyük miktarda iletken dolgu/lif olmalıdır [63]. Ancak karışıma eklenmesi gereken optimum miktarda lif vardır. Bu Garcia ve diğerleri tarafından araştırılmıştır,

“İhtiyaç duyulan optimum iletken partikül hacmini bulmak için, optimum lif (perkolasyon eşiği) bulunana kadar eklenen liflerin hacmi artırılarak her bir karışım ayrı ayrı analiz edilmelidir” [78]. Araştırma ayrıca iletken liflerin iletkenliği artırma açısından dolgu maddelerinden çok daha verimli olduğunu kanıtlamıştır. Kapalı devrelerde, eğer bir bobinin yakınındaysa, manyetik alanla aynı frekansta girdap akımları indüklenir; bu akımlar malzemenin direnciyle karşılaştığında, enerji kaybı yoluyla ısı üretilir [63]. Bitüm ısıtıldığında daha az viskoz hale gelir ve çatlağa akar.

Elyaf hacimlerinin ön araştırmalarından, belirli bir manyetik alan frekansında enerji girdisine yönelik çalışmalara kadar, indüksiyonla ısıtmanın geliştirilmesi çok umut verici sonuçlara sahiptir. Demir/demir alaşımlarının ferromanyetik yapıları nedeniyle indüksiyonla ısıtmaya mükemmel tepki verdiği iyi bilinmektedir. Düşük maliyet ve iyi bulunabilirlik ile birlikte, demir partikülleri indüksiyonlu ısıtmada ideal seçimdir. Çelik yünü (bir demir alaşımı), kaplamayı güçlendirerek ve dolayısıyla yorulma direncini artırarak, kaplamanın mekanik özelliklerini iyileştirmesi yararları ile iletken bir malzeme olarak kullanılmıştır. İndüksiyonla iyileşen kaplamanın yorulma ömrünün, indüksiyonla ısıtma uygulamasıyla önemli ölçüde uzatıldığı kanıtlanmıştır [79]. Yoldan alınan karotlar üzerinde yapılan deneyler ve sonuçlar, laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlarla örtüşmüştür. Alan çekirdekleri parçacık kaybı direnci iyi, yüksek mukavemet, iyi yorulma direnci ve yüksek indüksiyon iyileştirme kapasitesi göstermektedir [79]. Bununla birlikte, bu deneyler 2013 yılında, herhangi bir yorulma belirtisi olmaması gereken asfalt yapımından sadece üç yıl sonra yapılmıştır. İndüksiyonla iyileştirme laboratuvar sonuçları umut vericidir, ancak tam ölçekli tekniğin sonuçlarını analiz etmek için Dutch A58 yolu daha uzun bir zaman gözlemlenmelidir. Ayrıca yollara yapılacak başka uygulamalarda kullanılmadan önce yeni tekniğin sürdürülebilir ve ekonomik faydalarına ilişkin bir analiz yapılmalıdır.

Lui ve arkadaşları, asfalt kaplamada donmuş buz tabakasını çevreye zararı olmayan ve yüksek verimli buz çözme elde etmek için indüksiyonlu ısıtma asfalt kaplamasının (IHAP) yeni bir kompozit yapısı önermişlerdir. Yeni IHAP'te, geleneksel IHAP'teki endüktif asfalt karışımı tabakasının (IAML) alt kısmını değiştirmek için manyetik olarak iletken tabaka (MCL) kullanılmıştır. MCL ve IAML'nin hacimsel ve mekanik özelliklerinin şartname gereksinimlerini karşıladığı görülmüştür. Ayrıca, yeni kompozit yapı iyi bir yapısal stabiliteye ve fizibiliteye sahiptir. Yeni IHAP, geleneksel IHAP ile karşılaştırıldığında buz çözme verimliliğini %81,80 oranında artırabilir. Bu arada, yeni IHAP'te geri dönüştürülen atık malzemeler önemli ölçüde ekonomik, enerji tasarrufu ve emisyon azaltma faydaları sağlayabilir [80].

Bitümde farklı faktörler “yaşlanma” olarak bilinen bir sertleşme süreci üretir ve yeni karışımlara geri dönüştürülmüş, eskitilmiş malzemenin (yani RAP) eklenmesi, karışımın viskozitesini değiştirir. Breixo Gómez-Meijide ve arkadaşları mevcut bir araştırmalarında, bu iki eylemin asfalt karışımlarının elektromanyetik indüksiyon yoluyla iyileştirme kapasitesini nasıl etkilediğini incelemiştir. Farklı yaşlandırma işlemlerine tabi tutulan veya farklı miktarlarda RAP

içeren karışımlar test edilmiştir. Sonuçlar, hem yaşlanmanın hem de RAP içeriğinin, karışımdaki bağlayıcı sertliği ve hava boşlukları içeriğinin artmasına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bu nedenle, iyileşme süreci daha az etkili ve enerji verimli hale gelir [81].

Breixo Gómez-Mejide ve arkadaşları yayınlamış oldukları makalede, bitüm özelliklerinin asfalt karışımlarının indüksiyon iyileştirme kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çıkarılabilecek ana sonuç, Avrupa'da yaygın olarak kullanılan bitüm çeşitleri için, bitüm tipinin değiştirilmesi gerçeğinin ortaya çıkan asfalt karışımının iyileştirme kapasitesini önemli ölçüde etkilemediğidir [82].

Chao Yang ve arkadaşları bir çalışmalarında, çelik cüruf içeren asfalt karışımlarında geri dönüştürülmüş asfalt ve işlenmemiş asfaltın karıştırma verimliliği ve etkileşim mekanizması üzerinde indüksiyonla ısıtmayı araştırmışlardır. Farklı karışım katmanları içeren asfalt elde etmek için indüksiyonla ısıtma tekniği ve aşamalı ekstraksiyon yöntemi birleştirilmiştir. Sırasıyla reolojik özelliklerini, moleküler yapılarını, dört bileşen içeriğini ve moleküler ağırlık dağılımını araştırmak için Dinamik Kesme Reometresi (DSR), kızılötesi spektroskopisi, TLC-FID ve Jel Geçirgenlik Kromatografisi (GPC) uygulanmıştır. Sonuçlar, homojen olmayan karıştırma verimine sahip asfalt katmanlı sistemin, karışımların tüm katmanları boyunca meydana geldiğini göstermiştir. İndüksiyonla ısıtma, akış aktivasyon enerjisinin azalmasına ve asfalt tabakasının karıştırma derecesinin iyileştirilmesine katkıda bulunmuştur. Karışım asfalt tabakasının karbonil indeksi ve sülfoksit indeksinin azaltılmasında önemli bir teşvik etkisi göstermiştir. Kolloidal kararsızlık indeksi, ortalama moleküler ağırlık ve asfalt tabakasının polidispersitesinin tümü, indüksiyonla ısıtmadan sonra azalır; bu, indüksiyonla ısıtmanın, geri dönüştürülmüş asfalt karışımları için RAP asfalt ve işlenmemiş asfaltın karıştırma verimliliğini etkili bir şekilde artırabileceğini göstermiştir [83].

Marta Vila-Cortavitarte ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmadaki amaç, asfalt beton karışımlarının (AC-16) iyileştirme kapasitesini, eklenen metal parçacıkların özelliklerinden ve manyetik indüksiyon için kullanılan zaman ve yoğunluktan modellemek için istatistiksel bir metodoloji geliştirmektir. Atık ürünleri yol sektöründe kullanılmak üzere malzemeye dönüştürmeyi amaçlayan dört tip endüstriyel yan ürün de dahil olmak üzere, ısıtma indüktörleri olarak beş metal parçacık kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım, bu indüktörleri içeren asfalt beton karışımlarının test edilmesinden sonra elde edilen model laboratuvar verilerine uygulanan küme algoritmaları, çoklu regresyon analizi ve tepki optimizasyonunun bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Sonuçlar, asfalt karışımlarının deneysel davranışını yeniden oluşturmak için kullanılan istatistiksel yöntemlerin doğruluğunu kanıtlamıştır ve bu kanıt yazarların, kendini iyileştirme sürecini mümkün olduğunca verimli hale getirmek için gereken endüstriyel yan ürünlerin ve sürenin optimum miktarını belirlemelerini sağlamıştır [84].

Hechuan Li ve arkadaşları, indüksiyonla ısıtma yoluyla çelik lifler içeren asfalt betonunun ısıtma sıcaklığı alanını ve gradyan (Gradient) iyileştirme davranışını araştırmışlardır. İndüksiyonlu ısıtma ile asfalt betonun ısıtma sıcaklığı alanı kızılötesi kamera ile incelenmiştir. Farklı iyileşme koşullarındaki örneklerin iyileşme hızı, iyileşme sonrası kırılma direnci geri kazanımı test edilerek araştırılmıştır. Ek olarak, etkili iyileşme derinliğini doğrulamak için asfalt betonunda oluşan çatlağın iyileşme hızı yüksek çözünürlüklü 3D X-ray mikroskobu (CT) ile incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ısıtma mesafesi ve süresi ile ilgili indüksiyon ısıtma sıcaklığı alanı ölçülmüştür. 60 s indüksiyonla ısıtmadan sonra, 5 cm'deki sıcaklık 25 C'den 44,1 C'ye ve 1 cm'de 25 C'den 75,1 C'ye yükselmiştir, bu da bobine ne kadar yakınsa ısıtma hızının o kadar hızlı olduğunu göstermiştir. Laboratuvar ısınları deneyleri, indüksiyonla ısıtma sırasında, esas olarak sıcaklığın gradyan dağılımı ile ilgili olan bariz gradyan iyileşme davranışı olduğunu gösterdi. 60 s indüksiyon ısıtmasından sonra, her katmanın iyileşme oranı yüksek seviyede tutulmuştur. Üst katman %65 - %75, orta katman %50 - %60 ve alt katman %40 - %50 arasında değişmektedir. Gradyan ısıtma ve iyileştirme, sıcaklık dağılımına ve bağlayıcının yumuşama noktasına göre belirlenebilen asfalt betonunun etkin iyileşme derinliği ile sonuçlanmıştır. BT taramasından elde edilen çatlak iyileşme oranı ile de doğrulanmıştır. Ayrıca, agregaların kırılması nedeniyle mukavemet iyileşmesinin çatlak iyileşme hızından çok daha düşük olduğu bulunmuştur [85].

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Bitüm

Çalışmada TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen, 1,015 yoğunluğundaki B 50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bitümün genel özellikleri Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1. Bitümün genel özellikleri

Özellikler	Birim	Standart	Sonuçlar
Penetrasyon	mm ⁻¹	EN 1426	56
Yumuşama Noktası	°C	EN 1427	53.3
Parlama Noktası	°C	EN ISO 2719	245
Elastik Geri Dönme	%	EN 13398	30
Viskozite 135 /165	°C	ASTM D4402	737.5/225

4.2. Stiren-Butadien-Stiren (SBS)

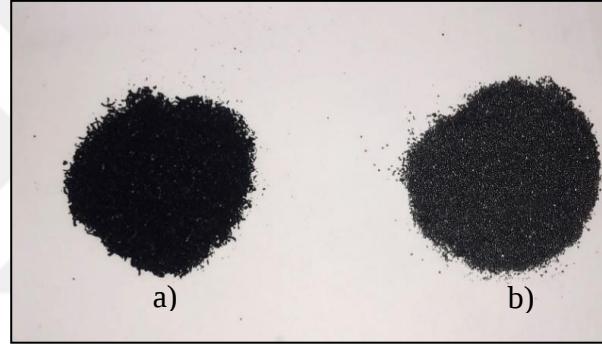
Bu tez çalışmasında Shell Bitumen şirketi tarafından üretilen stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimeri (KRATON D 1101) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan SBS’nin özgül ağırlığı 0,94; uzama kompası %880, çekme direnci 4600 psi ve stiren-kauçuk içeriği %31/69’dır. Kullanılan katkı maddesi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. SBS katkı maddesi

4.3. Atık Tüfalar ve Agregalar

Yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan çelik yüzeyinde oksitlenme sonucunda oluşan ince demir oksit tabakasına tüfal denmektedir [86]. Bu çalışmada yoğun asfalt karışımı kullanılmıştır. Agregalar, kaba agreg (boyut 4,75-12,5 mm arasında ve yoğunluk 2,626 g/ cm³), ince agreg (boyut 0,075-4,74 mm arasında ve yoğunluk 2,661 g/cm³) ve fillerden (boyut <0,075 mm ve yoğunluk 2,689 g/cm³) oluşmaktadır. Asfalt karışımlarına iki tip metalik atık eklendi: sıcak tüfal (HMS) (Şekil 4.2a) ve soğuk tüfal (CMS) (Şekil 4.2b). Sıcak tüfal 6,250 g/cm³, soğuk tüfal ise 7,142 g/cm³ yoğunluğuna sahiptir. Bu tez çalışmasında 2,36 mm, 1,18 mm ve 0,600 mm boyuta sahip HMS ve CMS malzemeleri hem %50 hem de %100 oranında aynı boyuttaki agreg yerine kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan karışımların kısa isimlendirmeleri Tablo 4.2’de, agreg karışımlarının gradasyonu ise Tablo 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Atık metal kullanımı, (a) sıcak tüfal, (b) soğuk tüfal

Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan karışımların kısa isimleri

Karışım Tipi	Tüfal (%) ve SBS (%)				
	0	50-2	100-2	50-3	100-3
Sıcak Tüfal	SK	2HMS5	2HMS10	3HMS5	3HMS10
Soğuk Tüfal		2CMS5	2CMS10	3CMS5	3CMS10

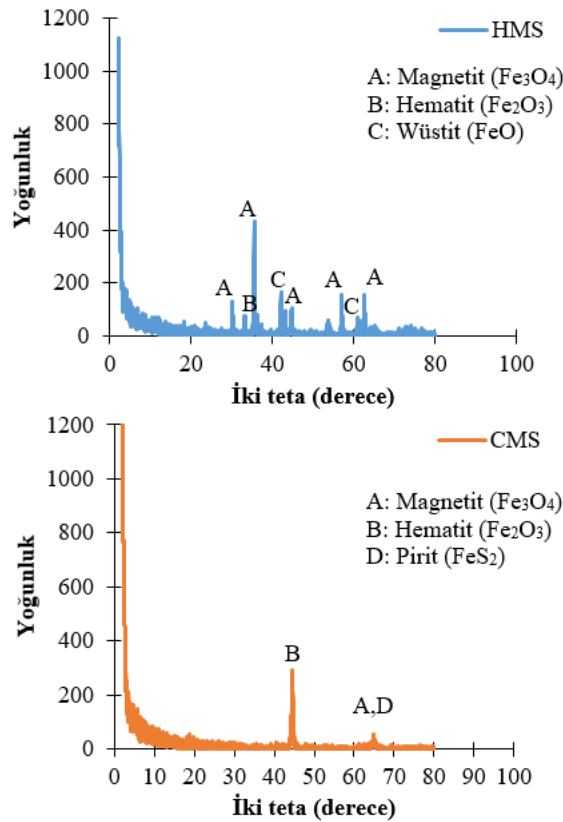
Tablo 4.3. Asfalt karışımında kullanılan agreg gradasyonu

Elek Boyutu	Toplam Kümülatif Geçen (%)								
	Saf	HMS5		HMS10		CMS5		CMS10	
		Agrega	HMS	Agrega	HMS	Agrega	CMS	Agrega	CMS
19 mm (3/4 inç)	100	100	-	100	-	100	-	100	-
12.5 mm (1/2 inç)	95	95	-	95	-	95	-	95	-
9.5 mm (3/8 inç)	88	88	-	88	-	88	-	88	-
4.75 mm (no 4)	65	65	-	65	-	65	-	65	-
2.36 mm (no 8)	35	17.5	17.5	-	35	17.5	17.5	-	35
1.18 mm (no 16)	23	11.5	11.5	-	23	11.5	11.5	-	23
0.600 mm (no 30)	14	7	7	-	14	7	7	-	14
0.300 mm (no 50)	10	10	-	10	-	10	-	10	-
0.150 mm (no 100)	8	8	-	8	-	8	-	8	-
0.075 mm (no 200)	6	6	-	6	-	6	-	6	-

En basit tfal demir oksit (FeO)'dir. Isıtılan yüzey sıcaklığı 900°C yi geçtiği anda tfalleşme de hızlanır. Hızlı ısıtmada tfal kalınlığı daha ince olurken daha uzun bekletildiği takdirde tfal kalınlığının arttığı görülmektedir. Tfal oluşum reaksiyonları aşağıda verildiği gibidir.

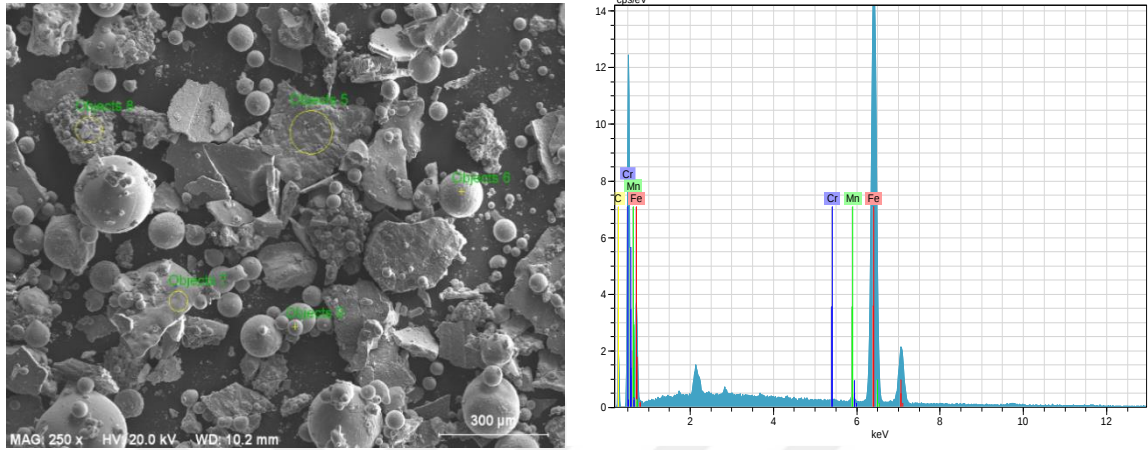


Diğer demir oksitlere nazaran wstit (FeO) en düşük oksijen miktarına sahip ve metale yakın iteki tabakayı oluşurmaktadır. Wstitin artan sıcaklıkla birlikte tfaldeki miktarı artmakta ve çeliğin sıcaklığı 700°C altına düştüğü zaman tfal tabakasının %95 'ini wstit oluşurmaktadır [87]. Sıcak hadde tfalinin (hot mill scale) XRD analizi sonucuna göre yapının çoğunlukla wstit (FeO), hematit (Fe₂O₃) ve magnetit (Fe₃O₄) formunda, soğuk haddene tfalinde ise tek farklı form pirit (FeS₂) formunu olduğu görülmektedir. Tfallerin X-ışını kırınım grafiği şekil 4.3'te gösterilmiştir.

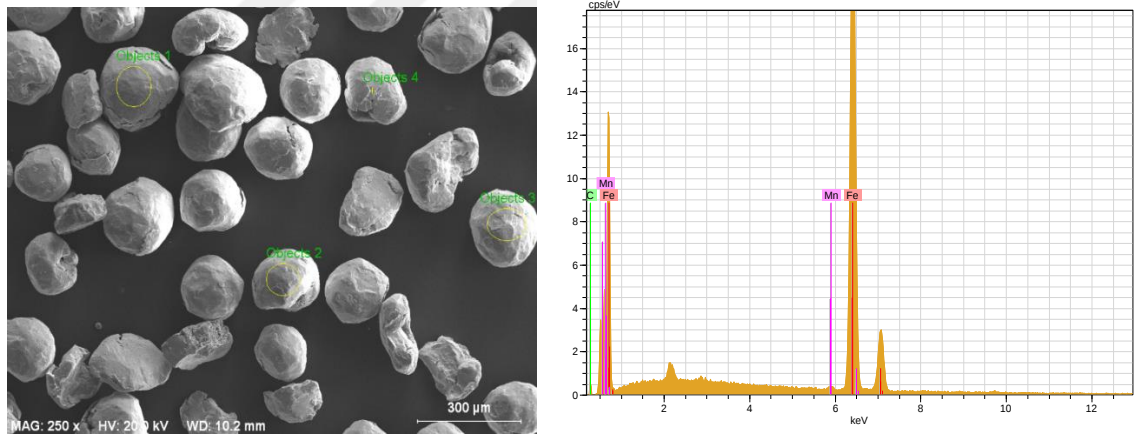


şekil 4.3. Tfallerin X-ışını kırınım grafiği

Elektron Probu Mikro Analizör sonuçlarının harita taramasına göre (Şekil 4.4 ve 4.5), belirli bir elementin oranı arttıkça, numunedeki dağılımı daha yoğunlaşmaktadır [87]. Tablo 4.4 ve 4.5 farklı elementlerin kütle konsantrasyonlarını göstermektedir.



Şekil 4.4. SEM/EDS sonuçlarıyla HMS yüzeyinin harita taraması



Şekil 4.5. SEM/EDS sonuçlarıyla CMS yüzeyinin harita taraması

Tablo 4.4. HMS'deki ana elementlerin kütle konsantrasyonu

Element	Fe	C	Mn	Cr
Konsantrasyon (%)	90.09	5.22	4.47	0.22

Tablo 4.5. CMS'deki ana elementlerin kütle konsantrasyonu

Element	Fe	C	Mn	Cr
Konsantrasyon (%)	94.19	0.86	4.95	-

SEM ve EDX analizinden görüleceği üzere sıcak hadde tufalinin nispeten düzenli bir granül ve tabakasal bir morfolojik yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Tufallerin basınçlı su ile uzaklaştırılması neticesinde oluşan tufalin tabaka halinde oluştuğu söylenebilir. Bu tabakalı yapının, SEM görüntülerinde oldukça belirgin bir şekilde tespit edildiği görülmektedir. Diğer taraftan, EDX analizi ile tufalde bulunan ve minör miktarda bulunan çeşitli elementlerin varlığı söz konusudur. Düzenli bir kristal yapısına sahip olduğu halde az miktarda tufalde bulunan Cr, C ve Mn gibi elementler XRD analizinde tespit edilemediği halde SEM-EDX analiz sonuçlarında belirlendiği dikkat çekmektedir.

CMS örneklerindeki ana element Fe'dir. Sıcak tufalden farklı olarak soğuk tufallerde SEM sonuçlarına göre C_r elementi bulunmamaktadır.

Bu iki metal atığının sahip olduğu zengin metal içeriği sayesinde iyi bir ısıtma performansı sağlayacaktır. Özetle, HMS ve CMS daha iyi bir indüksiyon ısıtma kapasitesi ortaya koymuştur. Bu nedenle çalışmada 3 farklı elek çapında agrega yerine kullanılmıştır.

4.4. Modifiye Bitüm Hazırlanması

Bu tez çalışmasında SBS elastomeri 2 farklı oranda (%2 ve %3) saf bitüme ilave edilerek hedef bağlayıcılar hazırlanmıştır. Modifiyeli bağlayıcı hazırlama işlemi aşağıdaki sıralamaya göre yapılmıştır.

- İlk önce saf bitüm $170\pm5^{\circ}\text{C}$ 'deki etüvde 30 dakika ısıtılarak akışkan hale getirilir.
- Akışkan hale getirilen bitüm 500 gram olacak şekilde karıştırıcının metal haznesine dökülür.
- Homojen ısı kaynağı oluşturmak için metal hazneye dökülen bitüm $170\pm5^{\circ}\text{C}$ koşullandırılan ısıtıcı kaynağı üzerindeki ısı gömleğinin içerisine bırakıldıktan sonra ısıtıcı $170\pm5^{\circ}\text{C}$ ısı dengesini sağlayana kadar bekletilir.
- Atık yağlar, bitümün ağırlığınca belirlenen yüzdelerde sıcak bitümün içerisine dökülür.

Atık yağ içeren bitümler, 60 dakika boyunca 1000 devir/dakika hızla çalışan mekanik karıştırıcı ile karıştırılarak hazırlanmıştır (Şekil 4.6) [88, 89].



Şekil 4.6. Mekanik karıştırıcı ile modifiyeli bağlayıcı hazırlama işlemi

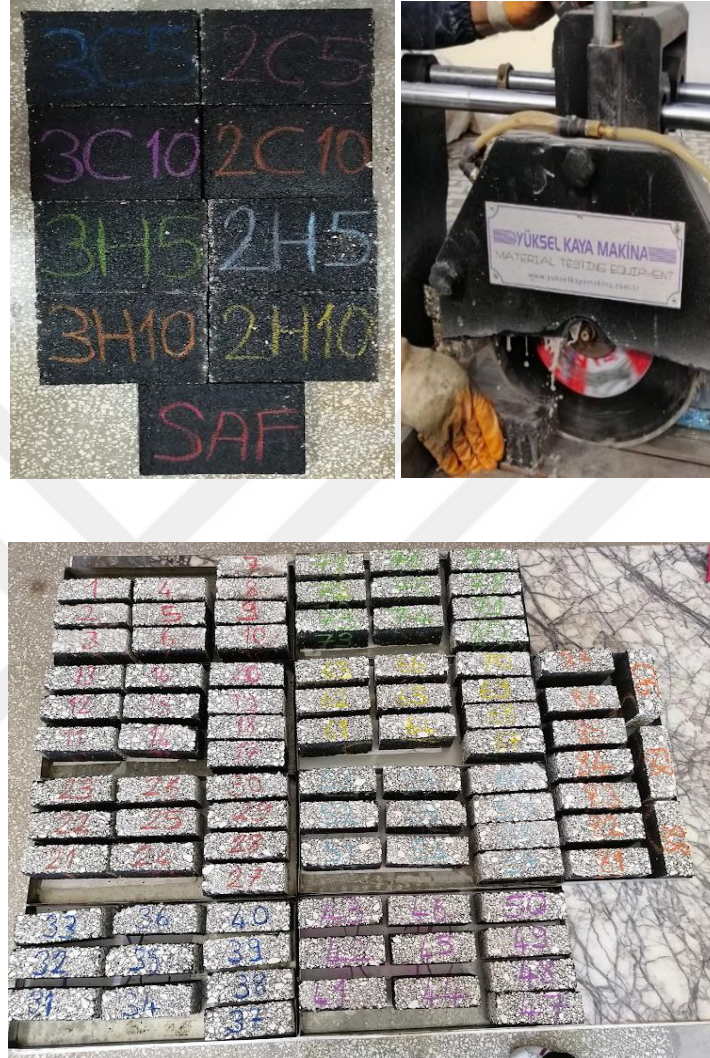
4.5. Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında SBS modifiyeli bitüm ilaveli metal atıklı ve saf bitüm ilaveli metal atıksız prizmatik ve silindirik asfalt karışım örnekleri üretilmiştir. Malzemeler bir laboratuvar karıştırıcısı ile 100 rpm karıştırma hızında karıştırıldı. Agregalar ve metalik atıklar karıştırılmadan önce 3 saat, %2 SBS içeren bitüm 183 °C'de, %3 SBS içeren bitüm 208 °C'de, saf bitüm ise 172 °C'de 1 saat ısıtılmıştır. Karışımlar bir karıştırma makinesinin metalik kasesinde hazırlanarak, metalik kaseye şu sırayla ilave edildi; ilk olarak kaba agregası; ikincisi ince agregası veya metalik atık; üçüncü olarak filler malzemesi ve son olarak da bitüm. Yapılan analizler sonucunda saf karışımın tasarım bitüm içeriği %4,67 olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı miktarının karışımların mekanik özelliklerine etki etmesini engellemek amacıyla tüfal ve SBS kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri tüfal ve SBS içermeyen karışımla aynı bitüm içeriğinde (%4,67) hazırlanmıştır. Malzemeler yaklaşık 5 dakika boyunca karıştırılmıştır.

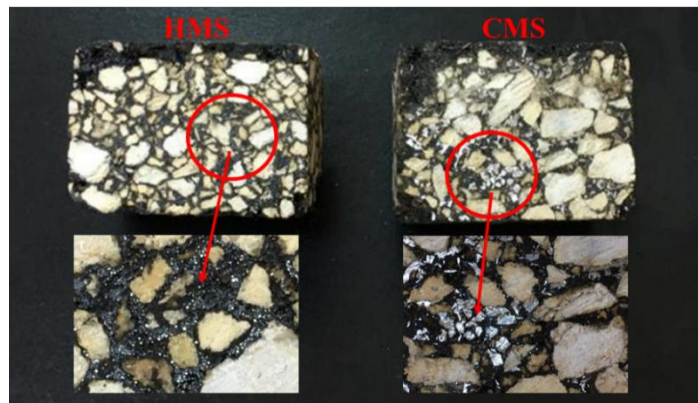
İlk olarak hazırlanan karışım 10 cm çapında yaklaşık 6 cm yüksekliğinde ve tam olarak 1100 g kütleye sahip silindirik Marshall numuneleri 600±18 kP statik basınç 1,25±0,02°'lik eğim açısına sahip döner bir kompaktör kullanılarak sıkıştırılmıştır. Numunelerin %4 boşluk oranına sahip olması için 100 devir uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında toplamda yaklaşık 162 marshall numunesi hazırlanmıştır.

İkinci olarak ise diktörtgen plaka numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım %4 hava boşluk içeriğine ulaşana kadar silindir kompaktör vasıtasıyla prizmatik kalıplarda sıkıştırıldı. Diktörtgen plaka boyutları 305x305x50 mm'dür. Daha sonra her bir diktörtgen plakadan sekiz adet 150x70x50 mm³ boyutlarında prizmatik numune (kiriş) kesilmiştir (Şekil 4.7). Asfalt karışımların içersindeki atık metallerin dağılımı Şekil 4.8'de verilmiştir. Son olarak, kirişlerin merkez ekseninden yükleme yönünde orta noktada yaklaşık 2 mm kalınlığında ve yaklaşık 10 mm

derinliğinde bir çentik açılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılmak üzere toplamda 27 dikdörtgen asfalt karışım plakası hazırlanmıştır.



Şekil 4.7. Numunelerin kesilmesi



Şekil 4.8. Asfalt karışımlarında atık metallerin dağılımı

4.6. Bağlayıcılara Uygulanan Deney Yöntemleri

4.6.1. Penetrasyon Deneyi

Yarı-katı veya akıcı olmayan bağlayıcıların kıvamlarının viskozimetre ile ölçülmesi mümkün değildir. Bu durumda penetrasyon deneyi ile kıvam bulunur. Penetrasyon deneyi bağlayıcının sertliğini belirlemektedir. Penetrasyon deneyinin esası standart bir iğnenin, belirli ısı ve zaman koşulları altında numuneye düşey olarak battığı derinliğin ölçülmesinden ibarettir. Penetrasyon iğnesinin batma derinliği 1/10 mm cinsinden belirtilir. 100 gr ağırlığında standart bir iğnenin 25°C sıcaklıkta, 5 sn sürede bitüm numunesi içerisine dikey olarak batma mesafesi ölçülmesidir. Penetrasyon değeri 500'ün üzerinde olan numuneler için deney 15°C'de yapılmakta ve yükleme şartları değişmektedir. Burada penetrasyon değeri 500'e kadar olan bitümlü bağlayıcılara uygulanan deney yöntemi anlatılmaktadır. Penetrasyon cihazı, sürtünmeye uğramadan dikey olarak hareket edebilen iğne ile batma miktarını gösteren taksimatlı gösterge ve üzerine numune kabı veya aktarma kabı konulan tabladan oluşmaktadır.

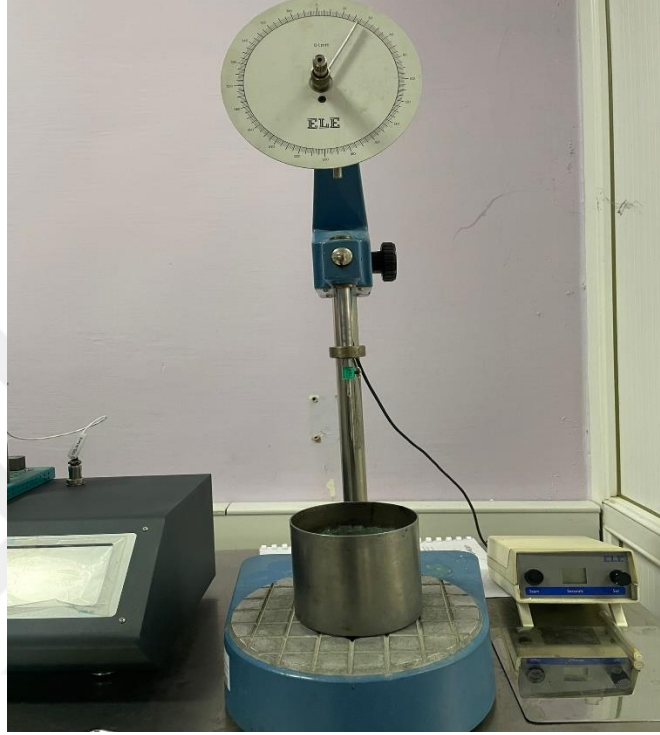
Deneyde kullanılacak olan bitümlü bağlayıcı, yumuşama noktası sıcaklığının 90°C üstünü geçmeyecek şekilde ısıtılır ve hava kabarcığı kalmayacak şekilde penetrasyon kabına dökülür. Hazırlanan numune iğnenin batma noktasından en az 10mm kadar üzerinde numune kabına koyulmalıdır. Numunenin 5-30°C ortam sıcaklığı olan bir yerde 1-1,5 saat boyunca soğuması beklenir. Soğuyan numune, deney sıcaklığındaki su banyosuna alınır ve 1-1,5 saat süreyle bu sıcaklıkta şartlandırılır. Daha sonra numune penetrasyon deney cihazına yerleştirilir. Bir ışıkla numune yüzeyi aydınlatılır. İğnenin ucu numunenin yansıma yüzeyi üzerinde uç uca temas edecek fakat numuneye batmayacak şekilde ayarlanır. Penetrasyon iğnesi, 5 saniye süren bir serbest düşme etkisinde kalır ve kenarları yaklaşık 1'er cm uzunluğunda olan bir eşkenar üçgen oluşacak şekilde, iğnenin numuneye en az üç kez batması sağlanır. Bu denemeler 2 dakika içinde yapılamaz ise numune ve aktarma kabı yeniden su banyosuna konulur ve ölçümler yeniden yapılır. İğne her deneyden önce temizlenmelidir. Yapılan denemelerden en az 3'ünün geçerli olabilmesi için ölçülen değerler arasındaki en büyük fark Tablo 4.6'daki değerlerden fazla olmamalıdır.

