



T.C.

KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIK KABLO TALAŞI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ
BİTÜMLÜ KAPLAMALARIN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

MERVE AKKÖK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2025

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK KABLO TALAŞI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ
BİTÜMLÜ KAPLAMALARIN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MERVE AKKÖK

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2025

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

MERVE AKKÖK



Bu çalışma KSÜ Bilimsel Araştırma Birimi (BAP Proje No: 2022/7-3 YLS) tarafından desteklenmiştir.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ATIK KABLO TALAŞI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ KAPLAMALARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

MERVE AKKÖK

ÖZET

Bu tezde, sürdürülebilir malzeme yönetimi ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda LDPE esaslı atık kablo talaşının bitüm modifikasyonunda kullanımı araştırılmıştır. Giderek artan trafik yükleri ve iklimsel değişkenlikler, geleneksel asfalt kaplamalarda deformasyon, çatlama ve servis ömrü kısalması gibi mühendislik sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu sorunların çözümü için bitümün performansını artırmaya yönelik katkı malzemelerinin kullanımı büyük önem taşımaktadır. Mevcut elastomer katkıları maliyet, bulunabilirlik ve çevresel etkiler açısından sınırlıdır. Bu nedenle atık plastik kökenli katkıların bağlayıcı modifikasyonunda değerlendirilmesi hem teknik hem çevresel hem de ekonomik açılardan umut verici bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında atık kablo talaşı %5, %10 ve %15 oranlarında B 50/70 sınıfı bitüme ilave edilerek modifiye bitümlerin özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Saf ve modifiyeli bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme ile dinamik kayma reometresi (DSR) testleri uygulanmıştır. SEM analizleri ile katkının bitüm matrisiyle fiziksel olarak uyumluluğu doğrulanmaya çalışılmıştır.

Çalışmalar sonucunda, katkı oranı arttıkça penetrasyon değerleri düzenli olarak azalırken, yumuşama noktası değerleri artmış ve buna bağlı olarak bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki kıvamları yükselmiştir. LDPE esaslı atık kablo talaşı, elastik geri dönme kapasitesini sınırlı düzeyde artırmıştır. En yüksek kompleks kayma modülü değerini %15 atık kablo talaşı içeren bağlayıcının verdiği görülmektedir. Mikroyapısal değerlendirmelerde, SEM görüntüleri %5 ve %10 katkı oranlarında homojen dağılım sağlandığını; %15 oranında ise sınırlı kümelenme eğilimlerinin başladığını göstermiştir. Elde edilen bulgular, %10 katkı oranının mühendislik performansı ile işlenebilirlik arasında en uygun dengeyi sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Atık kablo talaşı, Bitüm modifikasyonu, Polimer katkıları, Asfalt kaplama performansı, Esnek Üstyapılar

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimler Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Temmuz/2025

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL

Sayfa Sayısı: 55

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF ASPHALT PAVEMENTS MODIFIED WITH WASTE CABLE SHAVINGS

(M.Sc. THESIS)

MERVE AKKÖK

ABSTRACT

In this thesis, the use of LDPE-based waste cable shavings in bitumen modification was investigated in line with the principles of sustainable material management and circular economy. Increasing traffic loads and climatic variability lead to engineering problems such as deformation, cracking, and shortened service life in conventional asphalt pavements. To address these challenges, the use of additives that enhance the performance of bitumen is of great importance. However, conventional elastomer additives are limited in terms of cost, availability, and environmental impact. Therefore, the incorporation of plastic-based waste materials into binder modification offers a promising approach from technical, environmental, and economic perspectives.

Within the scope of this thesis study, the effects of adding waste cable shavings to B 50/70 grade bitumen at rates of 5%, 10%, and 15% on the properties of modified bitumen were investigated. Penetration, softening point, elastic recovery, and dynamic shear rheometer (DSR) tests were applied to both neat and modified binders. SEM analyses were conducted to verify the physical compatibility of the additive with the bitumen matrix.

As a result of the studies, penetration values regularly decreased as the additive ratio increased, while the softening point values rose, thereby increasing the consistency of the binders at high temperatures. LDPE-based waste cable shavings provided a limited improvement in elastic recovery capacity. The binder containing 15% waste cable shavings exhibited the highest complex shear modulus (G^*) value. In microstructural evaluations, SEM images showed homogeneous distribution at 5% and 10% additive levels, while a tendency for limited clustering was observed at the 15% rate. The obtained findings indicate that the 10% additive ratio provides the most suitable balance between engineering performance and workability.

Keywords: Waste cable shavings, Bitumen modification, Polymer additives, Asphalt pavement performance, Sustainable material use, Flexible Pavement

Kahramanmaraş Sütçü Imam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering, July/2025

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL

Page number: 55

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, tez çalışmamın tüm safhalarında bilimsel desteğinin yanı sıra anlayış ve sabrını esirgemeyen, çalışmamın etkin bir şekilde ilerleyişi için fedakârlıklardan kaçınmayan, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum tez danışmanım Sayın hocam **Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL**'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve birikimlerini bana aktaran Sayın hocam **Prof. Dr. Murat KARACASU**'ya saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mesleki deneyimlerini paylaşarak tez çalışmama katkıda bulunan Sayın hocam **Ahmet Afşin GÜÇLÜ**'ye saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım boyunca bana gösterdikleri anlayış, sabır ve yardımlarından dolayı Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 5. Bölge Ar-Ge Başmühendisi **Murat CANPOLAT**'a ve laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederim.

Tez çalışmam için maddi destek sağlayan Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı'na (**BAP**) (Proje No: 2022/7-3 YLS) teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her konuda yanımda olan ve beni her zaman destekleyen çok değerli **Aileme** sonsuz teşekkür ederim.

MERVE AKKÖK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. ÜSTYAPIYA GELEN ETKİLER VE BİTÜM MODİFİKASYONU	10
3.1. Karayolu Üstyapısı	10
3.1.1. Esnek Üstyapı.....	11
3.1.2. Rijit Üstyapı.....	13
3.1.3. Semi Rijit Üstyapı	14
3.2. Üstyapıda Oluşan Deformasyonlar.....	15
3.3. Bitüm Modifikasyonu.....	16
3.3.1. Modifikasyon Yöntemleri ve Performans Beklentileri	17
3.3.2. Modifiye Bitüm Katkı Maddelerinin Özellikleri.....	18
3.3.3. Yaygın Modifiye Bitüm Katkıları ve Sınıflandırılmaları	18
4. MATERYAL VE METOT	22
4.1. Malzemeler	22
4.1.1. LDPE Esaslı Atık Kablo Talaşı	22
4.1.1.1. Atık Kablo Geri Dönüşüm Tesisi ve Elde Edilme Süreci	23
4.1.1.2. Atık Kablo Yaygın Kullanım Alanları	24
4.1.2. Asfalt Çimentosu (AC).....	25
4.2. Kullanılan Yöntem	25
4.2.1. Penetrasyon Deneyi	25
4.2.2. Yumuşama Noktası (Ring and Ball) Deneyi	26
4.2.3. Elastik Geri Dönme Deneyi.....	27
4.2.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi	29
4.2.5. Uygulanan Kimyasal ve Mikroyapı Analizleri.....	30
4.2.5.1. FTIR (Fourier Transform Infrared) Spektroskopisi	30
4.2.5.2. TGA (Thermogravimetric Analysis)	30
4.2.5.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi.....	31

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	31
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
5.1. Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi	33
5.1.1. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Sonuçları.....	33
5.1.2. Elastik Geri Dönme ve Depolama Kararlılığı Bulguları	37
5.1.3. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Sonuçlarının İncelenmesi	38
5.2. Kimyasal ve Mikroyapısal Bulgular.....	40
5.2.1. FTIR Analizi Bulguları.....	40
5.2.2. TGA Analizi Bulguları	42
5.2.3. SEM Görüntüleme ve Yorumlaması	44
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

TS EN	: Türk Standardı
AC	: Asfalt Çimentosu
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
LDPE	: Low Density Polyethylene (Düşük Yoğunluklu Polietilen)
PE	: Polyethylene (Polietilen)
PET	: Polyethylene Terephthalate (Polietilen Tereftalat)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TGA	: Thermogravimetric Analysis (Termogravimetrik Analiz)
%	: Yüzde
°C	: Santigrat derece
g	: Gram
μm	: Mikrometre (10^{-6} metre)
min	: Dakika (zaman birimi)
rpm	: Revolutions per minute (dakikadaki devir sayısı)
T_g	: Cam geçiş sıcaklığı
G^*	: Kompleks Kayma Modülü (DSR parametresi)
δ	: Faz Açısı (DSR parametresi)
E	: Elastisite Modülü
σ	: Gerilme (Stress)
ε	: Birim Uzama
μ	: Poisson Oranı
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
mm	: Milimetre
ER	: Elastik Geri Dönme
OL	: İlk Uzunluk
D	: Son Ara Mesafe
Pa	: Pascal (gerilme)
$G^*/\sin\delta$	: Tekerlek İzi Dayanımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Üstyapı Tipleri ve Gerilme Dağılışı (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019)	11
Şekil 3.2 Bandaj Yüğü Altında Üstyapıda Oluşan Deformasyon (Şimşek, 2021).....	12
Şekil 3.3 Üstyapıda oluşan deformasyonlar (İBB, 2001).....	16
Şekil 3.4 Fiziksel modifiyer ve katkı tipleri (KGM, 2021)	19
Şekil 4.1 LDPE esaslı atık kablo talaşı.....	23
Şekil 4.2 Kablo geri dönüşüm tesisi çalışma aşamaları (Suny Group, 2024)	23
Şekil 4.3 Penetrasyon deney cihazı (UTEST, KGM 5. Bölge)	26
Şekil 4.4 Yumuşama noktası deney seti (UTEST, KGM 5. Bölge).....	26
Şekil 4.5 Elastik geri dönme deney aşamaları.....	27
Şekil 4.6 Düktilite ve elastik geri dönme kalıpları.....	28
Şekil 4.7 Dinamik kayma reometresi deney cihazı (KGM 5. Bölge).....	29
Şekil 4.8 Mikroskobik analiz laboratuvarı-ÜSKİM	31
Şekil 4.9 Deney numunelerinin hazırlanması (a), (b), (c)	32
Şekil 5.1 Katkı oranına göre penetrasyon grafiğı.....	35
Şekil 5.2 Katkı oranına göre yumuşama noktası grafiğı	36
Şekil 5.3 Saf ve katkılı bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*)-sıcaklık ilişkisi	39
Şekil 5.4 Saf ve katkılı bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ -sıcaklık ilişkisi	40
Şekil 5.5 FTIR spektrum grafiğı ve kütüphane eşleşme listesi-ÜSKİM	41
Şekil 5.6 Atık kablo talaşı TGA sonuç grafiğı -ÜSKİM	43
Şekil 5.7 %5 LDPE Katkılı Bağlayıcının Mikroyapısal SEM Görüntüleri.....	45
Şekil 5.8 %10 LDPE Katkılı Bağlayıcının Mikroyapısal SEM Görüntüleri.....	45
Şekil 5.9 %15 LDPE Katkılı Bağlayıcının Mikroyapısal SEM Görüntüleri.....	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 LDPE Esaslı Atık Kablonun Özellikleri	22
Çizelge 4.2 Uygulanan deneyler ve kullanılan standartlar.....	25
Çizelge 4.3 Modifiye bitüm karışım tasarımı.....	32
Çizelge 5.1 Penetrasyon deney sonuçları	33
Çizelge 5.2 Yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	35
Çizelge 5.3 Elastik geri dönme deneyi sonuçları	37



1. GİRİŞ

Günümüzde karayolu ulaşım ağlarının genişlemesi ve taşıt trafiğinin yoğunlaşması, yol üstyapılarında kullanılan malzemelerden yüksek mühendislik performansı beklentisini artırmaktadır. Şehirleşmenin hız kazanması, sanayi faaliyetlerinin yaygınlaşması ve taşımacılık hacminin büyümesi, asfalt kaplamaların hem yük taşıma kapasitesini hem de iklim koşullarına karşı direncini artırmayı zorunlu kılmaktadır. Ancak yol kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bitüm, sıcaklık değişimlerine duyarlı viskoelastik bir yapıya sahip olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklarda deformasyon, düşük sıcaklıklarda ise çatlama gibi sorunlara açık hale gelmektedir. Trafik yükü altında elastikiyetinin yetersiz kalması da yorulma performansını olumsuz etkilemektedir. Bu sorunlar, yol ömrünün kısalmasına ve bakım-onarım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır.

Esnek üst yapılarda kullanılan bitümlü bağlayıcılar, hem viskoelastik hem de termoplastik özellikler gösteren karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu bağlayıcılar, sıcaklık ve yükleme süresine bağlı olarak hem akışkan gibi davranabilir hem de elastik bir yapı sergileyebilir. Yüksek sıcaklıklarda viskoz özellikler baskın hale gelerek deformasyona yol açarken, düşük sıcaklıklarda elastik davranış yetersiz kalmakta ve çatlama riski artmaktadır. Termoplastik karakteri sayesinde ısı etkisiyle şekil değiştirebilmesi avantaj sağlasa da, bu durum performansın çevresel koşullara karşı hassas olmasına neden olur. Dolayısıyla, bitümlü bağlayıcıların uzun ömürlü ve dayanıklı olabilmesi için bu özelliklerin dengelenmesi ve gerektiğinde uygun katkı maddeleriyle modifiye edilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda, modifikasyonda döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda plastik esaslı atıkların değerlendirilmesine yönelik yaklaşımlar ön plana çıkmıştır. Özellikle düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) içeren endüstriyel atıklar, bağlayıcı ile uyumlu şekilde karıştırılarak modifiye bitüm üretiminde kullanılabilir hale getirilmektedir. Bu tür uygulamalar, hem mühendislik performansını yükseltmekte hem de atık miktarını azaltarak çevreye katkı sağlamaktadır. Ayrıca yerli ve düşük maliyetli bu atıkların kullanımı, ithal katkı maddelerine olan bağımlılığı da azaltmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kablo soyma ve ayrıştırma işlemleri sonucunda ortaya çıkan LDPE esaslı atık kablo talaşının, bitümlü bağlayıcılarda modifikasyon malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elektrik kablolarının geri dönüşüm sürecinde ortaya çıkan ve genellikle düzenli depolama ile bertaraf edilen bu atığın asfalt

bağlayıcıda değerlendirilmesiyle hem esnek üstyapı performansına olan etkileri analiz edilecek hem de çevreye zarar verme potansiyeli olan bu atık üretime kazandırılarak kaynak verimliliği artırılacak ve sürdürülebilir altyapı uygulamaları yoluyla ekonomik katkı sağlanmış olacaktır.

Bu çalışma, LDPE esaslı atık kablo talaşı kullanılarak modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların mühendislik özelliklerini laboratuvar ortamında deneysel olarak incelemektedir. Ancak çalışma; yalnızca saf bitüm bazında gerçekleştirilmesi, farklı polimer türlerinin ve saha uygulamalarının kapsam dışı bırakılması, analiz cihazlarının teknik sınırlamaları ve katkı oranlarının %5–15 aralığıyla sınırlı tutulması gibi bazı kısıtlar içermektedir. Ayrıca, asfalt karışımı düzeyinde performans testleri yapılmamış ve atık malzemenin geri dönüşüm süreçlerine ilişkin uygulama detayları değerlendirilmemiştir.

Bu tez altı bölümde ele alınmıştır.

Bölüm 1, araştırmanın önemi, amacı, kapsam ve sınırlılıkları verilerek çalışmanın neden gerçekleştirildiği hakkında bir giriş sunmaktadır.

Bölüm 2, geleneksel ve modifiye ve atık malzeme kullanımı konularında yapılan ulusal ve uluslararası araştırmalar sistematik biçimde değerlendirilmiş ve literatürdeki güncel araştırmalar analiz edilmiştir.

Bölüm 3, çalışma konusunun dayandığı teorik altyapı ve kuramlar açıklanmıştır.

Bölüm 4, tez kapsamında kullanılan deneysel yöntemler, malzeme özellikleri, katkı oranları ve test protokolleri detaylı biçimde tanımlanmıştır. Numune hazırlama süreci, katkı granüllerinin üretimi, bitüm ile homojen karıştırılması ve deneysel analizler sırasıyla açıklanmıştır.

Bölüm 5, deneysel analizlerden elde edilen bulgular tablo ve grafiklerle sunulmuş, her bir test sonuçları (penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme, DSR, FTIR, TGA, SEM vb.) ayrı başlıklar altında incelenmiş ve kablo talaşı katkısının performansa etkileri kapsamlı biçimde tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, hangi katkı oranının optimum değer sunduğu belirlenmiş ve katkının bağlayıcı üzerindeki etkisi teknik parametrelerle desteklenmiştir.

Bölüm 6, araştırmanın genel değerlendirmesi yapılmış ve deneysel bulgular doğrultusunda ulaşılan sonuçlar özetlenmiştir. Ayrıca çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında sektörel uygulamalara yönelik öneriler geliştirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı türlerine ilişkin ulusal ve uluslararası literatürde yer alan çalışmalar incelenerek, atık temelli katkı malzemelerinin performansa etkileri ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirmeleri ortaya konulmuştur.

Shi ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, SBS ile modifiye edilmiş bitümün yaşlanma ve gençleştirme sonrasındaki performansı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada katkı maddeleri olarak SBSMB ve 80/100 penetrasyonlu bitüm (90BB) kullanılmıştır. Gençleştirilmiş bitümün yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci, termal çatlama direnci, mikro morfolojisi ve termal stabilitesi MSCR, ABCD, AFM ve TGA testleri ile incelenmiştir. MSCR test sonuçlarına göre yüksek sıcaklıkta SMB ile gençleştirilmiş bitüm 90BB ile gençleştirilmiş bitüme göre yüksek trafik yüklerinde daha iyi performans gösterirken ABCD test sonuçlarına göre düşük sıcaklıkta 90BB ile gençleştirilmiş bitümün çatlama direnci, SMB ile gençleştirilmiş bitümünkinden daha iyi olduğu görülmüştür. AFM testleri ile SMB ile gençleştirilmiş bitümün ve 90BB ile gençleştirilmiş bitümün mikroskobik morfoloji incelenmiştir. Buna göre; 90BB ile gençleştirilmiş bitümde 90-BB içeriğinin artmasıyla arı benzeri yapıların sayısı azalmış, hacmi ise artmıştır. TGA test sonuçlarına göre 90BB içeriği %20'den fazla olduğunda, 90BB ile gençleştirilmiş bitümün termal stabilitesinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

Erkuş ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada, Irak'tan temin edilen ve bir tür doğal asfalt (NA) olan Gilsonit kullanımının bitüm özelliklerine etkileri araştırılmış ve SBS modifikasyonu ile karşılaştırılmıştır. Bitümlü bağlayıcılara %20, %35, %50 oranlarında Gilsonit ve %2, %3, %4 SBS ilave edilmiştir. Çalışmada %20 Gilsonit ilavesiyle elde edilen modifiye bitümün, yüksek ve düşük sıcaklıklarda %3 SBS modifiyeli bitüme benzer performans gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca %35 NA modifiyeli bitüm içeren bitümlü karışımların plastik deformasyonlara dayanıklılık açısından %4 SBS modifiyeli bitümle üretilen karışımlardan daha iyi olduğu görülmüştür. %20 NA ile hazırlana bitümlü karışımların, %4 SBS modifikasyonuna göre üretim sırasında işlenebilirlik sorunu yaşamadan, yüksek sıcaklıklarda ağır yükleri taşıma potansiyelinin daha yüksek olduğu bulunmuştur. NA modifikasyonu, düşük sıcaklıklarda sertlik açısından avantajlar gösterirken, SBS modifikasyonu, yüksek sıcaklıklarda daha elastik davranış sergilediği görülmüştür.

