

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜRDÜRÜLEBİLİR ASFALT KAPLAMALAR İÇİN ATIK
YAĞLARIN BİTÜM MODİFİKASYONUNDA KULLANIMI**

Gülşah ÖZ KICI

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet SALTAN**

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA- 2025**



© 2025 [Gülşah ÖZ KICI]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	10
2.1. Atık Yağların Modifikasyon ve Gençleştirme Adına Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanımına İlişkin Yapılan Bilimsel Çalışmalar	21
3. MATERYAL.....	47
3.1. Bitüm	47
3.2. Agregas	47
3.3. Atık yağ	48
3.3.1. Atık yemeklik yağ (AYY)	49
3.3.2. Atık endüstriyel yağ (AEY) ve atık motor yağı (AMY)	53
4. METOT	59
4.1. Bitümlü Bağlayıcı Yaşlandırma Simülasyonu İçin Geliştirilmiş Laboratuvar Yöntemi	59
4.2. Bitümlü Bağlayıcı Modifikasyonu	69
4.3. Standart Bitümlü Bağlayıcı Deneyleri.....	71
4.4. Bitümlü Bağlayıcı Karakterizasyonu	72
4.4.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR).....	72
4.4.2. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımlı X – ışını spektroskopisi (EDS).....	73
4.4.3. X-ışını difraktometresi (XRD).....	74
4.3. Superpave Bağlayıcı Deneyleri	74
4.3.1. Dinamik kesme reometresi (DSR).....	77
4.3.2. Kiriş eğilme reometresi (BBR).....	82
4.4. Bitümlü Karışımların Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı Yöntemine göre Hazırlanması ve Değerlendirilmesi	83
4.4.1. Agregas gradasyonunun belirlenmesi	84
4.4.2. Optimum bitüm miktarının saptanması	85
4.4.3. Nem hassasiyetinin değerlendirilmesi	87
4.5. Hamburg Tekerlek İzi (HWT) Deneyi	89
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	92
5.1. Standart Bitümlü Bağlayıcı Deneyleri Sonuçları	92
5.1.1. Penetrasyon deneyi sonuçları	92
5.1.2. Yumuşama noktası deneyi sonuçları	94
5.1.3. Düktilite deney sonuçları	96
5.1.4. Penetrasyon indeksi (PI) analizi sonuçları.....	98
5.1.5. Dönel viskozimetre deney sonuçları.....	100
5.2. Bitümlü Bağlayıcı Karakterizasyonu Sonuçları	108
5.2.1. SEM ve EDS sonuçları	108
5.2.2. XRD sonuçları	117
5.2.3. FTIR sonuçları	121

5.3. Superpave Bağlayıcı Deney Sonuçları	125
5.3.1. Dinamik kesme reometresi deney sonuçları	125
5.3.2. Kiriş eğilme reometresi deney sonuçları	131
5.4. Bitümlü Karışımlara Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	133
5.4.1. Optimum bitüm oranlarının tayini	134
5.4.2. Nem hassasiyetinin ve dayanım değerlerinin belirlenmesi deney sonuçları	135
5.5. Hamburg tekerlek izi deney sonuçları	139
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	142
KAYNAKLAR	150
ÖZGEÇMİŞ	168



ÖZET

Doktora Tezi

SÜRDÜRÜLEBİLİR ASFALT KAPLAMALAR İÇİN ATIK YAĞLARIN BİTÜM MODİFİKASYONUNDA KULLANIMI

Gülşah ÖZ KICI

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

Sürdürülebilir ulaşım hedeflerinin ön plana çıktığı günümüzde, yol yapımında kullanılan malzemelerin çevresel etkilerini azaltmak ve kaynak kullanımını daha verimli hâle getirmek büyük önem arz etmektedir. Özellikle bitümlü bağlayıcıların üretimi ve kullanımı sırasında karşılaşılan çevresel sorunlar, alternatif malzeme çözümlerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu kapsamda, atık malzemelerin yeniden kullanımı ve mevcut malzemelerin hizmet ömrünün uzatılması üzerine çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Atık yağların bitümlü bağlayıcılarda gençleştirici olarak değerlendirilmesi ise hem çevre dostu bir yaklaşım sunmakta hem de yaşlanma kaynaklı performans düşüşlerini gidermede etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu tez kapsamında, atık yağlarla modifiye edilen yaşlanmış bitümlü bağlayıcıların yeniden işlevselleştirilmesi hedeflenerek hem sürdürülebilirlik hem de performans odaklı bir çözüm önerisi geliştirilmektedir.

Çalışmada, kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcıların atık yemeklik, endüstriyel ve motor yağlarla gençleştirilmesi ele alınmıştır. Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış bağlayıcı temininde mevcut yöntemlerin yetersiz kalması göz önüne alınarak, yeterli miktarda ve homojen şekilde yaşlanmış bağlayıcı elde edebilmek amacıyla yeni bir laboratuvar yöntemi olarak hava sirkülasyonlu etüv sistemi geliştirilmiştir. Tez çalışmasında referans değer olan saf bitümlü bağlayıcı ve geliştirilen yöntem ile laboratuvar ortamında yaşlandırılan kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılara ek olarak her bir atık yağ türü için üç farklı modifikasyon oranında (%1, %3 ve %5) hazırlanan numuneler dahil olmak üzere toplam 21 bağlayıcı numunesi değerlendirmeye alınmıştır. Bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri standart bağlayıcı deneyleri ile analiz edilmiştir. Bitüm ve atık yağ örneklerinin fizikokimyasal ve yapısal özellikleri; FTIR Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile fonksiyonel grup analizi, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yüzey morfolojisi, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) ile elementel bileşim ve X-ışını Difraktometresi (XRD) ile kristal yapı belirleme yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Reolojik performansın değerlendirilmesi amacıyla Superpave sistemine uygun olarak Dinamik Kesme Reometresi (DSR) ve Eğilen Kiriş Reometresi (BBR) testleri gerçekleştirilmiş; bu sayede yüksek sıcaklık deformasyon direnci ve düşük sıcaklık çatlama eğilimi analiz edilmiştir. Karışım düzeyinde ise Superpave karışım tasarımı doğrultusunda agrega gradasyonları belirlenmiş, optimum bağlayıcı içerikleri tespit edilmiştir. Hazırlanan

karışımların nem etkisi altındaki dayanımları, İndirekt Çekme Dayanımı (ITS) ve Çekme Dayanımı Oranı (TSR) testleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca Hamburg Tekerlek İzi (HWT) testi uygulanarak karışımların tekerlek izi direnci ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

Elde edilen deneysel bulgular, farklı atık yağ türlerinin ve modifikasyon oranlarının bitümlü bağlayıcılar üzerindeki etkilerinin yaşlandırma koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Gençleştirme performansı açısından atık yemeklik yağ, özellikle fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından öne çıkarken; karışım performansında ise atık motor yağı, dayanım, nem hassasiyeti direnci ve tekerlek izi dayanımı gibi kritik parametrelerde üstün sonuçlar vermiştir. Kısa dönem yaşlandırmada en yüksek TSR değerleri atık yemeklik yağ ile elde edilirken, uzun dönem yaşlandırmada %1 atık motor yağı ile %110.5'lik en yüksek TSR değeri kaydedilmiştir. Ayrıca, tekerlek izi performansı bakımından da en düşük derinlik değeri olan 1.71 mm yine %1 atık motor yağı ile elde edilmiş, bu da söz konusu modifikasyonun uzun vadeli performans açısından öne çıktığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir ulaşım, bitüm modifikasyonu, atık yağ, atık yemeklik yağ, atık endüstriyel yağ, atık motor yağı, gençleştirme.

2025, 168 sayfa

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

USING WASTE OILS IN BITUMEN MODIFICATION FOR SUSTAINABLE ASPHALT PAVEMENTS

Gülşah ÖZ KICI

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

In today's context where sustainable transportation objectives have come to the forefront, minimizing the environmental impacts of materials used in road construction and ensuring more efficient resource utilization have become increasingly significant. Particularly, the environmental concerns associated with the production and use of bituminous binders have intensified interest in alternative material solutions. In this regard, research efforts have focused on the reuse of waste materials and the extension of existing materials' service life. The use of waste oils as rejuvenators in bituminous binders presents an environmentally friendly approach and has proven to be an effective method in mitigating performance deterioration caused by aging.

This thesis aims to develop a sustainability- and performance-oriented solution by refunctionalizing aged bituminous binders through modification with waste oils. The study investigates the rejuvenation of both short-term and long-term aged bituminous binders using waste cooking oil, industrial oil, and motor oil. Considering the inadequacy of existing laboratory methods in reliably simulating aged binders, a novel laboratory method—a forced air circulation oven system—was developed to produce sufficiently homogeneous and consistently aged binder samples.

In addition to the reference pure binder and binders artificially aged in the laboratory using the newly developed method, a total of 21 binder samples were prepared, including three different modification ratios (1%, 3%, and 5%) for each waste oil type. The physical properties of the binders were analyzed using standard binder tests. The physicochemical and structural characteristics of bitumen and waste oils were characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for functional group analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM) for surface morphology, Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) for elemental composition, and X-ray Diffraction (XRD) for crystalline structure determination.