Tablo 4.6. Penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük farklar

Penetrasyon değeri	≤49	50-149	150-249	≥250
Maks. penetrasyon farkı	2	4	6	8

En büyük fark değerinin aşılması durumunda ikinci bir numune ile deney tekrarlanır. Yapılan deneylerden sonuç elde edilemez ise sonuçlar dikkate alınmayıp atılır. Aynı deney numunesi ile 3

geçerli ölçüm elde edilinceye kadar deneyler tekrar edilir. Bu üç batma derinliği değeri kaydedilir ve ortalamaları en yakın tam sayıya yuvarlanarak bitümlü bağlayıcının penetrasyon değeri hesaplanır. Penetrasyon değeri düştükçe bitüm sertleşir. Penetrasyon değeri ne kadar yüksek olursa, bitüm o kadar yumuşak ve akışkan olur. Şekil 4.9’da penetrasyon deney aleti görülmektedir.



Şekil 4.9. Penetrasyon deney aleti

4.6.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Bitüm malzemesinin sıcaklığa karşı duyarlılığını değerlendirmek amacıyla yapılır. Deney standardı TS EN 1427 dir. Bitüm malzemesi deneyden başlamadan önce ısıtılarak akıcı hale getirilir. Daha sonra yüzeyi düzgün bir metal üzerine bitümün yapışmasını engellemek için yapışmayı engelleyen malzeme sürülür. 2 adet standart halka metal üzerine bırakılır. Akıcı hale getirilen bitüm malzemesi halka içerisine, halkanın tepe seviyesini biraz aşacak şekilde dökülür. Bitüm malzemesi soğuyup sertleştikten sonra ısıtılan spatula yardımıyla tepe noktası düz hale getirilir ve deney düzeneğine yerleştirilir. Deneyde sıcaklığa dayanıklı cam behere 5°C sıcaklıkta saf su konur. İçerisinde numuneleri bulunan deney düzeneği beher içine yerleştirilir. Bilyelerde bu kabın içine veya 5°C sıcaklıkta ayrı bir saf su kabına konur. Deney düzeneği ve bilyeler 5°C sıcaklıkta 15 dk boyunca bekletilir. Daha sonra çelik bilyeler deney düzeneğinde yerlerine konur ve bitüm üzerine 2,5 cm yüksekliğinde serbest düşmesi sağlandıktan sonra beher içindeki saf suyun sıcaklığı bir dakika da +5°C lik artışlar beklenerek beher ısıtılır. Sıcaklığın artmasıyla beraber

yumuşayan bitüm malzemesi düşmeye başlayıp beherin dibine değdiği an, beherin her iki yanında bulunan sensörler vasıtasıyla cihazdan okunan sıcaklık değeri malzemenin yumuşama noktası olarak tespit edilir. Bir deney için iki halka numunesi kullanıldığından aritmetik ortalamaları alınır. Deney aleti Şekil 4.10’da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Yumuşama noktası deney aleti

4.6.3. Penetrasyon İndeksi (PI) Yöntemi

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını ölçmek amacıyla Penetrasyon İndeksi (PI) değeri kullanılmaktadır. PI, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak denklem ile belirlenmektedir.

$$A = \frac{\log 800 - \log 25}{T_{YN} - 25} \quad (4.4)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.5)$$

Denklem P25, bitümün 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerini, TYN ise yumuşama noktası değerini göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon İndeksi değerinin -2’den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2’den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir [90]. Daha yüksek PI’ye sahip bitüm içeren asfalt karışımları, düşük sıcaklıktaki çatlamaya ve kalıcı deformasyona karşı daha dirençlidir [91].

4.6.4. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi (ASTM D 4402)

Dönel viskozimetre deneyi sayesinde bitümlü bağlayıcının sıcak karışım tesisinde ne derece pompalanabilirlik ve işlenebilirliğe sahip olduğunu tespit etmek için akma özellikleri belirlenmektedir. Deney sırasında AASHTO TP48 standardına uygun olarak Brookfield viskozimetresi kullanılmaktadır. Pompalama ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olup olmadıklarının tespit edilmesi amacıyla bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri belirlenmektedir.

Termosel sistemi; sıcaklık kontrollü bölme, numune kabı ve sıcaklık kontrol panelinden oluşmaktadır. Numune kabı, paslanmaz çelik veya alüminyumdan yapılmıştır. Numune kabını çıkarmak veya yerleştirmek amacıyla özel bir pense kullanılmaktadır. Sıcaklık kontrollü bölme ise numune kabını içine almaktadır. Sıcaklık kontrol paneli deney için gerekli olan sıcaklıkların (135 ve 165°C gibi) teminini sağlamaktadır. Sistemde uygulanan burulma ve dönme hızı dijital göstergeden ya da bilgisayardan okunabilmektedir. Kontrol paneli mil numarası, dönme hızı gibi parametrelerin girilmesinde ayrıca deneyin başlatılıp sonlandırılmasında kullanılmaktadır. Aletin bilgisayara bağlı olması durumunda bu işlemler yazılım üzerinden de yapılabilmektedir. Sonuçların doğru bir şekilde elde edilebilmesi için viskozimetre aleti (Şekil 4.11) ve termosel sistem, terazi kullanılarak ayar vidaları ile düzenlenmelidir.



Şekil 4.11. Dönel viskozimetre (RV) deneyinin yapılışı

Newton sıvısı, viskozitenin kayma deformasyonu oranından bağımsız olduğu, tamamen viskoz davranışla karakterize edilmektedir. Bitümlü bağlayıcılar yüksek sıcaklıklarda tamamen viskoz davranış sergilediklerinden karıştırma ve sıkıştırma sırasında bağlayıcının işlenebilirliğinin karakterize edilmesinde viskozite ölçümü yeterli gelmektedir [92]. Deneyde, kayma oranı ($\dot{\gamma}$) ile açısal hız (ω) ve kayma gerilmesi (τ) ile burulma (M) arasındaki ilişkiler verilen denklemlerde gösterilmektedir.

$$\text{Kayma oranı (s}^{-1}\text{); } \dot{\gamma} = \omega \left[\frac{2R_c^2}{(R_c^2 - R_s^2)} \right] \quad (4.6)$$

$$\text{Kayma Gerilmesi (din/cm}^2\text{)} \quad ; \quad \tau = \frac{M}{2\pi R_s^2 L} \quad (4.7)$$

Burada;

ω : Sabit mil hızı (rad/s),

R_c : Numune kabının çapı (1,9525 cm),

R_s : Milin çapı (No:27 için 1,176 cm),

M: Uygulanan burulma (din.cm),

L: Milin efektif uzunluğu (No:27 için 3,302 cm)'dur.

Asfaltın viskozite değeri santipois (cP) olarak aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmektedir.

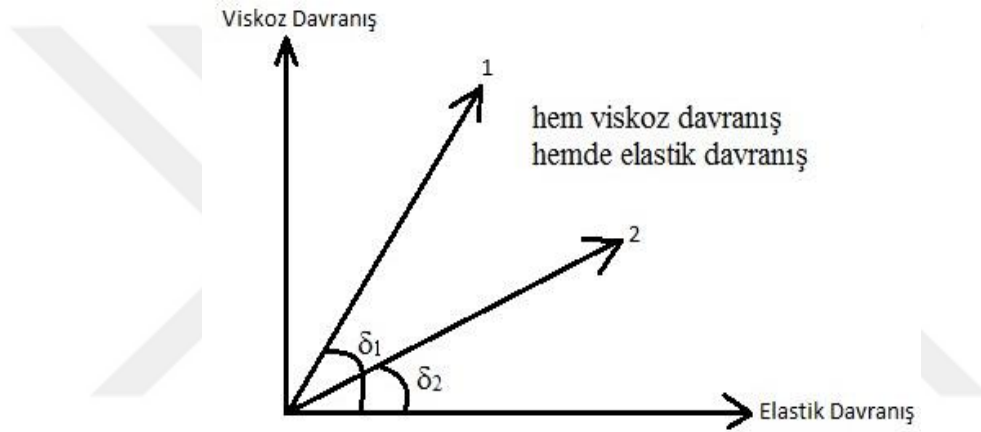
$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.8)$$

Deneye tabi tutulacak 30 gr kadar asfalt numunesi etüvde 150°C'nin altındaki bir sıcaklıkta ısıtılır. Isıtılan asfalt, daha önceden belirli bir sıcaklıkta ısıtılmış olan numune kabının içerisine, deneyde kullanılacak silindirik milin boyutuna göre 8–11 gr arasında dökülür. İçerisinde asfalt bulunan numune kabı önceden belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış olan sıcaklık kontrollü bir taşıyıcıya yerleştirilir [92, 93] Deney parametreleri sisteme girildikten sonra, öncelikli olarak viskozimetrenin bağlantı noktasında bulunan vida ile silindirik mil uzatma teli montajı yapılarak viskozimetre sıfırlanır. Daha sonra, önceden ısıtılmış olan silindirik mil viskozimetreye takılarak numune kabındaki asfalt içerisine daldırılır. Deney için, 135°C'lik sabit bir numune sıcaklığına ulaşıncaya kadar yaklaşık 30 dakika kadar beklenir. Bekleme periyodu boyunca silindirik milin dönme hızı 20 rpm olarak ayarlanır ve motor çalıştırılarak viskozite ve dönme (tork) oranı gözlemlenir. Şayet dönme oranı %2 ile %98 arasında bir değerde değilse farklı boyutlu bir silindirik

mil gerekebilir. Numune sıcaklığı dengeli duruma geldikçe, viskozite okumaları da sabitleşmeye başlar ve birer dakika aralıklarla üç okuma yapılarak deney sonuçları kaydedilir [94, 95]

4.6.5. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

Bitüm malzemesinin viskoelastik ve termoplastik davranışını dikkate alarak bitümün karakteristik özelliklerini belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu karakteristik özellikleri kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) özelliklerini ölçerek yapar. Bu özellikler yükleme sıcaklığına ve yükleme süresine bağlıdır. Şekil 4.12’de gösterildiği gibi asfaltlar yüksek sıcaklıklarda viskoz akışkanlar gibi ve çok düşük sıcaklıklarda ise elastik katılar gibi davranırlar [96].



Şekil 4.12. Viskoz ve elastik davranış

Asfaltlar trafik akışının olduğu sıcaklıklarda hem viskos sıvılar ve hemde elastikler gibi davranırlar. Kaplamaya yük uygulandığı zaman deformasyonun bir kısmı elastiktir yani geri alınabilir bir kısmı ise viskozdur yani geri alınamaz. İşte asfaltın visko-elastik malzeme olarak adlandırılmasının nedeni hem viskoz hemde elastik davranış göstermesi sebebiyledir. Şekil 4.12’de 1 ve 2 ile gösterilen her iki malzemede viskoelastiktir. Ancak şekilde 2 numara olarak gösterilen malzeme şekilde 1 ile gösterilen malzemeden daha esnektir [96].

Dinamik kayma reometresi deneyi, asfalt kaplamanın ilk servis yıllarında yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı gösterdiği direnci ve kaplamanın servis ömrü boyunca orta servis sıcaklıklarında oluşan yorulma çatlağına karşı gösterdiği direnci değerlendirmemize olanak sağlar.

DSR deneyi ile asfalt bağlayıcının viskoelastik özellikleri salınımlı (sinüzoidal) olarak uygulanan baskılara maruz kaldığında bağlayıcının davranışı değerlendirilerek belirlenmektedir. Deney standardı AASHTO TP5’dir. Bu test yönteminde sabit bir sıcaklıkta tutulan iki metal plaka arasında ince bitüm numunesinin sıkıştırılması ile yapılır. Burada bir plaka sabit tutulur diğer plaka

ise sabit tutulan plakaya göre 10 döngü boyunca 10 rad/sn açısal frekansta salınır. Bu test bitümün sinüzoidal gerilmelere karşı tepkisini değerlendirir ve bitümün kayma modülünü ve faz açısını hesaplar. Bitümün kayma modülü ve faz açısı kaplamanın yorulma ömrünü ve tekerlek izine karşı göstereceği potansiyeli tahmin etmeye yardımcı olur. Deney aleti Şekil 4.13'te gösterilmektedir.,



Şekil 4.13. Dinamik kayma reometresi (DSR) deney cihazı

4.7. Karışımlar Üzerine Uygulanan Deneyler

4.7.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanımı, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede oluşan düşey deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Öncelikle soğumuş ve sıkıştırılmış numunelerin yükseklikleri alınır. Yükseklikleri belirlenen numuneler 60°C'ye sahip su banyosunda yaklaşık 1 saat beklemektedir (Şekil 4.14). Daha sonra numuneler su banyosundan alınarak cihaza yerleştirilir ve numunelere 50 mm/dak hız ile yükleme yapılmaktadır (Şekil 4.15).



Şekil 4.14. Numunelerin 60±1°C sıcaklığa sahip su banyosunda bekletilmesi



Şekil 4.15. Marshall stabilite ve akma deneyinin yapılışı

Yapılan deney esnasında maksimum yük ve maksimum yüke varıldığı zamandaki deformasyon değerleri belirlenip yazılır. Numune su banyosundan alındıktan sonra 40 sn sürecek şekilde deney yapılmalıdır. Deneyde kullanılan numunelerin standart yüksekliği 63,5 mm bilinmektedir. Bu yüksekliği sağlamayan her numune için stabilite düzeltme katsayıları kullanılmıştır. Standart numune yüksekliğinden farklı yüksekliklerdeki her numune için stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki bağıntı ile bulunabilir:

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258 \times h)} \quad (4.9)$$

C, düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Belirlenen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Stabilite ve akma değerleri bu şekilde belirlenmektedir. Akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler ve stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler değerlendirilmez. Geri kalan numunelerin ortalaması alınarak numunelerin stabilite ve akma değerlerinin ortalama sapma miktarları belirlenmektedir. Eğer aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa numune serisi iptal edilmekte ve yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanmaktadır.

Kalıcı marshall stabilitesi deneyi bitümlü sıcak karışımların nem hasarı direcini bulmak amacıyla uygulanmaktadır. Bu yöntemde numuneler 60°C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilir ve sonra marshall deneyi yapılır. Marshall deneyi sonucunda numunelerin stabilite değerlerinin normal stabilite değerlerine oranı kalıcı Marshall stabilitesidir.

4.7.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi

Bitümlü karışımların nem hasarına karşı dayanımını belirlemek için birçok deney geliştirilmiştir. Geliştirilen deneyler gerçek arazi şartlarını pek yansıtmıyor olsada yakın bilgi elde etmemizi sağlar. Bitümün agregayla adezyonu, belirli bir zaman sonra kaplamadaki performans etkisi eden önemli faktörlerdendir. Zamanla bitüm ile agrega arasına girecek olan su, yapışmanın etkisini azaltıp bitümlü sıcak karışım kaplamalarda erken bozulmalara sebebiyet vermektedir. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı direnci etkileyen etkenler [97] aşağıdaki gibi sıralanabilir:

a) Nem duyarlılığında etkili olan bir faktör asfalt film kalınlığıdır. Suyun oluşturacağı negatif etkilere karşı ince asfalt film kalınlığı olan karışımlar, asfalt film kalınlığı fazla olan karışımlardan daha hassastır.

b) Karışımın nem hasarını etkileyen diğer etken asfalt çimentosunun üretiminde ve ham petrolde kullanılan rafineri sürecidir. Fakat birçok asfalt çimentosu nem hasarı bakımından fazla bir etkisi bulunmamaktadır.

c) Asfalt karışımın soyulma niceliğini etkileyen başka bir etken ise trafik ve çevresel göstergelerdir.

d) Bir diğer faktör ise asfalt beton karışımının özelliğidir. Karışımın geçirgenliği, porozitesi, asfalt çimentosu ve agrega gradasyonu gibi nitelikleri suyun doygunluk seviyesini ve drenajını denetlediği için önemli faktörlerdir. %6'dan fazla boşluk oranı bulunan karışımlarda daha çok nem hasarı oluşmaktadır.

e) Kaba ve ince agreganın çeşidi karışımda oluşabilecek nem hasarını belirgin bir şekilde etkilemektedir.

Bu yöntemde hava boşluğu oranı %6-8 aralığında bulunan 6 adet Marshall numunesi kullanılmaktadır. Bu numuneler koşullandırılmış ve koşullandırılmamış olmak üzere ikiye ayrılır. Koşullandırılmış numuneler bir piknometre içerisine konularak vakum işlemi, numunedeki hava boşluğunun yaklaşık %70-80'i su doluncaya dek sürmektedir. Boşluklardaki suyun dolma oranı %70'ten az olmamalıdır. %80'den fazla olursa o numuneler kullanılmamalıdır [98].

Numune doygunlukları aşağıdaki formüller yardımıyla bulunmaktadır:

$$J = B' - B \quad (4.10)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (4.11)$$

$$S' = J / I * 100 \quad (4.12)$$

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 işlemin sonra silindir numuneler streç film ile sıkı bir şekilde kaplanır. Streç kaplı numuneler su banyosunda ilk olarak -18°C'de 16 saat daha sonra 60°C bekletilir (Şekil 4.16). Bekleme süresi bittiğinde streçler çıkarılır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numuneler 25°C'deki suda 2 saat bekletilmektedir daha sonra düzlemde yükleme yapılarak kırılır (Şekil 4.17).



Şekil 4.16. Numunelerin streç film ile sarılıp bekletilmesi



Şekil 4.17. Vakum işlemi ve nem hasarına karşı dayanım deneyi

4.7.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

İndirekt çekme modunda ölçülen rijitlik modülü, elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümlerinin en yaygın şeklidir. Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir. Deneye başlamadan önce numunelerin en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmesi gerekmektedir. Bu sıcaklığı sağlamak için iklimlendirme kabini kullanılmaktadır. Bu sayede deney standardın dışında farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesi bazı değerler yazılıma girilmelidir. Bu değerler numune çapı, numunenin yüksekliği, tahmini poisson oranı, yük etki süresi, yük artış süreleri, hedef yatay deformasyon ve tahmini rijitlik modülü gibi değerlerdir.

Numune yükleme yapılacak çerçeveye yerleştirilir ve yatay deformasyonu ölçen sensörler numunenin belirli kısımlarına konulur. Deneyde, önce numunelere ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. 5 kez yapılan ön yükleme esnasında cihaz kendisi numunedeki yatay eksende beklenen deformasyonu oluşturacak yükü belirlemektedir. Daha sonra verilen darbeler sonucunda aşağıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri bulunmaktadır.

$$S_m = P \times (\mu + 0,27) / D \times t \quad (4.13)$$

S_m : Esneklik modülü (Mpa)

P : Maximum yük (N)

t : Numune kalınlığı (mm)

D : Yatay deformasyon (mm)

μ : Poisson oranı

Deneyi yapılan numuneler 90° döndürülerek tekrar deney yapılmakta ve bulunan değerler arasındaki fark %10'dan fazla olursa aynı işlemler tekrar yapılmaktadır. Numunenin ITSM değeri, arasında %10'dan az fark olan iki değer ortalaması alınarak bulunmaktadır. Deney aleti Şekil 4.18'de görülmektedir.



Şekil 4.18. İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinin yapılışı

4.7.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

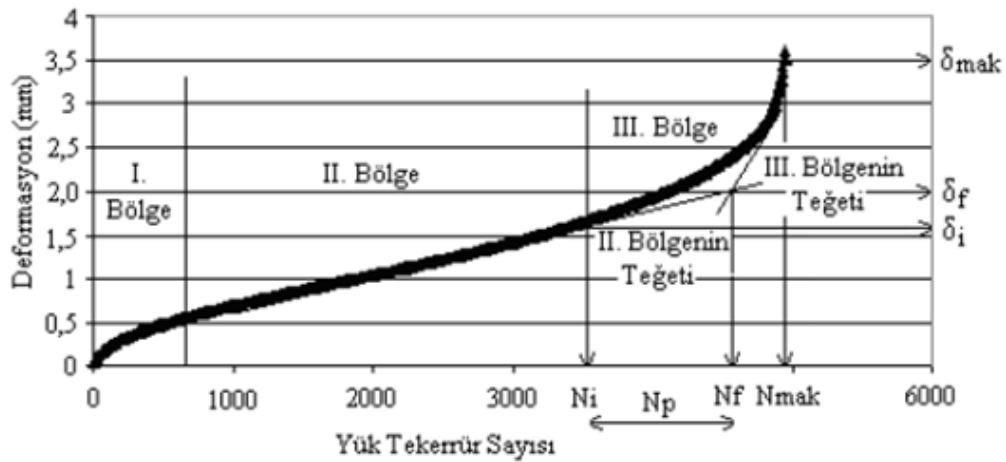
Bitümlü karışımlara, trafik sebebiyle üzerinden geçen her araç belirli bir yük uygulamaktadır. Uygulanan yük, malzemede mikro kırılmalara, mikro kırılmalar da ilerleyen zamanlarda yorulma çatlaklarına sebep vermektedir [99]. Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla rastlanan ve sürekli tekrarı olan yükler sonucunda çatlak oluşumunu takip eden aşamalı olarak artan bir bozulma çeşididir [100]. İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme kontrollü olarak UTM cihazı ile yapılmaktadır (Şekil 4.19). Deneye başlamadan önce numunelerin en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmesi gerekmektedir. Bu sıcaklığı sağlamak için iklimlendirme kabini kullanılmaktadır. Bu sayede deney standardın dışında farklı sıcaklıklarda

yapılabilmektedir. Deneyden önce numune yüksekliği, çapı, yük zamanı, yük artış süreleri ve uygulanacak gerilme gibi değerlerdir. Numune cihaza yerleştirilir, düşey deformasyonu algılayacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanır daha sonra deney başlatılır. Numune kırılana kadar deney devam etmektedir.



Şekil 4.19. Yorulma deney düzeneği

Yorulma deneyi sonucunda Şekil 4.20’de temsili olarak görülen yük tekerrür sayısı deformasyon grafiği çizilmektedir. Yorulma ömrü, yük tekerrür sayısı-deformasyon grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. bölge ve III. bölgeye çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [101, 102].



Şekil 4.20. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiği

Çatlak ilerleme oranı (rp), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının deformasyon miktarına oranını ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranının formülü aşağıda verilmiştir [98]. Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

$$r_p = \frac{N_p}{\delta f - \delta i} \quad (4.14)$$

Burada;

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

Np : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısını,

δi : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu (mm),

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

4.7.5. Dinamik Sünme Deneyi

Tekerlek izi, tekrarlı trafik yükleri altında üstyapıdaki tabakaların her birinde kalıcı deformasyonun kademeli olarak artması ile meydana gelmektedir [103]. Dinamik sünme deneyinde, numunelere belirli bir vuruş periyodu içerisinde, tek eksenli tekrarlanan basınç yüküne maruz bırakılır ve her bir yük tekrarından sonra numune içerisinde oluşan kalıcı deformasyon ölçülür. Bu deneyde de statik sünme deneyinde olduğu gibi UTM cihazı (Şekil 4.22) kullanılır. Dinamik sünme deneyinin, statik sünme deneyinden temel farkı hareketli trafik yükünü temsil kabiliyetidir [104, 105].

Silindirik numuneye belirli aralıklarla tekrarlı olarak sabit bir yük uygulanmaktadır. LVDT'ler yardımıyla her bir yük tekrarında meydana gelen plastik ve elastik deformasyonlar belirlenmektedir (Şekil 4.21). Sünme ve esneklik modülleri aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenebilmektedir [106].

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (4.15)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (4.16)$$

$$\varepsilon_c = (L_{3n} - L_1) / G \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_r = (L_{2n} - L_{3n}) / (G (L_{3n} - L_1)) \quad (4.18)$$

$$\sigma = F / A \quad (4.19)$$

E_c : Sünme modülü

E_r : Esneklik modülü

ε_c : Toplam plastik eksenel birim şekil değiştirme

ε_r : Toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme

L_1 : LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm)

L_{2n} : n darbe sayısındaki maksimum deplasman (mm) (elastik + plastik)

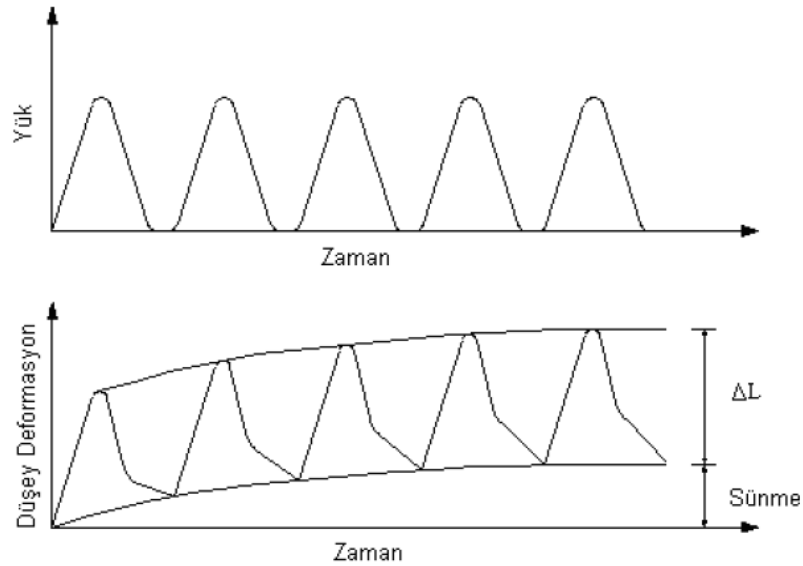
L_{3n} : (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman (mm) (plastik)

G : σ munenin başlangıç yüksekliği (mm)

σ : Maksimum düşey gerilme (kPa)

F : Maksimum düşey yük (σ)

A : Numunenin kesit alanı (cm²)



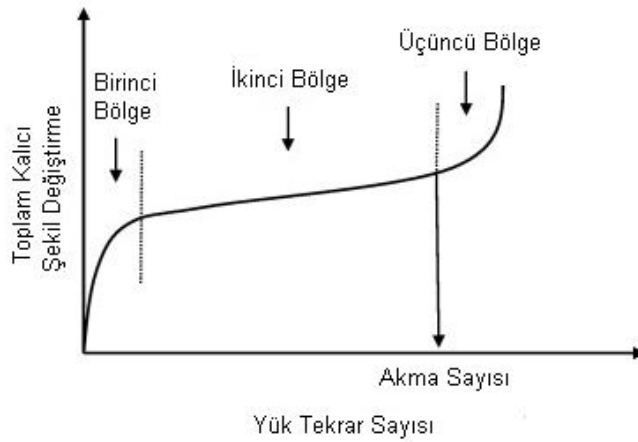
Şekil 4.21. Yükleme - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi

Dinamik sünme deneyine başlamadan önce sıcaklığın numune bünyesine tam anlamıyla işleyebilmesi için numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, ön yükleme süresi, uygulanacak gerilme, ön yükleme gerilmesi, yük artış süresi ve yük periyodu gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune yükleme çerçevesine yerleştirildikten sonra, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Deneyde ilk olarak girilen süre ve gerilme değerinde ön yükleme uygulanarak birincil oturmanın oluşması hedeflenmektedir. Ön yükleme süresinin sonunda normal gerilme seviyesinde tekrarlı yük uygulanmaktadır [107].



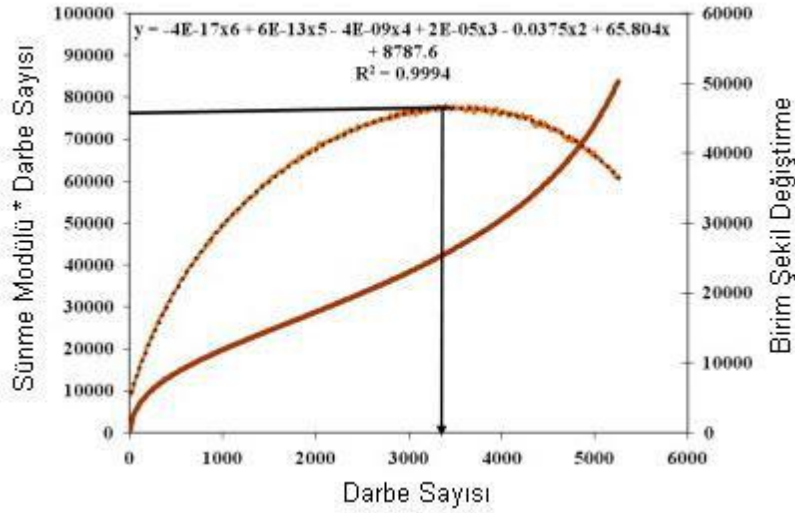
Şekil 4.22. Dinamik sünme deney düzeneği

Deney sonunda yük tekrar sayısından kaynaklı deformasyonlar oluşmaktadır. Şekil 4.23'te görüldüğü üzere eğri üç farklı alandan meydana gelmektedir. Birinci bölgede, konsolidasyon oluşarak hacim azalmıştır ve şekil değiştirme başlangıçta hızla artarken daha sonra artış hızı azalmaktadır. İkinci bölgede toplam şekil değiştirme lineere yakın bir değişim oluşmuştur. Üçüncü bölgede ise kayma deformasyonu meydana gelmekte ve şekil değiştirme miktarı tekrar artmaktadır. Witczak'ın teorisine göre üçüncü bölgenin başladığı andaki yük tekrar sayısı "akma sayısı" olarak adlandırılmaktadır ve akma sayısının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı direncinin bir belirtisi olduğu birçok çalışmayla kanıtlanmaktadır [108].



Şekil 4.23. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi

Akma sayısını tespit etmek için bir diğer yöntem de Bausano ve Williams tarafından geliştirilmiştir [109]. 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 4.24).



Şekil 4.24. Akma sayısının bulunması [109].

4.7.6. Asfalt Karışımlarının Çatlak-İyileştirme Özellikleri

Metalik atık içeren asfalt karışımları indüksiyon yöntemi ile ısıtılarak bunların çatlak iyileştirici özellikleri, 3 noktalı eğilme testleri ile ölçülmüştür. Tüm test numunelerinde kırılan bir kırılma elde etmek için testten önce 24 saat boyunca -20°C de koşullandırılmıştır. Test örneklerinin alt tarafında ortalanmış 5 mm kalınlığında ve 5 mm yüksekliğinde bir çentik kesilmiştir (Şekil 4.25). 3 noktalı bükülme testi sırasında, çentiğin ucundaki ilk çatlama noktasını bulmak için dikey yük çentiğe doğru yönlendirilmiştir. Numunelerin çatlak iyileşmesini ölçme prosedürü aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Şekil 4.25):

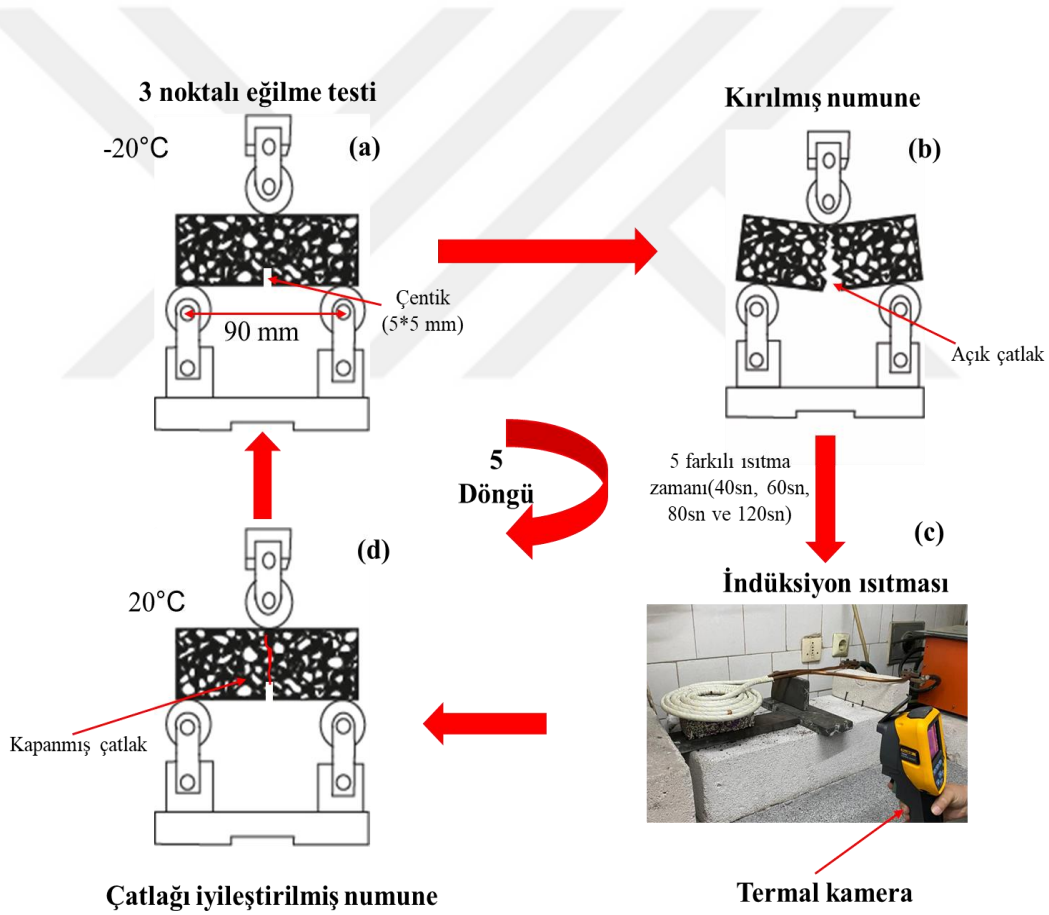
- Prizmatik test numuneleri, 90 mm ile ayrılmış iki destek makarasına yerleştirildi. Daha sonra 0.5 mm/dakikalık bir hızda dikey monotonik bir yük, numunenin tam orta noktasına numune kırılıncaya kadar uygulandı (Şekil 4.25a).
- 3 noktalı eğilme testi bittiğinde, kırılmış asfalt numunelerinin sıcaklığı 20°C 'ye ulaşana kadar 2 saat oda sıcaklığında bırakılmıştır. Çünkü amaç numunelerin yüzeyinde donmadan dolayı meydana gelen nemin tamamen buharlaşmasını sağlamaktır (Şekil 4.25b). Daha sonra numunenin kırılan iki parçası bir araya getirilmiştir. Numuneler her iki yöntem içinde 40 sn, 60 sn, 80 sn, 100 sn ve 120 sn olmak üzere beş farklı ısıtma süresinde ısıtılmıştır (Şekil 4.25c). Bu sürelerin daha önceki araştırma sonuçları incelenerek belirlenmiştir.

İndüksiyon ısıtma yöntemi kullanarak iyileşmeleri için uygun süreler olduğu düşünülmüştür [17].