Kök ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, SBS ile modifiye edilmiş bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda yapışma özellikleri araştırılmış ve özellikle bağlayıcıların -1 C, -3 C ve -5 C'deki kohezyon davranışına odaklanarak, SBS katkı maddelerinin asfalt karışımların performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada Türkiye'deki TÜPRAŞ Rafineri'sinden temin edilen B160/220 bitüm ve Kraton D-1101 SBS polimeri kullanılmıştır. Birtakım deneyler sonucunda bağlayıcılara uygun seviyelerde SBS eklenmesi düşük sıcaklıklardaki kohezyon özelliklerini geliştirdiği, mekanik yükleme altındaki davranışlarını etkilediği ve soğuk iklimlerde asfalt karışımlarının genel performansını iyileştirdiği görülmüştür.

Kök ve Çolak (2011) tarafından yapılan çalışmada, CR ve SBS ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik davranışını ve sıcak asfalt karışımlarında yorulma performansı incelenmiştir. CR ile modifiye edilmiş bitüme rotasyonel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometrisi (DSR) ve geleneksel bağlayıcı testleri uygulanmıştır. Hem SBS hem de CR ile modifiye edilmiş bağlayıcıda, artan katkı içeriğiyle birlikte sıcaklık duyarlılığında azalma gözlenmiştir. CR ile modifiye edilmiş bitüm, düşük frekansta aynı kompleks modülde SBS ile modifiye edilmiş bitümden daha düşük faz açısı sergileyerek daha elastik bir tepki gösterdiği görülmüştür. Genel olarak reolojik ve mekanik test sonuçları, CR modifikasyonun, bitüm ve karışım özellikleri açısından SBS modifikasyonuna kıyasla üstün performans sergilemiştir. %10 CR ile modifiye edilmiş karışımlar ilk çatlamadan sonra yüksek bir deformasyon oranı göstermiş bununla birlikte yorulma testi sonuçlarına göre etkin CR içeriği bitümün ağırlığının %8'i olarak belirlenmiştir. Çalışma, %8 CR modifikasyonunun, kalıcılık ve yorulma özellikleri, sertlik modülü ve genel karışım performansı açısından %4 SBS modifiyeli karışımla karşılaştırılabilir performans sergilediğini göstermiştir. Laboratuar test sonuçlarına ve performans değerlendirmelerine dayanarak, asfalt karışımlarda SBS modifikasyonuna eşdeğer performansa ulaşmak için en uygun seviye olarak %8 CR içeriği olduğu tespit edilmiştir.

Özdemir ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, salgın nedeniyle tüketim sonucu sayısı artan atık yüz maskelerinin (WFM) bitüm katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Öğütülmüş WFM'ler bitüme %1, %1,5, %2, %2,5 ve %3 oranlarında ilave edilmiştir. Modifiye edilmiş bitüm numunelerine Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ile frekans tarama testi uygulanmıştır. Saf bitüm ile WFM modifiyeli

bitüm kıyaslandığında WFM ilavesiyle daha yüksek kompleks modülü (G^*) elde edilmiş ve asfalt bağlayıcıların tekerlek izi performansında artış gözlenmiştir.

Hall ve White (2021) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş plastik ve geleneksel polimerlerle (SBS ve EVA) ile modifiye edilmiş bitümün yaşlanma ile reolojik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışmalar, atık plastiklerle modifiye edilmiş asfalt karışımlarının daha iyi yorulma direnci sergilediğini ve modifiye edilmemiş bitümle karşılaştırıldığında daha uzun yorulma ömrüne yol açtığını göstermiştir. MR6 gibi atık plastik bağlayıcı değiştiricilerin kullanımının asfalt karışımların modülünü % 120-150 oranında arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca PET gibi atık plastiğin eklenmesinin, sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu iyileştirebileceği tespit edilmiştir. Atık plastiklerin bitümlü bağlayıcılara ve asfalt karışımlarına dahil edilmesi, deformasyon direnci, yorulma direnci, yaşlanma direnci, modül ve tekerlek izi performansı dahil olmak üzere çeşitli performans yönlerinin iyileştirilmesinde umut verici sonuçlar içerdiği tespit edilmiştir.

Soliman ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada, donma-çözülme döngüsü yaşanan soğuk bölgelerde plastik atıkların asfalt karışımlarına dahil edilmesinin faydaları incelenmiştir. Araştırmada Naylon bazlı (NP) ve Polyester bazlı (PP) olmak üzere iki tür geri dönüştürülmüş plastik pelet kullanılmıştır. Modifiye bağlayıcılar 58°C'de gelişmiş elastik davranış göstermiştir. Naylon bazlı plastik peletlerle modifiye edilmiş bağlayıcıların depolama modülü, %2 dozaj için %62,5, %4 dozaj için %952,4 artışla önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Benzer şekilde, polyester bazlı plastik topaklarla modifiye edilmiş bağlayıcılar, %2'lik bir dozaj için %133,0'lık bir artış ve %4'lük bir dozaj için %1875,6'lık bir artış sergilediği görülmüştür. Her iki plastik pelet türünün eklenmesi, değiştirilmiş bağlayıcıların düşük sıcaklık davranışını önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Değiştirilen tüm bağlayıcılar, -18 °C'lik BBR test sıcaklığında düşük sıcaklıkta çatlama için Superpave gerekliliklerini karşılamıştır. Çoklu Gerilim Sünme ve Geri Kazanım (MSCR) test sonuçlarına göre, modifiye edilmiş bağlayıcılar gelişmiş elastik tepki ve tekerlek izi direnci sergilemiştir. Bu bulgular sonucunda, geri dönüştürülmüş plastik peletlerin bitümlü bağlayıcılar için değiştirici olarak kullanılmasının, düşük sıcaklık özelliklerinden ödün vermeden elastik davranışta, tekerlek izi direncinde ve genel performansta iyileştirmelere yol açabileceği tespit edilmiştir.

Sarışın ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, elastomerik ve plastomerik katkı maddelerinin polimer modifiyeli bitümün performansı üzerindeki etkileri, yüksek

sıcaklık davranışını iyileştirmeye ve hibrit modifikasyon yoluyla maliyetleri düşürmeye odaklanarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucuna hibrit polimerlerdeki plastomerik katkı maddesinin bitüm numunelerinin esnekliğini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Hibrit polimerlerin kullanılması, hem düşük hem de yüksek frekanslarda karışımın tekerlek izi direncini arttırdığı görülmüştür. Her iki katkı maddesinin de bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Plastomerik katkı içeren bitüm numunelerinin, ara sıcaklıklarda en yüksek $G^* \cdot \sin \delta$ değerini gösterdiği görülmüştür.

Gawande ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada, sert plastik atık parçacıkları belirli oranlarda bitüme eklenerek bunların esnek kaplamalarda yeniden kullanılabilirliğinin etkin yolları araştırılmıştır. Ağırlıkça yaklaşık %5-10 oranında atık plastik ilavesiyle elde edilen modifiye bitümün kullanılması, Marshall stabilitesini, mukavemetini, yorulma ömrünü ve diğer arzu edilen özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmeye yardımcı olmuş, bu da uzun ömürlülüğü ve kaplamayı iyileştirmiştir. Ayrıca atık plastiklerin yol ve lamine çatı imalatında kullanılmasının büyük miktarda atık plastiğin tüketilmesine yardımcı olmasıyla çalışmanın çevre dostu bir sürece eşlik ettiği vurgulanmıştır.

Köse ve Çelik (2022) tarafından yapılan çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) türündeki atık plastiklerin pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünlerin IKA (ılık karışım asfalt) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Piroliz ürünleri (bitüm ağırlığınca %6 oranında) saf bitümle (B50/70) modifiye edilerek 3 farklı formda katkılı bitüm hazırlanmış ve saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri yapılarak katkıların bitüm üzerindeki fiziksel değişimleri araştırılmıştır. Optimum asfalt içeriği Marshall yöntemi ile elde edilmiş ve modifiye edilmiş tüm karışımlarda kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, piroliz çarının saf bitümü sertleştirirken, vaks ürününün saf bitümü yumuşattığı göstermektedir. Çar ürününün etkisiyle bitümün penetrasyonu azalırken, yumuşama noktası artmakta, vaks üründe ise tersi sonuçlar elde edilmiştir. IKA'ların Marshall stabilite değeri, şartname limit değerlerini sağladığı kaydedilmiştir.

Rudram ve Ramavathu (2018) tarafından yapılan çalışmada, çöplükler gibi çeşitli yerlerden elde ettikleri plastik atıklar (poşet, bardak, su şişesi vb.) kullanılmıştır. Toplanan atık plastikler kurutulup parçalama makinesi kullanılarak 2,36 mm ve 4,75 mm arasında değişen boyutlarda parçalanmıştır. Yol inşaatında kullanılacak agregalar 165 °C ye kadar ısıtılır ve 45 saniye boyunca sıcak agregalara ufalanmış plastik eklenir ve agregası üzerinde

homojen bir şekilde karıştırılmış ve yaklaşık 30 ile 60 saniye içerisinde plastiklerin agregası üzerinde homojen olarak dağıldığı gözlenmiştir. Plastikler ayrıca iyi bağlanma özelliğine sahip olması için bitüm gibi 65 °C ısıtılmış, sonraki aşamada plastik ile kaplanmış agregası 155-165 °C sıcaklık aralığındaki bitüm ile karıştırılarak yol yapımında kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere penetrasyon indeksi, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası testi, Marshall kararlılığı gibi testler uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre polimer yüzdesindeki artışın penetrasyon değerini azalttığı yani bitümün sertliğini arttırdığı tespit edilmiştir. Bitüme plastik atık ilavesi ile süneklik azalmış, polimer yüzdesinin artmasıyla parlama noktası artmıştır. Ayrıca çalışma sonuçlarına göre plastik atık ilavesi ile yumuşama noktası değerinde artış görülmüştür.

Aldagari ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş PET ve kırıntı kauçuğu (CR) atık bitkisel yağ ile fonksiyonel (işlevsel) hale getirilerek elde edilen çıktılar bitümde modifiye edici olarak kullanılmış ve performansları karşılaştırılarak incelenmiştir. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) test sonuçlarına göre İşlevselleştirilmiş PET ve işlevselleştirilmiş kırıntı kauçuğu bitüm ile bağlanmada gelişme göstermiştir. Daha sonra işlevselleştirilmiş PET (PEToil) ve işlevselleştirilmiş kırıntı kauçuk (CROil) bitüme ayrı ayrı ilave edilmiş ve modifiye bitümlerin faz ayrımı ve termomekanik özellikleri belirlenmiştir.

Laboratuvar deney sonuçlarına göre PEToil granülleri ile modifiye edilmiş bitüm, CROil ile modifiye edilmiş bitümden (7.50 °C) daha düşük bir yumuşama noktası farkı (5.63 C) göstermiştir. Bu, PEToil ile işlenmiş granüllerin bitümle CROil ile işlenmiş granüllerden daha yüksek uyumluluğa sahip olduğunu göstermiştir. İki numune üzerinde tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin(8)$) karşılaştırıldığında PEToil ile modifiye edilmiş bitümün, CROil ile modifiye edilmiş bitüme kıyasla kalıcı deformasyonlara karşı daha yüksek direnç sağladığı saptanmıştır. Döngüsel yüklemeler altında CROil ile modifiye edilen bitümün yorulma çatlamasına karşı daha yüksek direnç gösterdiği bulunmuştur. BBR test sonuçlarına göre saf bitüme kıyasla, PEToil ile modifiye edilmiş bitüm ve CROil ile modifiye edilmiş bitümün düşük sıcaklıktaki çatlamaya karşı direnci sırasıyla %69,25 ve %71,34 oranında iyileşme göstermiştir.

Timakov ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş plastik kullanarak bitümlü karışımların modifikasyon olanakları incelenmiştir. Çalışmada yüksek basınçlı proses kullanılarak üretilen düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kullanılmıştır. Katkı maddesi ilavesi sonucu bitümün fiziksel özelliklerindeki değişim test edilmiştir.

Araştırma sonuçlarına göre saf bitüme %2-3 polimer eklenmesinin, ana fiziksel parametreleri (penetrasyon, süneklik, yumuşama) karşılayan bitüm elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca polimer atığının maksimum %25 oranında bitüme eklenebilir olduğu ancak bunun sıcak iklimlerde kullanmaya elverişli olduğu da belirtilmiştir.

Akalın ve Karacasu (2020) tarafından yapılan çalışmada, düşük maliyeti sebebiyle ülkemizde kullanım alanı fazla olan sathi kaplamaların agrega-bitüm ilişkisi incelenmiştir. Agrega olarak kireçtaşı ve bazalt cinsi agregalar; bitüm olarak 50/70 ve 70/100 penetrasyonlu bitümler; katkı olarak ise %10 atık lastik ve %1 Polivinil Klorür (PVC) bitüm ile modifiye edilerek kullanılmıştır. Oluşturulan numuneler üzerine Soyulma ve Yapışma mukavemeti deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre atık lastik ile modifiye edilmiş olan bitüm ve kireçtaşı en iyi performansı sağlarken PVC talaşı atıklarının asfalt karışımının dayanıklılığına olumlu bir etkisi gözlenmemiştir. Ayrıca atık lastik ve PVC talaşının, agrega ve bitüm arasındaki adezyon kuvvetini arttırdığı vurgulanmıştır.

Geçkil ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, atık PET katkısının bitümlü sıcak karışımların nem direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bitüm içerisinde PET katkısının homojen bir dağılım göstermesi amacı ile TEO (Trietanolamin) kimyasalı kullanılmıştır. Bu amaçla saf bitüme %2, %4, %6, %8 ve %10 oranında PET ilavesi yapılmış ve modifiye bitüm üzerine fiziksel deneyler (düktilite, penetrasyon, yumuşama noktası) yapılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen verilere göre %6 PET ilaveli modifiye bitümün diğer numunelere göre en iyi performansı sergilediği gözlenmiştir. Bu %6 PET içeren numunenin ayrıca SEM cihazı ile morfolojik görüntüsü alınarak bitüm-polimer uyumluluğuna bakılmıştır. Kalıcı Marshall Stabilesi (RMS) deney sonuçlarına göre %8 PET katkılı karışımda nem hasarına karşı direncin diğer numunelere göre en yüksek değerde olduğu bulunmuştur.

Bektaş ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) atıklarının asfalt bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliğini ve bu katkının bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Batman TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı bitüm, iki farklı LDPE türü (L1 ve L2) ile çeşitli oranlarda (%1, %2, %3 ve %4) modifiye edilmiştir. Deneyler kapsamında penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozite ve PI (penetrasyon indeksi) gibi fiziksel özellikler belirlenmiştir. Sonuçlar, katkıların artmasıyla birlikte penetrasyon değerlerinin azalacağını, yumuşama noktası ve viskozitenin ise yükseleceğini göstermiştir. Özellikle, L1 katkısı,

L2'ye kıyasla daha yüksek viskozite ve PI değerleri ile daha üstün performans sergilemiştir. Bu bulgular, LDPE atıklarının asfalt üretiminde çevresel faydalar sağlayarak maliyet etkin bir yöntemle bitüm performansını geliştirebileceğini ortaya koymaktadır. Çalışma ile geri dönüşümlü plastiklerin asfalt uygulamalarında kullanılabilirliğine yönelik literatürdeki bilgi boşluğunu doldurmak amaçlanmıştır.

Atasağun (2021) tarafından yapılan çalışmada, biyokütle ve plastik atıkların 1:1 oranında pirolize edilmesiyle elde edilen piroliz çarının bitüm modifikasyonunda kullanımı araştırılmıştır. Çalışmada, katkının bitümün viskozite, sıcaklık hassasiyeti ve tekerlek izi deformasyonlarına karşı dayanıklılığı üzerindeki etkileri; penetrasyon indeksi, dönel viskozite ve DSR deneyleri ile incelenmiştir. Literatürde ilk kez uygulanan bu hammadde kombinasyonunun, yüksek kaliteli piroliz katkıları sunduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, piroliz çarının saf bitümün özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Bitümün viskozitesini %33–83 oranında artırarak yüksek sıcaklık performansını geliştirdiği; penetrasyon değerini düşürüp sertliği artırdığı ve yumuşama noktasını yükselttiği tespit edilmiştir. Bu etkiler, bitümün akmaya karşı direncini ve sıcaklık dayanımını güçlendirmiştir. Böylece piroliz çarının, bitüm modifikasyonunda etkili bir katkı maddesi olduğu ortaya konmuştur.

Özdemir ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, çevresel bir soruna çözüm üretmek ve bitüm performansını artırmak amacıyla, iki farklı türde atık düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kullanılarak modifiye bağlayıcılar hazırlanmış ve bu bağlayıcıların özellikleri incelenmiştir. Araştırmacılar, LDPE (A) ve LDPE (B) olmak üzere iki farklı katkı maddesini, bitüm içine sırasıyla %1, %2, %3 ve %4 oranlarında eklemişlerdir. Daha sonra, Dinamik Kesme Rhoemeter (DSR) kullanılarak, sıcaklık ve frekans farklılıklarında bu modifiye bindirlerin davranışları incelenmiştir. Deneysel olarak, katkı maddelerinin artırılmasıyla bindirin kompleks modülünün (G^*) arttığı gözlemlenmiş, özellikle LDPE (A) katkısının daha yüksek etkiler sağladığı belirlenmiştir.