To evaluate rheological performance, Dynamic Shear Rheometer (DSR) and Bending Beam Rheometer (BBR) tests were conducted in accordance with the Superpave system, enabling analysis of high-temperature rutting resistance and low-temperature cracking susceptibility. At the mixture level, aggregate gradations were selected following Superpave mix design guidelines, and optimum binder contents were determined. The durability of prepared mixtures under moisture conditions was

assessed through Indirect Tensile Strength (ITS) and Tensile Strength Ratio (TSR) tests. Moreover, Hamburg Wheel Tracking (HWT) tests were performed to investigate rutting resistance in detail.

The experimental findings revealed that the effects of different waste oil types and modification rates on bituminous binders vary significantly depending on aging conditions. Waste cooking oil demonstrated superior rejuvenation performance, particularly in terms of physical and chemical properties, whereas waste motor oil exhibited superior results in critical mixture performance parameters such as strength, moisture sensitivity, and rutting resistance. In short-term aging, the highest TSR values were obtained with waste cooking oil, while in long-term aging, the highest TSR value of 110.5% was recorded with 1% waste motor oil. Furthermore, the best rutting performance, indicated by the lowest rut depth of 1.71 mm, was also achieved with 1% waste motor oil, highlighting the long-term performance advantages of this modification.

Keywords: Sustainable transportation, bitumen modification, waste oil, waste cooking oil, waste industrial oil, waste motor oil, rejuvenation.

2025, 168 pages

TEŞEKKÜR

Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca hem akademik hem de kişisel gelişimimde yol gösterici olan, her an yanımda olarak karşılaştığım zorluklarda sabırla destek veren, engin bilgi ve deneyimlerini büyük bir cömertlikle benimle paylaşan, insan odaklı yaklaşımı ve yüksek ahlaki değerleriyle daima örnek aldığım, çalışma disiplini ve kararlılığıyla ilham veren, değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Mehmet SALTAN'a sonsuz şükranlarımı, derin saygılarımı ve en içten sevgilerimi sunarım. Özellikle lisansüstü eğitimim boyunca her karşılaşmamızda içten gülümsemesi, nazik yaklaşımı ve moral verici tutumuyla bana daima iyi hissettiren, destekleyici tavrını hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Suna SALTAN'a gönülden teşekkür ederim.

Doktora tez izleme komitelerinde yer alarak, değerli görüş ve önerileriyle tezimin deneysel çalışmalarına yön veren hocalarım Prof. Dr. Serdal Terzi ve Prof. Dr. Volkan Emre Uz'a katkıları ve destekleri için teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince bilgi paylaşımı ve moral desteği ile büyük katkı sağlayan değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Gizem KAÇAROĞLU ve Öğr. Gör. Dr. Öznur KARADAĞ'a sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim boyunca YÖK 100/2000 Doktora Bursu kapsamında maddi desteğinden dolayı Yükseköğretim Kurulu'na teşekkür ederim. Tezimi FDK-2022-8810 No'lu Proje ile maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim. Tezimin gerçekleşmesinde 124M375 numaralı 1002 Hızlı Destek Programı projesi ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın malzeme temininde verdikleri destekten dolayı ACİÖZ Rafinasyon Tesisine teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımın yürütülmesinde sağladığı katkılar nedeniyle İSFALT A.Ş.'ye ve analiz süreçlerinde verdiği teknik destekten dolayı Laboratuvar Uzmanı Sevcan Servet HAN'a teşekkür ederim.

Bu zorlu ve anlamlı doktora sürecinde, her aşamada yanımda olan, bana güç ve cesaret veren en kıymetli varlıklarım olan aileme en derin teşekkürlerimi sunarım. Öncelikle, akademisyen kimliğiyle sürecin her anında maddi ve manevi destek sağlayarak bana büyük bir güç kaynağı olan sevgili eşim Dr. Öğr. Üyesi Aydın KICI'ya sonsuz minnettarım. Bu süreçte dünyaya gelen oğlum Atlas, hayatı sevme nedenim, en büyük mutluluğum ve her yeni güne çalışmak için duyduğum en güçlü motivasyonum oldu. Annem ise, bu sürecin yükünü omuzlayarak en büyük destekçilerimden biri oldu; torununa sevgiyle annelik yaparken, bana da her zamanki gibi koşulsuz sevgisiyle güç verdi. Bu yolculuğun en zor yanı, hayatım boyunca koşulsuz sevgisi ve desteğiyle yanımda olan, her zaman örnek aldığım babamı kaybetmiş olmamdı. Yokluğunu derinden hissetsem de bana miras bıraktığı değerler yolumu aydınlatmaya devam etti. Bu tezi, manevi varlığıyla daima yanımda hissedeceğim sevgili babama ithaf ediyorum.

Gülşah ÖZ KICI
ISPARTA, 2025

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Tez çalışmasının akış diyagramı	9
Şekil 2.1. Atık kızartma yağı bertaraf zinciri	16
Şekil 2.2. Atık yemeklik yağın oleokimyasal uygulamalarda kullanımı	17
Şekil 2.3. 2019-2023 yılları arasında satışa sunulan ve fiilen toplanan atık motor ve şanzıman yağı miktarları (bin ton)	20
Şekil 2.4. Atık motor ve endüstriyel yağların geri kazanım ve değerlendirme sürecinin şematik yapısı.....	21
Şekil 3.1. Atık yemeklik yağ (a), Atık endüstriyel yağ (b), Atık motor yağı (c)	49
Şekil 3.2. Atık yemeklik yağ FTIR analizi sonucu	52
Şekil 3.3. Atık endüstriyel yağ FTIR analizi sonucu	57
Şekil 3.4. Atık motor yağ FTIR analizi sonucu	57
Şekil 4.1. Superpave deneyleri özet gösterim	77
Şekil 4.2. Faz açısının oluşumu	78
Şekil 4.3. Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışı	79
Şekil 4.4. DSR cihazı çalışma prensibi	80
Şekil 4.5. Çalışmada kullanılan agrega gradasyon eğrisi.....	85
Şekil 4.6. Superpave karışım numunesinin hazırlanması.....	86
Şekil 4.7. Hamburg numunesinin hazırlanması	91
Şekil 5.1. Kısa dönem yaşlandırma penetrasyon değerleri	93
Şekil 5.2. Uzun dönem yaşlandırma penetrasyon değerleri	94
Şekil 5.3. Kısa dönem yaşlandırma yumuşama noktası değerleri.....	95
Şekil 5.4. Uzun dönem yaşlandırma yumuşama noktası değerleri	96
Şekil 5.5. Kısa dönem yaşlandırma penetrasyon indeksi değerleri.....	99
Şekil 5.6. Uzun dönem yaşlandırma penetrasyon indeksi değerleri	100
Şekil 5.7. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri	101
Şekil 5.8. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri	103
Şekil 5.9. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri	104
Şekil 5.10. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri	105
Şekil 5.11. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri	106
Şekil 5.12. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri	107
Şekil 5.13. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma SEM görüntüleri.....	109
Şekil 5.14. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma SEM görüntüleri.....	110
Şekil 5.15. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma SEM görüntüleri	112
Şekil 5.16. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma SEM görüntüleri.....	113
Şekil 5.17. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma SEM görüntüleri	114
Şekil 5.18. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma SEM görüntüleri.....	116
Şekil 5.19. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma XRD sonuçları.....	118
Şekil 5.20. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma XRD sonuçları	118
Şekil 5.21. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma XRD sonuçları.....	119
Şekil 5.22. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma XRD sonuçları.....	119
Şekil 5.23. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma XRD sonuçları	120

Şekil 5.24. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma XRD sonuçları.....	120
Şekil 5.25. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma FTIR sonuçları	122
Şekil 5.26. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma FTIR sonuçları	122
Şekil 5.27. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma FTIR sonuçları.....	123
Şekil 5.28. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma FTIR sonuçları	123
Şekil 5.29. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma FTIR sonuçları.....	124
Şekil 5.30. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma FTIR sonuçları.....	124
Şekil 5.31. Kısa dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların faz açısı değerleri	126
Şekil 5.32. Kısa dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri	128
Şekil 5.33. Uzun dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların faz açısı değerleri	129
Şekil 5.34. Uzun dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların $G^*.\sin(\delta)$ değerleri.....	130
Şekil 5.35. Uzun dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların sünme sertliği değerleri	132
Şekil 5.36. Uzun dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların sünme oranı değerleri	133
Şekil 5.37. Çalışmada kullanılan optimum bitüm oranları	134
Şekil 5.38. Kısa dönem yaşlandırma için ITS değerleri	135
Şekil 5.39. Uzun dönem yaşlandırma için ITS değerleri	136
Şekil 5.40. Kısa dönem yaşlandırma için TSR değerleri	137
Şekil 5.41. Uzun dönem yaşlandırma için TSR değerleri.....	138
Şekil 5.42. Hamburg Tekerlek izi derinliği değerleri	140
Şekil 5.43. Hamburg Tekerlek izi derinliği ortalama değerleri	141