- Isıtma işleminden sonra, numuneler 2 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler, 24 saat boyunca -20°C 'de koşullandırılmıştır. Koşullandırma işlemi bittikten sonra 3 noktalı eğilme testinde tekrar test edilmiştir (Şekil 4.25d).

Test edilen her prizmatik numunenin ulaştığı iyileşme seviyesi (HL), iyileşme sürecinden sonra numune tarafından elde edilen en yüksek yük (F_{Son}) ile aynı örneğin ilk iyileşme döngüsünden önce elde ettiği en yüksek yük ($F_{\text{Başlangıç}}$) arasındaki bölüm olarak tanımlandı:

$$HL = \frac{F_{\text{Son}}}{F_{\text{Başlangıç}}} \quad (4.20)$$



Şekil 4.25. Çatlak iyileştirme döngülerinin şematik gösterimi ve test numunelerinin indüksiyonla ısıtma yoluyla sıcaklık dağılımının ölçümü

Son olarak, iyileşme metodolojisinin etkinliğini ölçmek için her bir asfalt numunesi için toplam 5 çatlak iyileştirme döngüsü gerçekleştirilmiştir.

4.7.7. İndüksiyon Isıtması

İndüksiyonla ısıtma deneyleri, maksimum 350 kHz frekansında 6 kW'lık bir indüksiyon ısıtma jeneratörü ve yaklaşık 700W'lık bir kontrol gücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ısıtma dalgaları bobinin yakınında daha güçlüdür. Bu yüzden test numuneleri indüksiyon cihazının bobinine yakın tutulmamalıdır. Testler sırasında hava sıcaklığı 20°C'dir. Test numunelerinin sıcaklığı, 5 farklı ısıtma süresinden (40sn, 60sn, 80sn, 100sn ve 120sn) sonra 320 × 240 piksel tam renkli bir kızılötesi kamera kullanılarak yüzeylerinde tespit edilmiştir. Ek olarak, seçilen test numunelerinin kütle kaybını ve malzemelerin kimyasal bozulmasını kontrol etmek amacıyla indüksiyonla ısıtma öncesinde ve sonrasında tartılmıştır. İndüksiyon ısıtması düzeneği Şekil 4.26'da görülmektedir.



Şekil 4.26. İndüksiyon ısıtması düzeneği

4.7.8. Buz Eritme Deneyi

Bu deneyde, Marshall numunelerinin (Şekil 4.27) yüzeyinde 5 mm ve 10 mm olmak üzere farklı kalınlıklarda buz donduruldu. Bu testte de boyutu 101,6 mm çapında 63,5 mm yüksekliğinde standart Marshall numuneleri kullanılmıştır. Bu numunelerin sıcaklığı başlangıçta 20°C civarında tutulmuştur. Daha sonra eritme performansı indüksiyon ısıtma ile test edilmiştir. İndüksiyon

ısıtmasına maruz kalan her her numune, 120 s boyunca doğrudan ısıtıldı. Kızılötesi kamera ile sıcaklık değişim verileri toplanmıştır. Otomatik buz eritme testi de 9°C'lik oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Eritme testi öncesi ve sonrası buz ve asfalt numunelerinin ağırlıkları da bu deneyde kaydedilmiştir. Buz eritme testinin sonlandırılması, buzun Marshall numunesinden kendi ağırlığı ile ayrılabilirdi. Çünkü buz eritme işleminde tüm buz eritmek gereksizdir. Buz ve kaplama arasındaki tek kombinasyon, asfalt kaplamanın üst yüzeyi ile buzun alt yüzeyi arasındaki ara yüzeydir. Bu iki yüzey arasındaki bağ bozulduğunda, sonuç olarak buz yoldan kolayca temizlenebilirdi. Ayrıca, eritme sonrası süreç ve erimiş buzlu suyun kaplamada donmasını önleme göz önüne alındığında, buz bir katı olarak çıkarmanın tüm buz suya eritmekten daha iyi olduğu belirlenmiştir [110].



Şekil 4.27. Buz eritme deneyi için örnek

4.7.9. Kar Eritme Deneyi

Bu deneyde, Marshall numunelerinin (Şekil 4.28) yüzeyinde 15 mm kalınlığında kar yapılmıştır. Bu deneyde de 101,6 mm çapında 63,5 mm yüksekliğinde standart Marshall numuneleri kullanılmıştır. Kar, bu aşamada numunelerin üst yüzeyine eller tarafından hafifçe sıkıştırılmıştır. Bu numunelerin sıcaklığı da başlangıçta yaklaşık 20°C'de tutulmuştur. Daha sonra numuneleri ısıtmak için indüksiyonla ısıtma kullanılmıştır. Bu deneyde her numune dönüşümlü olarak 20 saniye ısıtıldı ve 10 saniye dinlendirildi. Kar eritme işlemi sırasında deney verilerini kaydetmek için ısıtma aralığı süresi kullanılmıştır. Otomatik kar eritme deneyi de 9°C'lik bir oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Erime deneyi öncesi ve sonrası kar ve asfalt numunelerinin

ağırlıkları da kaydedildi. Kar eritme testinin bitiş noktası, tüm karın suya dönüştüğü an olarak belirlenmiştir [110].



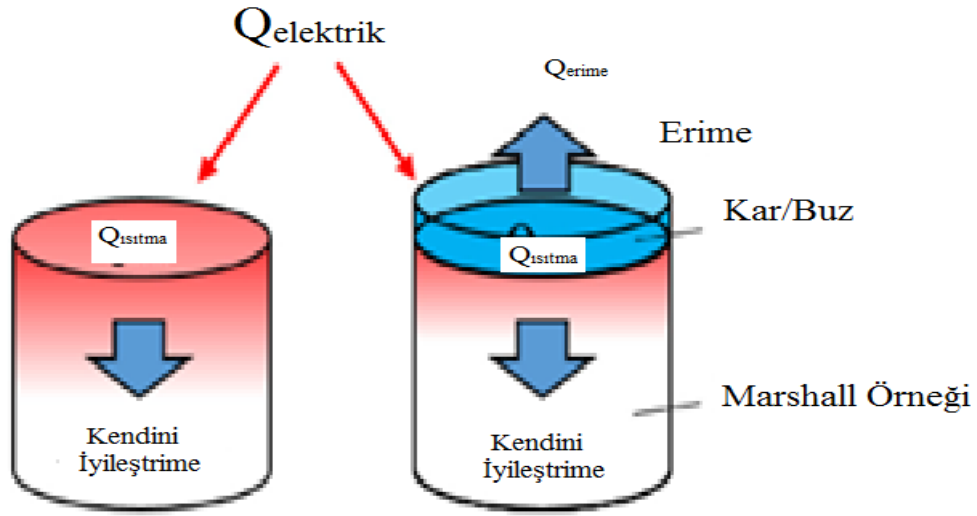
Şekil 4.28. Kar eritme deneyi için örnek

4.7.10. Eritme Verimliliği Analizi

Bilindiği gibi asfalt karışımlarının ısıtılması ve iyileştirilmesinde elektrik enerjisi ilk olarak asfalt karışımların ısı enerjisine dönüştürülmüştür. Daha sonra ısı enerjisi, asfalt karışımlarının kendini iyileştirme veya erimesini başlatması için gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu durumda, Şekil 4.29'da gösterildiği gibi, ilk önce asfalt numunelerini ($Q_{ısı}$) ısıtmak için elektrik enerjisi ($Q_{elektrik}$) kullanılmıştır. Daha sonra asfalt numunesinin ısı enerjisi ($Q_{ısı}$) buz eritmek (Q_{erime}) ve çatlakları iyileştirmek ($Q_{iyileşme}$) için kullanılmıştır. Bununla birlikte, asfalt karışımlarının mikro çatlakları düzgün dağılım olmadığından, asfalt karışımının bu ısıtma verimliliğini ölçmek çok zordur. Ayrıca asfalt karışımlarının sıcaklığı da homojen değildir. Bu nedenle, buz eritmek için kullanılan ısı enerjisini basitçe $Q=mC\Delta T$ ve $Q=m\Delta H$ denklemi ile hesaplamak imkânsızdır. Bu tez çalışmasında, her numunenin erime verimliliğini değerlendirmek için ortalama erime hızı uygulandı. Ortalama erime hızı aşağıdaki denklem ile hesaplanır [110].

$$v = \frac{m_s}{t} \quad (4.21)$$

Burada m_s : erimiş buz veya karın kütlesi ve t ise erime zamanıdır.



Şekil 4.29. Kendini iyileştirme (sol) ve buz eritme deneyinin (sağ) şematik diyagramı [110]

4.7.11. Buz için Üç Noktalı Eğilme Deneyi

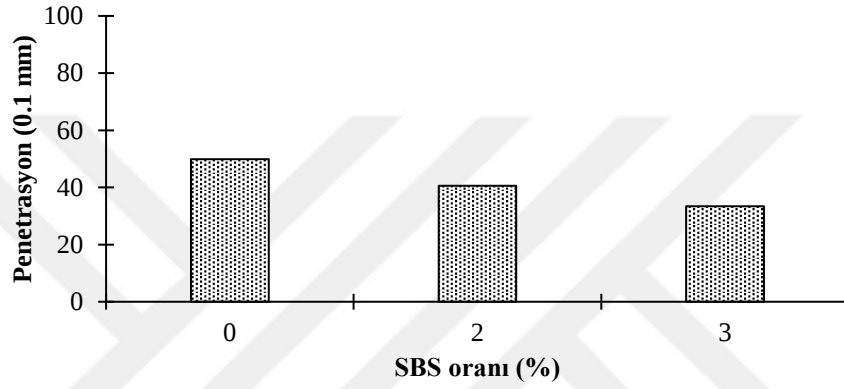
Bu tez çalışmasında, kendini onaran asfalt karışımının eritme sırasındaki iyileşme performansını ölçmek için üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Bu deney için 150x70x50 mm boyutlarında prizmatik numune (kiriş) kullanılmıştır. Numuneler ilk önce -20°C’de kırılmıştır. Daha sonra kırık asfalt numunelerinin üst yüzeyine 5 mm kalınlığında buz yapıştırılmıştır. Buzlu numuneler, buzlarının erimesi ve çatlaklarının iyileştirilmesi için indüksiyon cihazında ısıtılmıştır. Numunelerin yan yüzeyine bir fiber optik sıcaklık sensörü takılmıştır. Sıcaklık bir bilgisayar tarafından ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Eritme sırasında numunelerin sıcaklığı tavsiye edildiği gibi 80°C civarında tutulmuştur [111]. Buzlu numuneler toplamda yaklaşık 30 dakika ısıtılmıştır. Bu eritme işleminden sonra dikkörtgen asfalt kırış numuneleri tekrardan -20°C’de kırılmıştır. İyileşme sonrası maksimum kırılma kuvveti kaydedilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Bağlayıcı Deney Sonuçları

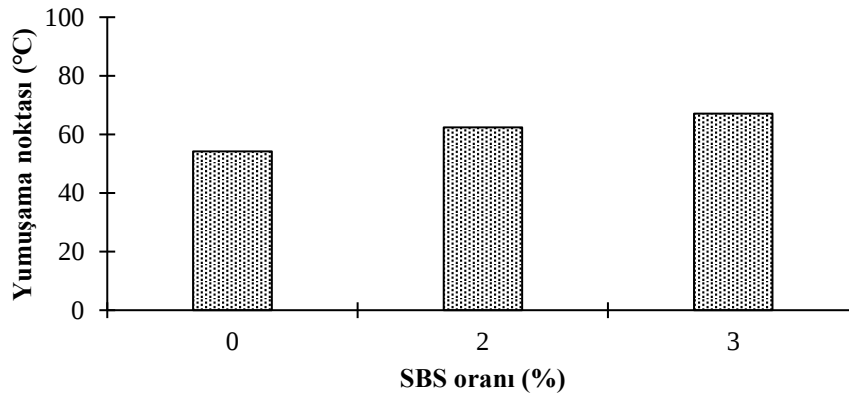
5.1.1. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında hazırlanan modifiyeli bitümler ve saf bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 5.1’de verilmiştir.



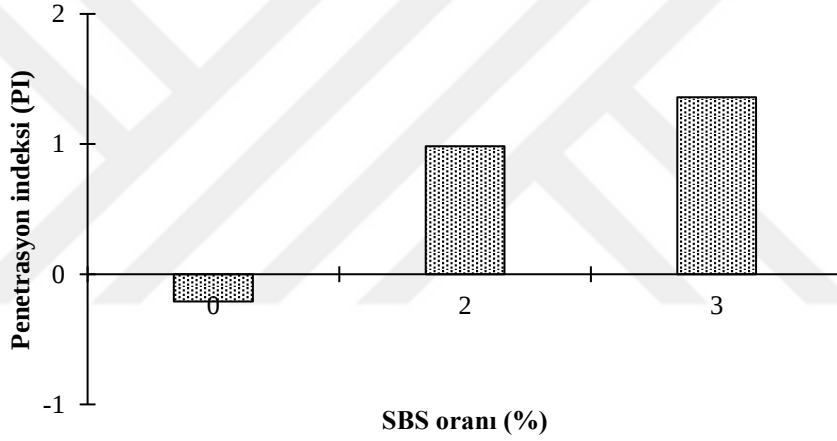
Şekil 5.1. Saf ve modifiyeli bitümlerin penetrasyon deney sonuçları

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere SBS kullanımı ile penetrasyon değerleri azalmış dolayısıyla bağlayıcıların kıvamları artmıştır. Saf bağlayıcı içerisindeki katkı oranı arttıkça bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bitüm modifikasyonunda SBS elastomerinin %2 ve %3 oranlarında kullanılması durumunda penetrasyon değeri saf bağlayıcının penetrasyon değerine göre sırasıyla %18,5 ve %32,9 oranlarında azaltmıştır. Bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2. Saf ve modifiye bitümlerin yumuşama noktası değerleri

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere SBS elastomerinin kullanımı ile yumuşama noktası değerleri artmış, dolayısıyla elastomerlerin bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir. Saf bağlayıcı içerisindeki SBS oranı arttıkça yumuşama noktası değerleri de düzenli bir şekilde artmıştır. Bitüm modifikasyonunda SBS elastomerinin %2 ve %3 oranlarında kullanılması durumunda yumuşama noktası değeri saf bağlayıcının yumuşama noktası değerine göre sırasıyla %15,1 ve %23,7 oranlarında artmıştır. Yumuşama noktası deney sonuçları penetrasyon deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcı, içinde kullanıldığı karışımın daha yüksek sıcaklıklara kadar visko-elastik davranışını koruyabileceğine işaret etmektedir. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden yararlanılarak belirlenen ve bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetlerinin bir göstergesi olan penetrasyon indeksi değerlerinin katkı türü ve içeriği ile değişimi Şekil 5.3’te görülmektedir.



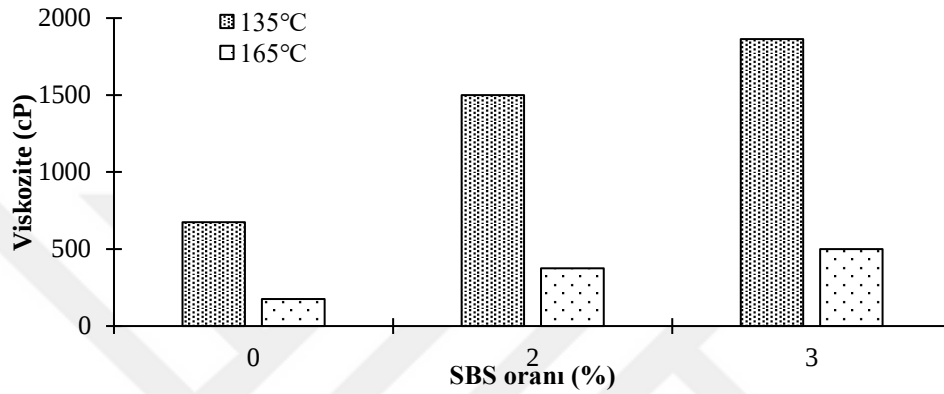
Şekil 5.3. Saf ve modifiye bitümlerin penetrasyon indeksi değerleri

Şekil 5.3’te görüldüğü üzere katkı oranı arttıkça bütün modifiye bitümlerde penetrasyon indeksi (PI) artmış dolayısıyla bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetleri düzenli bir şekilde azalmıştır. Saf bağlayıcının penetrasyon indeksi değeri sıfırdan küçük olduğu için ısıya normal duyarlıdır.

5.1.2. Dönel Viskozite (RV) Deney Sonuçları

Bitümlü bağlayıcılara 135°C ve 165°C sıcaklıkta uygulanan dönel viskozite deney sonuçları Şekil 5.4’te görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere hem 135°C’de hem de 165°C’de katkı oranının artması ile SBS modifikasyonunda viskozite değerleri artmaktadır. Superpave şartnamesine göre işlenebilirlik açısından bağlayıcıların 135°C sıcaklıkta viskozite değeri en fazla 3000 cP olması gerekmektedir. Tüm bağlayıcılar işlenebilirlik açısından şartname gereksinimini sağlamaktadır. Hem 135°C’de hem de 165°C’de saf bağlayıcı içerisindeki SBS oranı arttıkça viskozite değerlerine

artmaktadır. SBS katkısının bitüme %2 ve %3 oranlarında ilave edilmesi ile 135°C’deki viskozite değerleri saf bağlayıcının viskozite değerlerine göre sırasıyla 2,2 ve 2,8 kat arttırmıştır. SBS katkısının bitüme %2 ve %3 oranlarında ilave edilmesi ile 165°C’deki viskozite değerleri saf bağlayıcının viskozite değerlerine göre sırasıyla 2,1 ve 2,9 kat arttırmıştır. Viskozite değerlerine göre elastomerlerin saf bitümü sertleştirdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar bize penetrasyon ve yumuşama noktası değerleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. Saf ve modifiye bitümlerin döl viskozite deney sonuçları

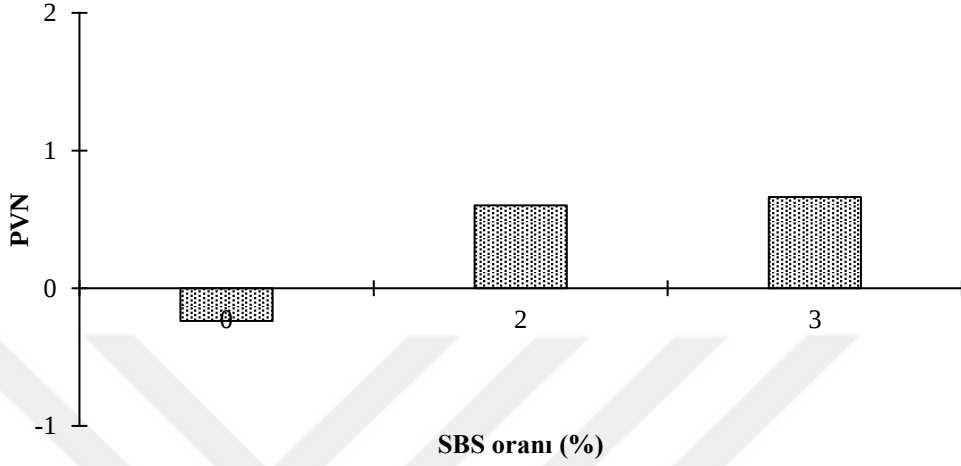
Bitümlü sıcak karışımların hazırlanmasında, asfalt bağlayıcının karıştırma sıcaklık aralığının $0,17 \pm 0,02$ Pa.s viskozite aralığında ve sıkıştırma sıcaklık aralığının ise $0,28 \pm 0,03$ Pa.s viskozite aralığında olması istenir [112]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri tespit edilerek çalışma kapsamında hazırlanan bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları belirlenmiştir. Belirlenen sıcaklık aralıkları Tablo 5.1’de verilmiştir. Katkı içeriği arttıkça hem karıştırma hem de sıkıştırma sıcaklıklarında artış meydana gelmiştir.

Tablo 5.1. Saf ve modifiye bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralık değerleri

Bitümler	Karıştırma sıcaklık aralığı (°C)	Sıkıştırma sıcaklık aralığı (°C)
Saf	172	150
%2 SBS	183	173
%3 SBS	208	195

Bağlayıcıların 25 °C’deki penetrasyon ve 135°C’deki viskozite değerleri ile tespit edilen PVN değerlerindeki değişim Şekil 5.5’te verilmiştir. Yüksek PVN değerleri, bağlayıcının düşük sıcaklık hassasiyeti ve düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumunu önleme kabiliyetinin bir göstergesi olduğundan bu özelliklerin, katkı oranının artması ile sürekli iyileştiği görülmektedir. Şekil 5.5’te görüldüğü üzere en düşük PVN değerini saf bağlayıcı verirken en yüksek PVN değerini ise %3 SBS katkısını içeren bağlayıcılarda görülmektedir. Bağlayıcıların PVN değerleri katkı oranı

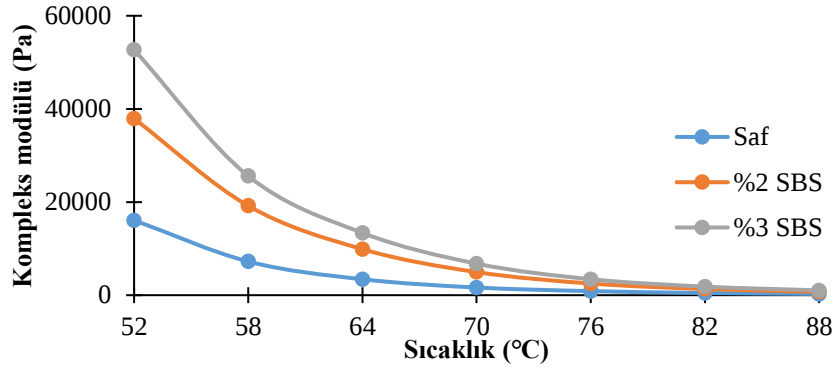
arttıkça artmaktadır. Saf bağlayıcıda elastomer kullanımı karışım içinde iyi bir etkileşim oluşturduğu ve bu sayede bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin önemli derecede düşmesini sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. Bağlayıcıların PVN değerlerindeki değişim

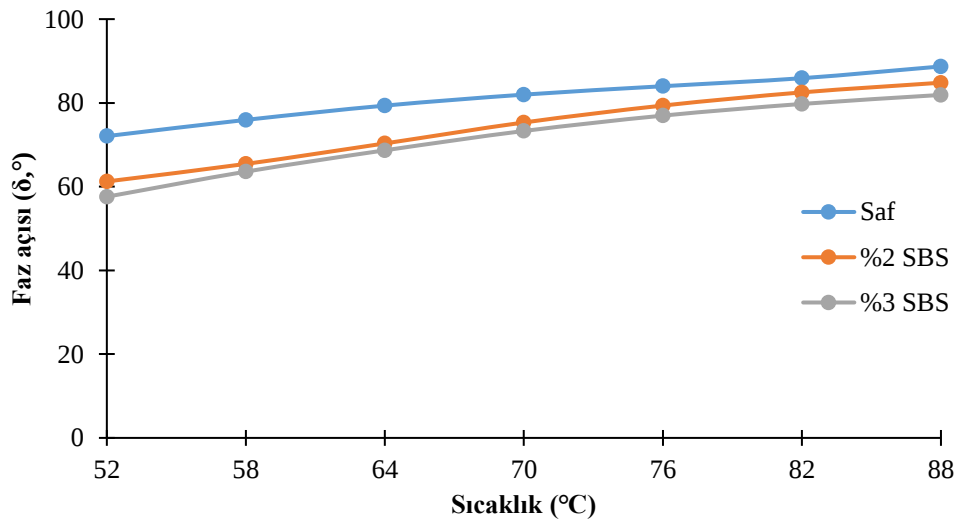
5.1.3. Kompleks Kayma Modülü (G^*) ve Faz Açısı (δ) Sonuçları

Tez çalışması kapsamında öncelikle yaşlandırılmamış (orijinal) saf ve modifiye bitümlerin Superpave yöntemine göre performans seviyesi yüksek sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Bu nedenle Superpave şartnamesine uygun olarak saf bağlayıcı ve modifiye bitümler 7 farklı sıcaklıkta (52°C, 58°C, 64°C, 70°C, 76°C, 82°C ve 88°C) deneylere tabi tutulmuştur. Uygulanan deneylerden elde edilen kompleks modül (G^*) değerlerinin katkı türü ile değişimleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Sıcaklığın artması ile saf ve modifiyeli bağlayıcıların G^* değerleri azalmaktadır. Bağlayıcıların içerisindeki katkı oranı arttıkça bağlayıcıların G^* değerlerinde artış meydana gelmektedir. Katkı kullanımı ile kaymaya karşı direnç açısından fayda sağlanacağı söylenebilmektedir. Şekil 5.6'da görüldüğü üzere SBS katkısının %2 ve %3 oranlarında kullanılması durumunda 52°C'deki kompleks modülü değerleri saf bağlayıcının kompleks modülü değerlerine göre sırasıyla 2,36 ve 3,28 kat artmıştır. SBS katkısının %2 ve %3 oranlarında kullanılması durumunda 88°C'deki kompleks modülü değerleri saf bağlayıcının kompleks modülü değerlerine göre sırasıyla 2,74 ve 3,94 kat artmıştır.



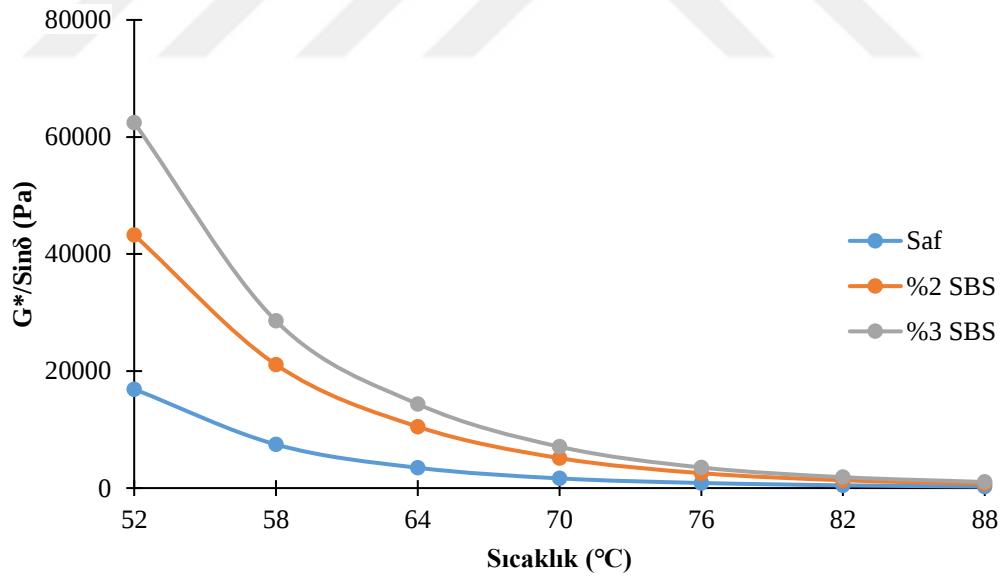
Şekil 5.6. SBS modifikasyonunda kompleks modül (G^*)-sıcaklık ilişkisi

Bağlayıcıların sıcaklık ile faz açılarında meydana gelen değişimi Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil 5.7’de görüldüğü üzere katkı içeriği arttıkça faz açısı değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bağlayıcılara uygulanan deney sıcaklığı arttıkça tüm bağlayıcıların faz açısı değerlerinde de artış meydana gelmektedir. En fazla artış %3 SBS içeren bağlayıcılarda meydana gelmiştir. 52°C’deki faz açısı değerleri saf bağlayıcısının faz açısı değerlerine göre sırasıyla %15,0 ve %20,1 azalırken, 64°C sıcaklığında ise sırasıyla %11,4 ve %13,5 azalmıştır. 76°C’deki faz açısı değerleri saf bağlayıcısının faz açısı değerlerine göre sırasıyla %5,5 ve %8,4 azalırken, 88°C sıcaklığında ise sırasıyla %4,4 ve %7,7 azalmıştır. Sıcaklık arttıkça bağlayıcıların faz açısı değerleri de birbirlerine yaklaşmaktadır. Faz açısı değerlerindeki artış viskozluğu azalma ise elastikliği ifade etmektedir. Bu deney sonuçlarına göre saf bağlayıcıya SBS ilavesi saf bağlayıcının elastiklik özelliğini artırmaktadır. Ayrıca katkı içeriği arttıkça bağlayıcıların elastiklik özelliği artarken viskozluk özelliği azalmaktadır.



Şekil 5.7. SBS modifikasyonunda faz açısı (δ)-sıcaklık ilişkisi

Bağlayıcıların sıcaklık ile $G^*/\sin\delta$ değerlerinde meydana gelen değişimi Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekil 5.8’de verilen tekerlek izi dayanım parametreleri ($G^*/\sin\delta$) incelendiğinde katkı kullanımı ile bu değerlerin düzenli bir şekilde arttığı, sıcaklığın artması ile düzenli bir şekilde azaldığı görülmektedir. SUPERPAVE bağlayıcı şartnamesine göre, orijinal (yaşlandırma işlemi uygulanmamış) bağlayıcılarda kalıcı deformasyon (tekerlek izi oluşumu) meydana gelmemesi için uygulanan deney sıcaklıklarında $G^*/\sin\delta$ parametresinin en az 1,0 kPa olması gerekmektedir [92]. Şekil 5.8’de görüldüğü üzere, 52°C, 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklık değerinde saf ve modifiyeli bitümlerin tamamının tekerlek izi parametresi değerlerinin şartname gereksinimi olan 1000 Pa değerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. 82°C sıcaklıkta %2 SBS modifiyeli bitüm, 88°C’de ise %3 SBS modifiyeli bitüm bağlayıcının şartname kriterini sağladığı belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ile SBS polimeri arasında iyi bir bitüm-polimer fazı olduğundan $G^*/\sin\delta$ parametre değeri artmıştır. 52°C’deki $G^*/\sin\delta$ değerleri saf bağlayıcısının $G^*/\sin\delta$ değerlerine göre sırasıyla 2,56 ve 3,69 kat artarken, 64°C sıcaklığında ise sırasıyla 3,02 ve 4,13 kat artmıştır. 76°C’deki $G^*/\sin\delta$ değerleri saf bağlayıcısının $G^*/\sin\delta$ değerlerine göre sırasıyla 1,38 ve 2,63 kat artarken, 88°C sıcaklığında ise sırasıyla 2,74 ve 3,97 kat artmıştır. Tekerlek izi parametresi açısından en iyi sonucu %3 SBS içeren bağlayıcı vermektedir. Katkı oranı arttıkça tekerlek izi direnci de artmaktadır.



Şekil 5.8. SBS modifikasyonunda $G^*/\sin\delta$ -sıcaklık ilişkisi

Yaşlandırma işlemi uygulanmamış (orjinal) bitümlere uygulanan DSR deney sonuçlarından bağlayıcıların performans sınıfı yüksek sıcaklık değerleri belirlenmiştir ve bulunan değerler Tablo 5.2’de verilmiştir.

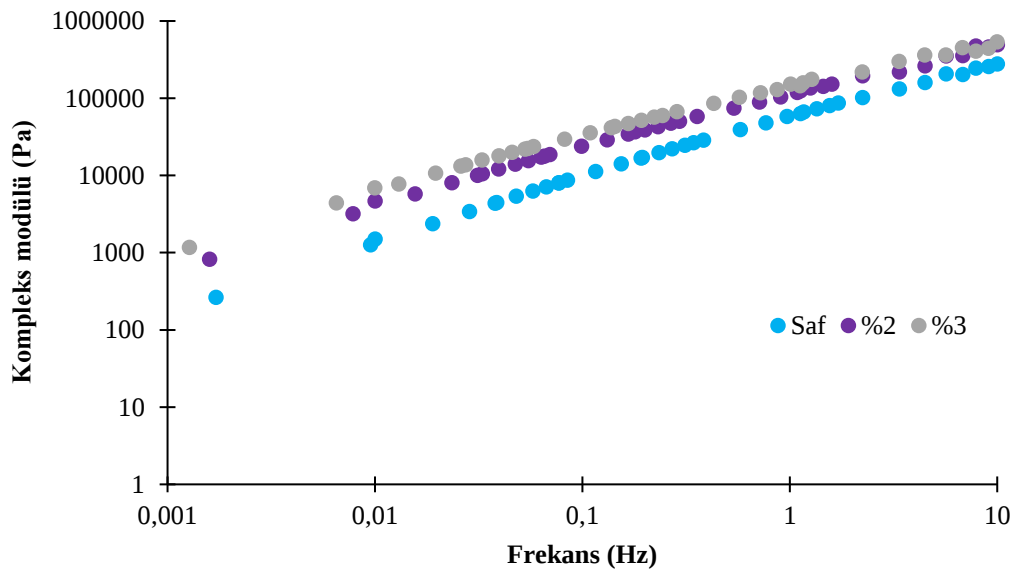
Tablo 5.2. Saf ve modifiye bitümlerin PG yüksek sıcaklık değerleri

Bitümler	PG yüksek sıcaklık değeri
Saf	PG 70
%2 SBS	PG 82
%3 SBS	PG 88

5.1.4. Dinamik Mekanik Analiz Deney Sonuçları

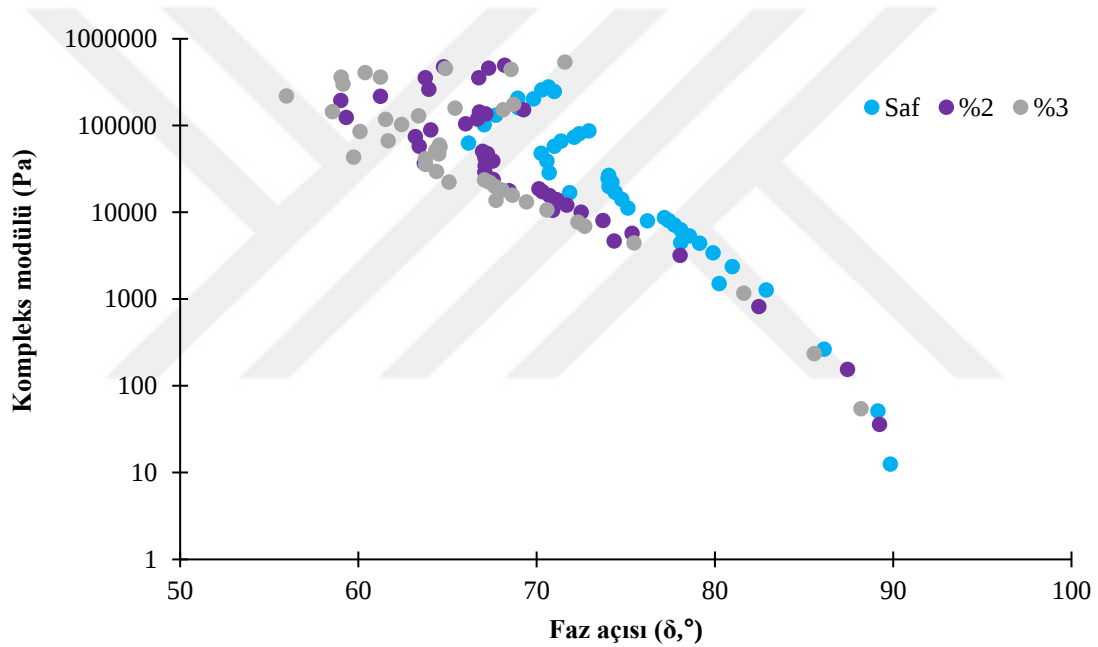
Çalışmada saf ve modifiye bitümlere 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıkta 0,01-10 Hz frekans aralığında 10 farklı frekansta dinamik kayma reometresi deneyi uygulanarak bitümlü bağlayıcıların farklı şartlardaki reolojik davranışı değerlendirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlar superpoze edilerek ana eğriler (master curve) Malvern Bohlin DSR yazılımı kullanılarak çizilmiştir. SBS elastomeri ile hazırlanan modifiye bitümlerin kompleks modüllerinin ana eğrileri ve siyah diyagramları Şekil 5.9’da görülmektedir.