Yapılan araştırmalara bakıldığında, modifiye bitüm ve modifiye edilmiş bitümlü kaplamalar üzerine pek çok yönden (performans, penetrasyon, süneklik, yumuşama noktası, nem direnci, SEM, FTIR, soyulma ve yapışma mukavemeti testi vb.) testler uygulanmış her katkı maddesi için ulusal ve uluslararası şartname limitleri çerçevesinde bulunan sonuçlar değerlendirilmiştir.

3. ÜSTYAPIYA GELEN ETKİLER VE BİTÜM MODİFİKASYONU

Bu bölümde, karayolu üstyapı sistemleri ve bitüm modifikasyonu kavramsal çerçevede ele alınarak; katkı maddelerinin özellikleri, uygulama yöntemleri, performansa etkileri ve atık temelli modifikasyon yaklaşımları teknik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla incelenmiştir.

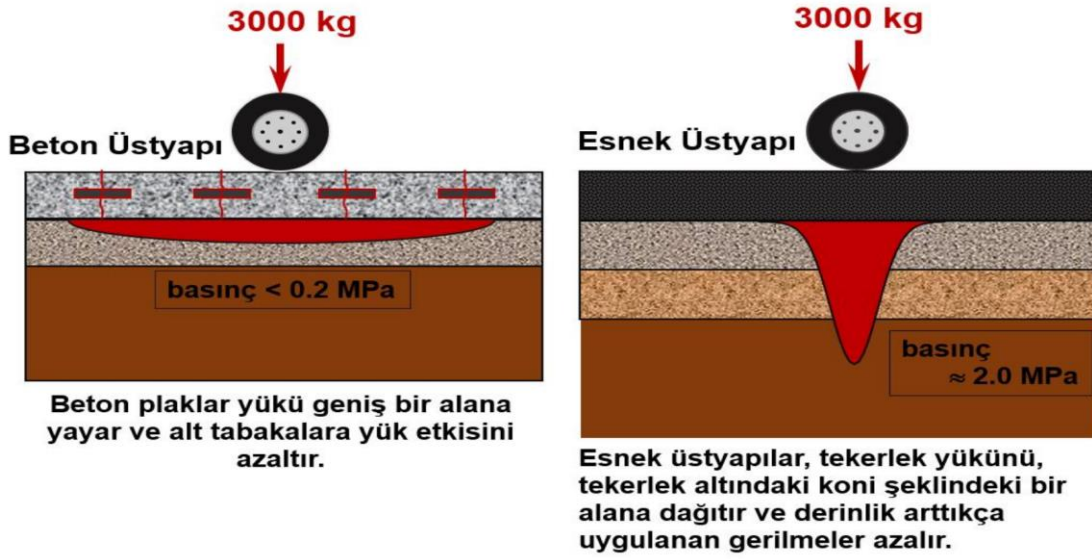
3.1. Karayolu Üstyapısı

Karayolu yapıları, belirli geometrik standartlara uygun olarak seçilen güzergâhlar boyunca, doğal zeminin istenen kotlara getirilmesiyle ve motorlu taşıtların belirli hız, güvenlik ve konfor koşulları altında hareket edebilmesini sağlamak amacıyla inşa edilen tüm yapıları kapsar (İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), 2001).

Karayolu yapıları genel olarak altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana başlık altında incelenir. Üstyapı, trafik yüklerinden kaynaklanan gerilmeleri altyapıya ileterek bu gerilmelerin azaltılmasını sağlar. Aynı zamanda sürüş sırasında tekerlek-yol temasında konforlu ve güvenli bir yüzey sunmayı amaçlayan, çok katmanlı bir sistemdir. Bu sistem; alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur. Her kaplama türünün farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle kaplama türü; yolun kullanım amacı ve trafik yoğunluğu, proje maliyeti, yerel iklim koşulları ve çevresel etmenler gibi çeşitli kriterler göz önünde bulundurularak seçilir. Şekil 3.1’de, esnek ve rijit üstyapı türleri ile bu sistemlerdeki gerilme dağılımları görsel olarak sunulmuştur (Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), 2019).

Üstyapılar genel olarak üç ana gruba ayrılır:

- i. Esnek kaplamalar,
- ii. Rijit kaplamalar,
- iii. Kompozit kaplamalar.



Şekil 3.1. Üstyapı Tipleri ve Gerilme Dağılışı (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019)

3.1.1. Esnek Üstyapı

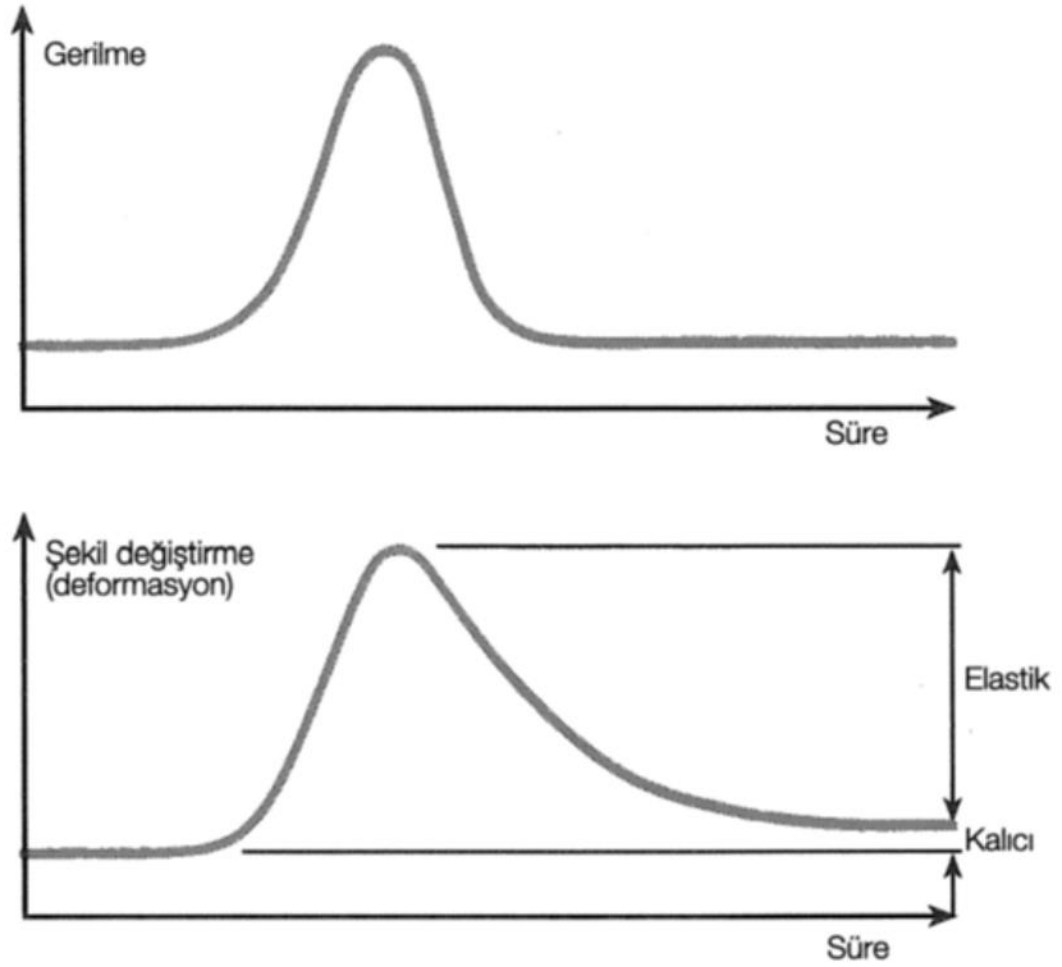
Esnek üstyapılar, trafik etkisiyle oluşan gerilmeleri altyapıya kademeli olarak aktaran ve bitümlü kaplama tabakalarından oluşan esnek sistemlerdir. Bu yapı sistemlerinde, alt tabakalar genellikle granüler malzemelerden oluşurken, üst tabakalar bitümlü karışımlarla hazırlanarak hem düzgün bir yüzey hem de yüksek dayanıklılık ve sürüş konforu sağlanması hedeflenir (İBB, 2001). Esnek üstyapılarda meydana gelen bozulmaların başlıca iki temel nedeni vardır:

- A. Mekanik etkiler – taşıt trafiğinin neden olduğu gerilme ve deformasyonlar,
- B. İklimsel etkiler – sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerdir.

Trafikten kaynaklanan gerilmeler, hareket hâlindeki veya duran taşıtların yol yüzeyine uyguladığı yüklerden oluşur. Bu gerilmelerin şiddeti; taşıtın dingil yükü, lastik basıncı ve hızına bağlı olarak değişir. Taşıt lastiklerinin yol yüzeyine uyguladığı düşey yük, kaplama üzerinde dairesel bir temas alanı oluşturur. Bu temas alanı boyunca, özellikle tekerleğin iz genişliği boyunca, düşey gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler, kaplama tabakasından başlayarak alttemel ve temel tabakalarına doğru azalarak iletilir ve bu süreçte maksimum düşey yer değiştirme (defleksiyon) oluşur (İBB, 2001).

Bu bağlamda, kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ile kaplama kalınlıkları, bu gerilme dağılımına uygun şekilde tasarlanmalıdır. Özellikle değme alanındaki aşırı çekme veya alttemeldeki aşırı basınçlar zamanla yapısal bozulmalara yol açar. Bandaj ile

yol kaplaması arasında oluşan bu gerilmeler sonucu deformasyonlar oluşur. Bu tür deformasyonlara ilişkin örnek Şekil 3.2’de sunulmuştur (Şimşek, 2021).



Şekil 3.2. Bandaj Yüğü Altında Üstyapıda Oluşan Deformasyon (Şimşek, 2021)

Hooke Kanunu’na göre, elastisite modülü (E) Denklem 1 ile ifade edilmektedir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Bu formülasyon, malzemede oluşan toplam deformasyon miktarının, uygulanan gerilmenin elastikiyet modülüne oranlanmasıyla hesaplandığını gösterir. Bir malzemenin Poisson oranı (μ) ise, Denklem 2’de gösterildiği gibi yanıl birim deformasyonun düşey birim deformasyona oranıdır ve her malzeme için sabit olup genellikle 0 ile 0,5 arasında değişmektedir.

Poisson oranı (μ) Denklem 2 ile bulunmaktadır.

$$\mu = \frac{E_{\text{yanal}}}{E_{\text{düşey}}} \quad (2)$$

Gerilme ve deformasyon analizlerinin doğru yapılabilmesi için, her katmanın elastikiyet modülü ve Poisson oranının bilinmesi gerekir. Ancak bu tür analizler teorik olarak oldukça karmaşık olduğundan, esnek kaplamalara ilişkin analizlerde birtakım varsayımlar yapılmaktadır:

- Her tabakanın homojen yapıda olduğu,
- Her tabakanın izotropik (tüm yönlerde aynı özellikte) olduğu,
- Tabakaların elastik davranış gösterdiği,
- Tabakalar arasında tam aderans (sürtünme) bulunduğu kabul edilir (İnce, 2012).

Esnek üstyapılar maliyet etkinliği, hızlı inşa edilebilirlik, bakım kolaylığı ve bakım sonrası yol kesiminin trafiğe hızlıca açılması, yüksek dayanıklılık ve konforlu sürüş imkanı sağlaması ile avantaj oluşturmaktadır. Esnek üstyapıların en önemli dezavantajları ise, kullanılan bitümlü malzemelerin termo-plastik ve visko-elastik özellikleri ile ilişkilidir.

Termo-plastik özellik, malzemenin ısıtıldığında yumuşayıp şekil alabilmesini; soğuduğunda ise tekrar sertleşmesini ifade eder. Bitümlü malzemeler de bu özelliğe sahip olup, belirli sıcaklık aralıklarında viskozitesini kaybederek akışkan hâle gelir. Bu durum, malzemenin kolayca işlenebilmesini sağlasa da, özellikle yüksek sıcaklıklarda aşırı yumuşama nedeniyle yol yüzeyinde iz oluşumu, deformasyon ve çökme gibi olumsuzluklara yol açabilir. Visko-elastik yapı ise, malzemenin hem viskoz (akışkan) hem de elastik (geri dönebilen) davranışlar sergilemesine imkân tanır. Bitümlü bağlayıcılar, uygulanan yüke karşı hem şekil değiştirir hem de belirli oranda eski formuna dönebilir. Ancak bu yapı, sıcaklık değişimlerine karşı oldukça hassastır. Sıcak havalarda aşırı esneme, soğuk havalarda ise sertleşme eğilimi gösterir. Bu da, sıcaklık kaynaklı çatlak oluşumu, kalıcı deformasyon ve yüzey bozulmalarını beraberinde getirir (Demirbağ, 2021).

Bu nedenle, üstyapı tasarımlarında her tabakanın karşılaştığı kritik gerilme değerleri dikkate alınarak, uygun kalınlık ve malzeme seçimi yapılmalıdır. Böylelikle, daha uzun ömürlü ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir yol tasarımı gerçekleştirilmiş olur.

3.1.2. Rijit Üstyapı

Rijit üstyapılar, taşıt yüklerini büyük oranda kendi yapısal bütünlüğü içinde

taşıyabilen, yüksek elastisite modülüne sahip çimento esaslı yol sistemleridir. Bu sistemler, özellikle beton malzemeden üretilmeleri nedeniyle “beton yollar” olarak da adlandırılmaktadır. Rijit sistemlerin uygulama alanları, yüksek aks yüklerinin ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu endüstriyel bölgeler, liman yolları, havaalanı pistleri ve otoyol kavşakları gibi stratejik ulaşım altyapılarıdır. Türkiye’de bu sistemlerin uygulama oranı esnek sistemlere göre daha düşük olsa da uzun vadeli dayanım, düşük bakım gereksinimi ve yüksek sıcaklık performansı gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir (Akyol, 2024). Rijit üstyapıların başlıca avantajları şunlardır:

- Uzun ömürlüdür ve düşük sıklıkta bakım gerektirir.
- Yüksek taşıma kapasitesine sahiptir.
- Yüksek yansıtıcılığı sayesinde gece sürüş güvenliğini artırır.
- Şehir içi uygulamalarda ısı adası etkisini azaltabilir.
- Araç yakıt tüketimini azaltmaya katkı sunabilir.

Ancak bazı dezavantajları da göz önünde bulundurulmalıdır:

- İlk yapım maliyetleri oldukça yüksektir.
- Onarımlar daha karmaşık ve maliyetlidir.
- Termal değişimlere karşı hassastır; bu da özel derz tasarımları gerektirir.
- Uzun kürleme süresi ve hava koşullarına bağlılık gibi yapım sürecini uzatan faktörler taşır.

Esnek üstyapılar ise daha düşük maliyetli ve hızlı uygulanabilir olmalarına rağmen, uzun vadede daha fazla bakım ve onarım gerektirir. Bu nedenle kaplama türü seçimi; kullanım amacı, taşıt yoğunluğu, çevresel koşullar ve bütçeye bağlı olarak yapılmalıdır.

3.1.3. Semi Rijit Üstyapı

Kompozit kaplamalar, alt yapıda çimento bağlayıcılı alttemel ve/veya temel üzerine bitümlü sıcak karışım tabakalarının uygulanmasıyla oluşturulan üstyapı sistemleridir. Bu sistemler hem rijit hem de esnek kaplamaların avantajlarını bir araya getirerek, dayanıklılık, yük taşıma kapasitesi ve sürüş konforu açısından hibrit bir çözüm sunmaktadır.

Bu yapı sistemlerinin başlıca amacı, rijit taban üzerinde oluşabilecek termal gerilmeleri üstteki esnek bitümlü tabaka ile dengeleyerek çatlama riskini azaltmak ve aynı zamanda taşıt yüklerini verimli şekilde yaymaktır. Kompozit kaplamalar, özellikle yüksek aks yüklerine maruz kalan sanayi yolları, havaalanı pistleri ve otoyol bağlantılarında tercih edilmektedir. Yarı rijit sistemlerin öne çıkan avantajları şunlardır:

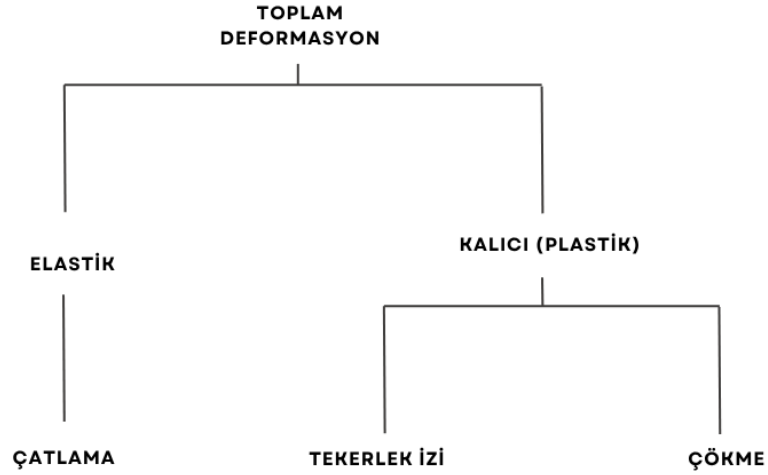
- Yüksek taşıma kapasitesi sunması,
- Kalıcı deformasyon (tekerlek izi) oluşumuna karşı dirençli olması,
- Uzun servis ömrü sağlayarak bakım ihtiyacını düşürmesi,
- Rijit yapı sayesinde sürüş konforu sunması,
- Zayıf zemin koşullarında yapısal dayanımı koruması.

3.2. Üstyapıda Oluşan Deformasyonlar

Üstyapı sistemlerindeki deformasyonlar; yol, köprü, bina ve benzeri altyapı yapılarında oluşan fiziksel bozulmalar olup, taşıma kapasitesini düşürerek hem yapısal güvenliği tehdit eder hem de bakım ve onarım maliyetlerini artırır. Üstyapı türlerinde sıkça karşılaşılan başlıca deformasyon türleri şunlardır:

- Çökme: Alt temel zemininde meydana gelen zayıflık ya da boşluklardan kaynaklanan yüzey oturmaları.
- Tekerek izi deformasyonu (Rutting): Trafik yükleri nedeniyle tekerlek izlerinde oluşan kalıcı deformasyon.
- Düşük sıcaklık çatlakları: Özellikle bitümlü tabakalarda, düşük sıcaklıklarda oluşan çekme gerilmeleri sonucunda meydana gelen çatlamlar.
- Beton derz bozulmaları: Rijit sistemlerde derzlerde meydana gelen kenar kırılmaları, ayrılmalar veya dolgu kayıpları.

Bu deformasyon türleri, trafik güvenliği ve sürüş konforunu olumsuz etkilediği gibi, üstyapının hizmet ömrünü de ciddi şekilde kısaltmaktadır. Şekil 3.3'te, konuya ilişkin deformasyon türlerinin şematik gösterimi sunulmuştur (İBB, 2001).