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan bitüme ait fiziksel özellikler.....	47
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan agregaya ait fiziksel özellikleri	48
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan atık yemeklik yağın FAME analiz sonuçları.....	51
Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan atık yemeklik yağın DPPH analizi sonuçları.....	53
Çizelge 3.5. Çalışmada kullanılan atık endüstriyel yağın elementel analizi sonuçları	55
Çizelge 3.6. Çalışmada kullanılan atık motor yağının elementel analizi sonuçları.....	56
Çizelge 4.1. Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi kısa dönem yaşlandırma sonuçları.....	67
Çizelge 4.2. Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi uzun dönem yaşlandırma sonuçları.....	67
Çizelge 4.3. Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi kısa dönem yaşlandırma farklı bitümlü bağlayıcı kalınlık sonuçları	68
Çizelge 4.4. Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi uzun dönem yaşlandırma farklı bitümlü bağlayıcı kalınlık sonuçları.....	68
Çizelge 4.5. Çalışmada kullanılan bitümlü bağlayıcı numune gruplarının kısaltmaları	71
Çizelge 4.6. Superpave performans deneyleri.....	75
Çizelge 4.7. Superpave deneylerinde kullanılacak bitümlü bağlayıcı numunesinin durumu	76
Çizelge 4.8. Kullanılan agrega gradasyonu.....	84
Çizelge 5.1. Kısa dönem yaşlandırma için düktilite değerleri	97
Çizelge 5.2. Uzun dönem yaşlandırma için düktilite değerleri	97
Çizelge 5.3. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma EDS sonuçları.....	109
Çizelge 5.4. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma EDS sonuçları	111
Çizelge 5.5. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma EDS sonuçları.....	112
Çizelge 5.6. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma EDS sonuçları	113
Çizelge 5.7. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma EDS sonuçları	115
Çizelge 5.8. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma EDS sonuçları.....	116
Çizelge 5.9. Bitümlü sıcak karışımların ITSkuru, ITSıslak ve TSR değerleri.....	139

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	Amerikan Devlet Yolları ve Ulaştırma İdaresi
AEY	Atık endüstriyel yağ
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AMY	Atık motor yağı
AYY	Atık yemeklik yağ
BBR	Eğilen giriş reometresi
BSK	Bitümlü sıcak karışım
CRA	Ticari gençleştirici
CTO	Ham tall yağı
D	Numune çapı
d	Deney numunesi genişliği
DDT	Doğrudan çekme
DSR	Dinamik kesme reometresi
EDS	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
EDX	X-ışını spektroskopisi
FAME	Yağ asidi metil ester
FESEM	Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
G*	Kompleks kayma modülü
GC-MS	Gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi
GC-FID	Gaz kromatografisi-alev iyonizasyon dedektörü
GPC	Jel geçirgenlik kromatografisi
h	Deney numunesi kalınlığı
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
HWT	Hamburg tekerlek izi
ITS	İndirekt çekme dayanımı
ITS _{ıslak}	Şartlandırılmış indirekt çekme dayanımı
ITS _{kuru}	Şartlandırılmamış indirekt çekme dayanımı
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
L	Destekler arası mesafe
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
LVDT	Lineer değişken diferansiyel transformatör
MS	Marshall stabilitesi
NCHRP	Ulusal kooperatif karayolu araştırma programı
P	Ölçülen deney yükü
P _{max}	Kırılma anındaki maksimum yük
PAV	Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi
PB	Polibit
PE	Polietilen
PET	Polietilen tereftalat
PETDER	Petrol Sanayi Derneği İktisadi İşletmesi
PG	Penetrasyon sınıfı
PI	Penetrasyon indeksi
PMB	Polimer modifiyeli bitüm
PP	Polipropilen
PPA	Polifosforik asit
RAP	Geri kazanılmış asfalt kaplama
RCAT	Dönel silindir yaşlandırma deneyi

RDE-OES	Döner disk elektrot optik emisyon spektrometresi
RHDPE	Geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen
RLDPE	Geri dönüştürülmüş düşük yoğunluklu polietilen
RPP	Geri dönüştürülmüş polipropilen
RTFOT	Dönel film halinde ısıtma deneyi
$S_m(t)$	t anındaki eğilme – sünme rijitliği
SARA	Doymuş, aromatik, reçine, asfalt
SBS	Stiren-bütadien-stiren
SBR	Stiren-bütadien-kauçuk
SCB	Yarım daire eğilme deneyi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TFOT	İnce film haline ısıtma deneyi
TLC-FID	Alev iyonizasyon algılamalı ince tabaka kromatografisi
TSR	Çekme dayanımı oranı
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UV	Ultraviyole
W_c	Yükleme döngüsü başına kaplama içinde yayılan iş
WBO	Atık biyo yağ
WCO	Atık yemeklik yağ
WEO	Atık motor yağı
WPS	Atık polistiren
WSRO	Atık çelik hadde yağı
WVO	Atık bitkisel yağ
XRD	X-ışını difraktometresi
VFA	Bitüm ile dolu boşluk oranı
VMA	Mineral agregalar arası boşluk oranı
δ	Faz açısı
σ	Yükleme döngüsü sırasında uygulanan basınç

1. GİRİŞ

Modern toplumların altyapı ihtiyaçları, ekonomik gelişim, nüfus artışı ve kentleşme hızına paralel olarak sürekli artış göstermektedir. Ulaşım, bu altyapı sistemlerinin en kritik bileşenlerinden biri olup, bireylerin hareketliliği, mal ve hizmetlerin dağıtımını ve ekonomik kalkınmanın sürdürülebilirliği açısından stratejik bir öneme sahiptir. Özellikle karayolu taşımacılığı gerek düşük ilk yatırım maliyetleri gerekse yaygın ağ altyapısı sayesinde en çok tercih edilen ulaşım modlarından biri haline gelmiştir. Bu durum, karayolu kaplamalarının dayanıklılığı, performansı ve uzun ömürlü olması gerekliliğini beraberinde getirmiştir (Zhao vd., 2021). Yol ağlarının sürekli bakım ihtiyacı, kamu bütçeleri üzerinde ciddi bir yük oluştururken, kullanıcı konforu, trafik güvenliği ve çevresel etkiler de dikkate alındığında; dayanıklı, ekonomik ve çevreci kaplama çözümlerine olan ihtiyaç kaçınılmaz hale gelmiştir (Santos vd., 2017).

Esnek kaplamalar dünya çapında en yaygın kullanılan üstyapı çözümüdür. Uygulama kolaylığı, bakım maliyetlerinin daha ekonomik olması, üstün sürüş konforu gibi nitelikleri ile tercih edilme bakımından öne çıkmaktadır. Bu kaplama türü, bitüm ile agreganın mükemmel uyumundan doğan dinamik bir sistem sunmaktadır. Adından da anlaşılacağı üzere "esnek" yapısı sayesinde trafik yükleri altında kontrollü deformasyon gösterir ve yük kalktığında neredeyse tamamen eski haline dönebilme yeteneğine sahiptir. Çok tabakalı olarak inşa edilmesi sayesinde farklı ihtiyaçlara karşılık vermektedir ve her tabaka özel olarak tasarlanmış agrega gradasyonu ve bitüm oranlarıyla optimize edilmektedir (Hu vd., 2015).

Esnek kaplama sistemlerinin en önemli bileşeni olan asfalt karışımlar, mineral agrega ve bitüm esaslı bağlayıcının belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Bu sistemde bitüm, yalnızca agregaları birbirine bağlayan bir yapıştırıcı olarak değil, aynı zamanda tekrarlayan trafik yükleri altında oluşan gerilmeleri ve şekil değişimlerini sönümleyerek kaplamanın servis ömrü boyunca mekanik bütünlüğünü sürdüren temel bir yapı elemanı olarak görev yapmaktadır. Viskoelastik yapısı sayesinde ısı ve yük altında belirli oranda esneklik gösteren bitüm, asfalt kaplamaların performansında kritik rol üstlenmektedir. Ancak bitüm, çevresel faktörler (güneş ışığı, oksijen, su) ve trafik yükleri gibi dış etkenler altında zamanla kimyasal ve fiziksel olarak yaşlanmaya maruz kalmaktadır. Bu yaşlanma, bağlayıcının sertleşmesine, elastikiyetinin

azalmasına ve dolayısıyla asfalt karışımında çatlakların ve deformasyonların daha erken zamanda ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Liu vd., 2025).

Bitümün yaşlanması, asfalt kaplamaların servis ömrünü azaltan en kritik mekanizmalardan biridir. Yaşlanma süreci iki temel aşamada gerçekleşir: ilki, üretim ve yerleştirme sırasında bağlayıcının sıcak karışım işlemlerine maruz kalmasıyla oluşan kısa dönem (termal-oksidatif) yaşlanma; ikincisi ise saha koşullarında uzun süreli çevresel etkiler sonucu gelişen uzun dönem yaşlanmadır. Yaşlanmış bitüm, özellikle düşük sıcaklıklarda gevrekleşir ve çatlama direncini kaybeder. Bu da hem kaplamanın ömrünü kısaltmakta hem de bakım sıklığını ve maliyetlerini artırmaktadır. Bu sorunun önüne geçebilmek için bitümün yaşlanmaya karşı daha dirençli hale getirilmesini sağlayacak çeşitli katkı maddeleri, polimerler ve modifikasyon teknikleri üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak son yıllarda, yalnızca malzeme performansını artırmakla kalmayıp aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak alternatif çözümler üzerinde durulmaktadır (Nizamuddin vd., 2021).