Şekil 5.9’da görüldüğü üzere frekansın (yükleme hızının) artması ile kompleks kayma modülü değerleri artmıştır. Katkı maddesi olan elastomer oranı arttıkça bağlayıcıların kompleks modülü değerleri artmıştır. Düşük frekanslarda katkı maddelerinin etkisi daha belirgin iken yüksek frekanslarda elastomer içeriğinin etkisi azalmıştır. Grafiklerde hem yatay eksen hem de dikey eksen logaritmik verildiğinden bağlayıcılar arasındaki farklar belirginlik görülmektedir. Ayrıca tüm bağlayıcılarda elastomer içeriği arttıkça kompleks modülü değerlerindeki fark belirgin olmuştur. En yüksek kompleks modülü değerleri %3 katkı içeriğine sahip bağlayıcılarda görülmektedir.



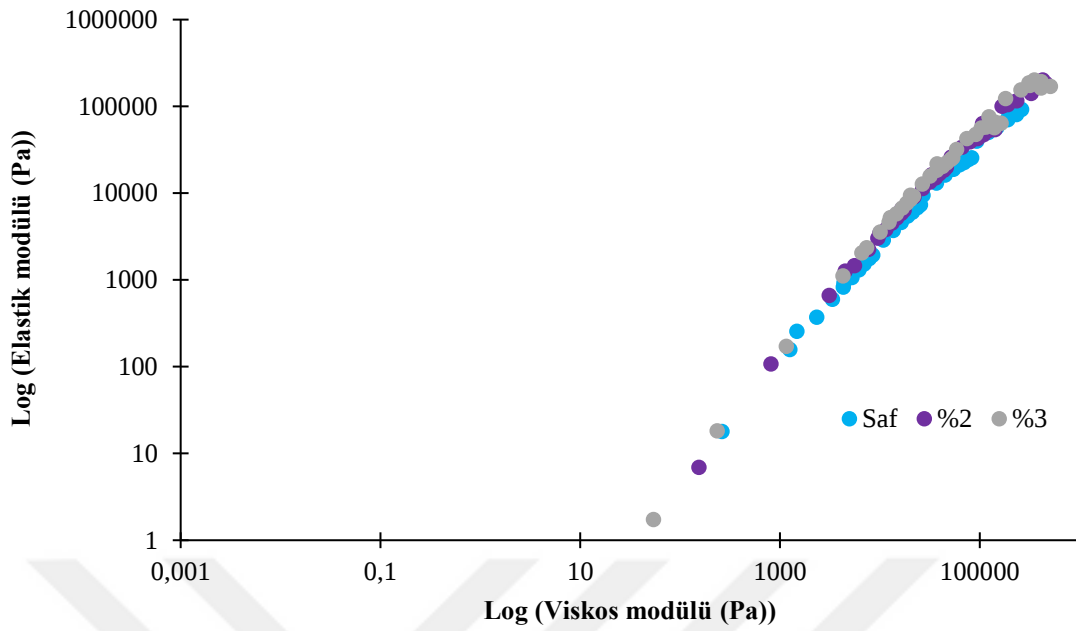
Şekil 5.9. SBS modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan bağlayıcıların kompleks kayma modülü değerlerinin frekansla değişimi

Saf ve modifiye bağlayıcıların siyah diyagramları Şekil 5.10'da görülmektedir. Faz açısı değerlerinin düşük ve kompleks kayma modülü değerlerinin yüksek olması bağlayıcıların daha elastik davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 5.10 incelendiğinde saf bitümde kompleks modülü değerlerinde meydana gelen artışla faz açısında azalma meydana gelmiştir. Modifiye bitümler dikkate alındığında ise katkı içeriği arttıkça özellikle $1,0E+5$ Pa civarı kompleks modül değerlerinde faz açısı değerleri en düşük seviyeye ulaşmış ve katkı içeriğinin artması ile faz açısı değerleri düzenli olarak azalmıştır. En düşük faz açısı değerlerinin %3 modifiye bitümde elde edildiği ve $55-60^{\circ}\text{C}$ aralığında olduğu gözlenmiştir. SBS modifikasyonlarından elde edilen bağlayıcıların elastik davranış açısından saf bağlayıcıdan elde edilen sonuçlara göre daha iyi sonuçlara sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10. SBS modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan bağlayıcıların kompleks kayma modülü – faz açısı ilişkisi (siyah diyagramlar)

Bağlayıcıların elastik modüllerinin viskoz modülleri ile değişimleri (cole cole diyagramları) ise Şekil 5.11'de görülmektedir. %3 SBS katkılı bağlayıcıların elastik modül değerleri 10 ile 10^6 arasında değişmektedir. Tüm bağlayıcıların viskoz modül değerleri yaklaşık olarak aynı yerden başlayıp bitmektedir. SBS elastomeri ile hazırlanan bağlayıcılar için katkı içeriği arttıkça diyagramların birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Elastomer içeren bağlayıcılar saf bağlayıcılara göre daha fazla elastik özellik göstermektedir.



Şekil 5.11. SBS modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan bağlayıcıların elastik modül – viskoz modül ilişkileri (cole-cole diyagramları).

5.2. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

İki farklı metal atığının iki farklı oranda agrega yerine ve iki farklı modifiye bitüm eklenerek hazırlanan bitümlü sıcak karışımlara dair; (1) kullanılan atık metallerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir; (2) atık metallerin karışımındaki dağılımları analiz edilmiştir; (3) test örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir; (4) asfalt test numuneleri indüksiyon ısıtmasına maruz bırakılmıştır; (6) kendini iyileştirme, tekrarlanan kırılma ve iyileşme döngü özellikleri incelenmiştir.

5.2.1. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

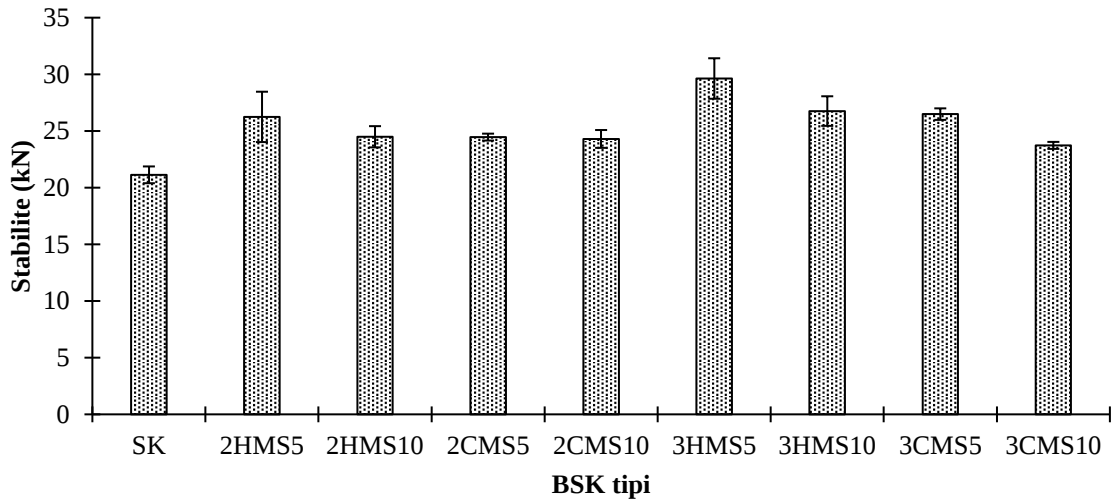
Hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanarak karışım numunelerinin deformasyona karşı maksimum dayanımları ve maksimum yük uygulandığı zaman numunelerde meydana gelen deformasyon miktarları belirlenerek karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımları değerlendirilmiştir. Marshall stabilite ve akma deneyi ile kalıcı Marshall stabilite deneyi, her bir karışım tipi için üçer adet karışım numuneleri kullanılarak yapılmıştır. Stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle Marshall oranı (MQ) değerleri belirlenmiştir. Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmı Şekil 5.12’de görülmektedir.

Şekil 5.13’te görüldüğü üzere katkı kullanımı ile Marshall stabilite değerleri artmıştır. Karışımlar içerisinde en yüksek stabilite değerleri 3HMS5 karışımından elde edilmektedir. En düşük stabilite değerine ise saf bitüm ve agrega ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit

edilmiştir. HMS içeren asfalt karışımların stabilite değerleri, CMS içeren asfalt karışımların stabilite değerlerinden daha yüksektir. Stabilite değerleri incelendiği zaman bitümlü sıcak karışım numuneleri içerisindeki her iki tüfal oranı arttıkça stabilite değerlerinde azalma meydana gelmiştir. 2HMS5 ve 2CMS5 asfalt karışımının stabilite değerlerini, referans karışıma göre sırasıyla 1,24; 1,16 kat, 3HMS5 ve 3CMS5 asfalt karışımlarında ise sırasıyla 1,40; 1,25 kat arttırdığı belirlenmiştir. 2HMS10 ve 2CMS10 asfalt karışımının stabilite değerlerini, referans karışıma göre sırasıyla 1,16; 1,15 kat, 3HMS10 ve 3CMS10 asfalt karışımlarında ise sırasıyla 1,27; 1,12 kat arttırdığı belirlenmiştir. Karışım numunelerinde kullanılan SBS miktarı arttıkça stabilite değerlerinde de artış meydana gelmektedir.

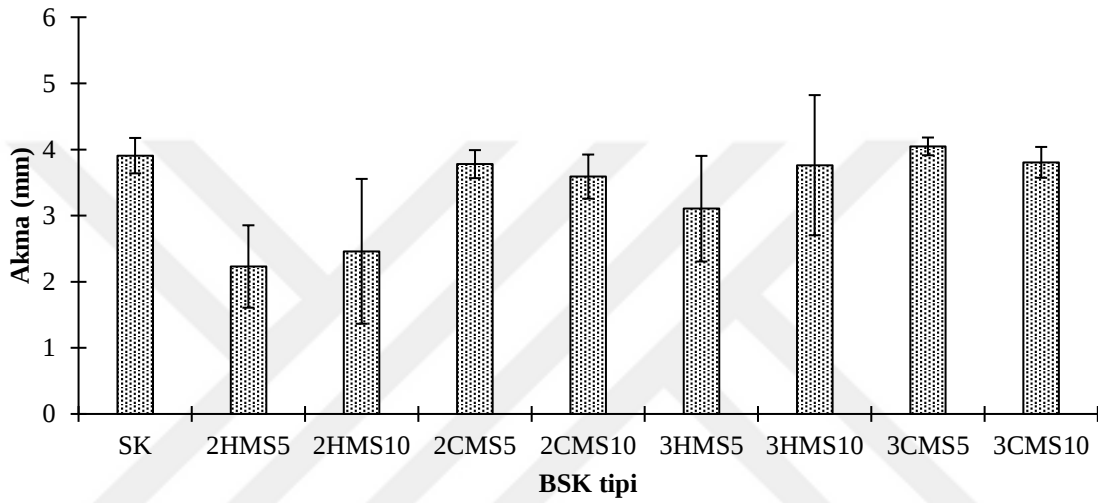


Şekil 5.12. Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmının görünüşü



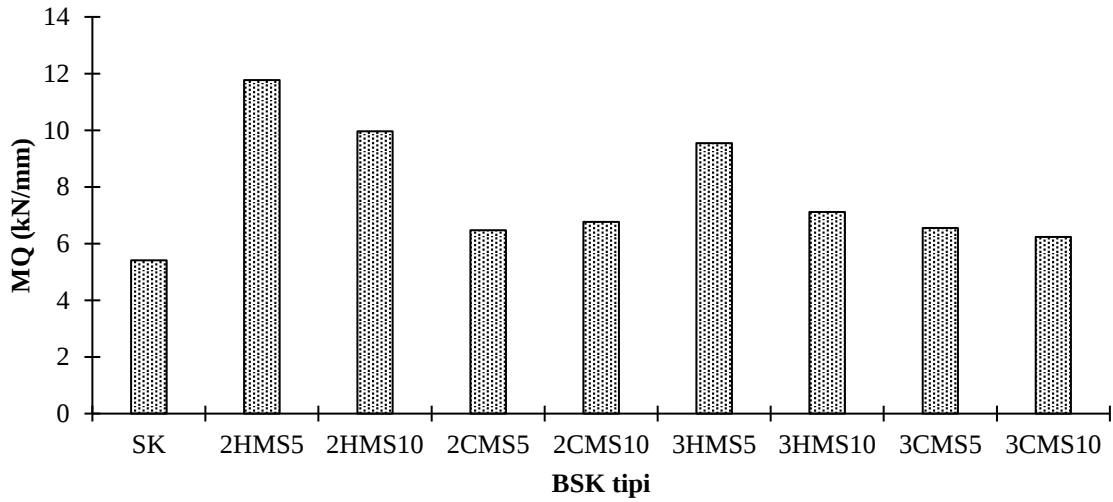
Şekil 5.13. Karışımların Marshall stabilite değerlerinin değişimi

Karışımların akma değerleri Şekil 5.14'te verilmiştir. Şekil 5.14'te görüldüğü üzere bitümlü sıcak karışımlardaki SBS oranı arttıkça karışımların akma değerlerinde artış meydana gelmektedir. HMS karışımlarında tüfal oranı arttıkça akma değerleri de artmıştır. En düşük akma değerini 2HMS5 karışımı vermektedir. En yüksek akma değeri ise 3CMS5 karışımından elde edilmektedir. 3CMS5 karışımı dışında diğer tüm karışımlar saf karışımın akma değerlerinden düşük çıkmıştır. Karışımların Marshall stabilite değerlerinin akma değerlerine bölünmesi ile belirlenen Marshall oranı değerleri Şekil 5.15'te görülmektedir.



Şekil 5.14. Karışımların akma değerlerinin değişimi

Şekil 5.15'te görüldüğü üzere tüfal kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımının bir göstergesi olan Marshall Oranı (MQ) değerleri artmıştır. SBS içeren HMS ve CMS kullanılan karışımlarda HMS ve CMS içeriğinin artması ile MQ değerindeki azalma süreklilik göstermektedir. Bitümlü sıcak karışımların içerdiği SBS oranı arttıkça her iki tüfal içeren karışımlar içinde MQ değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Karışımlar içerisinde en yüksek MQ değerine 2HMS5 karışımının, en düşük MQ değerine ise saf karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. MQ deney sonuçlarından tüfal kullanılarak bitümlü sıcak karışım hazırlanması durumunda karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının önemli oranda arttığı söylenebilmektedir. Ancak tüfal oranı arttıkça deformasyona karşı dayanımı azalmaktadır. 2HMS5 ve 2CMS5 asfalt karışımının MQ değerlerini, referans karışıma göre sırasıyla 2,18; 1,20 kat, 3HMS5 ve 3CMS5 asfalt karışımlarında ise sırasıyla 1,76; 1,21 kat arttırdığı belirlenmiştir. 2HMS10 ve 2CMS10 asfalt karışımının MQ değerlerini, referans karışıma göre sırasıyla 1,84; 1,25 kat, 3HMS10 ve 3CMS10 asfalt karışımlarında ise sırasıyla 1,31; 1,15 kat arttırdığı belirlenmiştir.



Şekil 5.15. Karışımların Marshall oranı değerleri

Marshall stabilite ve akma deney sonuçları değerlendirildiğinde katkı ve tüfal kullanımı ile stabilite ve MQ değerlerinin arttığı, akma değerlerinde ise 3CMS5 karışımı hariç diğer tüm karışımlarda azaldığı belirlenmiştir. Tüfal türü değerlendirildiğinde stabilite ve MQ değerleri üzerinde en etkin tüfalin HMS tüfali olduğu belirlenmiştir.

5.2.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım (Çekme Dayanımı Oranı) Deney Sonuçları

Referans karışım ile SBS modifiyeli bitüm ve tüfal ile hazırlanan karışım numuneleri üzerine AASHTO T 283 [98] standardına uygun olarak çekme dayanımı oranı deneyi uygulanmış ve karışımların nem hasarına karşı dayanımları belirlenmiştir. Her bir karışım türü için $7 \pm 0,5$ boşluk oranına sahip olacak şekilde 6 adet numune hazırlanmıştır. Standarta uygun olarak nem hasarına karşı dayanımlarının tespitinde kullanılacak karışım numuneleri hazırlanırken yoğurmalı preste 40 devirlik yoğurma sayısında sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımların kısa dönem yaşlandırılmasında numuneler 16 saat süresince 60°C sıcaklığa sahip etüvde, ardından sıkıştırma sıcaklığında iki saat bekletilmiştir. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ardından numunelerin hacimsel özellikleri belirlenerek boşluk oranları birbirine yakın olacak şekilde gruplandırılmıştır. Karışım numunelerinden üçer tanesine vakum uygulanarak boşluklarının %70-80 oranında suyla dolması sağlanmıştır. Bu doygunluk oranını sağlamak amacıyla koşullandırmaya maruz bırakılacak numunelerin hepsine 10 dakika süresince vakum uygulanmıştır. Doygunluk derecesi sağlanmayan numunelere yeniden vakum uygulanmıştır. Doygunluk seviyesi %80'in üzerinde olan numuneler deney dışında bırakılmış bu numunelerin yerine yeni numuneler hazırlanmıştır. Vakum uygulanan numuneler streç film ile kaplanmış, içerisinde 10 ml. su bulunan poşetlere konularak poşetlerin ağzı iyice kapatılmıştır.

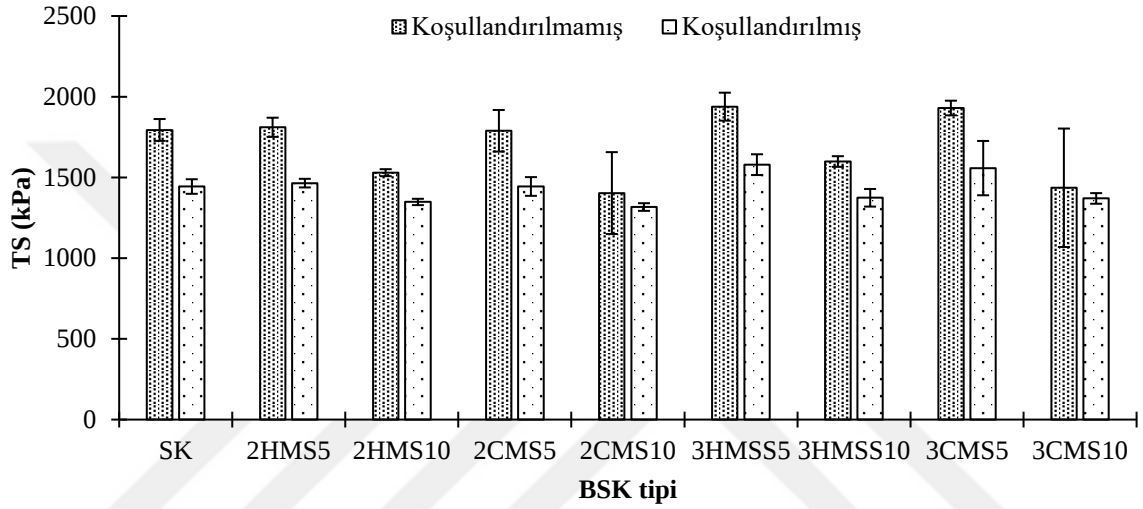
Numuneler -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiş ardından 60°C'deki suda 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler poşetten ve streç filminden çıkarılmış ve 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek kırılmıştır. Koşullandırılmamış numunelerde 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek marshall deney aletinde indirekt çekme dayanımı çenesinde kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 2 inç/dakika'lık (50,8 mm/dk) sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmı Şekil 5.16'da görülmektedir.



Şekil 5.16. Nem hasarı deneyine tabi tutulan numunelerin bir kısmının görünüşü

Koşullandırılmamış ve koşullandırılmış bitümlü sıcak karışım numunelerine uygulanan çekme dayanımı oranı deneylerinden elde edilen maksimum yük değerleri kullanılarak karışım numunelerinin çekme dayanımı (TS) değerleri belirlenmiş olup, Şekil 5.17'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere %3 SBS ve %50 tüfal kullanımı ile hem koşullandırılmamış hem de koşullandırılmış karışımlarda çekme dayanımı (TS) değerleri saf (referans) karışıma göre artmıştır. Koşullandırmadan önce ve koşullandırmadan sonra %100 tüfalla hazırlanan karışımların çekme dayanım oranlarında azalma meydana gelmektedir. Karışımların içerisindeki tüfal oranı arttıkça her iki tüfal de çekme dayanım oranında azalma meydana getirmiştir. Tüfal artışı çekme dayanım oranını azaltırken %3 SBS içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımların çekme oranı artmaktadır. Karışımların içerisindeki SBS katkı oranı arttıkça çekme dayanım oranı da artmaktadır. Buna göre en yüksek çekme dayanım oranını 3HMS5 karışımı vermektedir.

Koşullandırılmamış karışımlarda en düşük çekme dayanım oranını ise 3CMS10 karışımı vermektedir. Koşullandırma öncesinde 2HMS5, 3HMS5 ve 3CMS5 karışımlarının TS değerleri SK karışımlarının TS değerlerine göre sırasıyla 1,01; 1,08 ve 1,07 kat arttığı belirlenmiştir. Koşullandırmadan sonra 2HMS5, 3HMS5 ve 3CMS5 karışımlarının TS değerleri SK karışımlarının TS değerlerine göre sırasıyla 1,01; 1,09 ve 1,08 kat arttığı belirlenmiştir. Koşullandırılmamış ve koşullandırılmış bitümlü sıcak karışım numunelerinin çekme dayanım (TS) değerleri kullanılarak karışım numunelerinin çekme dayanım oranları (TSR) Şekil 5.18’de gösterilmektedir.

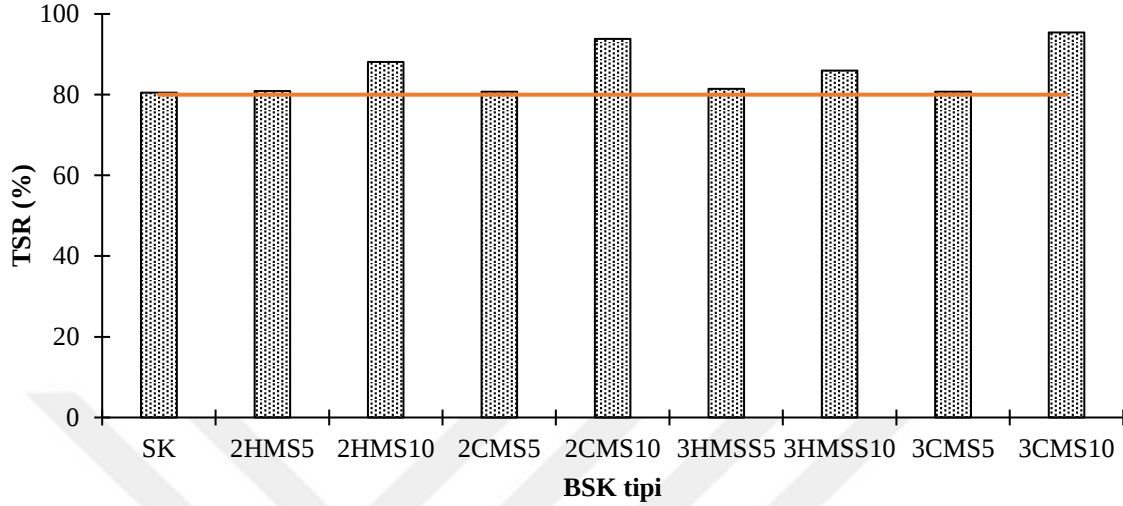


Şekil 5.17. Koşullandırma öncesi ve sonrası karışımların çekme dayanımı değerleri

Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan çekme dayanımı oranları incelendiğinde (Şekil 5.18) SBS katkısının kullanımı ile karışımların nem hasarına karşı dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisindeki SBS miktarının artması genel olarak nem hasarına karşı dayanımı azaltmıştır. Karışımlar içerisindeki her iki tüfal oranının artması ise nem hasarı dayanımını artırmıştır. Superpave yöntemine göre bitümlü sıcak karışımların dizaynında nem hasarına karşı dayanım bakımından çekme dayanımı oranı (TSR) değerlerinin %80’in üzerinde olması gerektiği önerilmektedir [113]. Elde edilen değerler incelendiğinde hazırlanan bütün karışımların TSR değerlerinin %80’e yakın veya üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bütün karışımların nem hasarına karşı dayanım bakımından yeterli performansı gösterdiği, en yüksek performansı ise 3CMS10 karışımının gösterdiği tespit edilmiştir.

Nem hasarına karşı dayanım deney sonuçları değerlendirildiğinde; koşullandırmış veya koşullandırılmamış HMS ve CMS kullanılarak oluşturulan karışımların çekme dayanımı (TS) değerleri üzerinde tüfal %50 ilavesinin %100 ilavesinden daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını değerlendirmede kullanılan çekme dayanımı

oranı (TSR) değerleri üzerinde ise tam tersi olarak tüfal %100 ilave %50 ilavesinden daha etkili olmuştur.



Şekil 5.18. Karışımların çekme dayanımı oranlarının değişimi

5.2.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

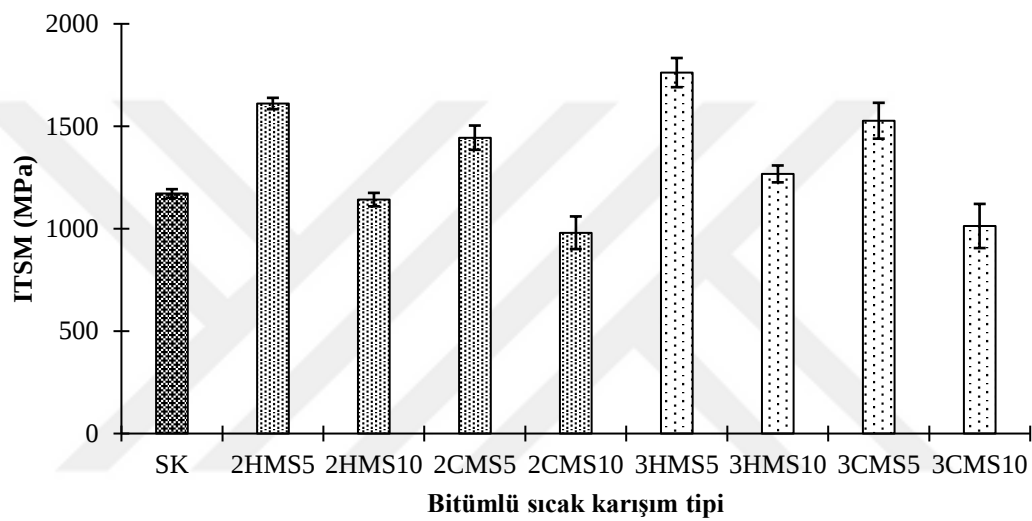
İndirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi, BS DD 213 standardında belirtilmiş olup deneysel çalışma bu standarda uygun olarak yapılmıştır [114]. Bu deney kapsamında, saf bitüm kullanılarak oluşturulan bitümlü sıcak karışım numuneleri ile iki farklı tüfal ve modifiyeli bitüm kullanılarak oluşturulan bitümlü sıcak karışım numunelerinin rijitlikleri belirlenmiştir.

Deney kapsamında her karışım türü için üç adet karışım numunesi kullanılmıştır ve bu deney sonucunda karışım numuneleri zarar görmediği için bu numuneler daha sonra yorulma deneyinde kullanılmıştır. Karışım numuneleri üzerinde uygulanan ITSM deneyi, 25°C deney sıcaklığında ve UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Karışım numunelerinin ITSM değerleri belirlenirken; aynı karışım numunesi en az iki kez deneye tabi tutulmuştur ve aynı karışım numunesi üzerinden elde edilen iki ITSM değerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. İlk yapılan deneydeki karışım numunesi 90° döndürülerek ikinci deney yapılmıştır. Aynı numune üzerinden elde edilen İki ITSM değeri arasında %10'dan fazla sapma olması durumunda, numune tekrar 90° daha döndürülerek deney tekrarlanmıştır ve aynı karışım numunesi üzerinden elde edilen üç ITSM değeri arasında %10'dan az sapma olan iki değer ortalaması alınarak karışım numunelerinin ITSM değerleri belirlenmiştir.

ITSM değerlerinin karışım tipine göre değişimi Şekil 5.19'da verilmiştir. HMS içeren asfalt karışımların ITSM değerleri, CMS içeren asfalt karışımların ITSM değerlerinden daha yüksektir. Ayrıca karışımlar içerisindeki SBS oranı arttıkça asfalt karışımların ITSM değerlerinde de artış

meydana gelmiştir. En yüksek ITSM değerini 3HMS5 karışımı verirken, en düşük ITSM değerini ise 2CMS10 karışımı vermektedir. 2HMS5, 3HMS5, 2CMS5 ve 3CMS5 asfalt karışımlarının ITSM değerlerini, referans karışımlarına göre sırasıyla 1,37; 1,50; 1,23 ve 1,30 kat arttırdığı belirlenmiştir. 2HMS10, 2CMS10 ve 3CMS10 asfalt karışımlarının ise ITSM değerlerini, referans karışımlarına göre sırasıyla %2,56; 16,37 ve %13,54 oranında azalttığı belirlenmiştir. Atık metal içeriği arttıkça ITSM değerlerinin azaldığı görülmüştür. %50 atık metal ilaveli karışımlar bitümlü sıcak karışımların (BSK) sertliğinde artış meydana getirmektedir. %100 atık metal kullanılması ise BSK'ların sertliğini azaltmasına rağmen yakın değerler vermektedir.



Şekil 5.19. Karışım numunelerinin ITSM değerleri

5.2.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

İndirekt çekme yorulma deneyi 9 farklı karışım türü üzerinde uygulanmıştır. Her karışım türü için üç adet karışım numunesi kullanılmıştır ve gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmada bütün numunelere 300 kPa'lık gerilme seviyesi uygulanmıştır.

Deneye başlamadan önce numuneler, deney sıcaklığı olan 25°C sıcaklıkta üç saat bekletilmiştir ve ardından deney numunesi, deney cihazı içerisindeki yerine yerleştirilerek deney sırasında numune üzerinde oluşan düşey deformasyonları belirleyecek olan LVTD'ler ayarlanmıştır. İndirekt çekme yorulma deneyi kapsamında kullanılan numunelerin, deney sonunda görünüşleri şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.20. ITFT deneyi sonunda numunelerin görünüşü

Gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilen indirekt çekme yorulma deneyinde; karışım numuneleri üzerinde tekrarlı yük uygulanarak numunelerin kırılması sağlanmıştır ve bu sayede numunelerin maksimum yük tekrür sayıları (N_{mak}) ve maksimum yük tekrür sayısındaki deformasyon miktarları (δ_{mak}) tespit edilmiştir. İndirekt çekme yorulma deneyi (ITFT) sonucunda elde edilen numunelerin N_i , N_f , N_p , N_{mak} , δ_i , δ_f , δ_{mak} ve r_p değerleri; %2 SBS ve %3 SBS kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri için ise Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te verilmiştir. Numunelerin deformasyon ile yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 5.21'de verilmiştir.