Şekil 3.3. Üstyapıda oluşan deformasyonlar (İBB, 2001)

Esnek üstyapılarda karşılaşılan deformasyon ve performans kayıplarını azaltmak amacıyla, bitümlü karışımlar çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilmektedir.

3.3. Bitüm Modifikasyonu

Türk Dil Kurumu (TDK)'na göre "modifiye" kelimesi “değiştirilmiş” anlamına gelir. Teknik bağlamda bu terim, ulaştırma mühendisliğinde bitümlü bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi ya da değiştirilmesini anlamında kullanılır.

Yol üstyapılarında kullanılan bitümlü bağlayıcıların temel gereksinimi, değişken sıcaklık ve yük koşulları altında şekil değiştirmeden işlevini sürdürebilmesidir. Ancak doğal (saf) bitüm, bu gereklilikleri her zaman karşılayamayabilir. Özellikle sıcak iklimlerde rut (tekerlek izi) oluşumu, soğuk iklimlerde ise termal çatlamlar, saf bitümün performans sınırlılıklarını ortaya koyar (Sayedzada, 2023). Bu performans eksikliklerini gidermek ve bitümün fiziksel-mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla geliştirilen modifikasyon süreci, belirli katkı maddelerinin bağlayıcıya veya karışımın kendisine eklenmesiyle gerçekleştirilir. Modifikasyonun başlıca nedenleri aşağıda sıralanabilir:

- i. Ekonomik Nedenler: Ham petrolün sınırlı ve pahalı bir kaynak olması, rafinasyon süreçlerini maliyetli hâle getirmiştir. Ayrıca döviz kuru dalgalanmaları ve artan enflasyon, petrol ürünleri fiyatlarını doğrudan etkilemektedir. Modifiye bitüm, uzun ömrü ve bakım gereksinimini azaltması sayesinde ekonomik bir çözüm sunar.

- ii. Çevresel ve Sürdürülebilir Yaklaşımlar: Endüstriyel atıkların katkı maddesi olarak kullanılması, doğal kaynak tüketimini azaltır. Bu uygulama, karbon ayak izinin düşürülmesine, enerji tüketiminin azaltılmasına ve geri dönüşümün teşvik edilmesine katkı sağlar (Özdemir ve ark., 2021).
- iii. Trafik Yükleri ve Yapısal Dayanım: Artan ağır taşıt trafiği, saf bitümün performansını zorlamakta; bu nedenle, modifiye bitüm daha dayanıklı ve deformasyona dirençli bir yapı oluşturmaktadır.
- iv. Onarım Kolaylığı: Modifiye bitüm, elastikiyet ve mukavemet kazandırarak çatlak ve bozulmaların önüne geçer. Bu durum, yol ömrünü uzatmakta ve onarım sıklığını azaltmaktadır.
- v. Teknolojik Gelişmeler: Ulaştırma altyapısındaki teknolojik ilerlemeler, asfalt üretim ve uygulama tekniklerini geliştirmiş; modifiye bitüm kullanımını daha cazip hâle getirmiştir.

3.3.1. Modifikasyon Yöntemleri ve Performans Beklentileri

Bitüm modifikasyonu, yalnızca bir karışım süreci değil; bağlayıcının fonksiyonel ömrünü artırmaya yönelik sistematik bir mühendislik yaklaşımıdır. Kullanılan yöntemlerin başarısı; katkının tipi, oranı, karıştırma yöntemi, sıcaklık kontrolü ve dispersiyon kalitesi gibi parametrelere bağlıdır (Duyğun ve Taşdemir, 2024). Bitüm modifikasyonu hem fiziksel hem kimyasal temellere dayanabilir:

- A. Fiziksel modifikasyon, katkı maddesinin termal ortamda eritilerek bağlayıcıyla karıştırılması esasına dayanır. Özellikle LDPE, SBS, EVA gibi termoplastikler bu yöntemde yaygın olarak kullanılır (Ahmed, 2023).
- B. Kimyasal modifikasyon ise katkı ile bağlayıcı arasında kimyasal bağ (kovalent etkileşim) oluşmasını sağlar. Bu yöntem, yüksek homojenlik ve uzun süreli kararlılık sunmasına rağmen maliyet ve uygulama karmaşıklığı açısından sınırlayıcıdır (Ahmed, 2023). Modifiye bitümlerde istenen başlıca performans kriterleri şunlardır:
 - i. Yüksek sıcaklıkta tekerlek izi oluşumuna karşı direnç,
 - ii. Düşük sıcaklıkta çatlama direnci,
 - iii. Elastik geri kazanım kabiliyeti,

- iv. Uzun süreli yaşlanma dayanımı.

3.3.2. Modifiye Bitüm Katkı Maddelerinin Özellikleri

Katkı maddesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, modifikasyonun başarısında belirleyici rol oynamaktadır. Yıldırım (2022), katkı maddesinin partikül boyutunun bağlayıcı ile etkileşimini doğrudan etkilediğini ve ince granül formda kullanılan katkıların daha etkin sonuçlar verdiğini ifade etmiştir. Ahmedzade ve ark. (2016), katkı oranı ve karıştırma süresinin, modifiye bağlayıcının reolojik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Modifiye bitüm üretiminde kullanılacak katkı maddeleri ve elde edilen bitümlü bağlayıcılar, uygulamada etkinlik, uygunluk ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından belirli teknik koşulları sağlamalıdır. Katkı maddelerinin modifikasyon sürecinde karşılaması gereken temel koşullar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- i. Katkı maddeleri, bitüm ile homojen bir şekilde karışabilir olmalıdır.
- ii. Bitümle kimyasal olarak uyumlu olmalı; karışımın diğer bileşenleriyle istenmeyen tepkimelere girmemelidir.
- iii. Karışım, yüksek sıcaklıklarda plastik deformasyona karşı dirençli, düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı dayanıklı hâle gelmelidir.
- iv. Katkı maddeleri, karışımın hizmet ömrü boyunca stabil kalmalı, performans kaybı yaşamamalıdır.
- v. Maliyet açısından uygun olmalı, proje bütçelerini zorlamamalıdır.
- vi. Kolay temin edilebilir ve kullanım sürecinde uygulanabilirlik açısından pratik olmalıdır.

3.3.3. Yaygın Modifiye Bitüm Katkıları ve Sınıflandırılmaları

Bitüm katkıları; kimyasal yapıları, fiziksel formları (granül, toz, sıvı) ve bağlayıcı ile etkileşim düzeylerine göre sınıflandırılır. Polimer katkıları (SBS, EVA, LDPE, HDPE), performansı artıran başlıca bileşenlerdir. Doğal katkıları (lateks, lignin) ve atık temelli malzemeler (plastik, lastik, kauçuk) ise sürdürülebilirlik açısından ön plana çıkar (Köse ve Çelik, 2022). Şekil 3.4’de fiziksel modifiyer ve katkı tipleri gösterilmektedir (KGM, 2021).

MODİFİYER TİPİ	KATKI TİPİ
Termoplastik Elastomerler	*Stiren-Butadien - Stirene (SBS) *Stiren-Butadien - Kauçuk (SBR) *Stiren-İzopren - Kauçuk (SIS) *Stiren-Etilen - Butadien - Stiren(SEBS) *Etilen-Propilen - Dien Terpolimer (EPDM) *Isobuten-Isopren Copolimer (IIR) *Doğal Kauçuk *Ufalanmış Tekerlek Kauçuğu *Polibutadin (PBD) *Poliisopren
Termoplastik Polimerler	*Etilen Vinil Asetat (EVA) * Etilen Metil Akrilat (EMA) * Etilen Butil Akrilat (EBA) *Ataktik Polipropilen (APP) *Polietilen (PE) *Polipropilen (PP) *Polivinil Klorid (PVC) *Polistiren (PS)
Termoset Polimerler	*Epoksi Reçine *Poliüretan Reçine *Akrilik Reçine *Fenolik Reçine

Şekil 3.4. Fiziksel modifiyer ve katkı tipleri (KGM, 2021)

En çok kullanılan modifiyer tipleri ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

- SBS (Stiren-Butadien-Stiren) Polimeri: SBS, stiren ve butadien bloklarından oluşan bir termoplastik elastomer olup bitüme elastikiyet kazandırır. Stiren polimer bloğuna sertlik ve dayanım sağlarken, butadien esneklik ve darbe direnci kazandırır. Elastikiyeti artırır, viskoziteyi yükseltir, oksidasyona karşı dayanıklılık sağlar. Bu sayede hem sıcak hem de soğuk hava koşullarında asfaltın performansı artar.
- EVA (Etilen-Vinil-Asetat) Polimeri: Termoplastik bir kopolimer olan EVA, etilen ve vinil asetat monomerlerinden oluşur. Yüksek sıcaklık dayanımı, elastikiyet artışı ve agrega ile iyi yapışma özelliği sağlar. Termal genleşmelere karşı da olumlu etki gösterir.
- SBR (Stiren-Butadien Rubber) Polimeri: Stiren ve butadien monomerlerinden elde edilen SBR, sentetik kauçuk sınıfında yer alır. Özellikle düşük sıcaklıklarda

çatlamayı engeller, sıcak iklimlerde deformasyon direnci sunar ve yaşlanma direncini artırır.

- iv. Grafen ve Karbon Nanotüpler (CNT): Bu nanomalzemeler, yüksek mekanik dayanım ve termal iletkenlik özellikleriyle öne çıkar. Bitümün çekme, kırılma ve ısı performansını artırır. Oksidasyona karşı koruma sağlar, böylece yaşlanma direnci yükselir.
- v. Polipropilen (PP): Propilen monomerinden elde edilen PP, hafif, kimyasal dirençli ve düşük maliyetlidir. Viskoziteyi artırır, mekanik dayanımı güçlendirir, daha sert ve uzun ömürlü asfalt üretimine olanak sağlar.
- vi. Asfalt Yağları: Bu maddeler, genellikle karışım işlenebilirliğini artırmak için kullanılır. Viskoziteyi düşürerek karışımın daha kolay yerleştirilmesini sağlar. Aynı zamanda düşük sıcaklıklarda esnekliği artırır.
- vii. Crumb Rubber (Atık Lastik): Geri dönüştürülmüş lastiklerden elde edilen bu katkı, genellikle doğal ve sentetik kauçuk içerir. Viskozite artışı, düşük sıcaklık elastikiyeti ve yüksek aşınma direnci sağlar. Trafik yüküne karşı dirençlidir ve sürtünmeyi artırır.
- viii. PET (Polietilen Tereftalat): PET, genellikle ambalaj ve tekstilde kullanılan geri dönüştürülmüş bir termoplastiktir. Viskozite ve aşınma direncini artırır, düşük sıcaklıkta elastikiyet sağlar ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunar.

Modifiye bitümlü bağlayıcılar, katkı maddesinin bitüm matrisi içerisindeki dağılım özelliklerine bağlı olarak homojen ve homojen olmayan olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmektedir.

- A. Homojen bağlayıcılar, katkı maddesinin bitüm içerisinde tamamen çözünerek tek fazlı bir yapı oluşturduğu sistemlerdir. Bu tür sistemlerde, mikroskopik incelemelerde farklı fazlar gözlemlenemez; bağlayıcı, bütünlük ve düzenli bir görünüm sergiler. EVA (Etilen Vinil Asetat), SBR (Stiren-Bütadien Kauçuk) ve SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) gibi katkı maddeleriyle hazırlanan bitümler bu grupta yer alır.
- B. Homojen olmayan bağlayıcılar ise birden fazla fazın varlığının belirgin şekilde ayırt edilebildiği, katkı maddesinin bitüm içerisinde tam anlamıyla çözünmediği yapılardır. Bu durumda katkı parçacıkları, bağlayıcı içerisinde belirli bir düzende

veya dağınık biçimde gözlemlenebilir. Özellikle geri dönüştürölmüş kauçuk gibi malzemelerle hazırlanan Kauçuk-Modifiye Bitümler (KMB), bu yapısal sınıfa dâhil edilmektedir. Bu bağlayıcılarda, faz ayrışması ve katkı yoğunluğuna bağlı olarak belirli performans farklılıkları gözlemlenebilir.



4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, araştırmada kullanılan malzemeler, deneysel düzenek, cihazlar, modifikasyon süreçleri ve uygulanan test yöntemleri ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır.

4.1. Malzemeler

Bu çalışmada bağlayıcı olarak 50/70 penetrasyon dereceli bitüm, katkı malzemesi olarak LDPE esaslı atık kablo talaşı kullanılmıştır.

4.1.1. LDPE Esaslı Atık Kablo Talaşı

Çalışmada modifier olarak düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) esaslı atık kablo talaşı kullanılmıştır (Özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir). Kullanılan kablo talaşına ait bir görsel Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. LDPE Esaslı Atık Kablonun Özellikleri

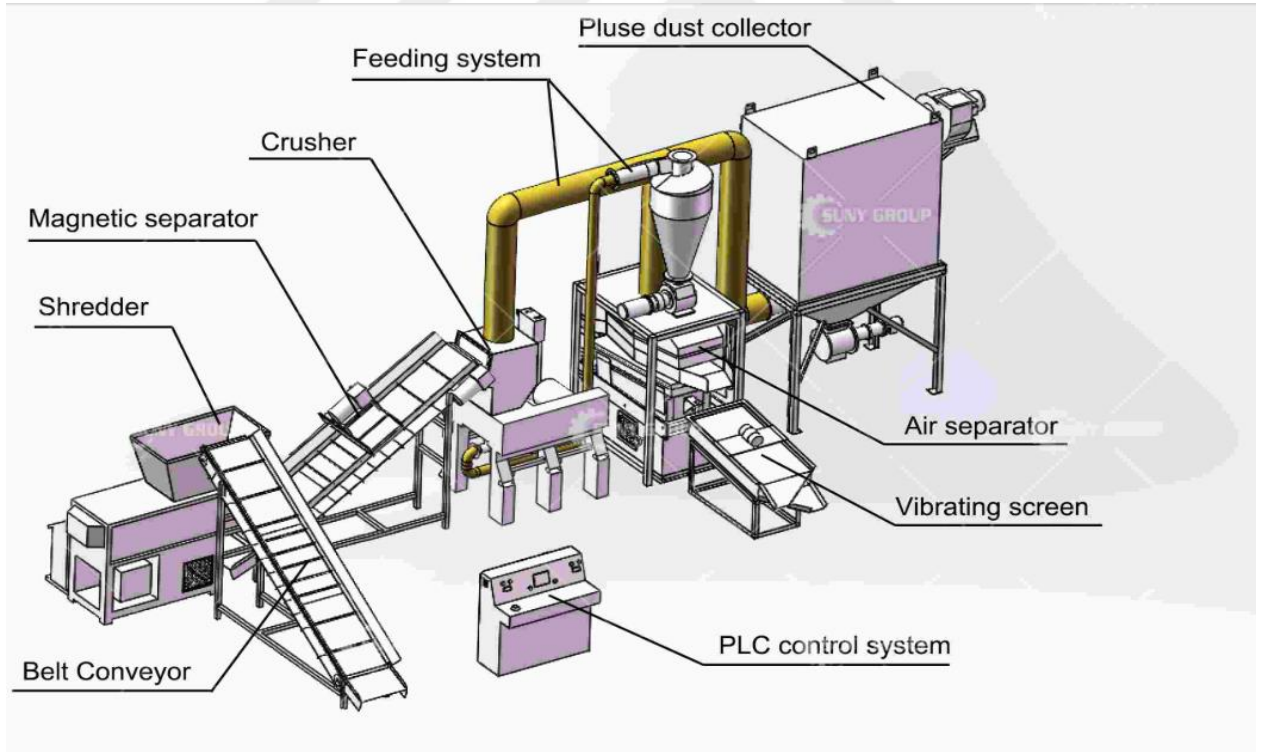
Özellik	Değer
Renk	Birden fazla renkli
Form	Granül
Granül Boyutu	<2 mm (ASTM No.10 Elek Skalası)
Kimyasal Yapı	LDPE (FTIR ve TGA analizleri sonucuna dayalı olarak belirlenmiştir.)
Yalıtım Sınıfı	Z1
Halojen İçeriği	Yok

Araştırmada kullanılacak malzeme, atık kabloların soyma ve ayrıştırma sürecinin (hurda kabloların bakırından arındırılması) yan ürünü olan termoplastik bir üründür. Bu yan ürün Şekil 4.1’de görüldüğü üzere kablo geri dönüşüm tesislerinde el değmeden makineler aracılığıyla elde edilir ve plastik granül haline getirilir. Bu çalışmada ihtiyaç duyulan atık kablo talaşı geri dönüşüm tesislerinden elde edilmiştir ve 0-2 mm granül boyutuna sahiptir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. LDPE esaslı atık kablo talaşı

4.1.1.1. Atık Kablo Geri Dönüşüm Tesisi ve Elde Edilme Süreci



Şekil 4.2. Kablo geri dönüşüm tesisi çalışma aşamaları (Sunny Group, 2024)

Şekil 4.2’de gösterilen kablo tesisi geri dönüşüm aşamaları dokuz adımda sıralanabilir.

- i. Besleme Sistemi (Feeding System): Atık kablolar ilk olarak manuel ya da otomatik olarak besleme sistemine yüklenir. Bu sistem kabloları düzenli ve dengeli biçimde birincil işleme ünitesine iletir.
- ii. Parçalama Ünitesi (Shredder): Kablolar, güçlü bıçaklara sahip parçalama makinesinde (shredder) iri parçalara ayrılır. Bu işlem, kablonun içindeki metal (bakır/alüminyum) ve dışındaki plastik yalıtımın ayrıştırılabilir hâle gelmesini sağlar.
- iii. Taşıma Bandı (Belt Conveyor): Parçalanmış kablo materyali, konveyör bandı aracılığıyla bir sonraki işlem olan kırıcıya aktarılır.
- iv. Kırıcı Ünitesi (Crusher): Parçalanmış malzeme bu üniteye daha küçük granüller hâline getirilir. Özellikle bakır ve plastik fraksiyonları ayırmak için gerekli olan boyut küçültme burada sağlanır.
- v. Manyetik Ayırıcı (Magnetic Separator): Demir gibi manyetik metal parçalar bu aşamada sistemden ayrıştırılır. Bu işlem, geri dönüştürülmüş ürünlerin saflığını artırmak içindir.
- vi. Hava Ayırıcı (Air Separator): Malzeme, özgül ağırlık farkına göre hava akımıyla ayrılır. Hafif plastik fraksiyonlar bir yöne, ağır metal fraksiyonlar (bakır) diğer yöne yönlendirilir.
- vii. Titreşimli Elek (Vibrating Screen): Farklı boyuttaki parçacıklar burada ayrılır. İnce plastik tozlar, daha büyük bakır granüllerden elenerek ayrıştırılır.
- viii. Toz Toplayıcı (Pulse Dust Collector): İşlem sırasında ortaya çıkan tozlar çevreye yayılmadan toplanır. Bu sistem, çevre koruması ve operatör sağlığı açısından önemlidir.
- ix. PLC Kontrollü Otomasyon (PLC Control System): Tüm sistem otomasyonla kontrol edilir. Parametreler bu panel üzerinden izlenir ve ayarlanır; sistem güvenliği ve verimliliği sağlanır.