Son yıllarda, bitümlü bağlayıcının yaşlanma etkilerini azaltmak ve mevcut malzeme kaynaklarını daha verimli kullanmak amacıyla bitümün modifikasyonu ve gençleştirilmesi üzerine kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir. Özellikle sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde, atık malzemelerin altyapı uygulamalarında yeniden kullanılması büyük bir ilgi görmektedir. Kullanım ömrünü tamamlamış motor yağları ve endüstriyel atık yağlar gibi artıklar, kimyasal yapıları nedeniyle bitüm ile yüksek uyumluluk gösterebilmekte ve yaşlanmış bağlayıcının yeniden işlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu tür atık yağlar, bitümün viskozitesini düşürerek esnekliğini artırabilir ve moleküler yapısındaki sertleşmeyi kısmen geri döndürebilir. Böylece hem çevresel bir sorunun geri kazanım yoluyla çözülmesi sağlanmakta, hem de altyapı sektörüne sürdürülebilir bir katkı sunulmaktadır.

Bu bağlamda yürütülen bu doktora çalışması, bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen yaşlanma etkilerini anlamaya, laboratuvar koşullarında bu etkilere maruz bırakılmış bağlayıcıları çeşitli atık yağ türleriyle modifiye ederek performanslarını iyileştirmeye odaklanmaktadır. Çalışmada, farklı atık yağ türlerinin yaşlı bitüm üzerindeki etkileri hem kimyasal hem reolojik hem de fiziksel parametreler üzerinden detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, atık yağların bitüm modifikasyonunda yalnızca

bir katkı maddesi değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir mühendislik çözümü olabileceğini ortaya koymaktadır.

Ayrıca bu çalışmayla, yaşlanan bitümlü bağlayıcıların performans kaybı ve atık yağların çevreye verdiği zarar konularına eş zamanlı çözüm üretilebileceği gösterilmiştir. Böylelikle, gelecekte daha dayanıklı yol yapım tekniklerinin geliştirilmesine ve ulaştırma sektöründe sürdürülebilir kaynak kullanımının teşvik edilmesine katkı sağlanması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda elde edilen veriler mühendislik uygulamaları ve akademik araştırmalar için referans oluşturabilecek niteliktedir.

Bu çerçevede, bitümün yaşlanma etkilerini geri döndürmek veya azaltmak amacıyla uygulanan bitüm modifikasyonu ve gençleştirme teknikleri ön plana çıkmıştır. Gençleştirici katkıları, yaşlı bitümün kimyasal bileşimini dengeleyerek, orijinal reolojik özelliklerine yakın bir yapı kazandırmayı hedeflemektedir. Bu katkıları genellikle aromatik hidrokarbonlar bakımından zengin olup, bitüm içerisindeki polar bileşenlerin yeniden çözülmesini ve bağlayıcının yumuşamasını sağlamaktadır. Geleneksel gençleştiricilerin maliyetleri yüksektir ve çoğu zaman petrokimya bazlıdır. Bu durum, alternatif, çevre dostu ve ekonomik çözümleri ön plana çıkarmaktadır. Atık motor yağları, bu noktada hem kimyasal uygunluk hem de çevresel fayda açısından dikkat çeken bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Atık yağlar, özellikle aromatik yapı bakımından bitümle yüksek oranda uyum göstermektedir. Böylelikle bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir.

Diğer yandan, endüstriyel faaliyetlerin ve araç sayısının artmasıyla birlikte her yıl tonlarca atık motor yağı ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların büyük bir kısmı çevreye zarar verecek şekilde doğaya bırakılmakta ya da uygun olmayan koşullarda bertaraf edilmektedir. Oysa bu tür atıkların, asfalt sektöründe ikinci bir ham madde olarak değerlendirilmesi hem çevresel kirliliği önleyecek hem de doğal kaynakların kullanımını azaltarak döngüsel ekonomi ilkelerine hizmet edecektir. Üstelik atık yağların yeniden kullanımı, enerji tüketiminin düşürülmesi ve karbon ayak izinin azaltılması gibi dolaylı faydaları da beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, atık yağların bitüm modifikasyonunda değerlendirilmesi, sürdürülebilir altyapı çözümleri üretmek adına önemli bir fırsat sunmaktadır.

Bu tez çalışması, bitümlü bağlayıcılarda yaşlanma sonucu meydana gelen performans kayıplarını tespit etmeyi, farklı türlerdeki atık yağların bitümlü bağlayıcılar üzerindeki gençleştirici etkilerini bilimsel yöntemlerle ortaya koymayı ve böylece sürdürülebilir, ekonomik ve çevre dostu bir alternatif geliştirmeyi amaçlamaktadır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen yaşlandırma metodu ile gerçek saha koşulları simüle edilmiştir. Laboratuvar ortamında yaşlandırılan bitümlü bağlayıcılar farklı atık yağ grupları ile ağırlıkça farklı oranlarda modifiye edilmiştir. Elde edilen atık yağ katkılı bitüm numuneleri üzerinde reolojik, kimyasal ve fiziksel analizler uygulanarak, performans iyileşmeleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Bu çalışmayla hem malzeme mühendisliği hem de sürdürülebilir ulaşım altyapıları alanında yeni açılımlar sunulması hedeflenmektedir.

Bitüm, ham petrolün rafinasyonu sırasında elde edilen bir yan üründür. Dünya genelinde bitüm üretimi, petrol rezervlerine ve rafineri kapasitelerine bağlıdır. Türkiye gibi petrol rezervleri sınırlı olan ülkeler, bitüm ihtiyacını büyük ölçüde ithalatla karşılamaktadır. Bu durum, dışa bağımlılık ve maliyet artışı gibi sorunlara yol açar. Dışa bağımlılık, ülkelerin enerji güvenliği açısından risk oluşturarak ekonomik dengeleri bozmaktadır. Ayrıca petrol rezervlerinin sınırlı olması, bitümün de tükenebilir bir kaynak olması anlamına gelir. Artan nüfus ve altyapı ihtiyaçları, bitüm talebini her geçen yıl artırmaktadır. Bu durum, bitümün gelecekte daha pahalı ve erişilemez hale gelme olasılığını beraberinde getirir. Çevresel etkiler gözetildiğinde ise bitüm üretimi ve kullanımı, karbon emisyonları ve çevre kirliliği gibi problemlere neden olur. Buradan hareketle bitümün tükenebilir ve dışa bağımlı bir kaynak olması, bitümün yeniden kazanılması ve tekrar kullanılması, bitümün performans parametrelerinin iyileştirilmesi ile daha uzun ömürlü ve dayanıklı olması gibi teknik alanlarda çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu teknik alanlara ilişkin çalışmalar yapmak için ise laboratuvar ortamında yaşlandırılmış bitüm üretmek, bu sürecin anlaşılmasına ve çözümler geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Kısa dönem yaşlanma, asfalt karışımının depolanması, plente taşınması, plente karıştırılması, şantiyeye taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması gibi işlemler sırasında ortaya çıkar. Bu tür yaşlanmanın genellikle buharlaşma süreçlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer yandan, uzun dönem yaşlanma yolun servis ömrü boyunca gerçekleşir ve genellikle oksidasyon süreçlerinden büyük ölçüde etkilenir. Bitümlü bağlayıcıların yaşlandırılması laboratuvar ortamında çeşitli metotlar yardımı ile

gerçekleştirilebilmektedir. Bu metotlardan en bilinen ve kabul gören metot Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT), bitümlü bağlayıcının kısa dönem yaşlanmasını temsil etmektedir. Bitümlü bağlayıcıların uzun dönem yaşlanmasını temsil etmek amacıyla sıklıkla kullanılan yöntem Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyidir. Mevcut yöntemlerin laboratuvar ortamında gerçek koşullardaki bitümlü bağlayıcının yaşlanmasını temsil etmesi gibi avantajlarının olmasının yanında çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajların en başında deney prosedürlerinde görüldüğü şekilde 500 gr bitümlü bağlayıcının deney sonunda 20-40 gram kadar az bir miktarda yaşlandırılmış olarak geri alınmasıdır. Bu şekilde elde edilen yaşlanmış bitümlü bağlayıcının çeşitli deneysel çalışmalara tabi tutulması için defalarca kez deney uygulanması gerekmektedir. Böylece hem enerjiden hem de işten kayıp oluşmaktadır. Yürütülen doktora tez çalışmasının asıl amacı Sürdürülebilir Ulaşım olması dolayısı ile mevcut yaşlandırma prosedürlerine alternatif olması için bitümlü bağlayıcının hem kısa dönem hem de uzun dönem yaşlanmasını temsil edecek şekilde yeni bir metot tez kapsamında geliştirilmiştir.

Bu çalışma, bitümlü bağlayıcıların yaşlanma süreciyle karşılaştıkları fiziksel ve kimyasal bozulmaları detaylı şekilde inceleyerek, bu bozulmaların asfalt kaplama performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymayı hedeflemektedir. Yaşlanma sonucu sertleşen ve elastikiyetini kaybeden bitümün yeniden işlevsel hale getirilebilmesi için alternatif gençleştirici çözümlerin araştırılması, çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, özellikle çevresel sürdürülebilirliği ön planda tutan bir yaklaşım benimsenmiş ve atık bitkisel, endüstriyel ve motor yağlarının bitüm üzerinde gençleştirici etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın temel amacı; farklı kaynaklardan elde edilen atık yağların, yaşlandırılmış bitümün reolojik, kimyasal ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkilerini belirleyerek, performans açısından en uygun katkı türünü ve dozajını ortaya koymaktır. Bu amaçla, laboratuvar ortamında kontrollü yaşlandırma yöntemleriyle (RTFOT ve PAV) yapay olarak yaşlandırılmış bitüm örnekleri hazırlanmış; ardından bu örneklerle farklı oranlarda atık yağlar ilave edilerek karışımlar yeniden karakterize edilmiştir. Elde edilen örnekler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, dinamik kesme reometresi (DSR), bükülme ısı reometresi (BBR) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) gibi bir dizi deney uygulanmıştır.