Tablo 5.3. %2 SBS içeren asfalt karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları

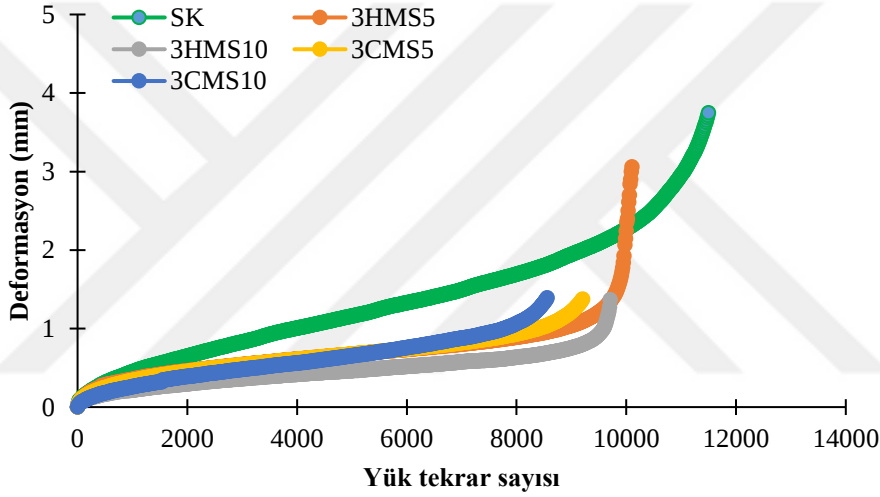
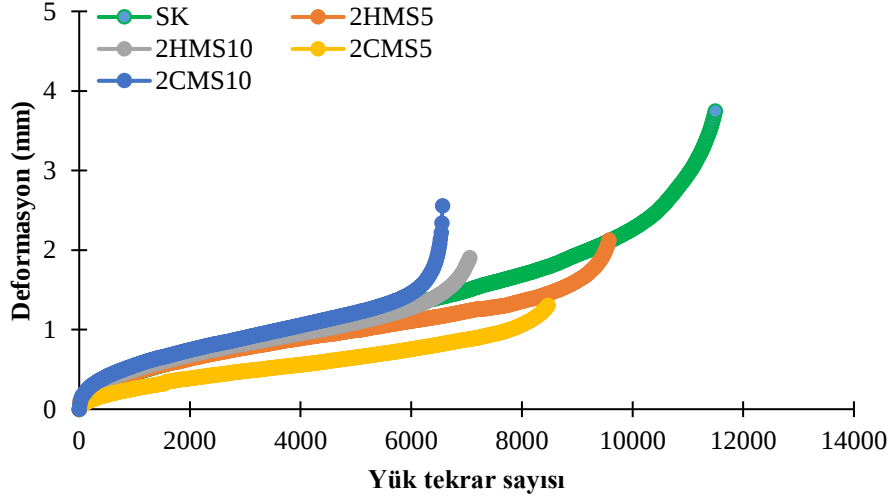
Gerilme Seviyesi	Katkı Türü	Num. No	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N _i	δ _i	N _f	δ _f	N _p	N _{mak}	δ _{mak}	r _f
%2 SBS	SK	37	$y = 1E-04x + 0,1839$	$y = 0,0015x - 11,707$	7692	1,065	8494	1,399	802	8784	1,923	2400
		18	$y = 8E-05x + 0,0735$	$y = 0,001x - 13,614$	13800	2,581	14878	2,663	1078	16800	2,838	13143
		57	$y = 0,0002x + 0,9076$	$y = 0,001x - 6,5571$	8616	2,212	9331	2,393	715	9792	2,51	3950
		Ort.			10036	1,953	10901	2,152	865	11792	2,424	6497
	HMS10	50	$y = 0,0002x + 0,3361$	$y = 0,0021x - 8,9444$	4044	0,991	4884	1,19	840	5176	1,539	4223
		57	$y = 4E-05x + 0,1565$	$y = 0,0016x - 10,205$	6088	0,406	6642	0,68	554	6792	1,126	2022
		55	$y = 7E-05x + 0,3352$	$y = 0,0004x - 2,5685$	8208	0,963	8799	1,12	591	9204	1,374	3765
		Ort.			6113	0,787	6775	0,997	662	7057	1,346	3337
	HMS5	19	$y = 0,0002x + 0,1608$	$y = 0,0008x - 5,5078$	8632	2,399	9448	3,057	816	10066	2,355	1240
		59	$y = 0,0008x + 0,3607$	$y = 0,0019x - 9,9252$	8218	1,704	9351	2,331	1133	9805	2,8	1807
		36	$y = 0,0002x + 0,1985$	$y = 0,0005x - 2,3358$	7888	1,599	8448	1,697	560	9054	2,021	5711
		Ort.			8246	1,901	9082	2,362	836	9642	2,392	2919
	CMS10	1	$y = 8E-05x + 0,2621$	$y = 0,004x - 29,66$	7344	0,978	7633	1,119	289	7812	1,508	2051
		2	$y = 0,0001x + 0,4085$	$y = 0,0035x - 22,747$	6060	1,294	6810	1,615	750	7212	2,661	2338
		3	$y = 0,0002x + 0,5483$	$y = 0,0021x - 9,2588$	4842	1,802	5162	1,989	320	5550	2,719	1709
		Ort.			6082	1,358	6535	1,574	453	6858	2,296	2033
	CMS5	45	$y = 5E-05x + 0,1992$	$y = 0,0016x - 14,718$	9168	0,788	9624	1,067	456	9708	1,369	1634
		44	$y = 0,0001x + 0,473$	$y = 0,0048x - 41,399$	7844	1,403	8909	2,012	1065	9156	2,77	1749
		34	$y = 0,0002x + 0,4388$	$y = 0,0057x - 35,073$	5700	1,359	6457	1,89	757	6564	2,557	1425
		Ort.			7571	1,183	8330	1,656	759	8476	2,232	1603

Tablo 5.4. %3 SBS içeren asfalt karışımların indirekt çekme yorulma deney sonuçları

Gerilme Seviyesi	Katkı Türü	Num. No	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N _i	δ _i	N _f	δ _f	N _p	N _{mak}	δ _{mak}	r _f
%3 SBS	SK	37	$y = 1E-04x + 0,1839$	$y = 0,0015x - 11,707$	7692	1,065	8494	1,399	802	8784	1,923	2400
		18	$y = 8E-05x + 0,0735$	$y = 0,001x - 13,614$	13800	2,581	14878	2,663	1078	16800	2,838	13143
		57	$y = 0,0002x + 0,9076$	$y = 0,001x - 6,5571$	8616	1,212	9331	1,393	715	9792	1,51	3950
		Ort.			10036	1,619	10901	1,818	865	11792	2,090	6497
	HMS5	75	$y = 6E-06x + 0,637$	$y = 0,0019x - 15,447$	8256	1,021	8492	1,07	236	9216	1,995	4818
		66	$y = 5E-05x + 0,2525$	$y = 0,0012x - 15,699$	12024	1,204	13871	1,552	1847	14424	1,747	5307
		76	$y = 0,0002x + 0,1608$	$y = 0,0017x - 5,5078$	4632	0,93	5249	1,057	617	6666	1,355	4856
		Ort.			8304	1,052	9204	1,226	900	10102	1,699	4994
	HMS10	70	$y = 0,0001x + 0,1295$	$y = 0,0015x - 12,954$	8504	1,977	9345	2,495	841	10342	2,776	1624
		80	$y = 0,0003x + 0,3349$	$y = 0,0011x - 7,0373$	8379	1,839	9215	2,262	836	9867	2,526	1977
		54	$y = 0,0008x - 0,0267$	$y = 0,0023x - 12,951$	8096	1,734	8652	2,091	556	9062	2,248	1557
		Ort.			8326	1,850	9071	2,283	744	9757	2,517	1719
	CMS10	73	$y = 0,0001x + 0,4388$	$y = 0,0022x - 15,27$	6804	1,124	7480	1,689	676	7944	2,097	1197
		51	$y = 0,0002x + 0,4894$	$y = 0,0025x - 12,444$	4656	1,058	5623	1,42	967	5940	1,92	2672
		78	$y = 7E-05x + 0,4788$	$y = 0,0001x - 0,2437$	9824	1,347	10321	1,891	497	10920	2,284	914
		Ort.			7095	1,176	7808	1,667	714	8268	2,100	1594
	CMS5	67	$y = 6E-05x + 0,3522$	$y = 0,0019x - 16,654$	8916	2,906	9243	3,336	327	9984	3,544	759
		22	$y = 8E-05x + 0,4907$	$y = 0,00017x - 0,3313$	8568	2,235	9133	2,634	565	9996	2,918	1417
		69	$y = 5E-05x + 0,1788$	$y = 0,0015x - 11,072$	7072	2,351	7759	2,551	687	7980	2,883	3436
		Ort.			8185	2,497	8712	2,840	526	9320	3,115	1871

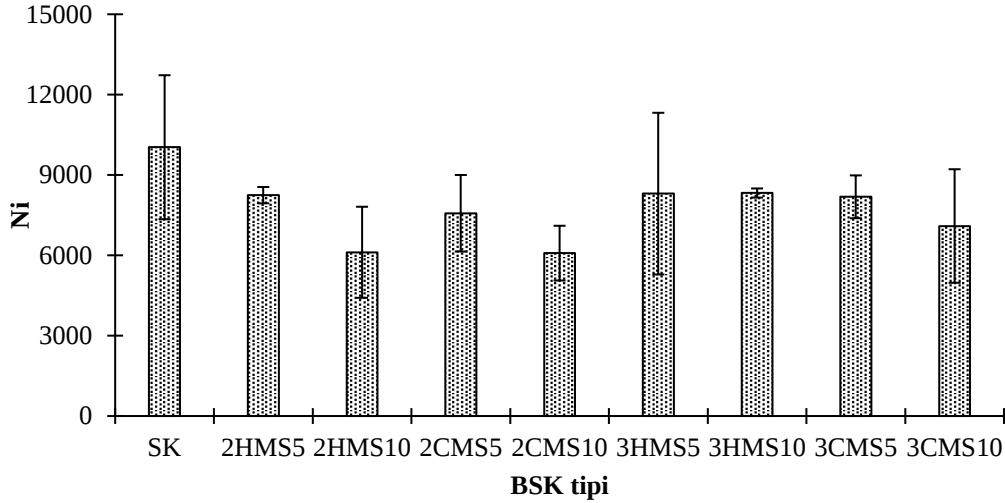
300 kPa'lık bir gerilim seviyesinde yük döngüsüne karşı biriken deformasyon Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Şekil 5.21'de görüldüğü üzere numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük gerekli yük tekrar sayısı 2CMS10 karışımından elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlarda, en yüksek yük tekrarı sayısına SK ve 3HMS5 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bitümlü sıcak karışımların içerdiği SBS oranı arttıkça yük tekrar sayısı artmaktadır. Deformasyonlar incelendiğinde her gerilme seviyesinde farklı sonuçlar olduğu, gerilme seviyesine bağlı olarak düzenli bir değişimin olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca karışımların içerdiği tüfal miktarının %50'den %100 çıkması durumunda yük tekrar sayılarında azalma meydana getirmektedir. 300 kPa gerilme seviyesinde 2HMS5, 2CMS5, 2HMS10 ve 2CMS10 asfalt karışımların maksimum yük tekrar sayıları saf karışıma göre sırasıyla %16,7; %26,3; %38,6 ve %42,9 oranında azalmıştır. 3HMS5, 3CMS5, 3HMS10 ve 3CMS10 asfalt karışımların maksimum yük tekrar sayıları saf karışıma göre %12,1; %19,9; %15,6 ve %25,5 oranında azalmıştır. Atık metal ilavesi saf karışıma göre yük tekrar sayılarını azaltmaktadır. Fakat bu etkiyi SBS katkısı azaltmaktadır. Atık metallerin kullanım oranına göre yük tekrar sayıları değişmektedir. HMS5 ve CMS5 karışımları saf karışıma göre yaklaşık olarak aynı yük tekrar sayılarını vermiştir.

300 kPa gerilme seviyesinde üç numuneden elde edilen çatlağın olduğu yük tekrar sayılarının (Ni) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 5.22'de, yorulma ömrü (Nf) değerlerinin ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 5.23'te, çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı (Np) değerlerinin ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 5.24'te, maksimum yük tekrar sayılarının (Nmak) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.21. Karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

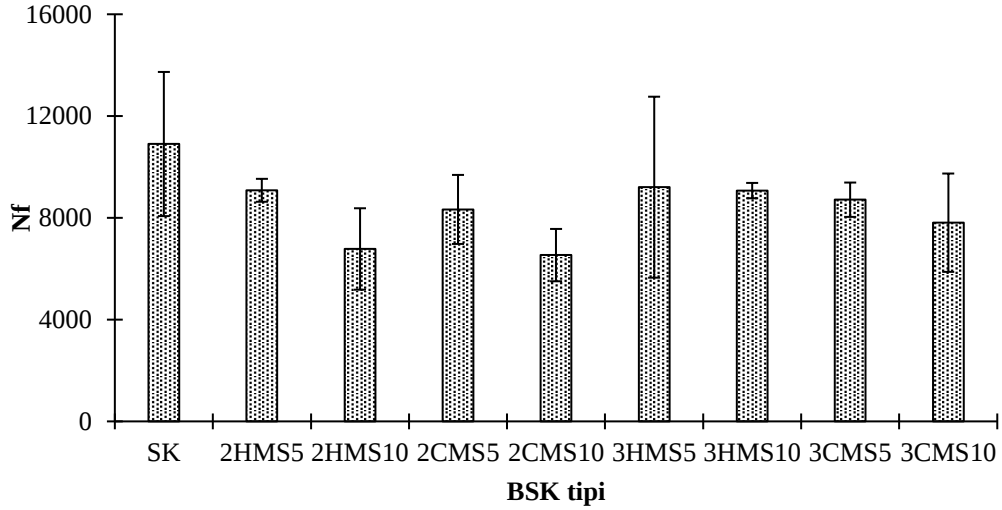
Şekil 5.22 incelendiğinde 300 kPa gerilme seviyesinde SBS iki farklı tüfalin katkı malzemesi olarak kullanımı ile çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarının (Ni) azaldığı belirlenmiştir. Bitümlü sıcak karışımlar içerisindeki SBS oranı arttıkça çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarında da artış meydana gelmiştir. Ancak karışımların içerisindeki tüfal artışıyla çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarında ise azalma belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde 2HMS5, 2CMS5, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımlarının Ni değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %17,84; %24,56; %39,09 ve %39,40 oranlarında azalmıştır. 3HMS5, 3CMS5, 3HMS10 ve 3CMS10 karışımlarının ise Ni değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %17,26; %18,44; %17,04 ve %29,31 oranlarında azalmıştır. 3HMS5 karışımı 2HMS5 karışımından 1,01 kat daha fazla yük tekrarına maruz kalmıştır. 3CMS5 karışımı 2CMS5 karışımından ise 1,08 kat daha fazla yük tekrarına maruz kalmıştır. Bu sonuçlar bize SBS katkısının faydalarını göstermektedir.



Şekil 5.22. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı (N_i) – karışım türü ilişkisi

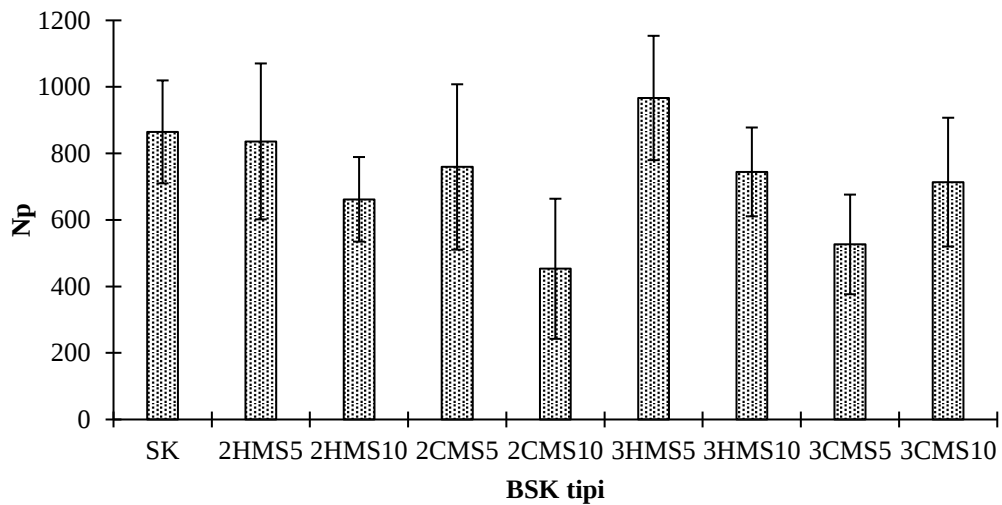
Yük tekrar sayısı deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilen yorulma ömrü değerlerine göre çizilen grafiklerden, çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarında olduğu gibi katkı kullanımı ile yorulma ömrü (N_f) değerlerinin arttığı, gerilme seviyesi arttıkça ise N_f değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Şekil 5.23'te görüldüğü üzere karışımlar içerisindeki tüfal oranı arttıkça yorulma ömrü (N_f) değerlerinin azaldığı görülmektedir. 300 kPa gerilme seviyesinde, en yüksek ve en düşük N_f değerlerinin sırasıyla saf karışım (SK) ve 2CMS10 karışımından elde edildiği gözlenmiştir. Atık metal içeriği arttıkça yorulma ömür değerlerinde azalma görülmektedir. Asfalt karışımlar içerisindeki SBS oranı %2'den %3'e çıktığında karışımların yorulma ömürlerinde artma meydana gelmektedir. 300 kPa gerilme seviyesinde 2HMS5, 2CMS5, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımlarının N_f değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %16,67; %23,58; %37,85 ve %40,05 oranlarında azalmıştır. 3HMS5, 3CMS5, 3HMS10 ve 3CMS10 karışımlarının ise N_f değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %15,57; %20,08; %16,79 ve %28,37 oranlarında azalmıştır.

Elde edilen sonuçlardan atık metal içeren 3HMS5 ve 3CMS5 karışımlarının mekanik özelliklerinin saf karışıma yakın olduğu, atık metal kullanım oranı arttıkça yorulma ömürlerinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Atık metallerin adezyon özellikleri agregalara göre daha düşük olduğundan atık metal oranı arttıkça asfalt karışımların yorulma ömürlerinde azalma meydana gelmektedir.



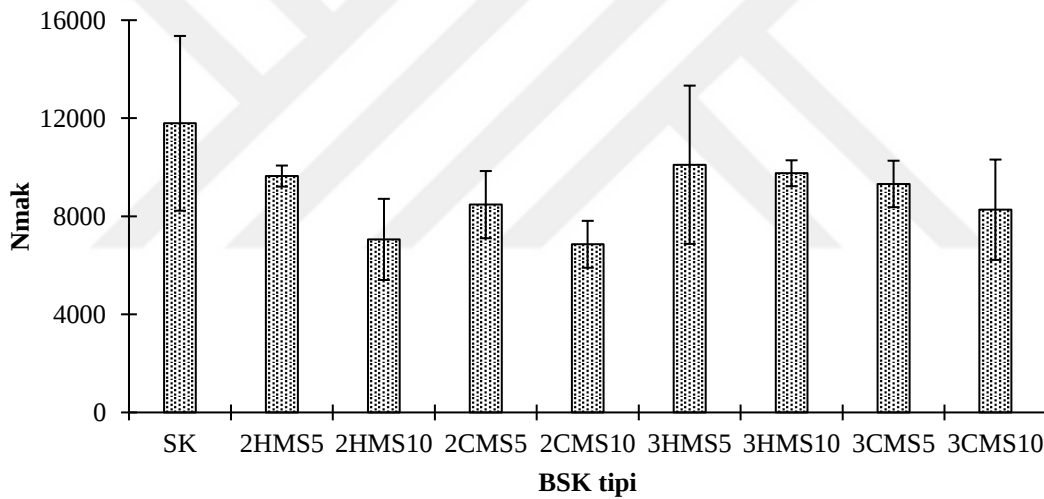
Şekil 5.23. Yorulma ömrü (N_f) – karışım türü ilişkisi

Şekil 5.24'te görülen çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) değerleri N_f ile N_i değerlerinin farkından elde edilmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde en yüksek N_p değerine 3HMS5 karışımının, en düşük değerlere ise 2CMS10 karışımının sahip olduğu belirlenmiştir. 2HMS5, 2CMS5, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımlarının N_p değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %3,31; %12,20; %23,46 ve %47,60 oranlarında azalmıştır. 3CMS5, 3HMS10 ve 3CMS10 karışımlarının ise N_p değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %39,13; %13,90 ve %17,47 oranlarında azalmıştır. 3HMS5 karışımında ise N_p değeri saf karışıma (SK) göre 1,12 kat artırmıştır. Asfalt karışımlar içerisindeki tüfal arttığı zaman N_p değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca asfalt karışımlar içerisindeki SBS oranı arttıkça N_p değerlerinde de artış meydana gelmiştir. Bu nedenle SBS oranı yüksek olan karışımların çatlak ilerlemesi sırasında daha fazla yük tekrarı aldığı belirlenmiştir.



Şekil 5.24. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) – karışım türü ilişkisi

Şekil 5.25'te görüldüğü üzere tüfal ve SBS kullanımının asfalt karışımlarının maksimum yük tekrar sayıları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüfal içeren tüm karışımların maksimum yük tekrar sayısı saf karışımın maksimum yük tekrar sayısından düşüktür. Asfalt karışımların içerisindeki tüfal oranı %50'den %100'e çıktığı zaman karışımların maksimum yük tekrar sayılarında azalma meydana gelmektedir. İlâveten asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı %2'den %3'e çıktığı zaman asfalt karışımların maksimum yük tekrar sayıları artarak saf karışımın maksimum yük tekrar sayısına yakın olmuştur. 2HMS5, 2CMS5, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımlarının N_{mak} değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %18,24; %28,12; %40,15 ve %41,84 oranlarında azalmıştır. 3HMS5, 3CMS5, 3HMS10 ve 3CMS10 karışımlarının ise N_{mak} değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %14,33; %20,96; %17,25 ve %29,88 oranlarında azalmıştır. 3HMS5 karışımı 2HMS5 karışımından 1,05 kat daha fazla maksimum yük tekrarına maruz kalmıştır. 3CMS5 karışımı 2CMS5 karışımından ise 1,1 kat daha fazla maksimum yük tekrarına maruz kalmıştır. Asfalt karışımın içerisindeki SBS katkısı maksimum yük tekrar sayısı açısından CMS karışımlarında daha fazla etkili olmuştur.

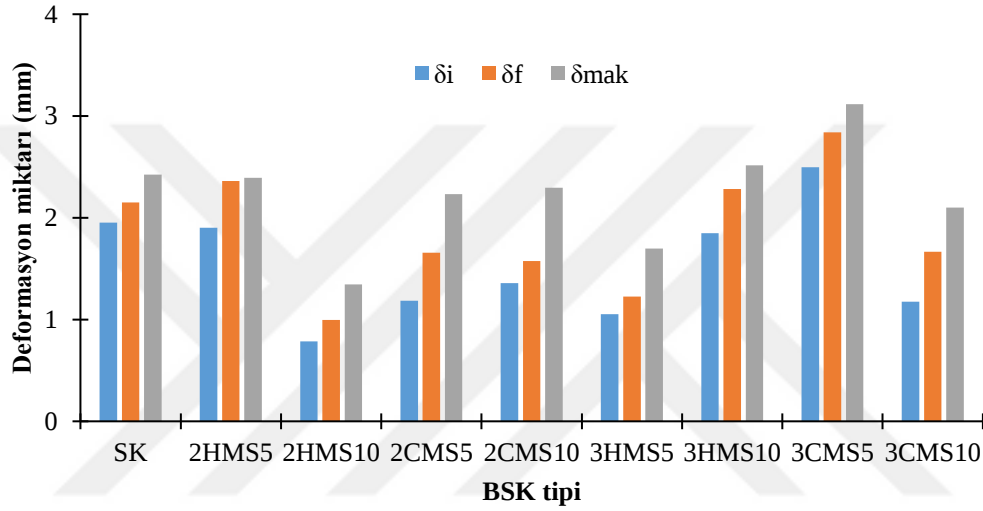


Şekil 5.25. Maksimum yük tekrar sayısı – karışım türü ilişkisi

Bitümlü sıcak karışım numunelerinin; çatlak oluşmaya başladığı noktadaki toplam deformasyon değerleri (δ_i) ortalaması, yorulma ömrü (N_f) değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) ortalaması ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarları (δ_{mak}) ortalamasının değişimi Şekil 5.26'da verilmiştir.

Şekil 5.26'da görüldüğü üzere; hem tüfal hem de SBS içeren karışımların deformasyon değerleri saf karışımlara göre hem artmış hem de azalmıştır. 3HMS5 karışımında, N_i değerindeki deformasyon miktarları (δ_i) saf karışıma göre %44,96 azalırken, N_f değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) %43,01; N_{mak} değerindeki deformasyon miktarları (δ_{mak}) %29,90 oranında azalmıştır. %50 CMS tüfal ve %3 SBS kullanılması durumunda, N_i değerindeki deformasyon miktarları (δ_i) saf karışıma göre 1,28 kat artarken, N_f değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) 1,32 kat; N_{mak} değerindeki deformasyon

miktarları (δ_{mak}) 1,29 kat artmıştır. %100 HMS tüfal ve %3 SBS kullanılması durumunda, N_i değerindeki deformasyon miktarları (δ_i) saf karışıma göre %5,25 azalırken, N_f değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) 1,06 kat; N_{mak} değerindeki deformasyon miktarları (δ_{mak}) 1,04 kat artmıştır. %100 CMS tüfal ve %3 SBS kullanılması durumunda, N_i değerindeki deformasyon miktarları (δ_i) saf karışıma göre %39,76, N_f değerindeki deformasyon miktarları (δ_f) %22,54; N_{mak} değerindeki deformasyon miktarları (δ_{mak}) %13,34 azalmıştır. Deformasyonun en az olduğu karışım 2HMS10 karışımı olduğundan dolayı bu karışımın en gevrek davranışı sergileyeceği belirlenmiştir. Tüm karışımların deformasyon değerleri karşılaştırıldığında düzenli bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir.

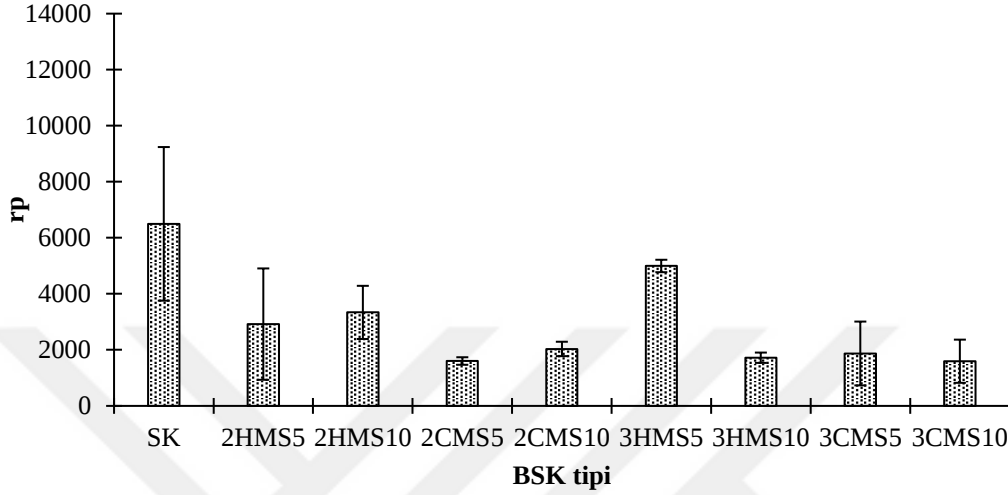


Şekil 5.26. Deformasyon değerlerinin karışım türüne göre değişimi

Karışım numunesinde çatlak oluştuğundan (N_i) sonra, numunenin yorulma ömrüne (N_f) kadar numunede meydana gelen her 1 mm deformasyon için gereken yük tekrar sayısını ifade etmede kullanılan çatlak yayılma oranı değerlerinin (r_p), hem HMS hem de CMS kullanımı ile değişimi Şekil 5.27’de verilmiştir.

Şekil 5.27’de görülen $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı (r_p) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde bütün gerilme seviyelerinde katkı kullanımı ile r_p değerlerinin arttığı, uygulanan gerilmenin artması ile ise bu değer azaldığı belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere %2 SBS içeren asfalt karışımlarda tüfal oranı arttıkça r_p değerlerinde artma meydana gelirken, %3 SBS içeren asfalt karışımlarda ise tüfal içeriği arttıkça azalma meydana gelmiştir. En düşük r_p değerini 2CMS5 karışımı verirken, en yüksek r_p değerini ise saf karışım vermektedir. 2HMS5, 2CMS5, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımlarının r_p değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %55,07; %75,33; %48,64 ve %68,72 oranlarında azalmıştır. 3HMS5, 3CMS5, 3HMS10 ve 3CMS10 karışımlarının ise r_p değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla %23,14; %71,21; %73,54 ve %75,46 oranlarında azalmıştır.

İndirekt çekme yorulma deneyi (ITFT) genel olarak değerlendirildiğinde; tüfal kullanımı ile karışımların yorulma performanslarının azalacağı fakat SBS kullanımı ile karışımların yorulma performansının artacağı belirlenmiştir. Kullanılan tüfalin, karışımların yorulma performansını saf asfalt karışımların yorulma performansına göre çok fazla azaltmadığı belirlenmiştir.



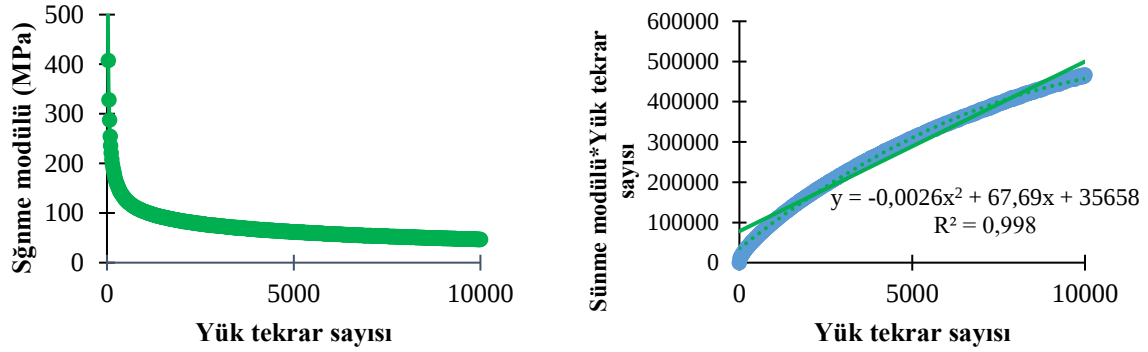
Şekil 5.27. $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı – karışım türüne ilişkisi

5.2.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

Tez çalışmasında dinamik sünme deneyi için toplam 9 farklı karışım numunesi hazırlanmıştır. Her karışım türü için üçer adet karışım numunesi hazırlanmıştır ve deneyde kullanılan UTM cihazının iklimlendirme kabini deney sıcaklığı olan 50°C sıcaklık değerine ayarlanarak, her bir karışım numunesi en az 3 saat deney sıcaklığında iklimlendirme kabini içerisinde bekletilmiştir. Ardından 500 ms dinlenme süresi ve 1000 ms yük etki süresi olmak üzere toplam 1,5 sn yükleme periyodu seçilerek numuneler üzerinde 500 kPa gerilme altında tekrarlı yükleme yapılmıştır. Her karışım numunesi için deneysel çalışma, numunelerdeki kalıcı birim şekil değiştirme (ϵ_c) 10000 yük tekrar sayısına ulaşana kadar devam etmiştir.

Akma sayısı değerleri ise Bausano ve Williams tarafından önerilen şekilde hesaplanmıştır [115]. 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. Burada düşey eksen “sünme modülünü * yük tekrar sayısını” yatay eksen ise yük tekrar sayısını temsil eden grafikler oluşturulmuştur. Grafiğe 2. derece polinom fonksiyonu uygulanarak eğri oluşturulmuş ve modellere uygun denklemler belirlenmiştir. Denklemin türevi alınıp sıfıra eşitlenerek akma sayısı olarak bilinen

pik noktaya karşılık gelen yük tekrar sayıları bulunmuştur. Saf karışımın akma sayısı belirlenmesi aşağıda Şekil 5.28'de gösterilmektedir.



Şekil 5.28. Saf karışımın akma sayısının bulunmasına bir örnek

Karışımlar içerisinde en düşük dayanımı saf karışım göstermiş olup yaklaşık 10.000 yük tekrarında %5 kalıcı birim şekil değiştirme değerine ulaşılmıştır. Bu nedenle bütün karışımları kıyaslayabilmek amacıyla 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme, esneklik ve sünme modülü değerleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da verilmiştir. Sünme deneyi kapsamında hazırlanan 9 farklı karışım türü için elde edilen sonuçlar Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da verilmiştir.