4.1.1.2. Atık Kablo Yaygın Kullanım Alanları

Bakır plastikten ayrılır, ayırma verimi %99 civarındadır. Bakır granül geri dönüşüm açısından değerli bir maden olduğu için doğrudan satılabilir ya da rafine edilerek saf forma ulaştırılabilmektedir. Plastik granüller ise normalde PVC veya kauçuk malzemedir ve

doğrudan satılabilmektedir. Geri kazanılan plastiğin kullanım alanları şu şekilde gruplanabilir:

- Plastik Sanayi: Boru, hortum, profil, pencere çerçevesi üretimi
- Ambalaj Sektörü: Sert ambalajlar, kapaklar, taşıma kasaları
- Yapı Sektörü: Yalıtım malzemeleri, parke altlığı, inşaat levhaları
- Otomotiv Sektörü: Çmurluk içleri, plastik gövde parçaları
- Geri Dönüşümlü Kompozitler: Modifiye asfalt katkısı olarak, plastik ahşap kompozit (WPC) üretimi

4.1.2. Asfalt Çimentosu (AC)

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılan bitüm, Batman rafinerisinde üretilmiş olan ve Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünden temin edilen 50/70 penetrasyon dereceli bitümdür.

4.2. Kullanılan Yöntem

Bu çalışma kapsamında uygulanan deneyler ve deneylere ait kullanılan standartlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Uygulanan deneyler ve kullanılan standartlar

No	Deneyler	Standartlar
1	Penetrasyon deneyi	TS EN 1426
2	Yumuşama noktası deneyi	TS EN 1427
3	Elastik geri dönme deneyi	TS EN 13589
4	DSR deneyi	TS EN 14770

4.2.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi, bitüm bağlayıcının kıvamını belirlemek amacıyla uygulanan temel bir testtir. TS EN 1426 standardına göre, penetrasyon; 25 °C sıcaklıkta, 100 g ağırlığında bir iğnenin 5 saniye boyunca dikey olarak batırılması sonucunda, bitüm numunesine ne kadar derinlikte nüfuz ettiğinin 0.1 mm cinsinden ölçülmesidir (TS EN 1426, 2015). Numune yüzeyinden üçgen alan oluşturacak şekilde 3 adet ölçüm yapılarak ortalama değer alınır. Penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır. Şekil 4.3’de KGM 5. Bölge laboratuvarında bulunan ve deneyde kullanılan penetrasyon deney cihazı görülmektedir.



Şekil 4.3. Penetrasyon deney cihazı (UTEST, KGM 5. Bölge)

4.2.2. Yumuşama Noktası (Ring and Ball) Deneyi

Yumuşama noktası deneyi, asfalt bağlayıcının sıcaklıkla birlikte akışkan hâle geçmeye başladığı sıcaklık aralığını belirlemek amacıyla uygulanır. Genellikle *Ring and Ball* (Halka ve Bilye) yöntemi ile yapılan bu deneyde, belirli koşullarda ısıtılan bitüm örneklerinin içerisinde yerleştirilen metal bilyelerin belirli bir mesafeye düşmesi esas alınır. Yumuşama noktası, asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklıklardaki performansı hakkında bilgi vermektedir. Bu deney TS EN 1427 standardına göre gerçekleştirilir. Şekil 4.4’ de yumuşama noktası deneyinde gerekli olan deney ekipmanları ve deney cihazı görülmektedir.



Şekil 4.4. Yumuşama noktası deney seti (UTEST, KGM 5. Bölge)

Şekil 4.4'te görülen yumuşama noktası deneyi şu adımlardan oluşur:

- i. Bitüm veya modifiye bitüm örnekleri deney halkalarına doldurulur ve örneklerin üst yüzeyleri düzgün hâle getirilir ve oda sıcaklığında bekletilir.
- ii. Su (5 °C) veya gliserin (30 °C) banyosu içeren test kabı cihazın içine yerleştirilir ve 15 dakika termal sıcaklığa gelmesi beklenir. Genellikle test ortamı 30–35 °C'den başlar ve dakikada 5 ± 0.5 °C oranında sıcaklık artışı sağlanır.
- iii. Bilyeler dikkatlice her numunenin üzerine yerleştirilir.
- iv. Bilyelerin halkadan düşerek alt tabandaki metal plakaya temas ettiği sıcaklık, yumuşama noktası olarak kaydedilir.
- v. Deney sonunda cihaz ve halka-bilye düzeneği temizlenerek bir sonraki deneye hazırlanır. Elde edilen sıcaklık verileri kayıt altına alınarak analiz için kullanılır.

4.2.3. Elastik Geri Dönme Deneyi

Elastik geri dönme deneyi, bitümlü bağlayıcıların deformasyon sonrasında ne ölçüde eski formuna dönebildiğini, yani elastikiyetini ölçmek amacıyla yapılır. Bu deney özellikle polimer modifiyeli bitümlerde elastik özelliklerin belirlenmesinde kullanılır. Yüksek elastik geri dönme yüzdesi, özellikle çökme ve çatlamaya karşı dayanımı artıran önemli bir göstergedir. Şekil 4.5' de elastik geri dönme deneyine ait görseller bulunmaktadır.



Şekil 4.5. Elastik geri dönme deney aşamaları

Deneyin yapılışı şu şekildedir:

- i. Numuneler, 90 °C'yi aşmayacak şekilde ısıtılarak Şekil 4.6' da gösterilen düktülite kalıplarına dökülür (3 adet numune hazırlanır).
- ii. Numuneler oda sıcaklığında 30 dakika soğumaya bırakılır.
- iii. Ardından 30 dakika boyunca 25 ± 0.5 °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir.
- iv. Banyodan çıkarılan numunelerin taşan kısımları, ısıtılmış spatula veya falçata ile temizlenir.
- v. Temizlenen numuneler tekrar aynı sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilerek yaklaşık 90 dakika bekletilir.
- vi. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi hazırlanan numuneler, delikli uçlarından düktülite cihazına yerleştirilir ve 5 cm/dk hızla çekilir.
- vii. Numune uzunluğu 20 cm'ye ulaştığında ortasından kesilir.
- viii. 30 dakika sonra iki uç arasındaki geri dönme mesafesi ölçülür.

Elastik geri dönme yüzdesi Denklem 3'de gösterilen formülasyona göre hesaplanır.

$$ER = \frac{D}{OL} \times 100$$

(3)

ER= Elastik geri dönme (%)

OL= İlk uzunluk (cm)

D= Son ara mesafe (cm) (Son uzunluk – İlk uzunluk)



Şekil 4.6. Düktülite ve elastik geri dönme kalıpları

Modifiye bitümlerin elastik davranışını değerlendirmek amacıyla uygulanan elastik geri dönme testleri (Elastic Recovery–ER), özellikle termoplastik ve elastomerik katkıların bağlayıcı üzerindeki etkilerini analiz etmek açısından önemli bir yöntemdir. Bu testler, bitümün deformasyon sonrasında eski formuna dönebilme kapasitesini ölçerek çatlak oluşumu ve ilerlemesine karşı gösterdiği direnci ortaya koyar.

4.2.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

Modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık altında gösterdiği viskoelastik davranışı analiz etmek amacıyla kullanılan başlıca yöntemlerden biri Dinamik Kayma Reometresi (DSR) testidir. Bu test, bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) gibi parametrelerini belirleyerek deformasyon direnci ve elastik özellikleri hakkında bilgi sunar.

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcıların hem elastik (geri dönüşlü) hem de viskoz (kalıcı) deformasyon davranışlarını ölçerek, yük altında ve sıcaklık değişimlerinde nasıl performans göstereceklerini anlamaya yönelik gelişmiş bir reolojik analiz yöntemidir. Şekil 4.7’de görülen DSR deney cihazına göre; hazırlanan numune iki plaka arasında sıkıştırılır. Alt tabaka sabit iken üst tabaka döner ve salınım yapar. Uygulanan tork sayesinde numuneye kayma gerilmesi verilir. Uygulanan tork ve oluşan deformasyon bilgisayar kontrollü yazılım sayesinde ölçülür ve parametreler hesaplanır. Deneyden önce kararlaştırılan başlangıç test sıcaklığı, frekans, deformasyon seviyesi gibi parametreler bilgisayar yazılımına girilir. AASHTO TP5 standardı uygulanır.



Şekil 4.7. Dinamik kayma reometresi deney cihazı (KGM 5. Bölge)

4.2.5. Uygulanan Kimyasal ve Mikroyapı Analizleri

Bu bölümde, atık kablo talaşı katkısının yapısal özellikleri FTIR ve TGA analizleriyle; modifiye bitümdeki dağılımı ve yüzey yapısı ise SEM ile incelenmiş, katkının kimyasal uyumu ve mikroyapısal etkileri ortaya konmuştur.

4.2.5.1. FTIR (Fourier Transform Infrared) Spektroskopi

FTIR (Fourier Transform Infrared) Spektroskopi, maddelerin kimyasal yapısını tanımlamak amacıyla kullanılan bir analiz tekniğidir. Bu yöntem, bir örneğin kızılötesi (IR) ışını hangi dalga boylarında ne kadar soğurduğunu (absorbe ettiğini) ölçerek, moleküler yapısındaki fonksiyonel grupları belirlemeye yarar.

FTIR analizi; kimya, malzeme bilimi, farmasötik, çevre mühendisliği ve polimer araştırmaları gibi pek çok disiplinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında katkı malzemesi olarak kullanılan atık kablo talaşının kimyasal yapısını belirlemek amacıyla FTIR analizi ÜSKİM’de uygulanmıştır.

4.2.5.2. TGA (Thermogravimetric Analysis)

TGA (Thermogravimetric Analysis / Termogravimetrik Analiz), bir maddenin ısı kararlılığını ve sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği kütle değişimini ölçmek amacıyla kullanılan bir termal analiz yöntemidir. Bu analiz, maddenin ısıtılması sırasında meydana gelen bozunma, buharlaşma, oksidasyon gibi fiziksel veya kimyasal değişimlere bağlı olarak kütledeki azalmaları kaydeder.

TGA analizinde kütledeki azalma, numunenin ısı kararlılığına dair bilgi verirken; her bir kütle kaybı basamağı, numunedeki farklı bileşenlerin ayrışma veya bozunma davranışını temsil eder. Bu da malzemenin içeriği, kararlılığı ve uygun kullanım sıcaklığı aralığı hakkında önemli veriler sunmaktadır. Bu çalışmada atık kablo talaşının ısıl stabilitesi ÜSKİM’de TGA analizi ile tespit edilmiştir.

4.2.5.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi



Şekil 4.8. Mikroskobik analiz laboratuvarı-ÜSKİM

Polimer modifiye bitümlere uygulanan SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi, katkı maddesinin bitüm matrisi içindeki dağılımını, mikroyapısal etkilerini ve faz ayrışması gibi yapısal problemleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Bu analiz, katkı maddesinin bitümle uyum düzeyi ve homojen karışım oluşturup oluşturmadığı hakkında detaylı ve görsel bilgi sağlamaktadır.

Bu çalışmada %5, %10 ve %15 LDPE esaslı atık kablo talaşı katkısı içeren bitümlü bağlayıcıya Şekil 4.8’de gösterilen ÜSKİM mikroskobik laboratuvarında testler uygulanarak katkı-bitüm uyumu ve katkının mikroyapısal etkileri görsel olarak incelenmiştir.

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneyde katkı malzemesi olarak kullanılan atık kablo talaşı No.10 (ASTM) elekten elenerek tek bir gradasyon skalasına getirilmiştir (a). Atık kablo talaşı Çizelge 4.3’de belirlenen deney yüzdelerinde (%5, %10, %15) tartılarak toplamda 2000 gr. olacak şekilde hesaplanmış ve öncesinde etüvde 170-180 °C sıcaklığa erişen 50/70 penetrasyon dereceli saf bitüme ilave edilmiştir (b). Karışım sıcaklığının 180 °C altına düşmemesine dikkat edilmiştir. Elde edilen her bir karışım Şekil 4.9 görüldüğü gibi mekanik mikser yardımıyla ısı kontrolü sağlanarak 120 dakika boyunca karıştırılmıştır (c).

Çizelge 4.3. Modifiye bitüm karışım tasarımı

Yüzdelikler	Atık kablo talaşı (gr.)	Bitüm (gr.)
%5	100 gr.	1900 gr.
%10	200 gr.	1800 gr.
%15	300 gr.	1700 gr.

Karıştırma sonrası elde edilen PMB'ler aşağıdaki testlere tabi tutulmuştur.

- Penetrasyon
- Yumuşama noktası (Ring and Ball)
- Elastik geri dönme
- DSR (kompleks modül ve faz açısı)



Şekil 4.9. Deney numunelerinin hazırlanması (a), (b), (c)

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm, araştırmada elde edilen deneysel verilerin detaylı analizini ve bu verilerin yorumlanmasını içermektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılan değerlendirmeler, literatürdeki bulgularla karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu sayede atık kablo talaşı katkısının bitümlü bağlayıcı üzerindeki etkileri hem teknik hem çevresel açılardan değerlendirilmekte, katkının performans üzerindeki rolü net biçimde ortaya konmaktadır. Bulguların doğruluğu ve anlamlılığı bu bölümde somutlaştırılmakta, çalışmanın temel katkı noktaları burada görünür hale gelmektedir.

5.1. Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, atık kablo talaşı ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcının fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel testlerle incelenmektedir. Penetrasyon, yumuşama noktası ve elastik geri dönme gibi testlerle katkının bağlayıcının sertlik, esneklik ve sıcaklık dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; malzemenin mühendislik performansı hakkında önemli veriler elde edilmiştir. Bu analizler, modifikasyonun teknik uygunluğunu ve potansiyel uygulama alanlarını belirlemek açısından temel bir zemin oluşturmaktadır.

5.1.1. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Sonuçları

TS EN 1426 deney standartlarına uygun olarak yapılan penetrasyon deneyi sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Penetrasyon deney sonuçları

Penetrasyon (25°C, 1/10 mm)	Numune 1	Numune 2	GENEL ORT (Numune 1+ Numune 2) /2
Saf Bitüm	52,5	52,6	52,6
%5 (1)	32,6	32,0	
%5 (2)	31,8	33,8	
%5 (3)	35,0	32,3	
ORT	33,1	32,7	32,9
%10 (1)	28,6	24,1	
%10 (2)	24,1	24,6	
%10 (3)	24,7	27,6	
ORT	25,8	25,4	25,6
%15 (1)	9,4	14,3	
%15 (2)	10,6	11,20	
%15 (3)	9,6	12,00	
ORT	9,6	12,50	11,1

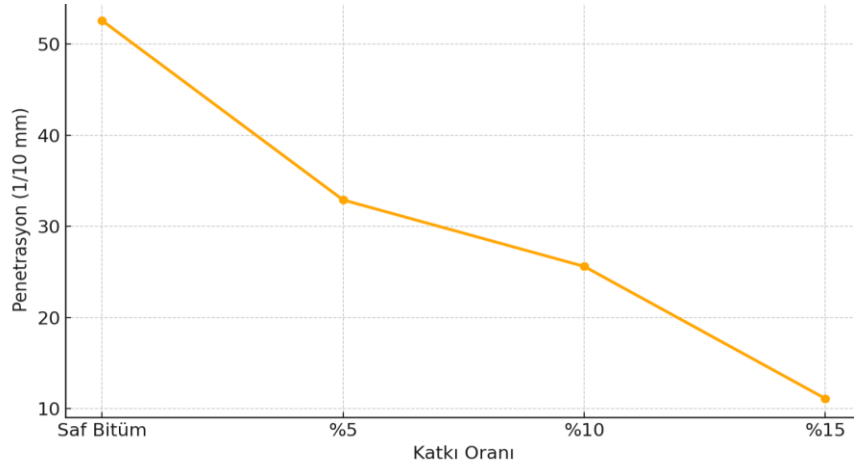
Penetrasyon deneyi sonuçlarına göre, saf bitüm ve farklı oranlarda (%5, %10, %15) LDPE esaslı atık kablo talaşı katkısı ile modifiye edilmiş bağlayıcı numuneleri üzerinde yapılan ölçümler, katkı kullanımının bağlayıcının penetrasyon özellikleri üzerinde önemli değişimlere neden olduğunu göstermektedir. Penetrasyon değeri, bitümlü bağlayıcının yumuşaklık seviyesini belirleyen ve bağlayıcının servis sıcaklıklarındaki davranışını etkileyen temel bir parametredir. Bu parametredeki azalma, bağlayıcının sertlik kazandığını ve sıcaklık değişimlerine karşı daha rijit bir yapıya kavuştuğunu göstermektedir.

Elde edilen verilere göre, saf bitümün ortalama penetrasyon değeri 52,6 (1/10 mm) olarak belirlenmiştir. %5 katkı oranıyla hazırlanan numunelerin genel ortalaması 32,9 olarak ölçülmüş ve bu durum, saf bağlayıcıya kıyasla %37,4'lük bir azalma anlamına gelmektedir. %10 katkı oranında ise ortalama penetrasyon değeri 25,6'ya düşmüş ve bu değer, saf bitüme kıyasla %51,3 oranında bir azalmayı ifade etmektedir. En yüksek katkı oranı olan %15 seviyesinde ise penetrasyon değeri 11,1 olarak belirlenmiş ve bu durum, saf bağlayıcıya göre %78,9'luk oldukça belirgin bir azalmayı ortaya koymuştur. Şekil 5.1' de katkı oranına göre penetrasyon grafiği gösterilmiştir.

Bu veriler, katkı miktarının artmasıyla birlikte bağlayıcının penetrasyon değerinde anlamlı bir düşüş yaşandığını, dolayısıyla bağlayıcının sertlik kazandığını göstermektedir. %5 katkı oranında bile bağlayıcının daha rijit hale gelmeye başladığı; %10 oranında bu etkinin daha da belirginleştiği ve %15 oranında ise bağlayıcının elastik yapısının büyük ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı maddesinin bitümün termoplastik davranışı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve bağlayıcının viskoelastik karakterini katkı oranına bağlı olarak değiştirdiğini göstermektedir.