Çalışma, yalnızca bitümün teknik performansını değil, aynı zamanda malzeme seçiminde sürdürülebilirlik ilkesini de merkeze alarak, atık yönetimi ve döngüsel ekonomi kavramlarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Kullanılmış motor ve endüstriyel yağların asfalt endüstrisinde yeniden değerlendirilmesi, hem çevresel açıdan zararlı atıkların bertaraf yükünü azaltmakta hem de yeni bağlayıcı ihtiyacını düşürerek ekonomik avantaj sağlamaktadır. Bu bağlamda araştırma hem bilimsel hem de uygulamalı mühendislik açısından çok yönlü bir katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; esnek kaplamaların uzun ömürlü ve sürdürülebilir şekilde tasarlanabilmesi için yaşlanmış bitümlerin geri kazanılmasında atık yağların kullanılabilirliğini kapsamlı bir şekilde inceleyerek, yol mühendisliği uygulamalarına hem çevresel hem de teknik perspektiflerden yenilikçi bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

Yürütülen tez çalışması kapsamında kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümlerin atık yağ modifikasyonu ile gençleştirilmesi araştırılmıştır. Kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcıların atık yağ ile gençleştirilmesi üzerine kapsamlı araştırmalar yürütülmüştür. Yaşlandırılmış bağlayıcıların temininde kullanılan mevcut laboratuvar yaşlandırma yöntemleri incelenmiş ve tez kapsamında ihtiyaç duyulan miktarın elde edilebilmesi amacıyla, mevcut yöntemlerin yetersiz kalması göz önünde bulundurularak yeni bir yaşlandırma yöntemi geliştirilmesine karar verilmiştir. Bitümlü bağlayıcının saha koşullarında maruz kaldığı kısa ve uzun dönem yaşlanma etkilerini laboratuvar ortamında daha temsil edici şekilde simüle edebilmek amacıyla, kontrollü sıcaklık ve hava akışı sağlayan Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem 'Bitüm Yaşlandırma Simülasyonu İçin Geliştirilmiş Kısa ve Uzun Dönem Bitümlü Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemi' başlığı ile uluslararası patent başvurusu sürecindedir. Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile saf bitümlü bağlayıcı laboratuvar ortamında kısa ve uzun dönem yaşlandırma koşulları simüle edilerek üretilmiştir. Bu aşamada tez çalışmasının ilk kısmı tamamlanmıştır.

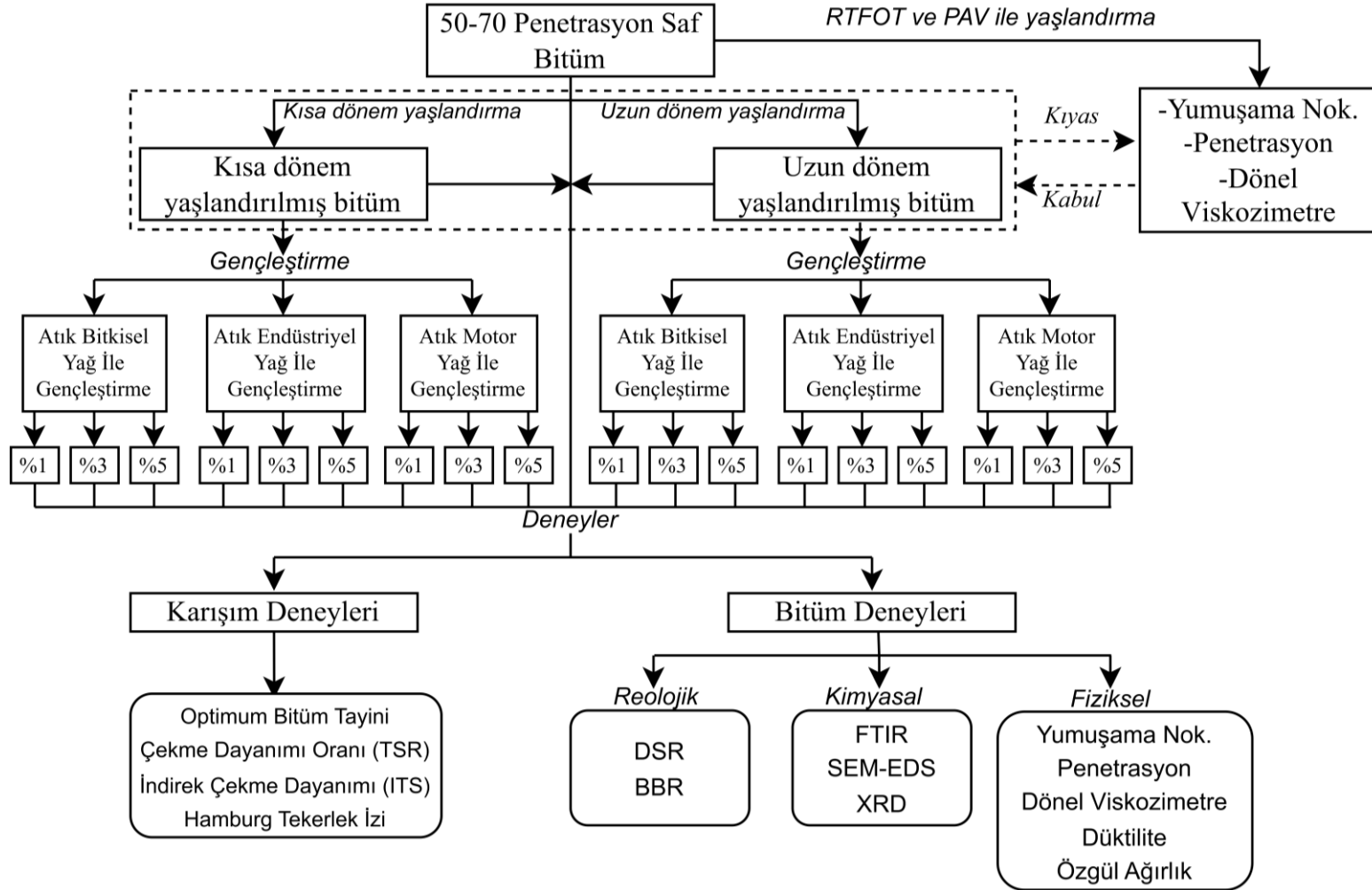
Tez çalışmasının ikinci kısmında ise Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile kısa ve uzun dönem yaşlandırılan bitümlü bağlayıcılar ayrı ayrı olmak üzere 3 ayrı atık yağ (yemeklik, endüstriyel ve motor) ile 3 farklı oranda (%1, %3 ve %5) modifiye edilerek gençleştirilmiştir. Tez kapsamında, saf bitüm, kısa dönem yaşlandırılmış bitüm ve

uzun dönem yaşlandırılmış bitüm olmak üzere üç farklı referans bağlayıcının yanı sıra; kısa dönem yaşlandırma koşulları altında her bir atık yağ grubu için üç farklı modifikasyon oranında hazırlanmış toplam 9 numune ile aynı şekilde uzun dönem yaşlandırma koşullarına için 9 numune olmak üzere, toplamda 21 adet bitümlü bağlayıcı numunesi değerlendirilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan tüm numunelerin fiziksel özelliklerin belirlenebilmesi için geleneksel bitüm deneylerinden olan penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, özgül ağırlık deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca tez kapsamında kullanılan bütün bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları konusunda bilgi sahibi olmak adına dönel viskozimetre deneyi uygulanmıştır. Elde edilen penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri vasıtasıyla penetrasyon indeksleri hesaplanarak tüm bitüm numunelerinin sıcaklık hassasiyetleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Daha sonra tez çalışmasında kullanılacak atık yağlar ile bitümlü bağlayıcıların kimyasal, morfolojik, elementel ve kristal yapılarının detaylı biçimde karakterize edilebilmesi amacıyla; fonksiyonel grupların belirlenmesi için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), yüzey morfolojisinin incelenmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), elementel bileşimin analiz edilmesi için Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) ve kristal yapının değerlendirilmesi için X-Işını Difraktometrisi (XRD) analizlerinden faydalanılmıştır. Özellikle atık yağ modifikasyonunun bitümlü bağlayıcıların reolojik ve mekanik performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, Superpave performans testlerinden olan Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Eğilen Kiriş Reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır. DSR deneyi ile bağlayıcıların yüksek sıcaklık koşullarındaki deformasyona karşı dirençleri ve viskoelastik özellikleri belirlenirken; BBR deneyi ile düşük sıcaklık koşullarında termal çatlamaya karşı dayanımları ve rijitlik özellikleri analiz edilmiştir. Bu testler aracılığıyla, atık yağ ile modifiye edilen gençleştirilmiş bağlayıcıların kısa ve uzun dönem yaşlanma sonrası gösterdiği performans davranışları, saf ve referans bitümlerle karşılaştırmalı olarak kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bu aşamada tez çalışmasında kullanılan bütün bitümlü bağlayıcıların fiziksel, kimyasal ve reolojik açıdan değerlendirmeleri tamamlanmıştır.