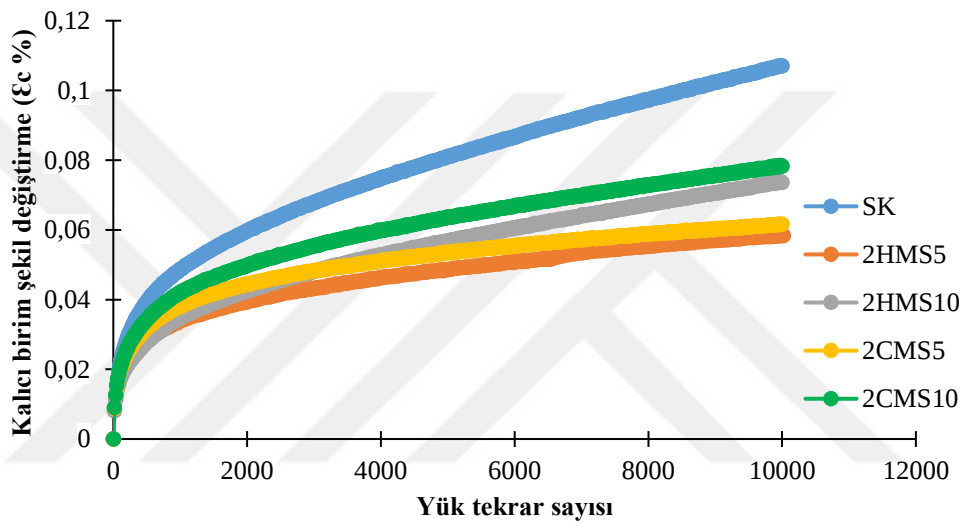
Tablo 5.5. %2 SBS içeren numunelerin dinamik sünme deney sonuçları

Gerilme Seviyesi	Katkı Türü	Num. No	Akma Sayısı Denklemi	Akma Sayısı	10.000 yük tekrarındaki ϵ , %	10.000 yük tekrarındaki Esneklik Modülü	10.000 yük tekrarındaki Sünme Modülü
%2 SBS	SK	1	$y = -0,0026x^2 + 67,69x + 35658$	13017	0,107	655	46,7
		2	$y = -0,0025x^2 + 84,652x + 34971$	16930	0,078	729	64,4
		3	$y = -0,0030x^2 + 87,45x + 23853$	14012	0,095	710	55,2
		Ort.		14653	0,093	698	55
	HMS5	1	$y = -0,002x^2 + 105,63x + 43970$	26408	0,055	716	90,8
		2	$y = -0,0025x^2 + 107,45x + 37853$	21490	0,057	747	87,5
		3	$y = -0,002x^2 + 97,075x + 33790$	24269	0,062	750	80,9
		Ort.		24055	0,058	738	86,4
	HMS10	1	$y = -0,004x^2 + 93,434x + 50861$	11679	0,083	666	59,9
		2	$y = -0,004x^2 + 93,434x + 50861$	13928	0,074	625	61,5
		3	$y = -0,0023x^2 + 57,442x + 20228$	12458	0,071	620	62,4
		Ort.		12688	0,076	637	61,2
	CMS5	1	$y = -0,0023x^2 + 93,517x + 38615$	20330	0,066	718	74,8
		2	$y = -0,0026x^2 + 104,98x + 40201$	20188	0,059	737	84,7
		3	$y = -0,0085x^2 + 131,4x + 29176$	7729	0,050	689	90,3
		Ort.		16083	0,059	715	83,3
	CMS10	1	$y = -0,0032x^2 + 83,347x + 94023$	13023	0,078	671	57,6
		2	$y = -0,00037x^2 + 89,519x + 253250$	12097	0,075	618	62,0
		3	$y = -0,0026x^2 + 64,071x + 14620$	12341	0,079	611	58,1
		Ort.		12487	0,077	633	59,2

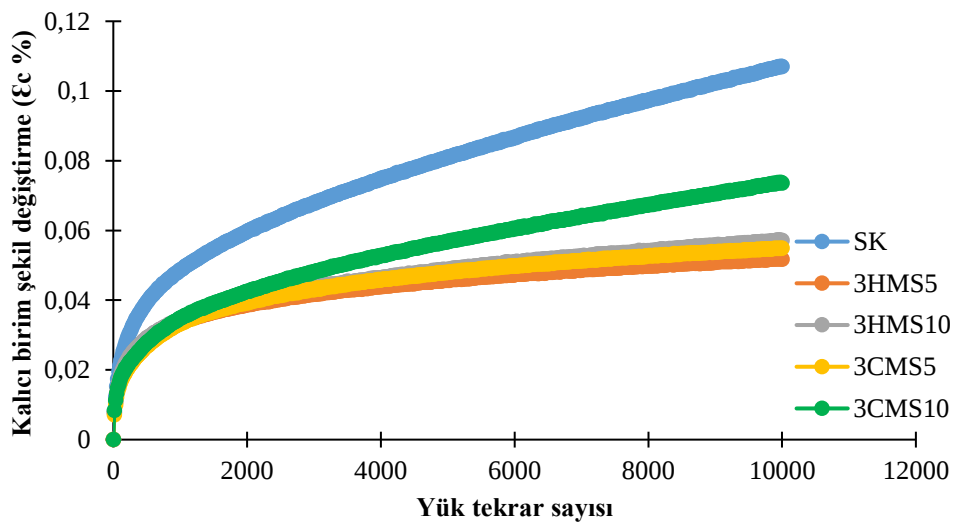
Tablo 5.6. %3 SBS içeren numunelerin dinamik sünme deney sonuçları

Gerilme Seviyesi	Katkı Türü	Num. No	Akma Sayısı Denklemleri	Akma Sayısı	10.000 yük tekrarındaki ϵ , %	10.000 yük tekrarındaki Esneklik Modülü	10.000 yük tekrarındaki Sünme Modülü
%3 SBS	SK	1	$y = -0,0026x^2 + 67,69x + 35658$	13017	0,107	655	46,7
		2	$y = -0,0025x^2 + 84,652x + 34971$	16930	0,078	729	64,4
		3	$y = -0,0030x^2 + 87,45x + 23853$	14012	0,095	710	55,2
		Ort.		14653	0,093	698	55,4
	HMS5	1	$y = -0,0014x^2 + 87,526x + 23455$	31259	0,059	799	76
		2	$y = -0,0021x^2 + 118,08x + 43151$	28114	0,044	764	102
		3	$y = -0,0021x^2 + 112,68x + 35763$	26829	0,052	724	97
		Ort.		28734	0,052	762	91,8
	HMS10	1	$y = -0,0025x^2 + 88,169x + 37479$	17634	0,074	676	112
		2	$y = -0,0022x^2 + 129,3x + 35177$	29386	0,045	759	68
		3	$y = -0,0019x^2 + 105,05x + 32449$	27645	0,056	722	90
		Ort.		24888	0,058	719	89,9
	CMS5	1	$y = -0,0023x^2 + 97,507x + 44830$	21197	0,062	731	80
		2	$y = -0,0033x^2 + 121,76x + 42352$	18448	0,048	745	105
		3	$y = -0,0025x^2 + 106,29x + 41493$	21258	0,057	698	87
		Ort.		20301	0,056	725	90,7
	CMS10	1	$y = -0,0027x^2 + 95,119x + 42644$	17615	0,068	708	74
		2	$y = -0,0028x^2 + 101,3x + 41168$	18089	0,064	661	78
		3	$y = -0,0029x^2 + 86,937x + 43496$	14989	0,079	734	63
		Ort.		16898	0,070	701	71,5

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’da görüldüğü üzere SBS kullanımı ile kalıcı birim şekil değiştirme miktarları azalmıştır. Asfalt karışım numuneleri içerisindeki tüfal miktarı arttıkça kalıcı birim şekil değiştirme oranı da artmaktadır. CMS tüfali HMS tüfaline göre asfalt karışımların kalıcı birim şekil değiştirme oranını artırmıştır. Ayrıca şekillerde görüldüğü üzere hiçbir karışımda 3. bölgeye geçilmemiştir. Karışımların dinamik sünme deney sonuçlarını daha rahat değerlendirebilmek amacıyla karışımların akma sayısı değerleri Şekil 5.31’de, 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri Şekil 5.32’de, esneklik modülü değerleri Şekil 5.33’te ve sünme modülü değerleri Şekil 5.34’de görülmektedir.



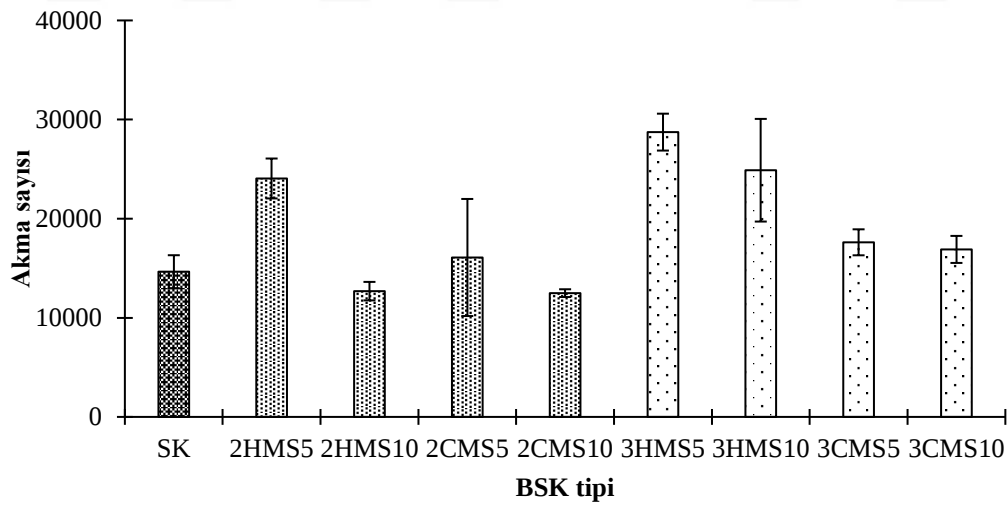
Şekil 5.29. %2 SBS içeren karışımların kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 5.30. %3 SBS içeren karışımların kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi

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 5.31 incelendiğinde hem sıcak tüfal hem de soğuk tüfal içeren karışımlarda tüfal içeriği arttıkça akma sayısı değerleri dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımları azalmıştır. Bitümlü sıcak karışımların içerdikleri SBS oranı arttıkça ise karışımların akma sayısı değerleri dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımları artmıştır. En düşük akma değerini 2CMS10 karışımı verirken en yüksek akma değerini ise 3HMS5 karışımı vermektedir. 2HMS5 ve 2CMS5 karışımlarının akma değerleri SK karışımının akma değerlerine göre sırasıyla 1,64 ve 1,10 kat artarken, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımların akma değerleri SK karışımının akma değerlerine göre ise sırasıyla %13,41 ve %14,78 azalmıştır. 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışımların akma değerleri, SK karışımının akma değerlerine göre sırasıyla 1,96; 1,70; 1,20 ve 1,15 kat artmıştır. Sıcak ve soğuk tüfal karşılaştırıldığı zaman akma değerleri için en etkin tüfalin sıcak tüfal olduğu görülmektedir.

Tüfal türü ve oranı değerlendirildiğinde özellikle yüksek orandaki tüfal içeriklerinde akma sayılarının önemli oranda azaldığı, yüksek SBS içeriklerinde ise bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımının daha fazla arttığı tespit edilmiştir.

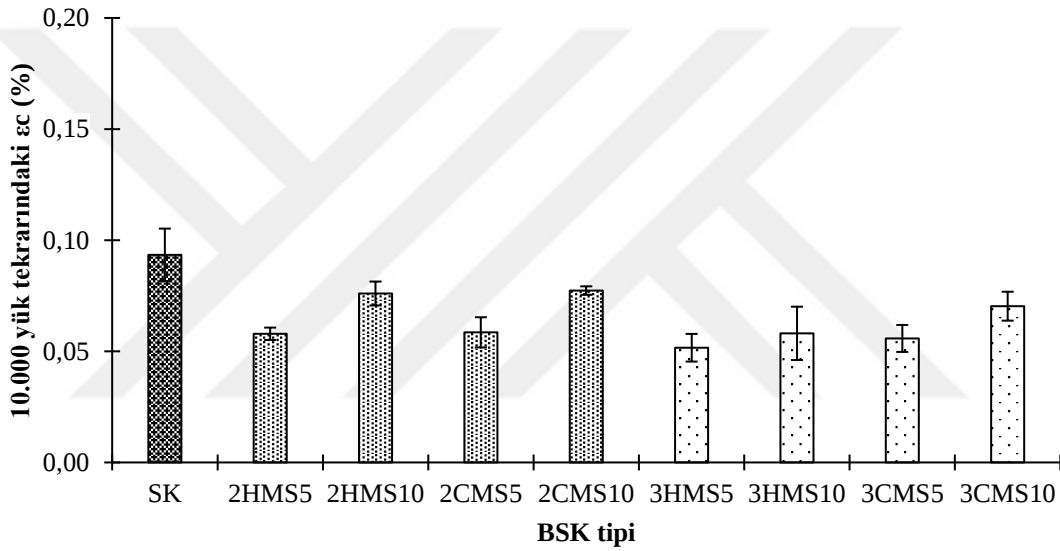


Şekil 5.31. Tüfal ve SBS içeren karışımların akma sayısı değerleri

Şekil 5.32’de karışımların 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri incelendiğinde tüfal ve SBS kullanımı ile karışımlarda oluşan kalıcı deformasyon oluşumunun saf karışıma göre azaldığı belirlenmiştir. Bitümlü sıcak karışımlara 10.000 yük tekrarı uygulanması ile en fazla kalıcı birim şekil değiştirme saf karışımda meydana gelmiştir. Bitümlü sıcak karışımlara 10.000 yük tekrarı uygulanması ile en az kalıcı birim şekil değiştirme ise 3HMS5 karışımında

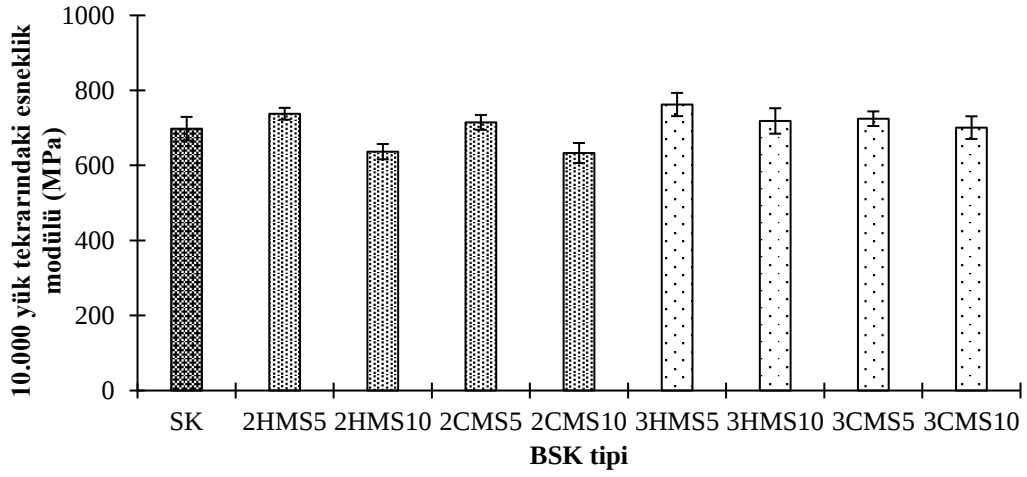
meydana gelmiştir. Ayrıca karışımların içerdiği SBS oranı arttıkça karışımlarda oluşan kalıcı deformasyon oluşumunun azaldığı belirlenmiştir.

2HMS5, 2HMS10, 2CMS5 ve 2CMS10 karışımların 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri, SK karışımının 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerlerine göre sırasıyla %37,63; %18,28; %36,56 ve %17,20 azalmıştır. 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışımlarının 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri, SK karışımının 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerlerine göre ise sırasıyla %44,09; %37,63; %39,78 ve %24,73 azalmıştır. Bu sonuçlara göre SBS'nin karışımların 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme üzerindeki etkisi görülmektedir.



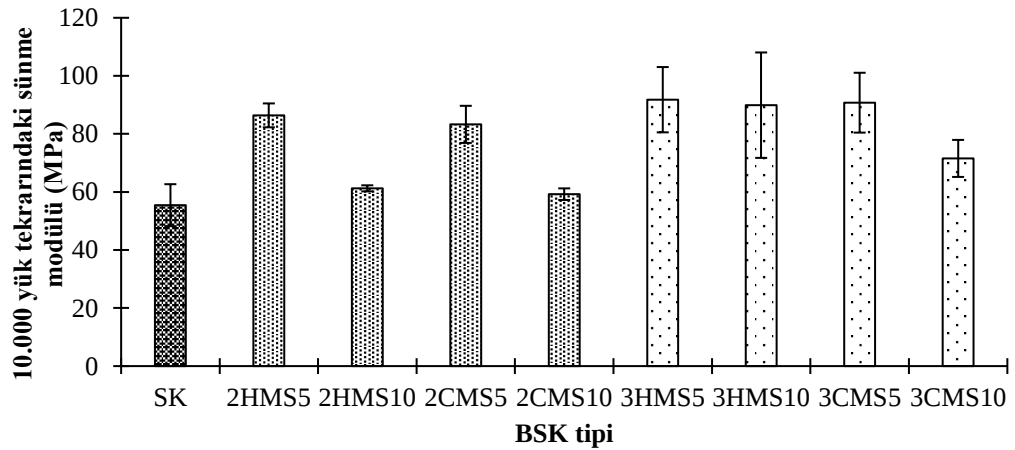
Şekil 5.32. Tüfal ve SBS içeren karışımların 10.000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri

Elastikiyetin bir göstergesi olan esneklik modülü değerleri incelendiğinde (Şekil 5.33) ise en yüksek esneklik modülü değerine 3HMS5 karışımının, en düşük değere ise 2CMS10 karışımının sahip olduğu belirlenmiştir. Esneklik modülünün yüksek olması elastik birim şekil değiştirmelerin düşük olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla esneklik modülü düşük olan karışımlar daha elastik davranış sergilemektedir. Karışımlarda SBS kullanımı esneklik modülü değerlerinde artma meydana getirmiştir. Fakat asfalt karışımlar içerisindeki tüfal oranı arttıkça esneklik modülü değerlerinde azalma meydana gelmiştir. 2HMS5 ve 2CMS5 karışımların akma değerleri SK karışımının akma değerlerine göre sırasıyla 1,06 ve 1,02 kat artarken, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımların akma değerleri SK karışımının akma değerlerine göre ise sırasıyla %8,74 ve %9,31 azalmıştır. 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışımların akma değerleri, SK karışımının akma değerlerine göre sırasıyla 1,09; 1,03; 1,04 ve 1,01 kat artmıştır.



Şekil 5.33. Tüfal ve SBS içeren karışımların 10.000 yük tekrarındaki esneklik modülü değerleri

Sünme modülü değerleri gerilmenin kalıcı birim şekil değiştirme değerlerine oranlanması ile elde edilmektedir. Bu nedenle Şekil 5.34'te verilen kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin yüksek olduğu karışımların sünme modülü değerleri düşük çıkmıştır. Şekilde görüldüğü üzere en yüksek sünme modülü değerine dolayısıyla en yüksek kalıcı deformasyon karşı dayanıma 3HMS5 karışımının, en düşük değere dolayısıyla kalıcı deformasyon oluşumuna karşı en düşük dayanıma ise saf karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 2HMS5, 2HMS10, 2CMS5 ve 2CMS10 karışımların 10.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerleri, SK karışımının 10.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerlerine göre sırasıyla 1,56; 1,11; 1,51 ve 1,07 kat artmıştır. 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışımların 10.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerleri, SK karışımının 10.000 yük tekrarındaki sünme modülü değerlerine göre ise sırasıyla 1,67; 1,64; 1,65 ve 1,31 kat artmıştır. Bu sonuçlar incelendiği zaman asfalt karışımlar içerisindeki tüfalin ve SBS'nin karışımların sünme modülü üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

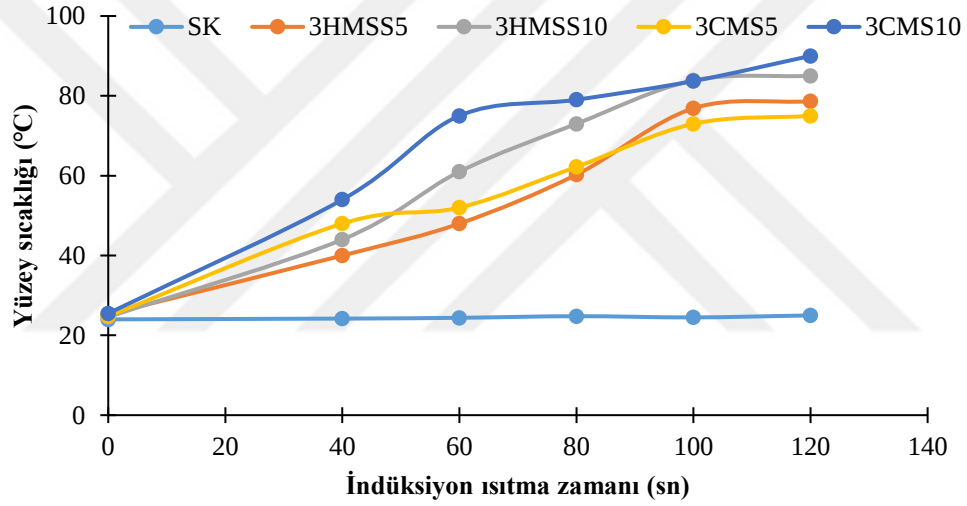
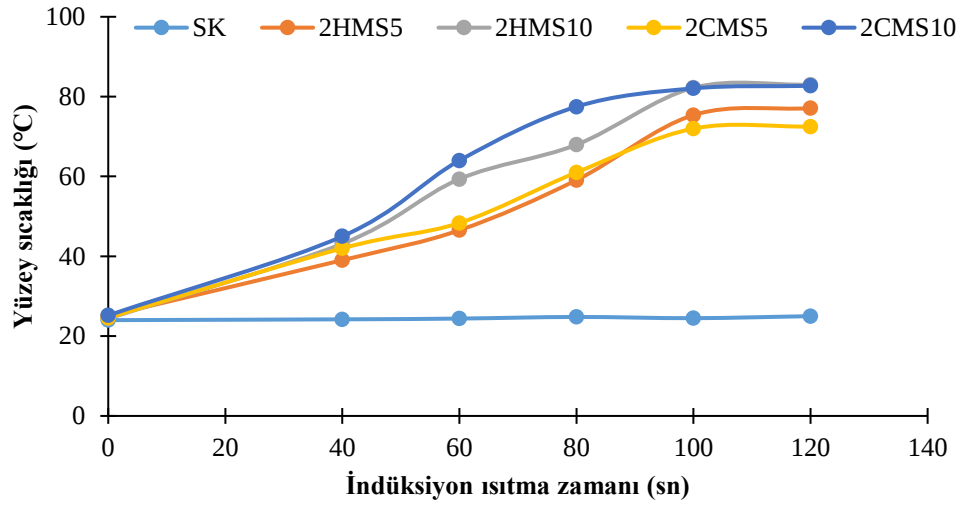


Şekil 5.34. Tüfal ve SBS içeren karışımların 10.000 yük tekrarındaki esneme modülü değerleri

Dinamik sünme deneylerinden elde edilen akma sayıları ve sünme modülü değerleri incelendiğinde tüfal ve SBS kullanımı ile karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımının arttığı belirlenmiştir. Tüfal türleri karşılaştırıldığında sıcak tüfal içeren karışımlarda kalıcı deformasyona karşı dayanımın soğuk tüfal içeren karışımlara göre daha fazla arttığı belirlenmiştir. SBS kullanım oranları değerlendirildiğinde bitümlü sıcak karışımlar içerisindeki SBS oranı arttıkça akma sayıları ve sünme modülü değerlerinde de artma meydana gelmektedir. Elastik modül değerlerinden tüfal kullanımı ile karışımların elastikiyetinin azaldığı, bu durumun tüfallerin kimyasal özelliklerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

5.2.6. Atık Metal İçeren Karışımların İndüksiyonla Isıtma Özellikleri

Şekil 5.35, 5 farklı (40°C, 60°C, 80°C, 100°C ve 120°C) zamanda indüksiyon ısıtmasına maruz kaldıktan sonra asfalt test numunelerinin yüzeyindeki sıcaklığı göstermektedir. Asfalt test numunelerinin yüzey sıcaklığının, indüksiyon ısıtmasına maruz kalma süresi ile arttığı ve test numunelerinin içerisindeki atık metal oranı arttıkça da sıcaklığın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, 2HMS5 asfalt karışım test numunesi 120 saniye ısıtıldıktan sonra 77,1°C'ye ulaşırken, 2CMS5 asfalt karışım test numunesi 120 saniye ısıtıldıktan sonra 72,5°C'ye ulaşmıştır. 2HMS10 asfalt karışım test numunesi 120 saniye ısıtıldıktan sonra 83,0°C'ye ulaşırken, 2CMS10 asfalt karışım test numunesi 120 saniye ısıtıldıktan sonra 82,7°C'ye ulaşmıştır. Ayrıca asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı arttıkça asfalt karışımların yüzey sıcaklığında artış meydana gelmiştir. 2HMS5 karışımının 120 sn'deki yüzey sıcaklığı 77,1°C'ken 3HMS5 karışımının yüzey sıcaklığı 78,6°C'ya yükselmiştir. Aynı şekilde 2CMS10 karışımının 120 sn'deki yüzey sıcaklığı 82,7°C'ken 3HMS10 karışımının yüzey sıcaklığı 90,0°C'ye yükselmiştir. İndüksiyonla ısıtma durumunda, atık metal içermeyen asfalt test numunelerinin yüzey sıcaklıkları artmamıştır. 2HMS5, 2CMS5, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımlarının 60°C'deki yüzey sıcaklık değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla 1,91; 1,98; 2,43 ve 2,62 kat artmıştır. 3HMS5, 3CMS5, 3HMS10 ve 3CMS10 karışımlarının 60°C'deki yüzey sıcaklık değerleri ise saf karışıma (SK) göre sırasıyla 1,98; 2,13; 2,5 ve 3,07 kat artmıştır. Şekil 5.35'te görüldüğü üzere 60°C'ye kadar ani bir artış meydana gelirken 60°C'den sonra yüzey sıcaklığındaki artış miktarı azalmıştır. 80°C'de 3HMS5 karışımı 2HMS5 karışımına göre 1,02 kat; 3HMS10 karışımı 2HMS10 karışımına göre 1,07 kat; 3CMS5 karışımı 2CMS5 karışımına göre 1,02 kat; 3CMS10 karışımı 2CMS10 karışımına göre 1,02 kat arttığı belirlenmiştir. Bu oranlar da asfalt karışımların içerisindeki SBS oranından kaynaklanmaktadır. İndüksiyon ısıtmasına maruz kalınan süre arttıkça asfalt numunelerinin yüzeyindeki sıcaklıklarda yaklaşık doğrusal bir artış görülmektedir.

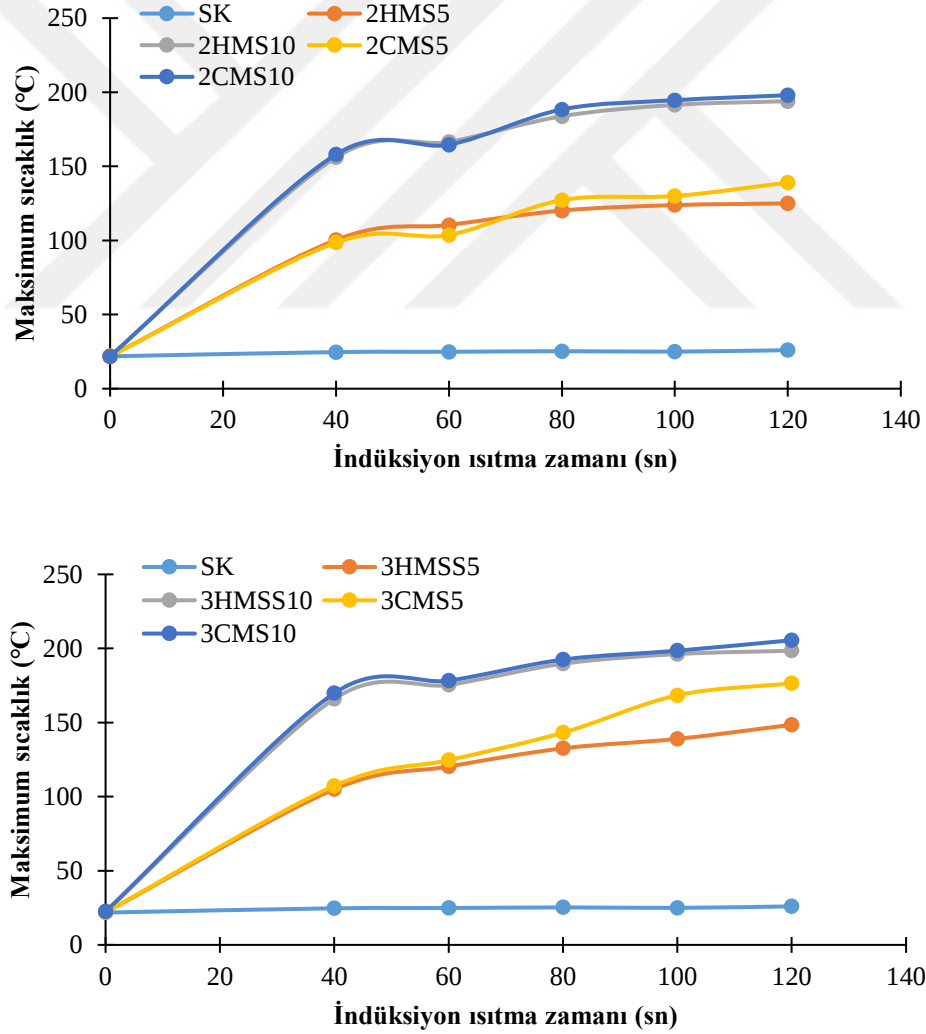


Şekil 5.35. İndüksiyon ısıtma süresinin test numunelerinin yüzey sıcaklığına etkisi

Şekil 5.36, farklı zamanlarda indüksiyon ısıtmasına maruz kaldıktan sonra asfalt test numunelerinde meydana gelen maksimum sıcaklığı göstermektedir. Bağlayıcıların sıcaklıkları 60 sn'ye kadar kadar artar, 60 sn'den sonra ise ısıtma süresi boyunca yaklaşık sabit kalmaktadır. Ayrıca şekilde görüldüğü üzere en çok ısınan karışımlar CMS karışımlarıdır. CMS karışımlarının HMS karışımlarından fazla ısınmalarının sebebi içeriğindeki demir oranıdır. CMS karışımlar HMS karışımlardan 1.05 kat daha fazla demir elementi içermektedir. Asfalt karışımların içerisindeki hem tufal miktarı hem de SBS miktarı arttıkça asfalt karışımların maksimum sıcaklıkları da artmaktadır. En yüksek maksimum sıcaklık 3CMS10 karışımından elde edilirken en düşük sıcaklık ise saf karışımdan elde edilmektedir. 2HMS5, 2CMS5, 2HMS10 ve 2CMS10 karışımlarının 60°C'deki maksimum sıcaklık değerleri saf karışıma (SK) göre sırasıyla 4,43; 4,16; 6,69 ve 6,61 kat artmıştır. 3HMS5, 3CMS5, 3HMS10 ve 3CMS10 karışımlarının 60°C'deki maksimum sıcaklık değerleri ise

saf karışıma (SK) göre sırasıyla 4,83; 5,00; 7,04 ve 7,17 kat artmıştır. 120°C’de 3HMS5 karışımı 2HMS5 karışımına göre 1,19 kat; 3HMS10 karışımı 3HMS10 karışımına göre 1,02 kat; 3CMS5 karışımı 2CMS5 karışımına göre 1,27 kat; 3CMS10 karışımı 3CMS10 karışımına göre 1,04 kat arttığı belirlenmiştir.

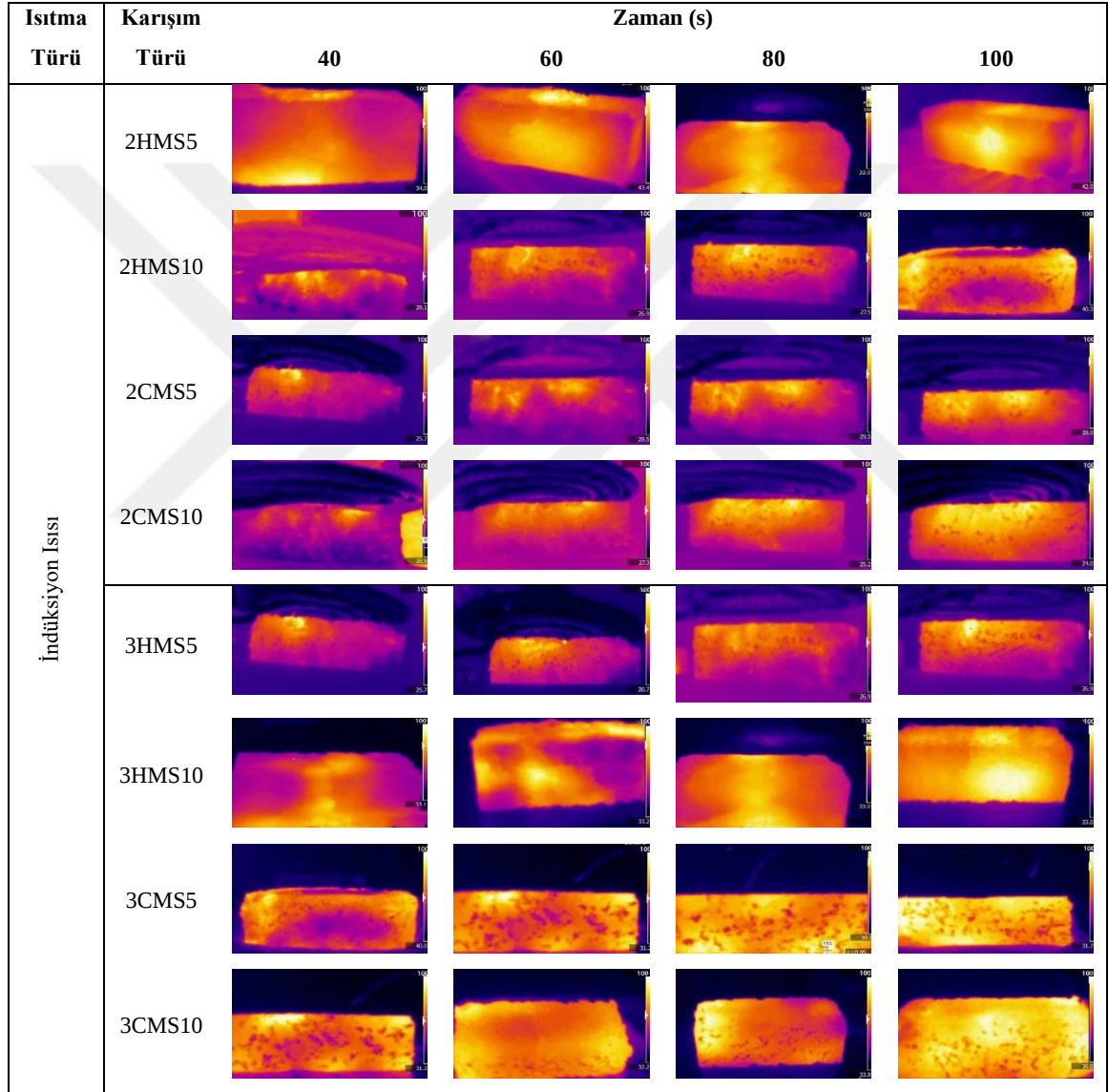
SBS içeren karışımların saf karışımlara göre daha fazla ısınmaları ısı duyarlılığından kaynaklanmaktadır. Saf 50/70 bitümün oda sıcaklığındaki ısı duyarlılığı 1,09 iken SBS’nin ısı duyarlılığı ise 2,09’dur. Bu sonuçlar Dijital Güvenlik Kontrolleri (DSC) sonucuna göre belirlenmiştir. Deney sonucuna göre SBS içeren bağlayıcılar yaklaşık olarak saf bağlayıcıya göre 2 kat daha fazla ısı duyarlılığına sahiptir. Isı duyarlılığı yüksek olduğu için indüksiyon ısıtmasında saf bağlayıcı içeren karışımlar, SBS modifiye bağlayıcı içeren karışımlara göre daha az ısınmaktadır.



Şekil 5.36. İndüksiyon ısıtma ısısının test numunelerinin maksimum sıcaklığına ısıtma süresinin etkisi

5.2.7. Metalik Atıkların Asfalt Karışımlarının Isınma ve Çatlak İyileştirme Özelliklerine Etkisi

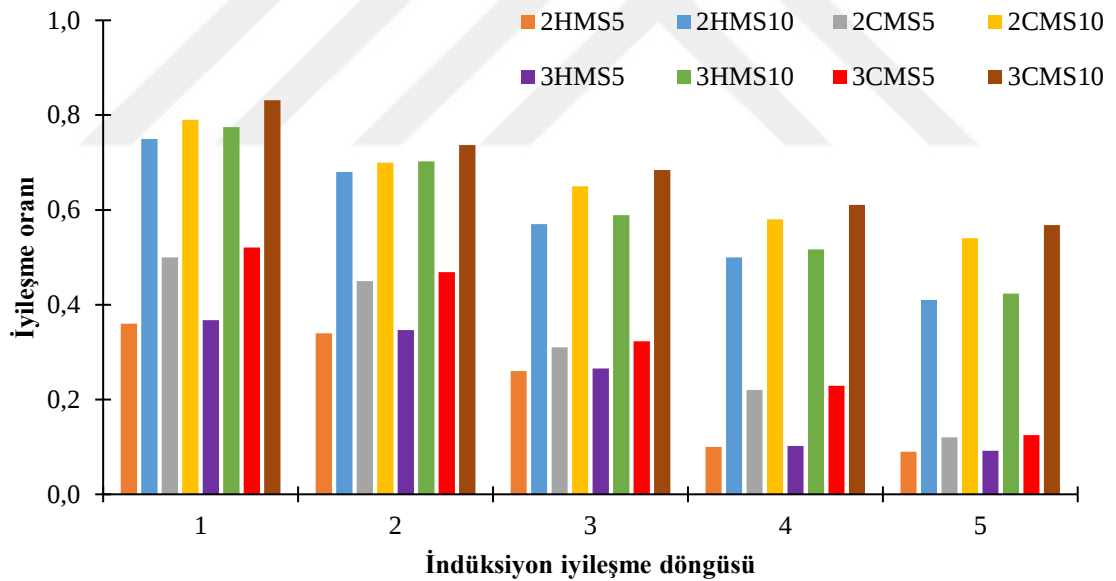
Prizmatik numunelerin indüksiyon kullanılarak ulaştığı sıcaklık dağılımının bir sonucu olarak farklı tür ve oranlarda atık metal içeriğine sahip asfalt numunelerinin temsili termografik görüntüleri Şekil 5.37’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere atık metal oranı arttıkça homojen bir ısınma görülmektedir. CMS karışımlar HMS karışımlara göre daha homojen bir ısınma göstermektedir.