Yapılan bu değerlendirmeler ışığında, katkı oranının bağlayıcının kullanım performansını doğrudan etkilediği sonucuna varılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık koşullarında, katkı kullanımına bağlı olarak elde edilen daha sert yapılar, deformasyonlara karşı direnç sağlarken; düşük sıcaklıklarda ise çatlama riski yaratabilecek kırılgan davranışlara neden olabilir. Bu bağlamda, katkı oranı belirlenirken uygulanacak iklim bölgesi ve servis koşulları dikkate alınmalı; performans, dayanım ve elastikiyet dengesi göz önünde bulundurularak optimum oran tercih edilmelidir. Özellikle %5 ila %10 katkı oranlarının, bağlayıcının mekanik özelliklerini iyileştirirken elastikiyetini tamamen kaybetmeden performans artışı sağladığı söylenebilir. Buna karşın, %15 katkı oranı, elastik

özellikleri büyük ölçüde sınırlayarak bağlayıcıyı çok sert ve kırılgan hâle getirme potansiyeline sahiptir.



Şekil 5.1. Katkı oranına göre penetrasyon grafiği

Yumuşama noktası deney sonuçları Çizelge 5.2’de görülmektedir. Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere yumuşama noktası sonuçları, katkı oranının artmasıyla birlikte bağlayıcının termal dayanımında belirgin bir artış meydana geldiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.2. Yumuşama noktası deneyi sonuçları

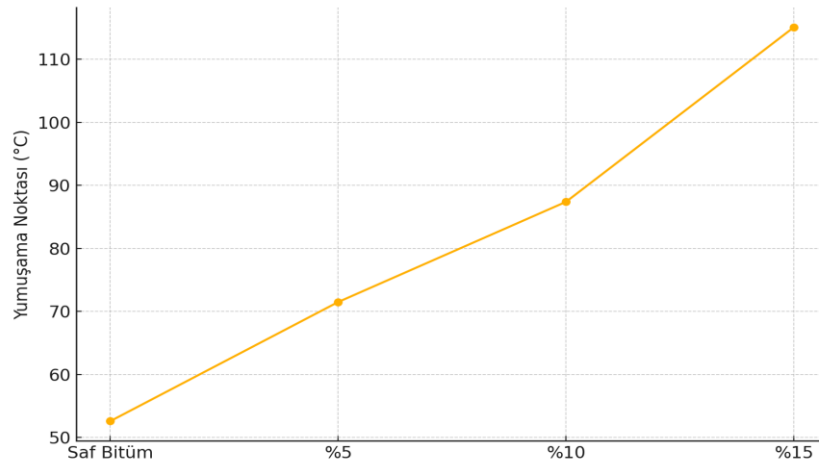
DENEY	YUMUŞAMA SICAKLIĞI (°C)		ORT
	1 (SOL)	2 (SAĞ)	
Saf Bitüm	52,5	52,6	52,6
%5	71,9	71,0	71,5
%10	88,5	86,2	87,4
%15	114,7	115,4	115,1

Saf bitüm numunesinin ortalama yumuşama sıcaklığı 52,6 °C olarak ölçülürken, %5 oranında katkı ilavesiyle bu değer 71,5 °C’ye yükselmiştir. Bu artış, saf bağlayıcıya kıyasla yaklaşık %36,0 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Bu durum, katkı maddesinin bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Katkı oranı %10’a çıkarıldığında yumuşama sıcaklığı ortalama 87,4 °C’ye ulaşmış ve bu da saf bitüm değerine göre yaklaşık %66,2 oranında bir artışa tekabül etmiştir. Bu sonuç, katkı oranı arttıkça bağlayıcının ısıya karşı direncinin daha da iyileştiğini göstermektedir. Bu noktada katkı maddesinin bitüm matrisinde daha kararlı bir yapı oluşturduğu ve viskoelastik özelliklerin daha belirgin hâle geldiği söylenebilir.

%15 oranında katkı kullanıldığında ise yumuşama noktası 115,1 °C'ye ulaşarak en yüksek değere erişmiştir. Bu oran, saf bağlayıcıya göre %118,9 oranında bir artış anlamına gelmektedir. Bu önemli yükseliş, katkı maddesinin bağlayıcının yumuşama sıcaklığını artırmadaki etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Söz konusu sonuç, katkı oranı ile yumuşama sıcaklığı arasında doğrusal olmayan ancak güçlü bir ilişki bulunduğunu da göstermektedir. Şekil 5.2' de katkı oranına göre yumuşama noktası grafiği gösterilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, katkı maddesi oranı arttıkça bağlayıcının yumuşama sıcaklığında istikrarlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, yüksek sıcaklık koşullarında deformasyon direnci gerektiren asfalt uygulamaları için son derece kritik bir performans kriteridir. Özellikle %15 oranındaki katkı uygulaması, yumuşama sıcaklığı açısından en etkili katkı oranı olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu katkı maddesinin bitümlü bağlayıcılarda yüksek sıcaklık dayanımını artırma potansiyeli oldukça yüksektir ve sıcak iklim koşullarına yönelik asfalt kaplama tasarımlarında tercih edilebilir bir modifikasyon yaklaşımı sunmaktadır.



Şekil 5.2. Katkı oranına göre yumuşama noktası grafiği

Her iki deney birlikte ele alındığında, katkı oranının artmasıyla bağlayıcının sertliği artarken, ısıl deformasyon sıcaklığı da belirgin biçimde yükselmektedir. Bu durum, katkı maddesinin hem mekanik hem de termal performans açısından bağlayıcıyı olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Özellikle %15 katkı oranı, her iki parametrede de en yüksek etkiyi ortaya koymuş, modifiye bağlayıcının hem yüksek sıcaklık dayanımını artırmış hem de düşük penetrasyon değeri ile daha rijit bir yapı kazandırdığı söylenebilir.

5.1.2. Elastik Geri Dönme ve Depolama Kararlılığı Bulguları

Çizelge 5.3. Elastik geri dönme deneyi sonuçları

Numune	İlk boy	Son boy	Ara mesafe	Elastik geri dönme
	(cm)	(cm)	(cm)	(%)
%5 (1)	20	11,8	8,2	41
%5 (2)	20	10,8	9,2	46
%5 (3)	20	11,8	8,2	41
ORTALAMA (%5)				42,7
%10 (1)	20	12,5	7,5	37,5
%10 (2)	20	12,5	7,5	37,5
%10 (3)	20	12,3	7,7	38,5
ORTALAMA (%10)				37,8
%15 (1)	20	16,5	3,5	17,5
%15 (2)	20	16,4	3,6	18
%15 (3)	20	16,7	3,3	16,5
ORTALAMA (%15)				17,3

Elastik geri dönme (ER) testi, bitümlü bağlayıcıların deformasyon sonrası eski formuna dönebilme kapasitesini ölçerek malzemenin elastikiyet düzeyini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda yapılan deneysel çalışmada, LDPE esaslı atık kablo talaşı katkısının bağlayıcının elastik davranışı üzerindeki etkisi üç farklı katkı oranında (%5, %10 ve %15) değerlendirilmiştir. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan elastik geri dönme deneyi sonuçları Çizelge 4.3'te görülmektedir.

Elde edilen bulgulara göre, katkı oranı %5 düzeyindeyken elde edilen ortalama elastik geri dönme değeri %42,7 olarak ölçülmüştür. Bu değer, modifiye bağlayıcının elastikiyetinin en yüksek seviyede gerçekleştiği katkı oranını temsil etmektedir. %5 katkı oranı, hem deformasyon sonrası geri kazanım oranı açısından hem de üretim açısından optimum dengeyi sunduğu izlenimini vermektedir.

Katkı oranı %10'a çıkarıldığında, elastik geri dönme değeri %37,8'e gerilemiştir. Bu durum, katkı miktarının artmasıyla birlikte bağlayıcı içerisindeki polimer yoğunluğunun artmasına bağlı olarak viskozitenin yükselmesi ve elastik yapıdaki sürekliliğin kısmen bozulmasıyla açıklanabilir. Nitekim literatürde de katkı oranının belirli bir seviyeyi aşması durumunda bağlayıcının esnekliğinde azalma eğilimi gözlemlendiği bildirilmektedir (Yıldırım, 2022; Özkan, 2024).

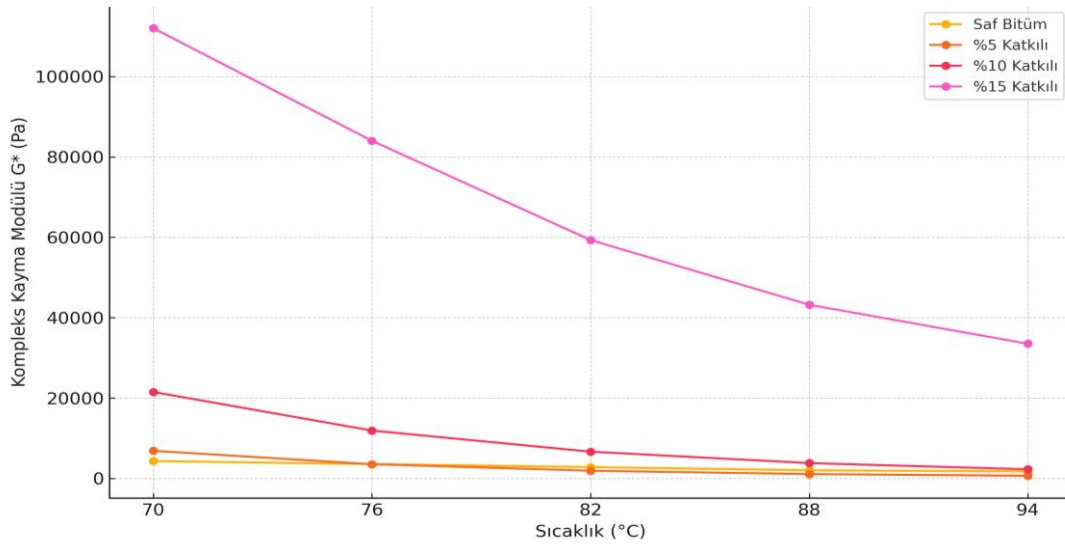
Katkı oranının %15'e yükseltilmesiyle birlikte elastik geri dönme değeri ciddi bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Bu grupta ölçülen ortalama geri dönme değeri %17,3 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, bağlayıcı içerisindeki katkı fazının artık homojen dağılmamakta olduğunu ve faz ayrışması riskinin elastikiyeti olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca katkı oranındaki bu artışın, bağlayıcının gevrekleşmesine neden olduğu ve elastomerik davranışın yerini daha kırılğan bir yapıya bıraktığı düşünülmektedir. Bu durum, önceki çalışmalarda da benzer şekilde ifade edilmiş ve katkı oranının kontrollü bir biçimde sınırlandırılması gerektiği vurgulanmıştır (Erginer, 2021).

Yapılan elastik geri dönme testleri, LDPE esaslı atık kablo talaşının bağlayıcının elastikiyetini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymakla birlikte, bu etkinin katkı oranı ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle %5 oranındaki katkı, elastik performans açısından optimum sonuçları sunarken, katkı oranının artması durumunda bu etkinin azaldığı ve malzeme davranışının olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, sürdürülebilir katkı malzemeleriyle modifiye bağlayıcı üretiminde katkı oranının dikkatle belirlenmesi gerektiğini ve optimum tasarımın hem performans hem de uygulama açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

5.1.3. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Sonuçlarının İncelenmesi

Tez çalışması kapsamında saf ve modifiye bitümlerin yüksek sıcaklıktaki performans seviyeleri TS EN 14770 standardına uygun şekilde analiz edilmiştir. Bu nedenle TS EN 14770 standardına uygun olarak saf ve katkılı bağlayıcılara max. 5 farklı sıcaklıkta (70 °C, 76 °C, 82 °C, 88 °C, 94 °C) deneylere tabi tutulmuştur. Sıcaklık başlangıç değeri 70 °C olarak alınmış ve her artış 6 °C olacak şekilde sıcaklıklar sıralanmıştır. Uygulanan deneylerden elde edilen kompleks modül (G^*) değerlerinin katkı türü ile değişimleri Şekil 5.3'de verilmiştir. Şekil 5.3'de görülen kompleks kayma modülü (G^*) değerleri incelendiğinde sıcaklığın artması ile saf bağlayıcı ve tüm katkı oranlarında G^* değerlerinin azalmış olduğu söylenebilmektedir. Saf bitüm, sıcaklık arttıkça G^* değerinde belirgin bir düşüş göstermekte; yüksek sıcaklıkta yapısal direncini kaybetmektedir. %5 katkı, başlangıçta etkili olsa da yüksek sıcaklıklarda G^* değerleri hızla düşmektedir. %10 katkı, özellikle 70–82 °C aralığında en dengeli G^* performansını sunar. %15 katkı, tüm sıcaklık aralıklarında en yüksek G^* değerini sağlayarak yapısal rijitlik açısından üstün performans sergilemiştir.

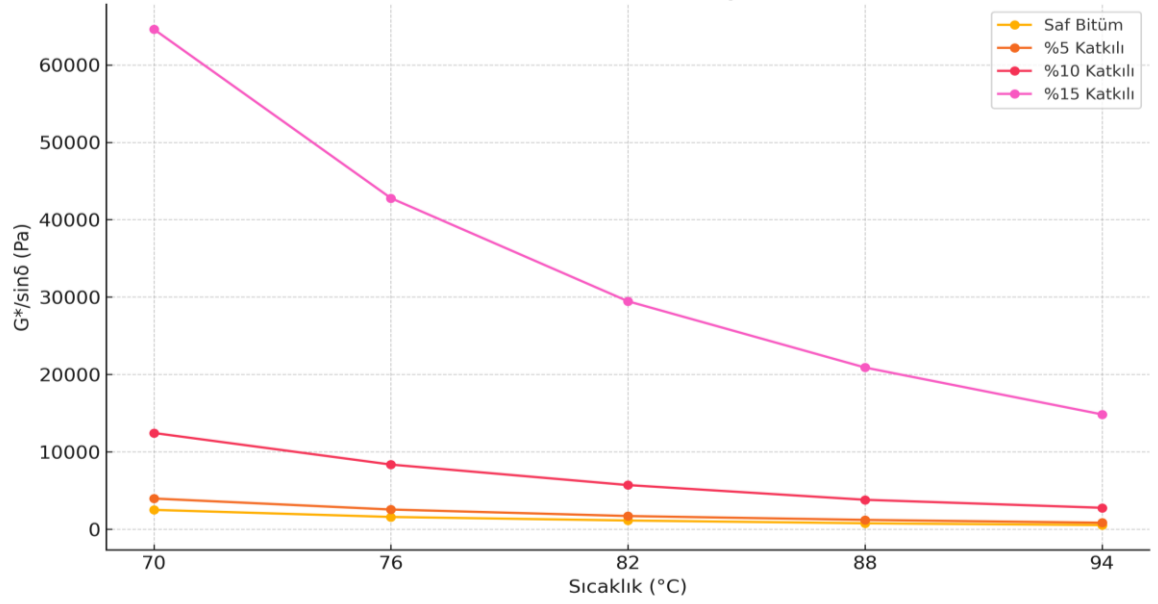
Başlangıç değerine göre kompleks modülündeki bu azalma en fazla saf bağlayıcı ve %5 katkılı bağlayıcıda görülürken katkı içeren bağlayıcılar içerisinde en yüksek kompleks kayma modülü değerini %15 atık kablo talaşı katkısı içeren bağlayıcının verdiği görülmektedir. 76 °C saf ve %5 katkılı bağlayıcıda G^* değerleri eşitlenmiş ve sonrasında da düzenli bir azalış sergileyerek sıfıra yaklaşmıştır. 88 °C'den sonra ise G^* değerlerinin saf, %5 ve %10 bağlayıcıda birbirine yaklaşıp neredeyse sıfırlandığı görülmektedir. 70 °C sıcaklıktaki kompleks kayma modülü değerleri %5, %10 ve %15 atık kablo talaşı ile yapılan modifikasyonda sırasıyla 1,6; 5 ve 26 kat artmıştır.



Şekil 5.3. Saf ve katkılı bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*)-sıcaklık ilişkisi

Bağlayıcıların sıcaklık ile $G^*/\sin\delta$ değerlerinde meydana gelen değişimi Şekil 5.4'de verilmiştir. Şekil 5.4'de verilen tekerlek izi dayanım parametreleri ($G^*/\sin\delta$) incelendiğinde 70 °C'de katkı kullanımı ile değerlerin saf bağlayıcıya göre artış gösterdiği, sıcaklığın artması ile düzenli bir azalış sergilediği görülmektedir. Tüm sıcaklıklarda ve tüm yüzdelikler arasında en yüksek $G^*/\sin\delta$ değerini %15 atık kablo talaşı ile hazırlanan bağlayıcı verirken, en düşük $G^*/\sin\delta$ değeri saf bağlayıcıda gözlenmiştir. %5, %10 ve %15 atık kablo ile oluşturulan bağlayıcıların 70 °C'deki $G^*/\sin\delta$ değerleri saf bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değerlerine göre sırasıyla 1,58; 4,98 ve 25,89 kat artmıştır. %15 katkılı bağlayıcı, tüm sıcaklık aralığında açık ara en yüksek $G^*/\sin\delta$ değerlerine sahip olduğu için, tekerlek izi direnci bakımından en iyi performansı gösteren bağlayıcıdır. Tekerlek izi (rutting) direnci, yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyona karşı bağlayıcının performansını belirler ve $G^*/\sin\delta$ değeri bu bağlamda kritik bir parametredir. En yüksek $G^*/\sin\delta$ değeri, daha yüksek rijitlik ve daha az deformasyon anlamına gelir. Bu çalışma için sadece tekerlek izi

dayanımı bakımından kablo talaşı katkısının en etkin yüzdelik değerin %15 olduğu belirlenmiştir.