Tez çalışmasının 3. ve son aşamasında ise Superpave karışım tasarım yöntemine uygun olarak agrega gradasyonları belirlenmiş ve Superpave karışım tasarımında kullanılacak bitümlü bağlayıcılar için optimum bağlayıcı içerikleri tayin edilmiştir. Optimum bağlayıcı içeriğine sahip karışımların nem hassasiyetine karşı

performansları ile mekanik dayanım özellikleri, İndirekt Çekme Dayanımı (ITS) deneyi aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, bağlayıcı tipine ve yaşlanma durumuna bağlı olarak karışımların etkisi altındaki davranışları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sıcaklık ve nem gibi çevresel etkenlerin karışımların üzerindeki temel etkilerini ortaya koyabilmek amacıyla, malzemenin saha koşullarına en yakın halini temsil eden sıkıştırılmış numunelere Dolaylı Çekme Dayanımı (ITS) ve Çekme Dayanımı Oranı (TSR) deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca karışımların uzun dönem performanslarının ve çatlama/tekerlek izi oluşumu gibi hasar türlerine karşı dirençlerinin daha kapsamlı biçimde anlaşılabilmesi için ileri düzey performans testlerinden olan Hamburg Tekerek İzi Deneyi (HWT) deneyi uygulanmıştır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel aşamaların daha detaylı incelenebilmesi adına Şekil 1.1’de akış şeması sunulmuştur.



Şekil 1.1. Tez çalışmasının akış diyagramı

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Avrupa standardı EN 12597'ye göre bitüm, ham petrolden elde edilen veya doğal asfalt içerisinde bulunan, tolüen kimyasalında tamamen veya neredeyse tamamen çözünebilen, oda sıcaklığında oldukça viskoz veya neredeyse katı halde bulunan, uçucu olmayan, yapışkan ve su geçirmez bir malzeme olarak tanımlanmaktadır (European Committee for Standardization, 2000). Bitümün bu fizikokimyasal özellikleri, mühendislik uygulamalarındaki performansı için büyük önem taşımaktadır. Özellikle viskoz davranış, bitümün kalitesinin ve yapı malzemesi olarak uygunluğunun temel göstergeleridir (Lesueur, 2009). Ayrıca, bitümün ham petrol rafinasyonundan veya doğal yataklardan elde edilmesi, kimyasal bileşimini ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemekte ve bu durum birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Read ve Whiteoak, 2003; Paliukaitė vd., 2015; Speight, 2015).

Bitüm, petrol rafinasyonu sırasında elde edilen ve genellikle yol kaplamalarında bağlayıcı malzeme olarak kullanılan viskoelastik bir malzemedir. Kimyasal olarak karmaşık bir yapıya sahip olan bitüm, hidrokarbonlar, reçineler ve asfaltenlerden oluşur (Lesueur, 2009). Bu malzeme, yüksek adezyon ve su geçirmezlik özellikleri sayesinde, üstyapıların dayanıklılığını ve performansını artırmak için yaygın olarak kullanılır. Ancak, bitümün performansı, zamanla oksidasyon, UV ışınları ve sıcaklık değişimleri gibi çevresel faktörlerden etkilenir ve yaşlanma sürecine girer (Petersen ve Glaser, 2011). Yaşlanma, bitümün sertleşmesine ve kırılgan hale gelmesine neden olarak, çatlak oluşumu gibi sorunlara yol açar (Lu ve Isacson, 2002).

Asfalt, mineral agregaların bitüm ile homojen bir şekilde karıştırılması sonucu elde edilen, esnek ve dayanıklı bir yol kaplama malzemesidir. Bitüm, ham petrolün rafinasyonu sırasında elde edilen, yüksek viskoziteli, yapışkan ve suya karşı dirençli bir hidrokarbon karışımıdır. Bu özellikleri sayesinde bitüm, asfalt karışımlarında agregaları bir arada tutarak yapısal bütünlüğü sağlar. Asfaltın kimyasal bileşimi, karbon (yaklaşık %90 oranında) ve hidrojen (yaklaşık %10 oranında) atomlarından oluşan hidrokarbonlar ile küçük miktarlarda sülfür, oksijen ve azot gibi heteroatomları içerir. Bu bileşenler, asfaltın reolojik ve yapısal özelliklerini belirler (Hallmark-Haack vd., 2025). Asfalt, doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Doğal asfaltlar, doğada doğal süreçlerle oluşan ve belirli bölgelerde bulunan asfalt türleridir. Bunlar

genellikle göl asfaltı ve kaya asfaltı olarak sınıflandırılır. Göl asfaltı, Venezuela'daki Trinidad Gölü gibi yerlerde bulunan ve yüksek oranda saf bitüm içeren doğal bir asfalttır. Kaya asfaltı ise, asfaltın kireçtaşı veya kumtaşı gibi kayaların gözeneklerine sızmasıyla oluşur ve bu kayaların ezilip ısıtılmasıyla kullanıma hazır hale getirilir (Rondón-Quintana vd., 2023). Yapay asfaltlar ise, ham petrolün rafinasyonu sırasında elde edilen bitümün, mineral agregalarla karıştırılmasıyla üretilir. Bu tür asfaltlar, üretim sürecinde kullanılan bitümün türüne göre farklılık gösterebilir.

Bitümlü karışımlar, mineral agregaların bitüm ile karıştırılmasıyla elde edilen kompozit malzemelerdir. Bu karışımlarda bitüm, agregaları bir arada tutan bağlayıcı olarak görev yapar ve karışımın dayanıklılığı, esnekliği ve suya karşı direnci gibi özelliklerini belirler. Bitümün viskozitesi, penetrasyon değeri, yumuşama noktası ve süneklik gibi reolojik özellikleri, asfaltın performansını doğrudan etkiler. Özellikle düşük penetrasyonlu, yüksek viskoziteli bitümler, ağır trafik yüklerine ve yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı asfalt kaplamaların üretilmesini sağlar (Hallmark-Haack vd., 2025). Ayrıca, bitüm ve agrega arasındaki aderans da asfalt performansı açısından kritik bir faktördür. Bitümün polar yapısı, yüzey enerjisi yüksek minerallerle daha iyi bağ kurmasını sağlar. Ancak bazı durumlarda, su ile yer değiştirebilecek bağlayıcı-agrega adezyonu yüzey soyulmasına yol açabileceğinden, yapışma artırıcı katkılar veya modifiye bitümler kullanılmaktadır (Hallmark-Haack vd., 2025).

Son yıllarda şehirlerin hızlı büyümesi ve otomobil sayısındaki artış, yol kaplama yapımı ve bakımına olan talebi önemli ölçüde artırmıştır. Günümüzde dünya genelindeki yolların yaklaşık %95'i esnek kaplama ile inşa edilmekte olup, bu kaplamalarda geleneksel bağlayıcı malzeme olarak bitüm kullanılmaktadır (Elahi vd., 2024). Ancak petrol bazlı bitüm yenilenemez ve sınırlı bir kaynak olduğundan, bu malzemenin aşırı kullanımından kaçınılması gerekmektedir. Çevresel düzenlemeler ve ekonomik kaygılar, araştırmacıları alternatif ve sürdürülebilir bağlayıcı kaynakları araştırmaya yöneltmiştir (Saboo vd., 2021; Lu vd., 2023). Atık yemeklik yağ (WCO), bitüm modifiye edici bir malzeme olarak dikkat çekmekte ve bu alandaki çeşitli çalışmalar, WCO'nun bitüm üzerindeki performansını incelemiş; özellikle düşük sıcaklık özellikleri açısından kayda değer sonuçlar elde edilmiştir (Zhang vd., 2020; Abdalla vd., 2022).

Bu bağlamda, geri dönüştürülemeyen, atık yenileyici özellik taşıyan, büyük miktarlarda erişilebilir olan ve kullanım öncesinde özel bir ön işlem gerektirmeyen malzemelere olan ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Bu tür bir malzemenin kullanımı, çevre kirliliğinin ve yüksek maliyetlerin önüne geçilmesine katkı sağlamakta ve doğal kaynakların (örneğin petrol ve madenler) tüketimini azaltmaktadır (Tabatabae vd., 2024).

Asfalt karışımların iklim ve trafik yüklerine karşı dayanıklı olabilmesi için gereken nitelikler daha çok bağlayıcının reolojik özellikleri ile alakalıdır. Bu reolojik özellikler bağlayıcının akışkanlığı ve şekil değiştirme davranışdır. Bitümlü bağlayıcıdan yüksek sıcaklıkta yeterli akışkanlık, sıcak iklim koşullarında yeterli sertlik ve düşük sıcaklıklarda yeterli esneklik olmak üzere 3 temel özelliği sağlaması beklenmektedir (Lesueur, 2009). Bu 3 ayrı özelliğin karşılanması demek her türlü iklim koşuluna uygun bir bitümlü bağlayıcı üretmek demektir. Bu durumun gerçekçi olmaması sebebiyle farklı kullanım bölgelerine uygun bitümlü bağlayıcı seçimi yapılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcılar hem üretim hem de servis sürecinde yaşlanmaya maruz kalmaktadır. Yaşlanma, bağlayıcının içerisindeki düşük molekül ağırlıklı uçucu bileşenlerin buharlaşması ve oksidatif reaksiyonların gerçekleşmesi sonucu meydana gelir (Loise vd., 2019). Bu süreç, bağlayıcının sertleşmesine, kırılabilirliğinin artmasına ve kaplamanın erken dönemde çatlamasına neden olur (Rashid vd., 2024). Bitümlü kaplamaların performansını artırmak ve servis ömrünü uzatmak için bitüm bağlayıcının modifikasyonu ve yaşlanma sürecinin kontrolü büyük önem taşımaktadır. Güncel araştırmalar, çeşitli polimer ve nanomalzeme katkılarının, bitümün reolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ve yaşlanmaya karşı direncini artırdığını göstermektedir. Bu tür modifikasyonlar, kaplama ömrünü uzatarak bakım ve onarım maliyetlerini azaltmakta ve dolaylı olarak ulusal ekonomiye katkı sağlamaktadır.