Şekil 5.37. Tüfally ve SBS’li asfalt test numunelerinin indüksiyonla ısıtma sonrası termografik görüntüleri

Şekil 5.38, 40 saniye indüksiyon ısıtmasından sonra 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında HMS ve CMS karışım numunelerinde ölçülen ortalama HL sonuçlarını göstermektedir. Şekilde

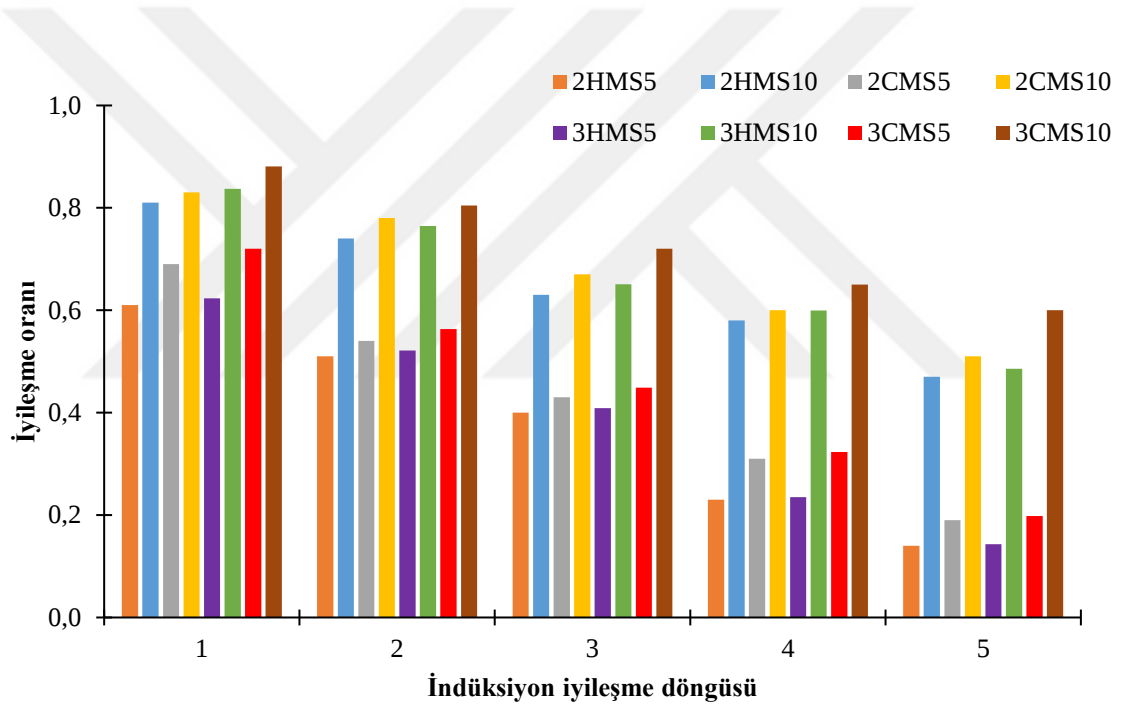
görüldüğü üzere indüksiyon ısıtma süresinde iyileşme döngüsü arttıkça HL değerlerinde azalma belirlenmiştir. 1. döngüdeki 2HMS10 karışımının HL değeri, 2HMS5 karışımının HL değerinden 2,08 kat; 2CMS10 karışımının HL değeri 2CMS5 karışımının HL değerinden ise 1,58 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. 1. döngüdeki 3HMS10 karışımının HL değeri, 3HMS5 karışımının HL değerinden 2,08 kat; 3CMS10 karışımının HL değeri 3CMS5 karışımının HL değerinden ise 1,60 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 40 saniye ısıtılmış 2HMS5, 2HMS10, 2CMS5 ve 2CMS10 karışım numuneleri için ortalama HL değerlerinin düşüşleri sırasıyla %75,0; %45,3; %76,0 ve %31,6'dır. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 40 saniye ısıtılmış 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışım numuneleri için ortalama HL değerlerinin düşüşleri ise sırasıyla %75,7; %45,5; %76,9 ve %31,3'dür. Şekilde görüldüğü üzere indüksiyon ısıtma süresi içinde en düşük HL değerini 2HMS5 sağlarken, en yüksek HL değerini ise 3CMS10 karışımı sağlamaktadır. Asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı arttıkça asfalt karışımların iyileşme oranlarında da artış meydana gelmektedir.



Şekil 5.38. 40 saniye indüksiyon ısıtmasının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi

Şekil 5.39, 60 saniye indüksiyon ısıtmasından sonra 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında HMS ve CMS karışım numunelerinde ölçülen ortalama HL sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.39'da görüldüğü üzere indüksiyon ısıtma süresinde iyileşme döngüsü arttıkça HL değerlerinde azalma belirlenmiştir. 1. döngüdeki 2HMS10 karışımının HL değeri, 2HMS5 karışımının HL değerinden 1,33 kat; 2CMS10 karışımının HL değeri 2CMS5 karışımının HL değerinden ise 1,20

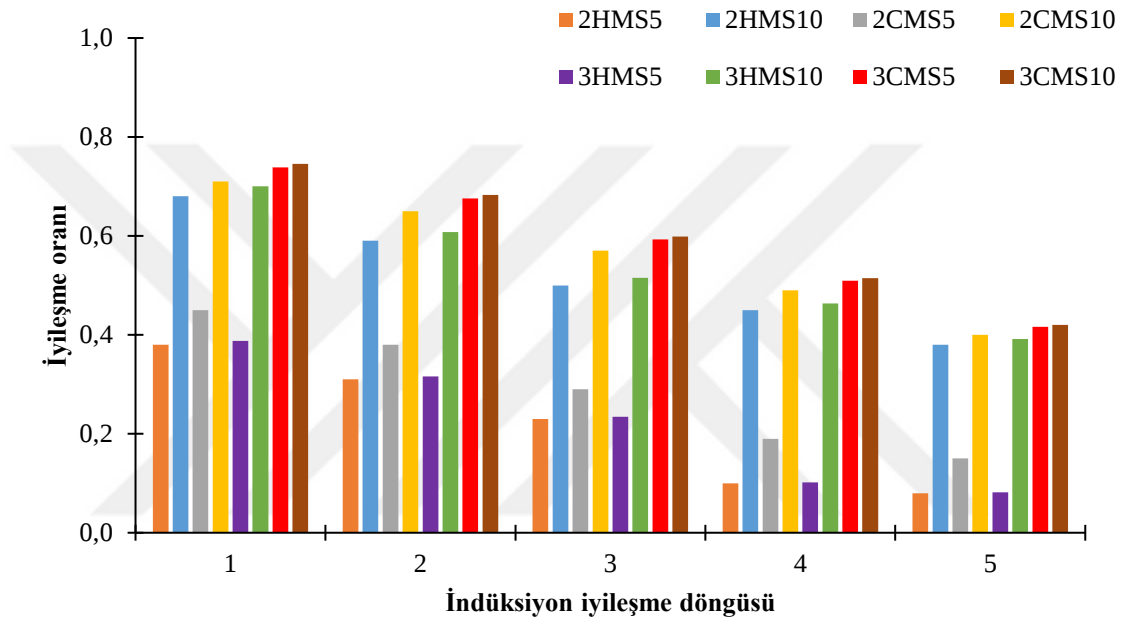
kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. 1. döngüdeki 3HMS10 karışımının HL değeri, 3HMS5 karışımının HL değerinden 1,35 kat; 3CMS10 karışımının HL değeri 3CMS5 karışımının HL değerinden ise 1,22 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 60 saniye ısıtılmış 2HMS5, 2HMS10, 2CMS5 ve 2CMS10 karışım numuneler için ortalama HL değerlerinin düşüşleri sırasıyla %75,1; %42,0; %72,5 ve %38,6'dır. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 60 saniye ısıtılmış 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışım numuneler için ortalama HL değerlerinin düşüşleri ise sırasıyla %77,4; %41,7; %72,2 ve %31,8'dir. Şekilde görüldüğü üzere indüksiyon ısıtma süresi içinde en düşük HL değerini 2HMS5 sağlarken, en yüksek HL değerini ise 3CMS10 karışımı sağlamaktadır. Asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı arttıkça asfalt karışımların iyileşme oranlarında da artış meydana gelmektedir.



Şekil 5.39. 60 saniye indüksiyon ısıtmasının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi

Şekil 5.40, 80 saniye indüksiyon ısıtmasından sonra 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında HMS ve CMS karışım numunelerinde ölçülen ortalama HL sonuçlarını göstermektedir. İndüksiyon ısıtma süresinde iyileşme döngüsü arttıkça HL değerlerinde azalma belirlenmiştir. En fazla azalma 2HMS5 ve 3HMS5 karışımlarında meydana gelmiştir. 1. döngüdeki 2HMS10 karışımının HL değeri, 2HMS5 karışımının HL değerinden 1,79 kat; 2CMS10 karışımının HL değeri 2CMS5 karışımının HL değerinden ise 1,58 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. 1. döngüdeki 3HMS10 karışımının HL değeri, 3HMS5 karışımının HL değerinden 1,79 kat; 3CMS10 karışımının HL

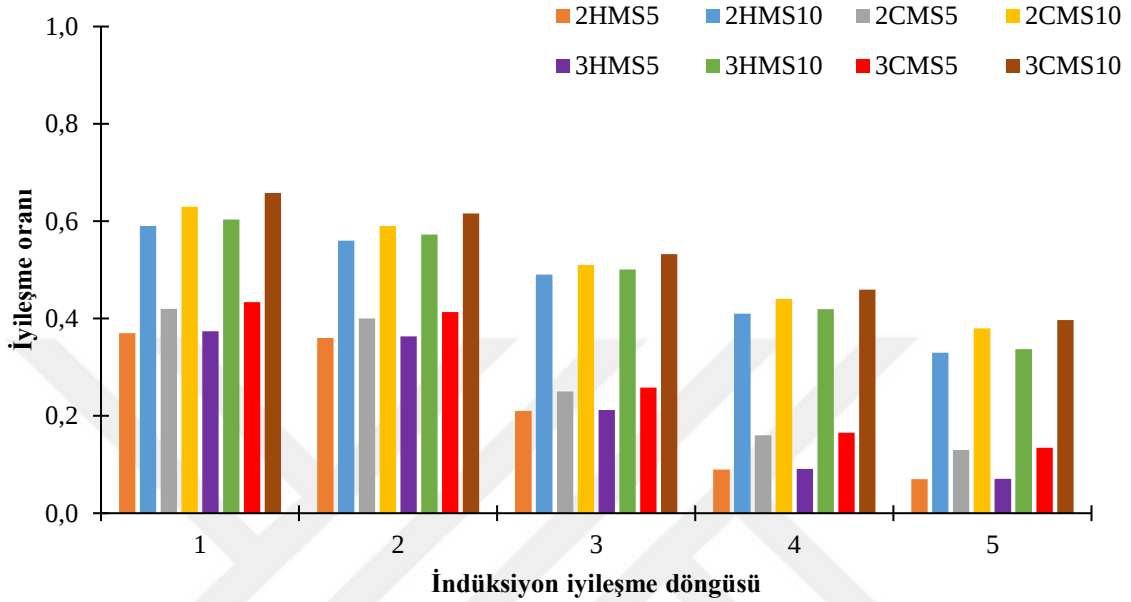
değeri 3CMS5 karışımının HL değerinden ise 1,01 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 80 saniye ısıtılmış 2HMS5, 2HMS10, 2CMS5 ve 2CMS10 karışım numuneler için ortalama HL değerlerinin düşüşleri sırasıyla %78,9; %44,1; %66,7 ve %43,7'dir. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 80 saniye ısıtılmış 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışım numuneler için ortalama HL değerlerinin düşüşleri ise sırasıyla %79,5; %44,3; %43,2 ve %44,0'dır. Asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı %2'den %3'e çıktığı zaman iyileşme oranlarında artış meydana gelmektedir.



Şekil 5.40. 80 saniye indüksiyon ısıtmasının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi

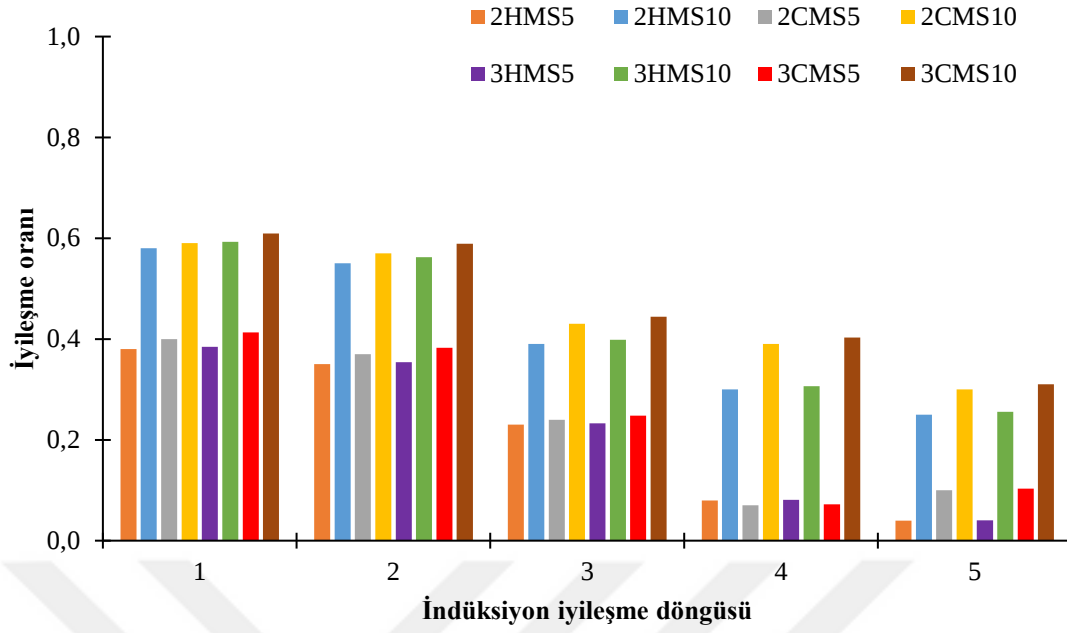
Şekil 5.41, 100 saniye indüksiyon ısıtmasından sonra 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında HMS ve CMS karışım numunelerinde ölçülen ortalama iyileşme oranı sonuçlarını göstermektedir. İndüksiyon ısıtma süresinde iyileşme döngüsü arttıkça iyileşme oranı değerlerinde azalma belirlenmiştir. 1. döngüdeki 3HMS5 karışımının iyileşme oranı değeri, 2HMS5 karışımının HL değerinden 1,00 kat; 3CMS5 karışımının HL değeri 2CMS5 karışımının iyileşme oranı değerinden ise 1,02 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. 1. döngüdeki 3HMS10 karışımının iyileşme oranı değeri, 2HMS10 karışımının iyileşme oranı değerinden 1,02 kat; 3CMS10 karışımının iyileşme oranı değeri 2CMS10 karışımının iyileşme oranı değerinden ise 1,05 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 100 saniye ısıtılmış 2HMS5, 2HMS10, 2CMS5 ve 2CMS10 karışım numuneler için ortalama HL değerlerinin düşüşleri sırasıyla %81,1; %44,1; %69,0 ve %39,7'dir. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 100 saniye ısıtılmış 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışım numuneler için

ortalama HL değerlerinin düşüşleri ise sırasıyla %81,1; %43,3; %69,8 ve %39,4'dür. Asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı %2'den %3'e çıktığı zaman iyileşme oranlarında artış meydana gelmektedir.



Şekil 5.41. 100 saniye indüksiyon ısısının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi

Şekil 5.42, 120 saniye indüksiyon ısıtmasından sonra 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında HMS ve CMS karışım numunelerinde ölçülen ortalama iyileşme oranı sonuçlarını göstermektedir. İndüksiyon ısıtma süresinde iyileşme döngüsü arttıkça iyileşme oranı değerlerinde azalma belirlenmiştir. 1. döngüdeki 3HMS5 karışımının iyileşme oranı değeri, 2HMS5 karışımının HL değerinden 1,00 kat; 3CMS5 karışımının HL değeri 2CMS5 karışımının iyileşme oranı değerinden ise 1,02 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. 1. döngüdeki 3HMS10 karışımının iyileşme oranı değeri, 2HMS10 karışımının iyileşme oranı değerinden 1,03 kat; 3CMS10 karışımının iyileşme oranı değeri 2CMS10 karışımının iyileşme oranı değerinden ise 1,03 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 100 saniye ısıtılmış 2HMS5, 2HMS10, 2CMS5 ve 2CMS10 karışım numuneler için ortalama HL değerlerinin düşüşleri sırasıyla %89,5; %56,9; %75,0 ve %49,2'dir. Birinci ve sonuncu çatlak iyileşme döngüsü (1-5) arasında 100 saniye ısıtılmış 3HMS5, 3HMS10, 3CMS5 ve 3CMS10 karışım numuneler için ortalama HL değerlerinin düşüşleri ise sırasıyla %89,5; %55,9; %75,6 ve %49,2'dir. Asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı arttığı zaman iyileşme oranlarında artış meydana gelmektedir.



Şekil 5.42. 120 saniye indüksiyon ısısının altında çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi

Tablo 5.7’de dört farklı sürede indüksiyon ısıtmasından sonra, 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında HMS ve CMS karışım numunelerinde ölçülen ortalama HL sonuçlarını gösterilmektedir. Tabloda da görüldüğü üzere atık metal içeriği arttıkça HL değerlerinde artış gözlenmektedir. Bunun aksine tüm karışım ve ısınma sürelerinde iyileşme döngüsü artışından sonrada HL değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Tablo 5.7 incelendiğinde her iki ısıtma sistemi içinde 60 saniyeden sonra HL değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Bu sonuçta indüksiyon ısınmasında asfalt karışımların optimum ısınma süresinin 60 saniye olduğu belirlenmiştir. 80 saniye ve 100 saniyede ise HL değerlerinde sabit bir değişim görülmektedir. Genel olarak en yüksek HL değerini CMS10 karışımı verirken en düşük HL değerini HMS5 karışımı vermektedir.

Tablo 5.7. Çeşitli yüzdelerde atık metal içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi [116]

Karışım Tipi	İyileşme Döngüsü	Mikrodalga Isısı				İndüksiyon ısısı			
		İyileşme Oranı (HL)- Zaman (s)				İyileşme Oranı (HL)- Zaman (s)			
		HL-40	HL-60	HL-80	HL-100	HL-40	HL-60	HL-80	HL-100
HMS5	1	0,57	0,78	0,52	0,51	0,34	0,55	0,32	0,31
	2	0,53	0,63	0,47	0,53	0,30	0,40	0,27	0,33
	3	0,42	0,55	0,35	0,31	0,19	0,32	0,15	0,11
	4	0,27	0,38	0,22	0,23	0,04	0,15	0,02	0,03
	5	0,20	0,32	0,17	0,15	0,10	0,09	0,05	0,03
HMS10	1	0,89	0,94	0,81	0,75	0,66	0,71	0,61	0,55
	2	0,86	0,89	0,76	0,72	0,63	0,66	0,56	0,52
	3	0,74	0,79	0,65	0,64	0,51	0,56	0,45	0,44
	4	0,63	0,70	0,58	0,55	0,40	0,47	0,38	0,35
	5	0,58	0,62	0,51	0,48	0,35	0,39	0,31	0,28
CMS5	1	0,65	0,75	0,56	0,57	0,42	0,52	0,36	0,37
	2	0,59	0,64	0,50	0,47	0,36	0,41	0,30	0,27
	3	0,48	0,58	0,43	0,35	0,25	0,35	0,23	0,15
	4	0,37	0,47	0,25	0,23	0,14	0,24	0,12	0,11
	5	0,23	0,33	0,19	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
CMS10	1	0,93	0,96	0,81	0,77	0,70	0,73	0,61	0,57
	2	0,80	0,89	0,74	0,68	0,57	0,66	0,54	0,48
	3	0,79	0,81	0,70	0,62	0,56	0,58	0,50	0,42
	4	0,75	0,75	0,64	0,58	0,52	0,52	0,44	0,38
	5	0,70	0,70	0,53	0,50	0,47	0,47	0,33	0,30

Tablo 5.8’de beş farklı sürede indüksiyon ısıtmasından sonra, 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında HMS ve CMS karışım numunelerinde ölçülen ortalama HL sonuçlarını gösterilmektedir. Tabloda da görüldüğü gibi atık metal içeriği arttıkça HL değerlerinde artış gözlenmektedir. Bunun aksine tüm karışım ve ısınma sürelerinde iyileşme döngüsü artışından sonrada HL değerlerinde azalış meydana gelmektedir. Tablo 5.7 incelendiğinde her iki ısıtma sistemi içinde 60 saniyeden sonra HL değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Bu sonuçta hem mikrodalga hem de indüksiyon ısınmasında asfalt karışımların optimum ısınma süresinin 60 saniye olduğu belirlenmiştir. Diğer sürelerde ise HL değerlerinde sabit bir değişim görülmektedir. Genel olarak en yüksek HL değerini CMS10 karışımı verirken en düşük HL değerini HMS5 karışımı vermektedir. Karışımlar içerisindeki SBS miktarının %2’den %3’e çıkması halinde asfalt karışımların iyileşme oranlarında da artış meydana gelmiştir. %3 SBS ve %100 tüfal içeren karışımlar diğer karışımlara göre daha yüksek iyileşme oranı sergilemişlerdir. İyileşme oranının yüksek oluşu indüksiyon sırasında asfalt karışımların o oranda ısınmasından kaynaklanmaktadır. Isınma oranı ne kadar yüksek olursa iyileşme oranı da o oranda artacaktır. İndüksiyon sırasında ısınmayan örneğin saf karışımlarda (SK) iyileşme meydana gelmemektedir. Isınmayla iyileşme oranı doğru orantılı denilebilmektedir. Önceki çalışmalarla sonuçların uyumlu olduğu belirlenmiştir [116].

Tablo 5.8. Farklı yüzdede atık metal ve 2 farklı yüzdede SBS içeren test numuneleri için tekrarlanan iyileştirme döngülerine karşı iyileştirme düzeyi

Karışım Tipi	İyileştirme Döngüsü	İndüksiyon Isısı				
		İyileştirme Oranı (HL)- Zaman (s)				
		HL-40	HL-60	HL-80	HL-100	HL-120
2HMS5	1	0,36	0,61	0,38	0,37	0,38
	2	0,34	0,51	0,31	0,36	0,35
	3	0,26	0,40	0,23	0,21	0,23
	4	0,10	0,23	0,10	0,09	0,08
	5	0,09	0,14	0,08	0,07	0,04
2HMS10	1	0,75	0,81	0,68	0,59	0,58
	2	0,68	0,74	0,59	0,56	0,55
	3	0,57	0,63	0,50	0,49	0,39
	4	0,50	0,58	0,45	0,41	0,30
	5	0,41	0,47	0,38	0,33	0,25
2CMS5	1	0,50	0,69	0,45	0,42	0,40
	2	0,45	0,54	0,38	0,40	0,37
	3	0,31	0,43	0,29	0,25	0,24
	4	0,22	0,31	0,19	0,16	0,07
	5	0,12	0,19	0,15	0,13	0,10
2CMS10	1	0,79	0,83	0,71	0,63	0,59
	2	0,70	0,78	0,65	0,59	0,57
	3	0,65	0,67	0,57	0,51	0,43
	4	0,58	0,60	0,49	0,44	0,39
	5	0,54	0,51	0,40	0,38	0,30
3HMS5	1	0,37	0,62	0,39	0,37	0,38
	2	0,35	0,52	0,32	0,36	0,35
	3	0,27	0,41	0,23	0,21	0,23
	4	0,10	0,24	0,10	0,09	0,08
	5	0,09	0,14	0,08	0,07	0,04
3HMS10	1	0,77	0,84	0,70	0,60	0,59
	2	0,70	0,76	0,61	0,57	0,56
	3	0,59	0,65	0,52	0,50	0,40
	4	0,52	0,60	0,46	0,42	0,31
	5	0,42	0,49	0,39	0,34	0,26
3CMS5	1	0,52	0,72	0,74	0,43	0,41
	2	0,47	0,56	0,68	0,41	0,38
	3	0,32	0,45	0,59	0,26	0,25
	4	0,23	0,32	0,51	0,17	0,07
	5	0,12	0,20	0,42	0,13	0,10
3CMS10	1	0,83	0,88	0,75	0,66	0,61
	2	0,74	0,80	0,68	0,62	0,59
	3	0,68	0,72	0,60	0,53	0,44
	4	0,61	0,65	0,51	0,46	0,40
	5	0,57	0,60	0,42	0,40	0,31

Tablo 5.7 ve Tablo 5.8 incelendiği zaman SBS içeren ve içermeyen asfalt karışımlar karşılaştırıldığı zaman SBS içeren karışımların daha yüksek iyileştirme oranı verdiği görülmektedir. Tablo 5.7’den CMS10 ile Tablo 5.8’den 3CMS10 karşılaştırıldığı zaman 1. iyileştirme döngüsü 40 saniye için 2CMS10 karışımı CMS10 karışımına göre 1,13 kat iyileştirme oranını artırırken; 3CMS10 karışımı ise 1,19 kat daha fazla iyileştirme oranı vermektedir. Bu sonuçlar bize asfalt karışımlara SBS

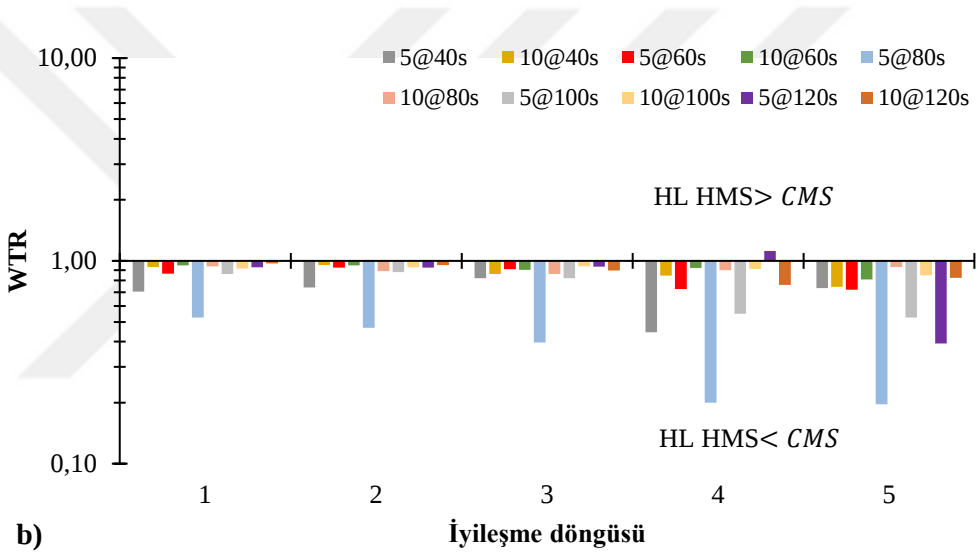
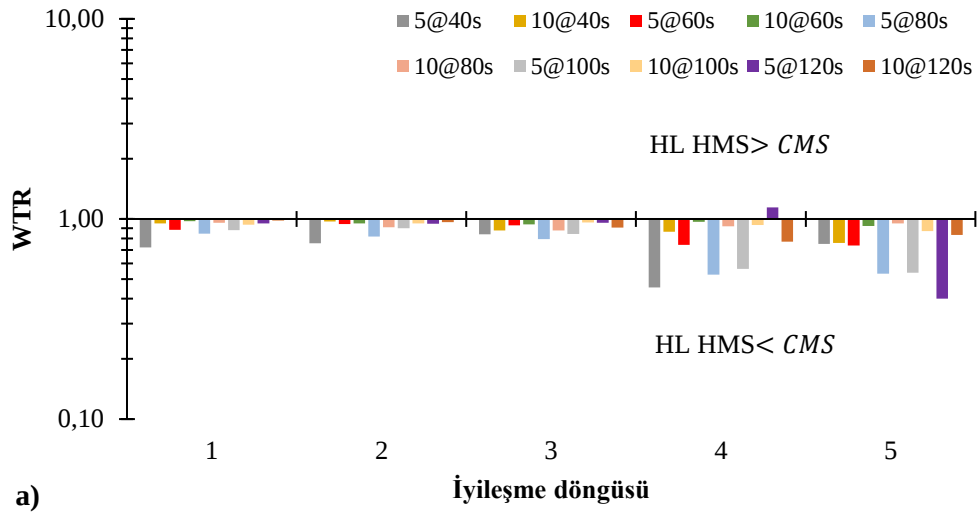
ilavesinin iyileşme oranını arttırdığını göstermektedir. Ayrıca asfalt karışımlar içerisindeki SBS oranı arttıkça iyileşme oranı da artmaktadır.

HMS ve CMS numunelerinde elde edilen HL'nin daha iyi bir karşılaştırmasını yapmak için, Şekil 5.43, Denklem (5.1) tarafından tanımlanan Atık Tip Oranı (WTR) sonuçlarını sunmaktadır:

$$WTR = \frac{HL_{HMS}}{HL_{CMS}} \quad (5.1)$$

Burada HL_{HMS} , belirli bir atık içeriği, döngü sayısı ve ısıtma süresi ile HMS'li numunelerin ulaştığı ortalama HL'dir; HL_{CMS} , aynı atık içeriğine, döngü sayısına ve ısıtma süresine sahip CMS'li numunelerin ulaştığı ortalama HL'dir. WTR, her bir karışım türü ve uygulanan ısıtma süresi için en yüksek HL'yi veren atık metal türünün bir göstergesidir. $WTR > 1$, HMS karışım numuneleri, eşdeğer koşullarda CMS örneklerden daha yüksek HL'ye sahip olduğu anlamına gelir. Aksine, $WTR < 1$ değerleri CMS karışım numunelerinin HMS numunelere göre daha yüksek HL'ye sahip olduğu anlamına gelir. WTR değeri 1'e ne kadar yakın olursa, CMS ve HMS karışım numuneleri arasındaki HL farkı o kadar düşük olur.

Şekil 5.43'te gösterildiği gibi, indüksiyon ısıtmasında bu iki atık metal arasındaki HL değerindeki fark çatlak iyileşme döngüsü arttıkça artmaktadır. Şekil 5.43'teki gibi, 60 saniye boyunca ısıtılmış HMS karışım numuneleri genel olarak, CMS karışım numunelerinden ($WTR > 1$) daha yüksek HL değerleri göstermiştir. Şekil 5.43 incelendiği zaman bir döngü dışında diğer döngülerde $CMS > HMS$ olarak belirlenmiştir.

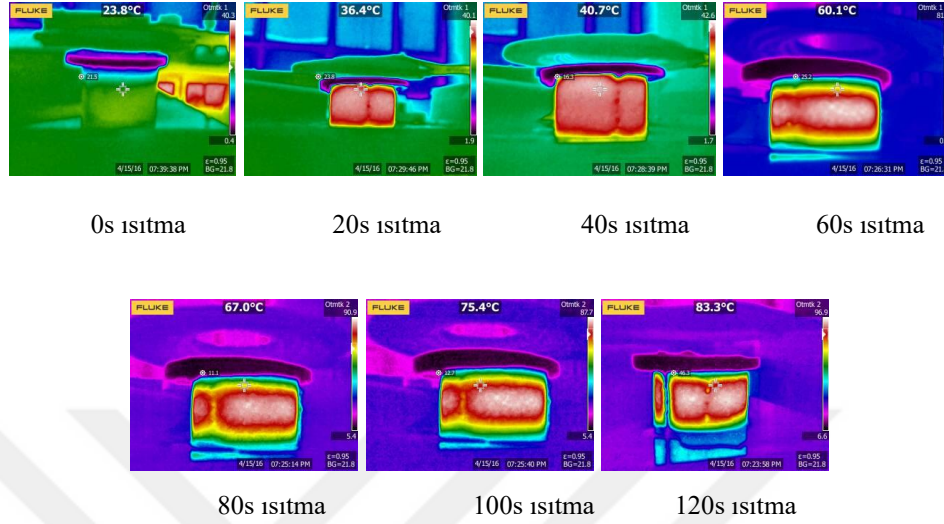


Şekil 5.43. (a) %2 SBS ve (b) %3 SBS için 5 çatlak iyileştirme döngüsü sırasında farklı içerikler için elde edilen Atık Tipi Oranı (WTR)

5.2.8. Asfalt Karışımların Isıtma Yöntemleriyle Buz Eritme Özellikleri

Kızılötesi görüntü sonuçları Şekil 5.44'te görülmektedir. Şekil 5.44'te, indüksiyon ısıtmalı tufal ve SBS modifiye asfalt karışımının buz eritme performansı ve sonucu verilmiştir. Buzun kalınlığı 5 mm'dir. 2 dakika içerisinde buzun eriyip asfalt karışımından ayrıldığı belirlenmiştir. Tufal ve SBS modifiye asfalt karışımının indüksiyonla ısıtmada eritme verimliliği yüksektir. Eritme işlemi sırasında, asfalt numunesinin sıcaklığı yaklaşık 20°C'ye yükselirken, buz yaklaşık 10°C'de kalmıştır. 120 s indüksiyonla ısıtmadan sonra, asfalt karışımının üst yüzeyindeki en yüksek sıcaklık 55,2°C'ye ulaşmıştır (Şekil 5.45). Bu sonuç, indüksiyonla ısıtmanın buz üzerinde hiç veya çok az ısıtma etkisine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Başka bir deyişle, buzun elektromanyetik

indüksiyondan enerjiyi emmediği belirlenmiştir. Bu durumda elektromanyetik indüksiyon asfalt karışımının yüzeyini doğrudan ısıtabilir.