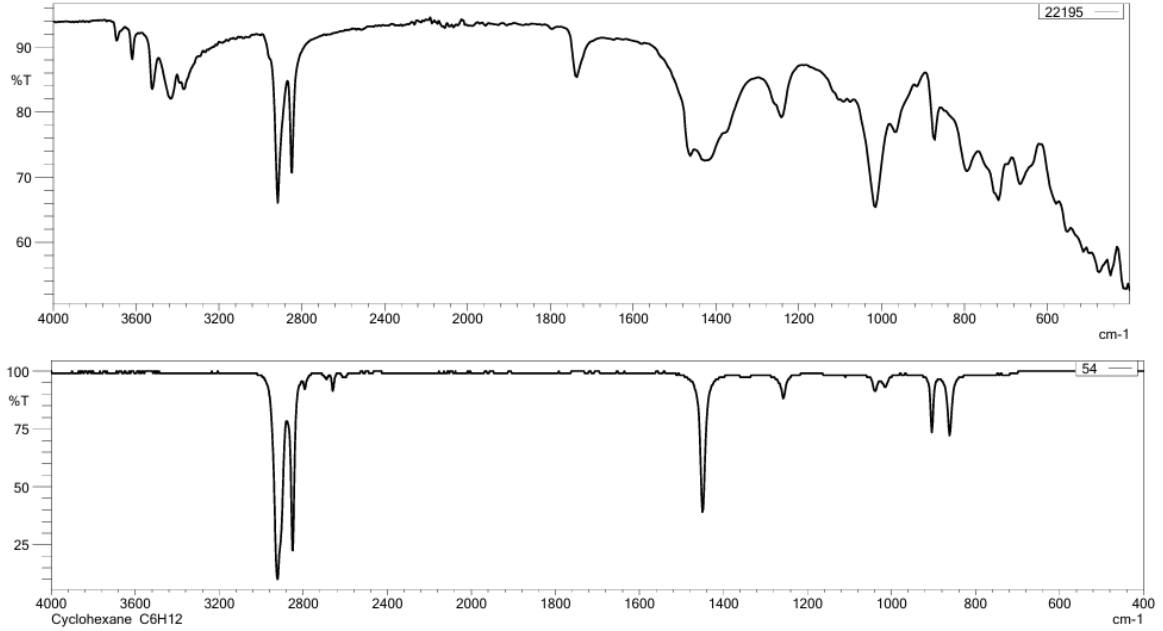
Şekil 5.4. Saf ve katkılı bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ -sıcaklık ilişkisi

5.2. Kimyasal ve Mikroyapısal Bulgular

Bu bölümde, atık kablo talaşı katkı maddesine FTIR ve TGA analizleri, modifiye bitüm numunelerine ise SEM analizi uygulanmıştır. FTIR ve TGA analizleriyle katkının kimyasal yapısı ve ısıl dayanımı belirlenirken; SEM ile bağlayıcı içindeki dağılımı ve mikroyapısal uyumu incelenmiştir. Bu analizler, katkı-bitüm etkileşimini moleküler ve mikroskobik düzeyde değerlendirme imkânı sunmuştur.

5.2.1. FTIR Analizi Bulguları

FTIR (Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi) analizi, bu çalışmada kullanılan katkı malzemesinin kimyasal yapısının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Spektroskopik analizler, örnek içerisinde yer alan bileşenlerin karakteristik fonksiyonel gruplarını ortaya koyarak, materyalin polimerik yapısına ve katkı fazlarına ilişkin kapsamlı bilgiler sunmuştur. Elde edilen spektrum, ATR (Attenuated Total Reflectance) yöntemiyle elde edilip Şekil 5.5’de görüldüğü üzere USKİM laboratuvarında referans kütüphane verileriyle karşılaştırılmıştır.



Score	Library	Name	Comment
1	934	54 - IRs ATR Reagent2	54 Cyclohexane C6H12
2	934	19 - IRs Polymer2	LDPE Low Density Polyethylene Film
3	933	81 - IRs Reagent2	STEAL Aluminium Stearate
4	932	83 - IRs Reagent2	STEAMG Magnesium Stearate [CH3(CH2)16COO]2Mg
5	930	71 - IRs Polymer2	VLDPE Low Density Polyethylene Film
6	930	85 - IRs Reagent2	STEAZN ZINC STEARATE [CH3(CH2)16COO]2Zn
7	929	40 - IRs ATR Reagent2	40 Arbutin C12H16O7
8	929	220 - IRs ATR Reagent2	220 1-Tetradecanol CH3(CH2)13OH
9	928	170 - IRs Agrichemicals	delta-BHC Standard ATR method(KRS-5 prism)
10	928	20 - IRs Polymer2	LLDPE Low Density Polyethylene
11	928	170 - IRs Agrichemicals	delta-BHC Standard ATR method(KRS-5 prism)
12	928	172 - IRs Agrichemicals	beta-BHC Standard ATR method(KRS-5 prism)
13	928	172 - IRs Agrichemicals	beta-BHC Standard ATR method(KRS-5 prism)
14	927	69 - IRs Agrichemicals	Aldicarb ATR method(KRS-5 prism)
15	927	84 - IRs Reagent2	STEANA Sodium Stearate CH3(CH2)16COONa ATR-Diamond ATRcorrected
16	927	79 - IRs ATR Reagent2	79 Methanol CH3OH
17	927	69 - IRs Agrichemicals	Aldicarb ATR method(KRS-5 prism)
18	926	49 - IRs ATR Reagent2	49 Decalin C10H18
19	925	17 - IRs Polymer2	IONOMER2 Ionomer (Zn Type) surlyn1652 Film
20	925	43 - IRs Reagent2	CHCL3 Chloroform [CHCl3] ORIGIN Date: 91/10/14 File: CHCL3.DX INFRARED SPECTROPHOTOMETER FTIR-8000 SERIES

Şekil 5.5. FTIR spektrum grafiği ve kütüphane eşleşme listesi-ÜSKİM

Analiz sonuçlarına göre en yüksek korelasyon skorları, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), çok düşük yoğunluklu polietilen (VLDPE), lineer düşük yoğunluklu polietilen

(LLDPE) ve çeşitli metal stearatlar (alüminyum, magnezyum, çinko ve sodyum stearat) ile eşleşmiştir. Spektral bantlar, $2915\text{--}2849\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında yer alan karakteristik C–H gerilme titreşimleri ve $1465\text{--}720\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bükülme modları ile LDPE varlığını doğrulamaktadır. Bu durum, katkı malzemesinin polimer matrisinin temel olarak LDPE esaslı olduğunu açıkça göstermektedir. LDPE, plastik bazlı sanayi atıklarında yaygın biçimde karşılaşılan ve termoplastik özellikleriyle bilinen bir polimerdir.

Spektrumda ayrıca $1700\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlemlenen absorpsiyon bantları, metal stearat katkılarına ait karboksilat (COO^-) gruplarını işaret etmektedir. Alüminyum stearat, magnezyum stearat, çinko stearat ve sodyum stearatın karakteristik piklerinin bu bölgelerde yer alması, katkı malzemesinin yalnızca polietilen polimerlerinden değil; aynı zamanda işlem kolaylaştırıcı ve termal stabiliteyi artırıcı katkı fazlarından oluştuğunu göstermektedir. Bu tür stearatlar, özellikle kablo izolasyonu gibi sanayi uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmekte olup, kaydırıcılık, yapışmayı azaltma ve stabilite gibi işlevsel katkılar sunmaktadır.

FTIR analizinde düşük düzeyde gözlemlenen çözücü kalıntılarına işaret eden bileşenler de tespit edilmiştir. Spektrumda cyclohexane ve chloroform gibi maddelerin düşük yoğunluklu geçiş bantlarının bulunması, muhtemelen numune hazırlığı sürecinde kullanılan çözücülerden kaynaklanan izlerin analizde yer aldığını düşündürmektedir. Ancak bu maddelerin temel yapı içinde dominant bir faz oluşturmadığı anlaşılmaktadır.

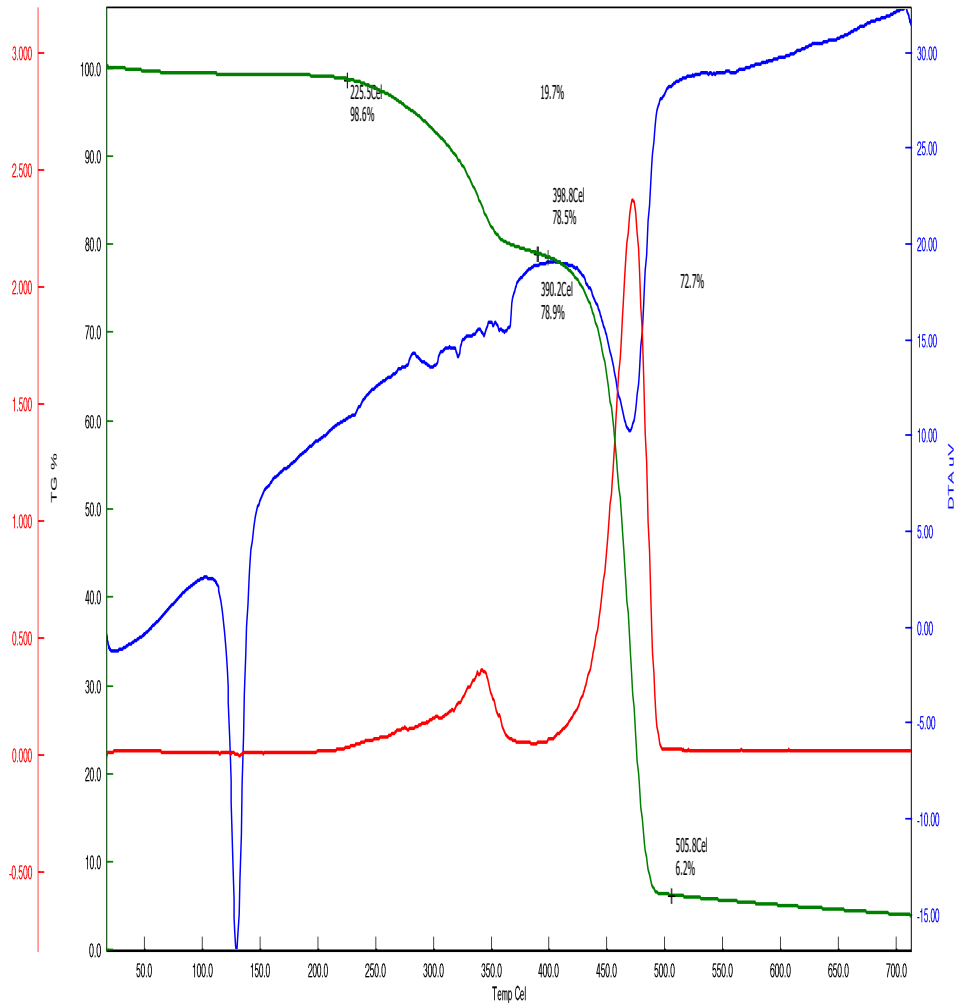
FTIR analizleri, katkı malzemesinin LDPE temelli, metal stearat içeren çok fazlı bir plastik yapıdan oluştuğunu göstermiştir. Bu bulgular, geri kazanılmış polimer atıklardan elde edilen katkının, modifiye bitüm bağlayıcılarda kullanılmaya uygun, çok bileşenli ve işlevsel bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır.

5.2.2. TGA Analizi Bulguları

Şekil 5.6'da çalışmada kullanılan atık kablo talaşı esaslı katkı malzemesinin sıcaklığa bağlı kütle değişimini gösteren TGA (Termogravimetrik Analiz) eğrisi görülmektedir.

TGA (Termogravimetrik Analiz) sonuçları, atık kablo talaşı katkı malzemesinin termal stabilitesi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Analiz, 11.686 mg başlangıç örnek kütlesi üzerinden yapılmış olup, sıcaklık arttıkça malzemenin kütleinde meydana gelen değişimleri detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Şekil 5.6'da görülen TGA eğrisi,

malzemenin farklı sıcaklık aralıklarında gösterdiği ağırlık kayıplarını kademeli şekilde göstermektedir.



Şekil 5.6. Atık kablo talaşı TGA sonuç grafiği -ÜSKİM

TGA eğrisine göre, katkı malzemesi ilk olarak yaklaşık 200–300 °C arasında kütle kaybı göstermeye başlamış, bu durum numunede bulunan düşük molekül ağırlıklı uçucu bileşiklerin ayrışmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bu bölgedeki kütle kaybı genellikle polimer atıkların içeriğinde yer alan katkı maddeleri (örn. plastifiyanlar veya yüzey aktif ajanlar) ya da nem ve gaz kalıntılarının buharlaşmasından kaynaklanır.

İkinci belirgin kütle kaybı evresi, yaklaşık 350–500 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir. Bu bölge, esasen polimer matrisin (özellikle LDPE bazlı yapıların) termal bozunmaya uğradığı aşamadır. LDPE'nin ayrışma sıcaklığı literatürde 400–480 °C aralığında raporlanmakta olup, elde edilen eğri ile bu değerler büyük ölçüde örtüşmektedir.

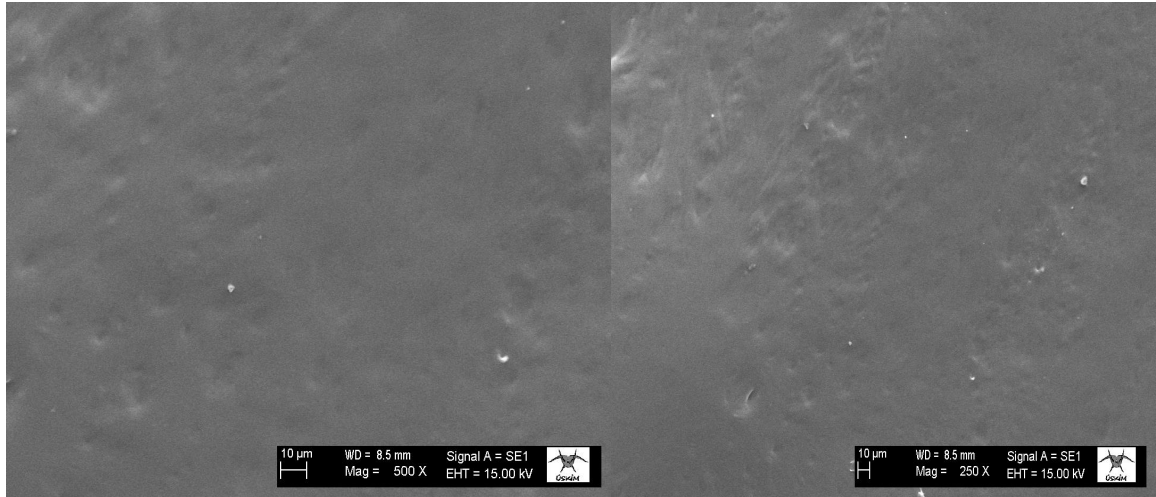
Bu da katkı malzemesinin temel yapısının düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) esaslı olduğunu doğrulamaktadır.

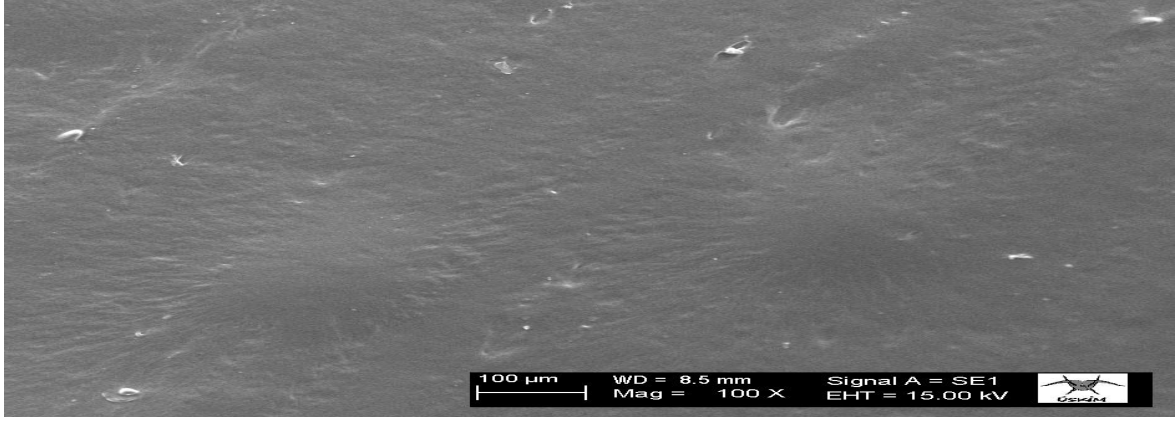
Yüksek sıcaklık bölgesinde (500 °C üzeri) eğrinin yavaşlayarak stabil hale gelmesi, termal bozunmanın büyük ölçüde tamamlandığını ve geriye yalnızca mineral kalıntıların veya inorganik katkı fazlarının kaldığını göstermektedir. Bu durum, malzemenin yapısında termal olarak dirençli bazı katkıların (örneğin metal stearatlar) bulunduğunu düşündürmektedir.

TGA verileri, katkı malzemesinin çok aşamalı termal bozunma süreci geçirdiğini ve yapısında hem organik polimer matrisin hem de inorganik katkı bileşenlerinin bulunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda TGA bulguları, FTIR analiz sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, malzemenin LDPE temelli ve çok fazlı, işlevsel bir polimer-kompozit yapıya sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca malzemenin ısıya karşı gösterdiği direnç, modifiye bitüm uygulamalarında yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren koşullar için uygun olduğunu da ortaya koymaktadır.

5.2.3. SEM Görüntüleme ve Yorumlaması

%5 katkı oranına sahip modifiye bitüm örneklerine ait farklı büyütme seviyelerinde ve farklı bölge tiplerinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

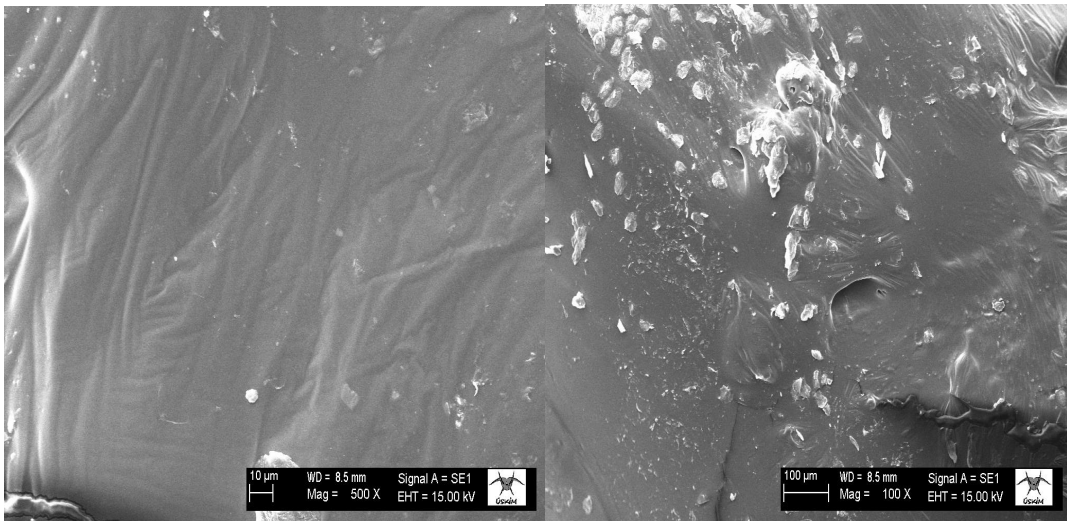




Şekil 5.7. %5 LDPE Katkılı Bağlayıcının Mikroyapısal SEM Görüntüleri

Şekil 5.7'ye göre katkı maddesinin bağlayıcı matris içinde oldukça homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Bu mikroyapısal görsellerde, katkı partikülleri bağlayıcı içerisine düzenli olarak gömülmüş, parçacıklar arası mesafe dengeli, ve yüzeyde belirgin bir pürüzsüzlük gözlemlenmiştir. Katkı ile bağlayıcı arasında gözle görülür bir uyum oluşmuş, ara yüzeylerde boşluk, çatlak başlangıcı ya da ayrışma belirtisi bulunmamıştır.