Bitümün performansını artırmak ve yaşlanmaya karşı direncini geliştirmek amacıyla çeşitli modifikasyon teknikleri uygulanmaktadır. Bitüm performansını artırmak amacıyla kullanılan katkı ve modifiye edici maddeler arasında polimerler, kimyasal modifikatörler, seyrelticiler, oksidanlar ve antioksidanlar, hidrokarbonlar ile soyulma önleyici katkılar yer almaktadır (Porto vd., 2019). Örneğin tekrar eden küçük moleküllerden oluşan zincir yapıdaki polimerlerin asfalt ile karıştırılması etkili bir

yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Polimer modifikasyonu, tekerlek izi ve termal çatlamaya karşı yüksek direnç sağlarken, yorulma çatlağı, soyulma ve sıcaklık hassasiyetini azaltma gibi önemli faydalar sağlamaktadır (Hatemoğlu vd., 2025; Wu vd., 2024; Yıldırım, 2007). Benzer şekilde, kimyasal olarak çapraz bağlanmış biyopolimer olan kitosan kullanımı, bağlayıcının reolojik özelliklerini iyileştirmekte ve yaşlanma sürecini yavaşlatmaktadır (Malinowski vd., 2023). SBR (Stiren-Bütadien Kauçuk) ve PPA (Polifosforik Asit) katkılarının kullanımı, bitümlü bağlayıcıların elastik modülü, tekerlek izi direnci, nem hassasiyeti ve yorulma direncini iyileştirmektedir (Babagoli vd., 2023). Ayrıca, nano-silika ve sentezlenmiş poliüretan gibi nanomalzemelerin kullanımı, bitümün yüksek sıcaklık performansını artırmakta ve termal çatlamalara karşı direncini geliştirmektedir (Motamedi vd., 2021). Elastomer grubu polimerik malzemelerden olan Stiren-bütadien-stiren (SBS) blok kopolimerlerinin, bitümlü bağlayıcıların elastikiyetini artırmakta böylelikle bitümlü bağlayıcının yaşlanma direncini iyileştirmektedir (Aksoy vd., 2005). Geri dönüştürülmüş yüksek ve düşük yoğunluklu polietilen (RHDPE ve RLDPE) ile geri dönüştürülmüş polipropilen (RPP) kullanılarak, SBS ve polibit (PB) katkılarıyla modifiye edilmiş asfalt bağlayıcılarının yüksek sıcaklık performansında ve depolama stabilitesinde iyileşme gözlemlenmiştir. (Al-Abdul Wahhab vd., 2017). Araştırmalar, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve polipropilen (PP) gibi geri dönüştürülmüş plastiklerin bitüm modifikasyonunda başarıyla kullanılabildiğini göstermektedir. Özellikle, bu tür plastomerik katkılar, bitümün yüksek sıcaklık dayanımını artırmakta ve deformasyona karşı direncini iyileştirmektedir (D'Angelo vd., 2022). Parafin bazlı katkılar, bitümün işlenebilirliğini ve reolojik özelliklerini iyileştirebilmektedir (Şahan vd., 2023; Feitosa vd., 2016).

Sürdürülebilirlik ilkesi doğrultusunda, bitüm modifikasyonunda atık malzemelerin kullanımı son yıllarda araştırmacıların dikkatini çekmiş ve bu alanda yapılan çalışmalar önemli ölçüde artış göstermiştir. Örneğin naylon bazlı ve polyester bazlı geri dönüştürülmüş plastik peletlerin bitümlü bağlayıcılarda modifiyer olarak kullanılmasının bitümün elastik davranışını ve tekerlek izi direncini iyileştirdiği görülmüştür (Soliman vd., 2023). Atık polietilen tereftalat (PET) modifikasyonunun bitümün fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (Imanbayev vd., 2022). Çeşitli atık plastikler değerlendirildiğinde polipropilen (PP), polietilen (PE) ve plastik karışımının, yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı bir polimer modifiyeli

bitüm (PMB) elde etmek için en uygun plastik türleri olabileceği düşünülmektedir (Vargas ve El Hanandeh, 2021). Atık lastik kırıntısının SBS ve ılık karışım katkısı Sasobit ile birlikte bitüm modifikasyonunda kullanımının tek başına SBS kullanımından daha etkin olduğu görülmüştür (Erkuş vd., 2020).

Günümüzde atık yönetimi, küresel çevresel sürdürülebilirliğin en kritik unsurlarından biri haline gelmiştir. Giderek artan kentleşme ve tüketim alışkanlıkları, geri dönüştürülmeyen atıkların depolama sahalarında birikmesine ve bu alanların çevresel zararlara neden olmasına yol açmaktadır. Depolama alanlarında oluşan sızıntı suları, yer altı ve yüzey sularını tehdit ederken, konvansiyonel yakma yöntemleri zararlı gazların atmosfere salınımına neden olmaktadır (Rahman vd., 2020). Bu sorunlara karşılık olarak, sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımları kapsamında geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi çevre dostu yöntemler ön plana çıkmaktadır.

Son yıllarda, asfalt sektörü atıkların yeniden kullanımına olanak sağlayan potansiyel uygulama alanlarından biri olarak dikkat çekmektedir. Asfalt betonları ve bitümlü bağlayıcılar, çeşitli endüstriyel ve evsel atıkların ikincil ham madde olarak değerlendirilmesine olanak sunmaktadır. Geri dönüştürülmüş plastik şişeler, atık cam, atık seramik tozu, uçucu kül, sigara izmariti, atık lastik kırıntısı, atık motor yağı ve pişirme yağları gibi çok çeşitli atık ürünlerin asfalt betonlarında kullanımı üzerine yapılan çalışmalar umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır (Lu vd., 2024; Ming vd., Hussein vd., 2021; 2022; Katara vd., 2014; Rahman vd., 2020; Carpani vd., 2022; Banerji vd., 2022). Bu çalışmalar, söz konusu atıkların bitümlü karışımların performans özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çevresel etkilerin azaltılması ve doğal kaynakların korunması açısından da önemli katkılar sunmaktadır. Bu bağlamda, mevcut literatürdeki bulgular ışığında çeşitli atık türlerinin asfalt teknolojisinde kullanımına ilişkin bulgular değerlendirilmekte ve gelecekteki araştırmalar için yeni yönelim alanları önerilmektedir.

Yaşlanma süreci, bitümün sertleşip kırılgan hale gelmesine neden olan bir dizi karmaşık kimyasal reaksiyonu içermektedir. Bu durum, yorulma direncinin azalmasına ve kaplama hasarlarının daha hızlı meydana gelmesine yol açar. Yaşlanmış bitüm, yoğun trafik yüklerine ve sıcaklık gerilmelerine karşı dayanıklılığını kaybeder.

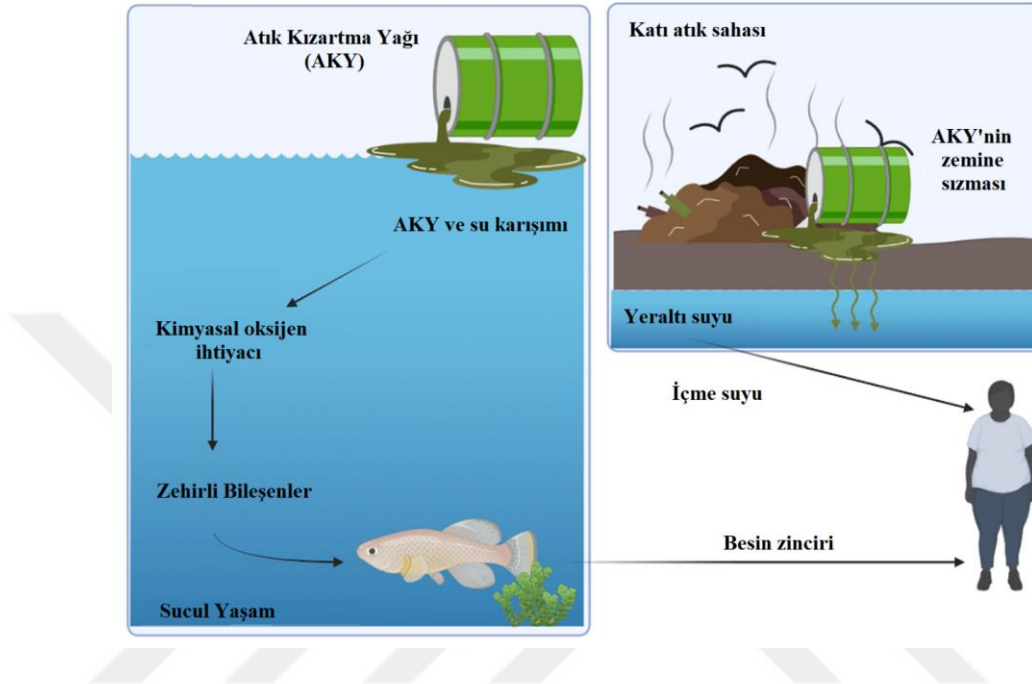
Bunun sonucunda yüzeyde oluşan çatlaklar, suyun kaplama içerisine sızmasına olanak tanır ve bu da zamanla çukur gibi bozulmaların oluşumu ve kaplamanın işlevselliğini kaybetmesiyle sonuçlanır. Bu süreç, sık bakım gereksinimi nedeniyle kaplamanın yaşam döngüsü maliyetini artırır.