Şekil 5.44. 5mm kalınlığında buz içeren 3CMS10 karışımının indüksiyon ısıtmalı buz eritme performansı



Şekil 5.45. 5mm kalınlığında buz içeren 3CMS10 karışımının indüksiyon ısıtmalı buz eritme sonucu

Buz kalınlığının etkisi de buz erime deneyinde tespit edilmiştir. Erime deneyinin ortalama erime hızları Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da verilmiştir. Buzun kalınlığının buz eritme süreci üzerinde çok az etkisi olduğu belirlenmiştir. 2 dakika içerisinde tüm buzlar erimiş ve asfalt karışımlarından ayrılmıştır. SBS ve tüfal içeriği arttıkça bu 2 dakikalık süre düşmektedir. Bu sonuç, indüksiyon enerjisinin buzdan geçerek asfalt karışımını doğrudan ısıtabileceği gerçeğini de desteklemektedir. Ancak asfalt karışımı ile ısıtma ekipmanı arasındaki mesafe de ısıtma özellikleri üzerinde önemli bir rol oynamıştır. Buz, asfalt karışımını ısıtma ekipmanından uzak tutacak kadar kalın olsaydı, buzun kalınlığının buz eritme performansı üzerinde büyük bir etkisi olacağı açıktır. Fakat bu çalışmada buzun normal kalınlığının buz eritme performansı üzerinde çok az etkisi olduğu düşünülmektedir. Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da görüldüğü üzere 5mm ve 10mm buz kalınlığına sahip

asfalt karışımların ortalama ısıtma hızları birbirlerine yakındır. Kaplama yüzeyindeki buz, 2 dakika içerisinde hızlı bir şekilde eriyip asfalt karışımlarından ayrılabilir. Bitümlü sıcak karışımların içerdiği tüfal miktarı arttıkça karışımların ortalama ısıtma hızında da artış meydana gelmiştir. Ayrıca asfalt karışımların içerdiği SBS miktarı arttıkça karışımların ortalama ısıtma hızında da artış belirlenmiştir. Buzlu numunelerin buzsuz numunelere göre yüzey sıcaklıkları düşüktür.

Tablo 5.9. 5 mm buz kalınlığı için asfalt karışımlarının üst yüzeyindeki ısıtma performansı

Karışım tipi	Ortalama başlangıç sıcaklığı (°C)	Ortalama son sıcaklık (°C)	Ortalama ısıtma hızı (°C/s)
2HMS5	22,10	50	0,233
2HMS10	23,40	77	0,447
2CMS5	22,60	55	0,270
2CMS10	23,60	79	0,462
3HMS5	23,30	59	0,298
3HMS10	23,50	79	0,463
3CMS5	22,80	70	0,393
3CMS10	23,80	82	0,485

Tablo 5.10. 10 mm buz kalınlığı için asfalt karışımlarının üst yüzeyindeki ısıtma performansı

Karışım tipi	Ortalama başlangıç sıcaklığı (°C)	Ortalama son sıcaklık (°C)	Ortalama ısıtma hızı (°C/s)
2HMS5	21,43	47,50	0,217
2HMS10	22,69	73,15	0,420
2CMS5	21,92	52,25	0,253
2CMS10	22,89	75,05	0,435
3HMS5	22,60	56,05	0,279
3HMS10	22,79	75,05	0,435
3CMS5	22,11	66,50	0,370
3CMS10	23,08	77,90	0,457

5.2.9. Asfalt Karışımların Isıtma Yöntemleriyle Kar Eritme Özellikleri

Buz eritme deneyinden farklı olarak, kar eritme deneyinde tüm karların erimesi gerekmektedir. Bu durumda (Şekil 5.46), tüfal ve SBS modifiye asfalt karışımının 15 mm kalınlığındaki karı indüksiyon ısıtması ile eritmesi yaklaşık 6 dakika sürmektedir. Bu aşamada 20 s ısıtma ve 10 s dinlenme bir erime döngüsü olarak tanımlandığından, indüksiyonla ısıtmanın toplam ısıtma süresi 4 dakikadır. Asfalt karışımlardaki tüfal ve SBS içeriği arttıkça asfalt karışımlara uygulanan eritme süresinde azalmaktadır. Kar erimesi için gereken zamanın, kar miktarı ile pozitif olarak ilişkili olduğu açıktır. 15 mm kar kalınlığının erime sürecinin ortalama erime hızları Tablo 5.11’de verilmiştir.



0 sn'deki erime

3 dak'daki erime

6 dak'daki erime

Şekil 5.46. İndüksiyon ısıtmalı 2HMS10 içerikli asfalt karışımının kar eritme performansı

Kar eritme testi söz konusu olduğunda, eritme sürecinde en etkili tüfalin soğuk tüfal olduğu belirlenmiştir. Ayrıca asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı arttıkça karların ortalama erime hızı da artmıştır. 2CMS5 karışımının ortalama erime hızı 0,3300 gr/dk iken 3CMS5 karışımının ortalama erime hızı ise 0,3383 gr/dk'dır. En yüksek ortalama erime hızını 3CMS10 karışımı verirken, en düşük ortalama erime hızını ise 2HMS5 karışımı vermektedir. Tüm karışımlardaki karlar yaklaşık olarak 6 dakikada erimiştir.

Tablo 5.11. Asfalt karışımlarının üst yüzeyde ısıtma performansı

Karışım tipi	Erimiş karın ağırlığı (gr)	Isıtma Süresi (sn)	Ortalama erime hızı (gr/dak)
2HMS5	77,50	240	0,3229
2HMS10	78,80	240	0,3283
2CMS5	79,20	240	0,3300
2CMS10	80,30	240	0,3346
3HMS5	78,50	240	0,3271
3HMS10	79,80	240	0,3325
3CMS5	81,20	240	0,3383
3CMS10	82,30	240	0,3429

5.2.10. Buz Eritme Deneyi Sırasında Asfalt Karışımlarının İyileştirme Performansı

Bu deneyde kırık numunelerin erime sonrası iyileşme performansı değerlendirilmiştir. Her numunenin maksimum kırılma kuvveti verileri Tablo 5.12'de verilmiştir. İyileşme oranı, ikinci kırılma kuvveti değerinin birinci kırılma kuvveti değerine bölünmesi ile bulunmuştur. Buz eritme sürecinde asfalt karışımların kendini iyileştirme oranları düşük belirlenmiştir. Çünkü erime aşamasında çatlakta çok miktarda su olduğundan dolayı iyileşme ortamı, nem hasarına maruz kalmaktadır. Çatlak yüzeylerindeki nemin, çatlakların termal iyileşmesini engelleyebileceği düşünülmektedir. 5 mm kalınlığa sahip asfalt karışımlar üzerinde asfalt karışımların iyileşme oranı belirlenmiştir.

Tablo 5.12'de görüldüğü üzere asfalt karışımların içerdiği tüfal ve SBS oranı arttıkça asfalt karışımların iyileşme oranı da artmaktadır. İyileşme oranı en yüksek karışım 3CMS10'da elde

edilirken en düşük iyileşme oranı ise 2HMS5 karışımından elde dılmıştır. Üç noktalı eğilme sonuçları incelendiği zaman asfalt karışımlardaki nemin etkisini görölmektedir. Kaplamadaki eriyen kar ve buzlu suyun donmasını önlemek ve çatlakların iyileşme performansını arttırmak için eritme işleminden sonra başka bir ısıtma işleminin uygulanması tavsiye edilmektedir.

Tablo 5.12. Buz eritme işleminden sonra örneklerin iyileşme oranı

Karışım tipi	İlk kırılma yükü (kg)	İkinci kırılma yükü (kg)	İyileşme (oranı)
2HMS5	546,34	79	14,46
2HMS10	628,31	101	16,07
2CMS5	558,78	86	15,39
2CMS10	344,02	60	17,44
3HMS5	537,56	88	16,37
3HMS10	413,50	75	18,14
3CMS5	567,20	108	19,04
3CMS10	939,36	213	22,68

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, indüksiyon ısıtmasının atık metal ve stiren-butadien-stiren (SBS) modifiyeli bitüm içeren asfalt karışım test numunelerinin kendini iyileştirmesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada ilk olarak, SBS modifiyeli bağlayıcıların genel bağlayıcı ve reolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Daha sonra bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Son olarak da atık metal içeren karışım numuneleri yüzeyinde buz ve kar oluşturularak bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki kar ve buzun erimesine etkisi incelenmiştir. Bu tez çalışmasının ana sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Modifiye bağlayıcıların, katkı kullanımıyla penetrasyon değerleri azalırken yumuşama noktaları ile viskozite değerleri artmıştır. SBS katkı malzemesinin, bitümlerin kıvamını (sertliğini), akmaya karşı direncini ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım parametresini arttırdığı belirlenmiştir. Bağlayıcı sertliği arttıkça PI değerinin de arttığı dolayısıyla ısıya karşı hassasiyetin azaldığı belirlenmiştir. Saf bağlayıcıda elastomer kullanımının karışım içinde iyi bir etkileşim oluşturduğu ve bu sayede bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin önemli derecede düşmesini sağladığı tespit edilmiştir.
- Bağlayıcıların içerisindeki SBS katkı oranı arttıkça bağlayıcıların G^* değerlerinde artış meydana gelmektedir. Katkı kullanımı ile kaymaya karşı direnç açısından fayda sağlanacağı söylenebilmektedir. DSR sonuçlarına göre saf bağlayıcıya SBS ilavesi saf bağlayıcının elastiklik özelliğini artırmaktadır. Ayrıca katkı içeriği arttıkça bağlayıcıların elastiklik özelliği artarken viskozluk özelliği azalmaktadır. Tekerlek izi parametresi açısından en iyi sonucu %3 SBS içeren bağlayıcı vermektedir. Katkı oranı arttıkça tekerlek izi direnci de artmaktadır.
- SBS katkı kullanımı ile Marshall stabilite değerleri artmıştır. Karışımlar içerisinde en yüksek stabilite değerleri 3HMS5 karışımından elde edilmektedir. Karışım numunelerinde kullanılan SBS miktarı arttıkça stabilite değerlerinde de artış meydana gelmektedir. HMS karışımlarında tüfal oranı arttıkça akma değerleri de artmıştır. En düşük akma değerinin 2HMS5 karışımı vermektedir. HMS ve CMS içeriğinin artması ile MQ değerindeki azalma süreklilik göstermektedir. Bitümlü sıcak karışımların içerdiği SBS oranı arttıkça her iki tüfal içeren karışımlar için de MQ değerlerinde azalma meydana gelmektedir.
- Nem hasarına karşı dayanım deney sonuçları değerlendirildiğinde; HMS ve CMS kullanılarak oluşturulan koşullandırmış ve koşullandırılmamış karışımların çekme dayanımı (TS) değerleri üzerinde tüfalin %50 ilavesinin %100 ilavesinden daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını değerlendirmede kullanılan çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri üzerinde ise tam tersi olarak tüfal %100 ilavesi %50 ilavesinden daha etkili olmuştur.

- HMS içeren asfalt karışımların ITSM değerleri, CMS içeren asfalt karışımların ITSM değerlerinden daha yüksektir. Ayrıca karışımlar içerisindeki SBS oranı arttıkça asfalt karışımların ITSM değerlerinde de artış meydana gelmiştir. En yüksek ITSM değerini 3HMS5 karışımı verirken, en düşük ITSM değerini ise 2CMS10 karışımı vermektedir.
- İndirekt çekme yorulma deneyinde atık metallerin kullanım oranı arttıkça karışımların yük tekrar sayıları ve yorulma ömürlerinde azalma meydana gelmektedir. Numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük gerekli yük tekrar sayısı 2CMS10 karışımından elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlarda, en yüksek yük tekrarı sayısına ise C ve 3HMS5 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Bitümlü sıcak karışımların içerdiği SBS oranı arttıkça yük tekrar sayısı artmaktadır. Deformasyonlar incelendiğinde her gerilme seviyesinde farklı sonuçlar olduğu, gerilme seviyesine bağlı olarak düzenli bir değişimin olmadığı belirlenmiştir.
- Karışım numunelerine uygulanan dinamik sünme deneylerinden elde edilen akma sayıları ve sünme modülü değerleri incelendiğinde, tüfal ve SBS kullanımı ile karışımların kalıcı birim şekil değiştirmeye dayanımında artma meydana geldiği belirlenmiştir. Tüfal türleri karşılaştırıldığında sıcak tüfal içeren karışımlarda kalıcı birim şekil değiştirmeye karşı dayanımın soğuk tüfal içeren karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. SBS kullanım oranları değerlendirildiğinde karışımdaki SBS içeriklerinin agrega ağırlığınca %2'den %3'e doğru gitmesi ile kalıcı deformasyona karşı dayanım parametrelerinde önemli bir artma olduğu belirlenmiştir. Elastik modül değerleri incelendiğinde ise tüfal ve SBS kullanımı ile karışımların elastikiyetinin azaldığı belirlenmiştir.
- İndüksiyon ısıtmasının bağlayıcı ve agregaları ısıtmazken atık metalleri ısıttığı gözlenmiştir. Asfalt karışımının sıcaklığını arttırmak için asfalt karışımına ilave atık metal parçacıklarına ihtiyaç vardır. Atık metal miktarı arttıkça sıcaklıkların arttığı belirlenmiştir. İlaveten asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı arttıkça karışımların yüzey ve maksimum sıcaklıklarında artış meydana gelmiştir.
- İndüksiyonla ısıtma yöntemi kullanıldığı zaman asfalt karışımının iyileşme seviyesinin her iyileşme döngüsünde azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedenleri hala belirsizdir. Asfalt karışımların içerisindeki tüfal oranı arttıkça iyileşme oranlarında da artış meydana gelmektedir. CMS içeren asfalt karışımlar HMS içeren asfalt karışımlara göre daha yüksek iyileşme oranı vermektedir. Asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı %2'den %3'e çıktığı zaman iyileşme oranlarında artış meydana gelmektedir. SBS içeren ve içermeyen asfalt karışımlar karşılaştırıldığı zaman SBS içeren karışımların daha yüksek iyileşme oranı verdiği görülmektedir.
- İndüksiyon ısıtmasında bu iki atık metal arasındaki HL değerindeki fark çatlak iyileşme döngüsü arttıkça artmaktadır. 60s boyunca ısıtılmış HMS karışım numuneleri genel olarak,

CMS karışım numunelerinden ($WTR > 1$) daha yüksek HL değerleri göstermiştir. Bir döngü dışında diğer döngülerde CMS > HMS olarak belirlenmiştir.

- İndüksiyonla ısıtma yöntemiyle kendini iyileştiren asfalt karışımların, buz ve kar eritme performanslarının önemli ölçüde iyileştirilebildiği belirlenmiştir. Numunelerin yüzeyindeki buz, 2 dakika içinde hızlı bir şekilde eriyerek asfalt karışımlardan ayrılmaktadır. Normal buz kalınlığının, indüksiyon ısıtmasıyla kendini iyileştiren asfaltın buz eritme süreci üzerinde çok az etkisi olduğu belirlenmiştir. Kar eritme testi söz konusu olduğunda, eritme sürecinde en etkili tüfalin soğuk tüfal olduğu belirlenmiştir. Ayrıca asfalt karışımların içerisindeki SBS oranı arttıkça karların ortalama erime hızı da artmıştır. İndüksiyonla ısıtma yöntemiyle kendini iyileştiren asfalt karışımı, buz eritme işleminde zayıf iyileştirme performansları göstermiştir. Çatlak yüzeylerindeki erimiş buzdan kaynaklanan nemin, çatlakların termal iyileşmesini engellediği belirlenmiştir. Kaplamadaki eriyen kar ve buzlu suyun donmasını önlemek ve çatlakların iyileşme performansını arttırmak için eritme sonrası başka bir ısıtma işleminin uygulanması tavsiye edilmektedir.
- Yapılan analizler sonucunda saf karışımın tasarım bitüm içeriği %4,67 olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı miktarının karışımların mekanik özelliklerine etki etmesini engellemek amacıyla tüfal ve SBS kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri tüfal ve SBS içermeyen karışımla aynı bitüm içeriğinde (%4,67) hazırlanmıştır. Bitüm içeriği farklı oranlarda da kullanılarak yeni çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Janoo, V.C. ve Korhonen, C. (1999). Performance Testing of Hot-Mix Asphalt Aggregates, US Army Corps of Engineering Project, Number: 99-20.
- [2] Roque, R., Birgisson, B., Drakos, C., Sholar, G. (2005). Guidelines for Use of Modified Binders, Florida Department of Transportation Project, 4910-4504-964-12.
- [3] Ayçiçek, S. (2011), Esnek Üstyapılarda İmalat ve Uygulama Kusurları, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- [4] Isacsson, U., Lu, X. (1995). Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art, *Materials and Structures*, 28, 139-159.
- [5] Wang, L.-B. (2012). Mechanics of asphalt: microstructure and micromechanics, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5.
- [6] BSI 2009a. BS EN 12591:2009 Bitumen and bituminous binders, Specifications for paving grade bitumens, London, England: British Standard Institute.
- [7] Domone, P. ve Illston, J. (2010). Construction materials: their nature and behaviour, CRC Press.
- [8] Traxler, R. (1936). The Physical Chemistry of Asphaltic Bitumen. *Chemical reviews*, 19, 119-143.
- [9] Zakar, P. (1971). Asphalt, Chemical Publishing Company.
- [10] Read, J. ve Whiteoak, D. (2003). The shell bitumen handbook, Thomas Telford.
- [11] Nunn, M., Brown, A., Weston, D. ve Nicholls, J. (1997). Design of long-life flexible pavements for heavy traffic, TRL report 250.
- [12] Hagos, E. T. (2008). The effect of aging on binder properties of porous asphalt concrete, TU Delft, Delft University of Technology.
- [13] <https://cdn.bartın.edu.tr/insaat/f0524f5c-98df-4ccf-8f50-40fb70f6b6dc/yolustyapisidersnotu56.pdf>, Erişim: 2 OCAK 2022.
- [14] Kanitpong, K. & Bahia, H. (2003). Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA (with discussion), *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72.
- [15] EUROPEAN_LIME_ASSOCIATION (2010). Hydrated lime: a proven additive for durable asphalt pavements—critical literature review, Report to the European Lime Association/Asphalt Task Force.
- [16] Ajam, Harith K.K. (2019). Effect of heating energy, steel fibres, bitumen types and ageing on the self-healing phenomena in hot mix asphalt, PhD thesis, University of Nottingham.
- [17] Thom, N. (2014). Principles of pavement engineering, 2nd Edition, London, UK, ICE Publishing (Institute of Civil Engineers).
- [18] Little, D. N., Lytton, R. L., Williams, D. & Kim, Y. R. (1997). Propagation and healing of microcracks in asphalt concrete and their contributions to fatigue, Marcel Dekker, New York.
- [19] Osman, S. A. (2004). The role of bitumen and bitumen/filler mortar in bituminous mixture fatigue, PhD, University of Nottingham.
- [20] Read, J. (1996). Fatigue cracking of bituminous paving mixtures, University of Nottingham.
- [21] Trask, R., Williams, H. & Bond, I. (2007). Self-healing polymer composites: mimicking nature to enhance performance, *Bioinspiration & Biomimetics*, 2, P1.
- [22] Qiu, J. (2012). Self healing of asphalt mixtures: Towards a better understanding of the mechanism, PhD Thesis, Delft University of Technology.
- [23] White, S. R., Sottos, N., Geubelle, P., Moore, J., Kessler, M. R., Srinam, S., Brown, E. & Viswanathan, S. (2001). Autonomic healing of polymer composites, *Nature*, 409, 794-797.

- [24] Hager, M. D., Greil, P., Leyens, C., Van Der Zwaag, S. & Schubert, U. S. (2010). Self-Healing Materials, *Advanced Materials*, 22, 5424-5430.
- [25] Van Der Zwaag, S. & Brinkman, E. (2015). *Self Healing Materials: Pioneering research in the Netherlands*, IOS Press.
- [26] Wool, R. P. (2008). Self-healing materials: a review, *Soft Matter*, 4, 400-418.
- [27] Craven, J. M. (1969). Cross-linked thermally reversible polymers produced from condensation polymers with pendant furan groups cross-linked with maleimides.
- [28] Dry, C. (1994). Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Materials and Structures*, 3, 118.
- [29] Li, V. C. & Yang, E.-H. 2007. Self healing in concrete materials, *Self Healing Materials*, Springer.
- [30] Schlangen, E. (2013). Self-Healing of Concrete [Online], Delft University of Technology. Available: <http://www.selfhealingconcrete.blogspot.co.uk/>.
- [31] Little, D. N. & Bhasin, A. (2007). Exploring Mechanism of Healing in Asphalt Mixtures and Quantifying its Impact, *Self healing materials*, Springer.
- [32] Andersson, H., Keller, M. W., Moore, J. S., Sottos, N. R. & White, S. (2007). Self healing polymers and composites, *Self Healing Materials*, Springer.
- [33] Bazin, P. & Saunier, J. (1967). Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes. *Proceedings of the 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Michigan, USA. PP 438-451.
- [34] Van Dijk, W., Moreaud, H., Quede ville, A. & Uge, P. (1972). The fatigue of bitumen and bituminous mixes. Presented at the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Grosvenor House, Park Lane, London, England, Sept.11-15.
- [35] Francken, L. (1979). Fatigue performance of a bituminous road mix under realistic test conditions, *Transportation Research Record*.
- [36] Castro, M. & Sánchez, J. A. (2006). Fatigue and healing of asphalt mixtures: discriminate analysis of fatigue curves, *Journal of transportation engineering*, 132, 168-174.
- [37] Si, Z., Little, D. & Lytton, R. (2002). Characterization of microdamage and healing of asphalt concrete mixtures, *Journal of materials in civil engineering*, 14, 461-470.
- [38] 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, *Strategic Highway Research Program*.
- [39] Shell, B. (1995). *The shell bitumen industrial handbook*, Thomas Telford.
- [40] Phillips, M. (1998). Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing, Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders, Luxembourg.
- [41] Bhasin, A., Little, D. N., Bommavaram, R. & Vasconcelos, K. (2008). A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties, *Road Materials and Pavement Design*, 9, 219-242.
- [42] Little, D. N., Epps, J. A. & Sebaaly, P. (2001). The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt, *National Lime Association*.
- [43] Kringos, N., Schmets, A., Scarpas, A. & Pauli, T. (2011). Towards an understanding of the self-Healing capacity of asphaltic mixtures, *Heron*, 56, 49-79.
- [44] Van Gooswilligen, G., De Hilster, E. & Robertus, C. (1994). Changing Needs and Requirements for Bitumen and Asphalts, *Proceedings Of The 6th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa, Capsa'94, Held Cape Town October 1994, Vol 2*.
- [45] Lytton, R., Chen, C. & Little, D. (2001). Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, volume IV: A viscoelastic continuum damage fatigue model of asphalt concrete with microdamage healing.

- [46] Qiu, J. 2008. Self-healing of asphalt mixes: literature review, Delft University of Technology.
- [47] Bhasin, A. & Motamed, A. (2011). Analytical models to characterise crack growth in asphaltic materials and healing in asphalt binders, *International Journal of Pavement Engineering*, 12, 371-383.
- [48] Ofori-Abebbresse, E. K. (2006). Fatigue resistance of hot-mix asphalt concrete mixtures (HMAC) using the Calibrated Mechanistic with Surface Energy Measurements (CMSE), Master Of Science, Texas A&M University.
- [49] Abo-Qudaib, S. & Suleiman, A. (2005). Monitoring fatigue damage and crack healing by ultrasound wave velocity, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 20, 125-145.
- [50] Kim, B. & Roque, R. (2006). Evaluation of healing property of asphalt mixtures, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1970, 84-91.
- [51] Theyse, H., De Beer, M. & Rust, F. (1996). Overview of South African mechanistic pavement design method, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1539, 6-17.
- [52] Grant, T. P. 2001. Determination of asphalt mixture healing rate using the Superpave indirect tensile test, University of Florida.
- [53] Tang, J., Liu, Q., Wu, S., Ye, Q., Sun, Y. and Schlangen, E. (2016). Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 113, 1029–1033.
- [54] Seo, Y. & Kim, Y. R. (2008). Using acoustic emission to monitor fatigue damage and healing in asphalt concrete, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12, 237-243.
- [55] Kim, Y. R. & Little, D. N. (1990). One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete, *Journal of engineering mechanics*, 116, 751-772.
- [56] Kim, Y. R., Little, D. N. & Burghardt, R. (1991). SEM analysis on fracture and healing of sand-asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 3, 140-153.
- [57] Pronk, A. 2005. Partial Healing, A New Approach for the Damage Process during Fatigue Testing of Asphalt Specimen. *Asphalt Concrete*, American Society of Civil Engineers.
- [58] García, Á. (2012). Self-healing of open cracks in asphalt mastic, *Fuel*, 93, 264–272.
- [59] Hefer, A. W. (2004). Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effect of water on the adhesive bond, PhD, Texas A&M University.
- [60] Zollinger, C. J. (2005). Application of surface energy measurements to evaluate moisture susceptibility of asphalt and aggregates, MSc, Texas A&M University.
- [61] Cheng, D. (2002). Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete based on surface free energy, Texas A & M University.
- [62] Good, R. J. & Van Oss, C. J. (1992). The modern theory of contact angles and the hydrogen bond components of surface energies, *Modern Approaches to Wettability*, Springer.
- [63] Garcia, A., Schlangen, E. & Van De Ven, M. (2010a). Two ways of closing cracks on asphalt concrete pavements: microcapsules and induction heating. *Key Engineering Materials*, 417, 573-576.
- [64] Boyer, R. E. & Engineer, P. S. D. (2000). Asphalt Rejuvenators “Fact, or Fable”, *Transportation systems*.
- [65] Chiu, C. & Lee, M. (2006). Effectiveness of seal rejuvenators for bituminous pavement surfaces. *Journal of Testing and Evaluation*, 34, 390.
- [66] Garcia, A., Schlangen, E., Ven, M. V. D. & Tno, D. V. V. (2011c). Crack repair of asphalt concrete with induction energy, *HERON*, 56.
- [67] Gallego, J., Del Val, M. A., Contreras, V. & Paez, A. (2013). Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing, *Construction and Building Materials*, 42, 1-4.

- [68] Sun, Y., Liu, Q., Wu, S. & Shang, F. (2014). Microwave heating of steel slag asphalt mixture, 2013 Annual Meeting of Chinese Ceramic Society's Building Materials, Professional Committees of Stone and Aggregate and Utilization of Solid Waste, SBM 2013, November 28, 2013 - December 1, 2013, Wuhan, China. Trans Tech Publications Ltd, 193-197.
- [69] Gümüşderelioğlu, M. ve Kaynak, G. (2012). Mikrodalgalar ve Uygulamaları. Bilim ve Teknik, 38-42.
- [70] Garcia, A., Schlangen, E., Van De Ven, M. & Sierrabeltrán, G. (2010b). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete, Journal of Hazardous Materials, 184, 603-611.
- [71] Al-Mansoori, T., Norambuena-Contreras, J., Micaelo, R. & Garcia, A. (2018). Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators, Construction and Building Materials, 161, 330-339.
- [72] Al-Mansoori, T., Micaelo, R., Artamendi, I., Norambuenacontreras, J. & Garcia, A. (2017). Microcapsules for selfhealing of asphalt mixture without compromising mechanical performance, Construction and Building Materials, 155, 1091-1100.
- [73] Su, J.-F., Qiu, J., Schlangen, E. & Wang, Y.-Y. (2015). Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, Construction and Building Materials, 74, 83-92.
- [74] Blaiszik, B.J., Kramer, S.L.B., Olugebefola, S.C., Moore, J.S., Sottos, N.R. ve White, S.R. (2010). Self-Healing Polymers and Composites. Annual Review of Materials Research, 40 (1), 179-211.
- [75] Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. L. & Black, M. (2002). Handbook of induction heating, CRC Press.
- [76] Haimbaugh, R. E. (2001). Practical induction heat treating, ASM international.
- [77] Lucía, O., Maussion, P., Dede, E. J. & Burdío, J. M. (2014). Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61, 2509-2520.
- [78] Garcia, A., Schlangen, E., Van De Ven, M. & Van Vliet, D. (2011b). Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers, Materials and Structures, 44, 499-508.
- [79] Liu, Q., Schlangen, H. & Van Bochove, G. (2013). The first engineered self-healing asphalt road: How is it performing ICSHM: Proceedings of the 4th International Conference on Self-Healing.
- [80] Liu Q., Xu, P., Wang, F., Jin, C., Huang, M., Dai, D., Fu, C. (2020). Deicing efficiency analysis and economic-environment assessment of a novel induction heating asphalt pavement, Journal of Cleaner Production, 273.
- [81] Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Lastra-González, P., Garcia, A. (2017). Effect of ageing and RAP content on the induction healing properties of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 179.
- [82] Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Garcia, A., Vansteenkiste, S. (2018). Effect of bitumen properties in the induction healing capacity of asphalt mixes, Construction and Building Materials, 190.
- [83] Yang, C., Xie, J., Wu, S., Amirkhanian, S., Wang, Z., Song, J., Zhou, X., Wang, F., Zhang, L. (2020). Enhancement mechanism of induction heating on blending efficiency of RAP - virgin asphalt in steel slag recycled asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 269.
- [84] Vila-Cortavitarte, M., Jato-Espino, D., Tabakovic, A., Castro-Fresno D. (2019). Optimizing the valorization of industrial by-products for the induction healing of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 228.
- [85] Li, H., Yu, J., Wu, S., Liu, Q., Li, B., Li, Y., Wu Y. (2018). Study on the gradient heating and healing behaviors of asphalt concrete induced by induction heating, Construction and Building Materials, 208.
- [86] <https://www.ozersoylar.com/tr/urunler/metaller-ve-mineraller/tufal>, Erişim: 16 OCAK 2022.

- [87] Cakıroglu, O. L., (1995). The surface oxidation of steel in industrial reheating furnaces and its effect on productivity of the mill, Istanbul Technical University.
- [88] Kök, B.V., Yılmaz, M., Guler, M. (2011). Evaluation of high temperature performance of SBS+ Gilsonite modified binder, Fuel 2011; 90, 3093-3099.
- [89] Yılmaz, M., Çelöglu, M.E. (2013). Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures, Construction and Building Materials 2013; 44, 533-540.
- [90] Koral, A.F., Aynı Performans Seviyesine Sahip Bağlayıcılarla Hazırlanan Bitümlü Sıcak Karışımların Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve Yorulma Ömürlerinin Karşılaştırılması, Fırat Üniversitesi, 2012.
- [91] N. Yusoff, M., Shaw, G.D. Airey, The effect of asphaltene on thermal properties of bitumen, Chem. Eng. Res. Des. 25 (2011) 2171–2189.
- [92] Zaniewski, J.P. ve Pumphrey, M.E, 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, Asphalt Technology Program, 107p, Morgantown, West Virginia.
- [93] Petersen, J.C, Robertson, R.E, Branthaver, J.F, Harnsberger, P.M, Duvall, J.J, Kim, S.S, Anderson, D.A, Christensen, D.W, Bahia, H.U, Dongre, R, Antle, C.E. ve Sharma, M.G, 1994. Binder characterization and evaluation volume 4: Test methods, Strategic Highway Research Program, SHRP A-370, 197p, National Research Council Washington, DC.
- [94] Altaş, Ö.Y, 2002. Bitümlü malzemeler ve karışım şartnamelerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [95] Warren, R.S, McGennis, R.B, Bahia, H.U, 1994. Superpave asphalt binder test methods an illustrated overview, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-068, Asphalt Institute, Lexington, 164p.
- [96] Öner, J. (2016). Farklı vaks türleri ile üretilen bitümlerin reolojik özelliklerinin asfalt betonu performansı üzerine etkilerinin incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [97] Behiry, A.E.A.E., (2013). Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures, Ain Shams Engineering Journal, 4, 351-363.
- [98] AASHTO T283, (2003). 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.
- [99] Francken, L., (1998). Bituminous Binders and Mixes, London, Rilem Reports, E&FN Spon, p. 352.
- [100] Kök, B.V., 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [101] Subagio, B.S., Siswosoebrotho, B.I. ve 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.
- [102] Aragao, F.T.S., Lee J., Kim, Y.R. ve 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.
- [103] Tayfur, S., Özen, H. ve Aksoy, A., 2007. Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers, Construction and Building Materials, 21(2), 328-337.
- [104] Oruç, Ş., Yoğun Granülometrilili Emülsifiye Asfalt Betonunda Çimentonun Karışım Performansı Üzerindeki Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002.
- [105] Deniz, M. T., Esnek Üstyapı Kaplamalarında Bitümle Birlikte Bağlayıcı Olarak Granüler Sülfür Kullanımının Kalıcı Deformasyona Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [106] ELE-UMATTA, Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens, Reference and Operating Manual, 1994.

- [107] Yılmaz, M., Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2011.
- [108] 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, Washington, DC.
- [109] Bausano, J., Williams, C. (2007). A New Approach to Calculating Flow Number, Unpublished Paper.
- [110] Sun, Y., Wu, S., Liu, Q., Hu, J., Yuan, Y., Ye, Q. (2017). Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating, Applied Thermal Engineering.
- [111] Bayerl, T., Duhovic, M., Mitschang, P., et al. (2014). The heating of the polymer composites by electromagnetic induction-a review, Compos, A: Applied Science and Manufacturing, 57(2014) 27-40.
- [112] Bahia, H. U., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A., & Anderson, R. M. (2001). Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design, NCHRP Report 459, National Academy Press, Washington, D.C.
- [113] Epps, J. A., Sebaaly, P. E., Penaranda, J., Maher, M. R., McCann, M. B., & Hand, A. J. (2000). NCHRP Report 444: Compatibility of a test for moisture-induced damage with Superpave volumetric mix design. TRB, National Research Council, Washington, DC, 97 s.
- [114] BS DD 213, 1993. Method for determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures, British Standards Institution, London
- [115] J. Bausano, C. Williams, A new Approach to Calculating Flow Number, Unpublished Paper, (2007).
- [116] Yalcin, E., (2021). Effects of microwave and induction heating on the mechanical and self-healing characteristics of the asphalt mixtures containing waste metal, Construction and Building Materials, 286.

ÖZGEÇMİŞ

İremgül ATICI

2019		2020	
1	100%	1	100%
2	100%	2	100%
3	100%	3	100%
4	100%	4	100%
5	100%	5	100%
6	100%	6	100%
7	100%	7	100%

■ [REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Bektaş, İ., Yalçın E., Yamaç Ö. E., Yılmaz M. 2021. “İki Farklı Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE) Plastik Atığın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı” Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(1), s339 – 346.