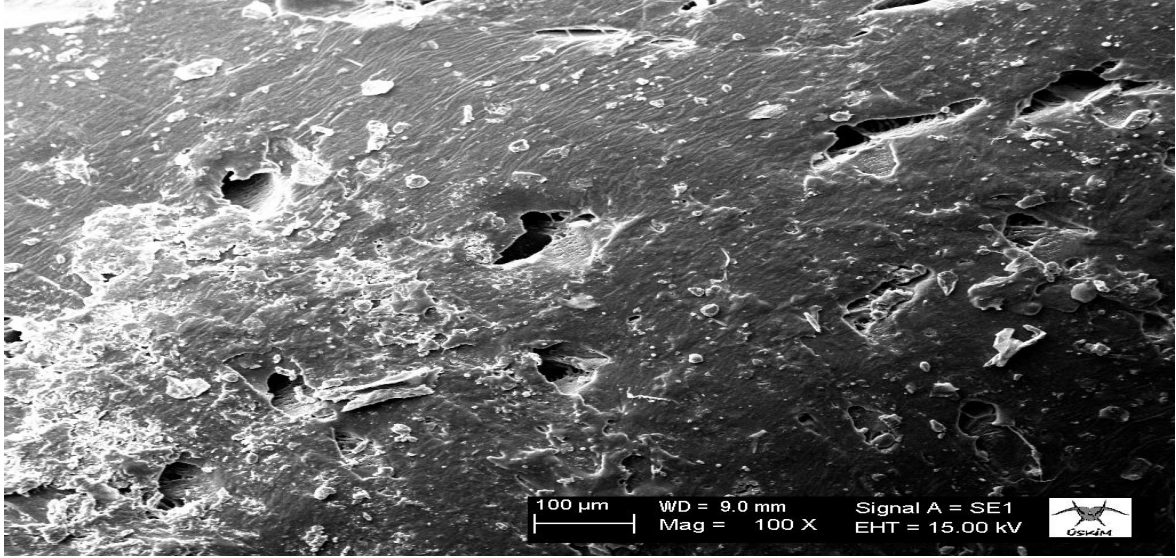
Bu durum, katkının bağlayıcıya yalnızca fiziksel olarak entegre olmadığını, aynı zamanda katkı-bitüm arasında uygun kimyasal etkileşimlerin de gelişmiş olabileceğini düşündürmektedir. %5 oranındaki katkının hem dispersiyon kolaylığı hem de bağlayıcı ile bütünlük oluşturma açısından optimum bir seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Bu yapı sayesinde, modifiye bitümün hem kısa vadeli işlenebilirliği hem de uzun vadeli performansı (çatlama direnci, deformasyon dayanımı vb.) açısından olumlu sonuçlar vereceği öngörülebilir.



Şekil 5.8. %10 LDPE Katkılı Bağlayıcının Mikroyapısal SEM Görüntüleri

Şekil 5.8’ de %10 katkılı LDPE bağlayıcıya ait verilen görsellerde, katkı partikülleri bağlayıcı içinde makul düzeyde dağılmış, birçok bölgede ara yüzey sürekliliği sağlanmıştır. Özellikle 100x büyütme ile alınan SEM görüntüsünde, katkıların hem boyutsal olarak daha homojen olduğu hem de birbirine yapışmadan dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu yapı, karıştırma sürecinin kontrollü yapıldığını ve katkının bağlayıcıya etkin biçimde entegre edildiğini göstermektedir.

Ancak dikkat çekici bir ayrıntı olarak, bu homojenlik yalnızca bazı lokal alanlarda gözlemlenmiştir. %10 katkı oranı, belirli bölgelerde başarılı sonuçlar vermekle birlikte, genel dispersiyon kalitesinde %5 oranına kıyasla düşüşler göstermektedir. Bu durum, katkı miktarının artmasıyla birlikte karışımın viskozitesinde yaşanan değişimlerin partiküllerin matris içinde dağılmasını zorlaştırdığını ve buna bağlı olarak bazı bölgelerde topaklanma veya mikroboşluk oluşumu riskinin yükseldiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.9. %15 LDPE Katkılı Bağlayıcının Mikroyapısal SEM Görüntüleri

Şekil 5.9’ da gösterilen %15 katkı oranı ile elde edilen örnekte genel olarak düzensiz, heterojen ve ayrılmış bir yapı hâkimdir. Katkı partikülleri büyük kütleler hâlinde bir araya gelmiş, bağlayıcıdan ayrılmış ve boşluklu bölgeler oluşturmuştur. Şekil 5.8 numunesi bu anlamda görece olarak daha iyi bir yapıya sahip olsa da, bu yapı bile %5 katkılı örneklerde gözlemlenen düzen ve homojenlik düzeyine erişememektedir. Bu durum, katkı oranının artmasıyla birlikte mikroyapısal uyumun bozulduğunu, katkının bağlayıcıya entegre edilmesinin zorlaştığını göstermektedir. Aynı zamanda bu oran, viskozite artışına ve karışım işlenebilirliğinin düşmesine neden olmaktadır.

%5, %10 ve %15 katkı oranlarına ait SEM görüntüler birlikte değerlendirildiğinde, mikroyapısal homojenlik, katkı-bitüm ara yüzey uyumu ve parçacık dağılım dengesi açısından en başarılı yapıların %5 katkı oranında elde edildiği görülmüştür. %10 oranında bu yapı kısmen korunabilmiş; ancak dispersiyon kalitesinde düşüş gözlenmiştir. %15 oranında ise mikroyapısal süreklilik ciddi şekilde zayıflamış, topaklanma ve ayrışmalar belirgin hâle gelmiştir.

Bu bulgular ışığında, katkı oranı arttıkça dispersiyonun zorlaştığı, katkıların bağlayıcı içerisine yeterince entegre olamayıp fiziksel ayrışmalar ve boşluklar oluşturduğu, bunun da hem mikroskobik hem de makroskobik düzeyde mekanik performansı olumsuz yönde etkileyebileceği sonucuna ulaşılmaktadır. Optimum katkı oranının %5 ile %10 arasında olduğu; ancak yapının bütünlüğünün korunabilmesi için %5 oranının en uygun seviye olduğu değerlendirilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, LDPE esaslı atık kablo talaşı kullanılarak modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların fiziksel, mekanik, reolojik, kimyasal ve mikroyapısal özelliklerinin sistematik bir şekilde değerlendirilmesini amaçlamıştır. Çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik verimlilik ve mühendislik performansı boyutlarını bir araya getiren bu çalışma, kablo soyma ve ayrıştırma işlemleri sonucu ortaya çıkan atık kablo talaşlarının asfalt bağlayıcılarında katkı maddesi olarak yeniden işlevlendirilmesinin mümkün ve verimli olduğunu ortaya koymuştur.

Yürütülen deneysel çalışmalar kapsamında; %5, %10 ve %15 oranlarında katkı içeren modifiye bitüm numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme, DSR (Dinamik Kayma Reometresi) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri uygulanırken; katkı maddesi olan atık kablo talaşının karakterizasyonu amacıyla ise FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) ve TGA (Termogravimetrik Analiz) testleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda;

- Fiziksel ve mekanik performans açısından, kablo talaşı katkısının bitümün sertliğini artırdığı (penetrasyon değerlerinde düşüş), yumuşama noktasını yükselttiği ve elastik geri dönüş kapasitesini sınırlı geliştirdiği tespit edilmiştir. Özellikle %10 katkı oranı, optimum performans değerlerine ulaşılması açısından belirgin bir eşik olarak ön plana çıkmıştır.
- LDPE esaslı atık kablo talaşı, elastik geri dönme kapasitesini sınırlı düzeyde artırmıştır. Bu katkının elastomerik özellikleri yetersiz kaldığından, elastikiyeti artırmak için SBS, SEBS veya EVA gibi elastomer katkılarla birlikte kullanılması önerilmektedir. Bu kapsamda, elastomer-atık kombinasyonlarının viskoelastik performans üzerindeki etkilerinin ilerleyen çalışmalarda araştırılması gerekmektedir.
- Reolojik özellikler, DSR analizleriyle değerlendirilmiş; katkı oranı arttıkça kompleks kayma modülünün (G^*) yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, bağlayıcının yüksek sıcaklık dayanımının arttığını göstermektedir. Sadece tekerlek izinde dayanım bakımından değerlendirildiğinde kablo talaşı katkısının en etkin yüzdelik değerinin %15 olduğu belirlenmiştir.

- FTIR analiz bulguları; bu çalışmada kullanılan atık kablo talaşı esaslı katkı maddesinin polimer esaslı çok fazlı bir yapıya sahip olduğunu, termoplastik özelliklerinin yanı sıra işlem kolaylaştırıcı katkılarla zenginleştirildiğini ve bu yönleriyle modifiye bitüm sistemlerine teknik açıdan entegre olmaya son derece uygun bir nitelik taşıdığını net biçimde ortaya koymuştur. Bu bulgular, modifikasyonun kimyasal düzeyde etkinliğini ve katkı maddesinin sürdürülebilir inşaat teknolojileri bağlamında değerlendirilebilirliğini güçlü biçimde desteklemektedir.
- Termal dayanım yönünden TGA analizleri, atık kablo talaşının yaklaşık 500 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara karşı stabilitesini koruyabildiğini, LDPE esaslı yapısının 350–500 °C aralığında ayrıştığını ve geriye kalan inorganik fazların (örneğin metal stearatlar) yüksek ısıya dirençli olduğunu ortaya koymuştur.
- Mikroyapısal değerlendirmelerde, SEM görüntüleri %5 ve %10 katkı oranlarında homojen dağılım sağlandığını; %15 oranında ise sınırlı kümelenme eğilimlerinin başladığını göstermiştir. Bu da katkının fiziksel uyumunu ve mikrometrik bütünlüğünü doğrulayan bir bulgudur.

Tüm bu bulgular, LDPE esaslı atık kablo talaşının yalnızca çevresel atık yükünü azaltan bir geri dönüşüm malzemesi değil; aynı zamanda teknik anlamda performans artırıcı bir modifikasyon olduğunu kanıtlamaktadır. Tezin özgün yönü, endüstriyel süreçlerden çıkan, düşük katma değerli ve çoğunlukla bertaraf edilen kablo talaşlarının asfalt bağlayıcılarda işlevsel olarak kullanılabileceğini, laboratuvar verilerine dayalı olarak göstermesidir. Bu katkı, geleneksel elastomer katkıların çevresel, ekonomik ve tedarik temelli dezavantajlarını minimize edecek yerli bir alternatif niteliğindedir.

Ancak bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Deneysel analizler yalnızca laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş; saha uygulamaları, trafik yükleri altındaki uzun vadeli davranışlar ve iklim etkileri değerlendirme dışı bırakılmıştır. Çalışmada yalnızca saf bitüm ve modifikasyonu değerlendirilmiş olup, asfalt karışımlarıyla ilgili bir analiz yapılmamıştır. Bu nedenle, elde edilen sonuçların saha koşullarına genellenebilmesi için daha ileri çalışmalara ihtiyaç vardır.

LDPE esaslı atık kablo talaşı ile modifiye edilmiş bitüm, sürdürülebilir malzeme teknolojileri ve döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde umut vadeden bir katkı maddesi

olarak değerlendirilmelidir. Çalışmada nerilen katkı türü; teknik uygunluğu, ekonomik erişilebilirliği ve çevresel avantajlarıyla birlikte, asfalt kaplama performansının iyileştirilmesine yönelik yerli ve yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

Bu tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmaların bütünsel değerlendirmesi sonucunda, atık kablo talaşı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılarda en uygun performansın %10 katkı oranında elde edildiği belirlenmiştir. %10 oranındaki katkı, hem fiziksel ve mekanik testler (penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme) hem de reolojik (DSR), mikroyapısal (SEM) analizler açısından dengeli sonuçlar vermiştir. Bu katkı düzeyinde bağlayıcı, yüksek sıcaklık dayanımı, elastikiyet, termal stabilite ve homojen faz dağılımı gibi kriterler bakımından optimize edilmiş bir yapı sergilemiştir. Dolayısıyla %10 katkı oranı, mühendislik performansı ile işlenebilirlik arasında en uygun dengeyi sunarak modifikasyon süreci açısından optimum katkı seviyesi olarak önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, A.M., (2023). *Atık lastik modifiye bitümün asfalt betonunun performansına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Eskişehir. 125s.
- Ahmedzade, P., Famleib, A., Günay, T., Grigoryeva, O. (2016). Geri dönüştürülmüş atık polipropilenin bitümlü bağlayıcılarda kullanılması. *Teknik Dergi*, 27(3), 7497-7513.
- Akalın, K. B., Karacasu, M. (2020). Çevresel atıklarla modifiye edilmiş sathi kaplamaların performansının agrega-bitüm ilişkisi bağlamında değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(1), 127-136.
- Akyol, F., (2024). *Geri kazanılmış geofom blok dolgular için esnek üst yapı imalatlarında geri kazanılmış asfalt agregasının kullanımının prototip modeller ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. Kocaeli. 129s.
- Atasağun, N. (2021). Atık çınar yaprakları ve plastik bardakların birlikte pirolizinden üretilen piroliz çarının bitümün viskozitesi ve yüksek sıcaklık performans sınıfı üzerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1703-1714. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.843014>
- 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), 339-346. <https://doi.org/10.35234/fumbd.868039>
- Demirbağ, A., (2021). *Farklı elastomerlerden elde edilen modifiye bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlandırmadan önce ve sonra reolojik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elazığ. 139s.
- Duygun, Y. E., Taşdemir, (2024). M. Analysis of Mechanical Properties of EVOH/LDPE Films Produced with Waste EVOH and LDPE. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 182-191.
- Erginer, İ. (2018). *Modifiye Bitümlü Karışımların Marshall Stabilite Değerlerinin Yapay Sinir Ağı İle Tahmini*. Yüksek Lisans Tezi. İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü. Hatay. 119s.

- Erkuş, Y., Kök, B. V., Yılmaz, M. (2023). Comparison of the conventional-rheological properties of Iraq gilsonite and SBS modified bitumen. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 41(6), 1096-1105.
- Gawande, A. Zamre, G., Renge, V. C., Bharsakale G. R., (2012). Utilization of Waste Plastic in Asphaltting of Roads. *Scientific Rewiews and Chemical Communications*: 2 (2), 147-157: A Rewiew. <https://www.researchgate.net/publication/265941915>
- Geçkil, T., Önal, Y., İnce, C. B. (2021). Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 461-471. <https://doi.org/10.2339/politeknik.699662>
- Hall, F., White, G. (2021). The Effect of Waste Plastics on the Ageing Phenomenon of Bituminous Binders and Asphalt Mixtures. *Materials*, 14(20), 6176. <https://doi.org/10.3390/ma14206176>
- İnce, M., (2012). *Asfalt kaplama yol üstyapılarında oluşan bozulmaların araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Samsun. 99s.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., (2001). *Asfalt ve Uygulamaları*. İstanbul. 280s.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, (2019). *Karayolları Beton Yol Üstyapıları Projelendirme Rehberi*. Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü. Ankara. 149s.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, (2021). *Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı*. Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü. Ankara. 302s.
- Kök, B. V., Çolak, H. (2011). Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3204-3212.
- Kök, B. V., Erkuş, Y., Yılmaz, M. (2021). Evaluation of the cohesive properties of SBS-modified binders at low temperatures. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 29(1), 27-34.

- Köse, H., Çelik, O. N. (2022). Yüksek Yoğunluklu Polietilen Atık Plastikinin Pirolizinden Elde Edilen Ürünlerin Ilık Karışım Asfalt Katkısı Olarak İncelenmesi. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(1), 31-46.
- Özdemir, A. M., Yalçın, E., Yılmaz, M., Kök, B. (2024). Dynamic-Mechanic Analysis and Rheological Modelling of Waste Face Mask Modified Bitumen. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 35(1), 85-108. <https://doi.org/10.18400/tjce.1265014>
- Özdemir, A.M., Yalcin, E., Yilmaz, M. (2021). Determination of complex modulus values of low-density polyethylene modified bitumen obtained by using two different waste types with artificial neural networks. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 12, 67-75
- Özkan, M., (2024). *Çam çırasından elde edilen püse (çam özü) katkısının modifiye bitümün reolojik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Toros Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. Mersin. 69s.
- Rudram, C. and Ramavathu, L. N. (2018, March). Study of Economics and Stability of Bituminous Road by using Waste Plastic. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 6 (3), pp. 1541-1548. doi: 10.22214/ijraset.2018.3237
- S. Aldagari, S.F. Kabir, E.H. Fini, (2022). “A comparative study on efficacy of waste plastic and waste Rubberin bitumen,” *Construction and Building Materials*, c. 325, s. ss. 126724.
- Sarışın, E., Yalçın, E., Öner, J., (2021). Analysis of rheological properties of modified bitumen with hybrid polymers. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* , vol.36, no.1, 201-212.
- Sayedzada, S.E., (2023). *Farklı Elastomer Modifiyeli Bitümlerle Hazırlanan Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elazığ. 94s.
- Shi, K., Ma, F., Fu, Z., Song, R., Yuan, D.,Ogbon, A. W. (2024). Enhancing aged SBS-modified bitumen performance with unaged bitumen additives. *Construction and Building Materials*, 412, 134768.

- Soliman, H., Osei, P., Shalaby, A. (2023). Performance of Bituminous Binder Modified with Recycled Plastic Pellets. *Materials*, 16(20), 6730. <https://doi.org/10.3390/ma16206730>
- Suny Group, (2024). Composition of copper wire recycling equipment. <https://www.sunycopperrecycle.com/tag/composition-of-copper-wire-recycling-equipment/> (Erişim tarihi:07.07.2025)
- şimşek, A., (2021). *Grafen ile modifiye edilmiş bitümlerin optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum. 81s.
- Timakov, E. A., Panov, Y. T., Vihrev, A. V., Provatorova, G. V., & Timantsev, Y. A. (2021, December). Modification of a bituminous binder using waste products from the polymer industry. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2131, No. 4, p. 042042). IOP Publishing.
- TS EN-1426, (2015). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-iğne batma derinliği tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Yıldırım, K., (2022). *Kısa ve uzun dönem yaşlandırmanın modifiye bitümlerin reolojik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elazığ. 93s.