Bitümlü karışımın tüm hizmet ömrü boyunca bağlayıcı, iki aşamada yaşlanmaya maruz kalır. İlk aşama, kısa dönem yaşlanma (short-term aging) olarak adlandırılır ve bitümlü karışımların depolanması, karıştırılması, taşınması ve serilmesi sırasında yüksek sıcaklığa bağlı olarak hızla gerçekleşir. İkinci aşama ise uzun dönem yaşlanma (long-term aging) olup, bitümlü yüzey tabakasının ultraviyole (UV) ışınımı, yüksek sıcaklık ve oksijen gibi değişken çevresel koşullara sürekli maruz kalması sonucu daha yavaş gerçekleşir (Wagh vd., 2023).

Bitüm yaşlanması, yapısal ve işlevsel özelliklerinde hem geri döndürülebilir hem de geri döndürülemez değişikliklere neden olur. Günümüzde yaşlanma olgusu; fiziksel sertleşme, uçucu bileşenlerin buharlaşması ve oksidasyon olmak üzere üç ana mekanizmayla açıklanmaktadır (Tauste vd., 2018). Bu mekanizmalar arasında özellikle oksidasyon, bitüm yaşlanmasının temel nedeni olarak kabul edilmektedir (Lu ve Isacson, 2002; Mohamed vd., 2021; Pipintakos vd., 2021). Bitümdeki sertleşme, kaplamanın hizmet ömrü ve performansı ile doğrudan ilişkili olduğundan, yaşlanma sürecinin yavaşlatılması büyük önem taşımaktadır. Ancak, bu yönde uygulanabilir ve etkili bir çözüm geliştirmek hâlâ araştırma camiası için önemli bir zorluk oluşturmaktadır.

Günümüzde dünya nüfusunun hızla artması, insanların değişen yaşam şekilleri, alışkanlıkları ve ihtiyaçları doğal çevrenin tahrip olmasına sebep olmaktadır. Değişen tabiat düzeni atık oluşumunu da beraberinde getirmektedir. Oluşan atıkların birçoğu kimyasal yapılarından dolayı doğaya karışmadan uzun yıllar varlığını sürdürmektedir. Atıkların hayati öneme sahip olanlarından biri yağlardır. Yağın yoğunluğu sudan daha düşük olması sebebiyle atık yağlar suyun yüzeyinde birikmektedir. Bu durum suyun havadan oksijen almasını engellemekte ve su içerisinde yaşayan canlıların zarar görmesine neden olmaktadır (Hosseinzadeh-Bandbafha vd., 2022; Bhatia vd., 2020; Kabir vd., 2014). Sadece işletmeler değil bireyler de evlerinde atık yağlarını (çoğunlukla kızartma yağları) lavabo giderlerinden dökerek çevreye zarar

vermektedir. Atık yağları giderlerden dökmek yerine çöpe atmak da çözüme yönelik değildir. Herhangi bir şekilde toprağa karışan yağlar topraktan yer altı kaynaklarına ulaşarak onların da kirlenmesine sebep olmaktadır (Şekil 2.1). Unutulmamalıdır ki yeraltı kaynakları bizim gelecekteki su kaynaklarımızdır.



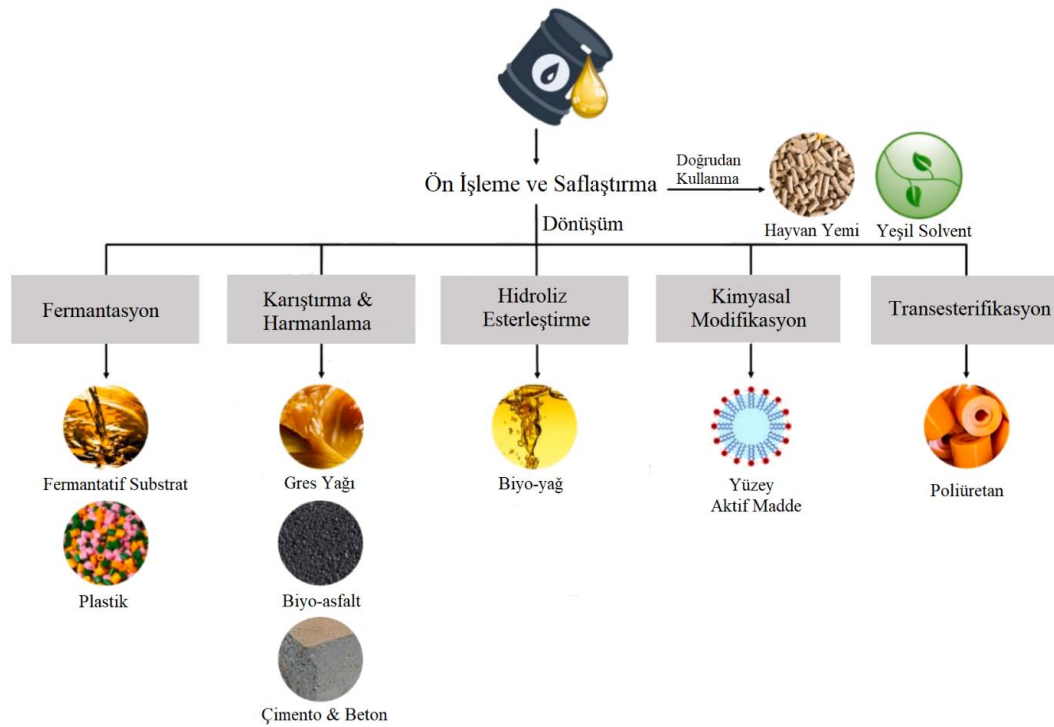
Şekil 2.1. Atık kızartma yağı bertaraf zinciri (Hosseinzadeh-Bandbafha vd., 2022)

Küresel anlamda her yıl yaklaşık olarak 41 ila 67 milyon ton arasında atık yemeklik yağ oluşmaktadır ve bu miktar dünya genelindeki toplam yemeklik yağ tüketiminin %20-32'sine denk gelmektedir (Thushari ve Babel, 2022; Orjuela ve Clark, 2020). Yüksek popülasyona sahip ülkelerin başında gelen Çin yıllık yaklaşık olarak 5.6 milyon ton atık yemeklik yağ üretmektedir. Amerika Birleşik Devletleri ve Hindistan ise sırasıyla yıllık yaklaşık 1.2 milyon ve 1.1 milyon ton atık yemeklik yağ üretmektedir (Foo vd., 2022; Lopes vd., 2020).

Türkiye'de yıllık bitkisel yağ tüketimi yaklaşık 1,7 milyon ton olarak gerçekleşmektedir. Bu tüketim miktarı, gıda, enerji ve kimya sektörlerinde yoğun kullanımın bir göstergesidir. Bu tüketim sonucunda, özellikle kızartma işlemleri ve rafinasyon süreçleriyle yaklaşık 300 ila 350 bin ton bitkisel atık yağ oluştuğu tahmin edilmektedir. Ancak, bu atık yağların toplanma oranı oldukça düşüktür. Örneğin, 2023 yılında Türkiye genelinde sadece 35 bin ton bitkisel atık yağ toplanarak biyodizel

üretiminde kullanılmıştır (Anadolu Haber Ajansı, 2024). Bu rakam, potansiyel atık yağ miktarının yaklaşık %10'una tekabül etmektedir. Türkiye’de bitkisel ve hayvansal kaynaklı atık yağların rafinasyon işleminden sonra gıda sektöründe ve hayvan yemlerinde kullanımı Tarım Bakanlığı tarafından, kozmetik sanayinde kullanımı ise Sağlık Bakanlığı tarafından yasaklanmıştır. Ülkemizde sadece Biyodizel üretiminde kullanımına izin verilmektedir (Haliç Çevre, 2024).

Atık yemeklik yağ biyoyakıt endüstrisinde biyodizel, hidrojen gazı ve düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar üretiminde yaygın olarak kullanılan bir hammadde (Thushari ve Babel, 2022; Panadare, 2015). Özellikle 2019–2026 yılları arasında, atık yemeklik yağın kullanım alanları arasında biyodizel üretimi, pazar payı bakımından en büyük segmenti oluşturmuştur. Biyodizeli sırasıyla oleokimyasal ürünler, hayvan yemi ve diğer uygulamalar takip etmiştir (Foo vd., 2022). Atık yemeklik yağ bazı ön işlem ve arıtma faaliyetleri sonucunda farklı alanlarda kullanılmaktadır (Şekil 2.2). Ancak farklı kullanım alanları olmasına rağmen asfalt endüstrisinde herhangi bir dönüşüm faaliyetine ihtiyaç duyulmadan modifiyer ve gençleştirici olarak katkı malzemesi yerine kullanımı son yıllarda öne çıkmıştır.



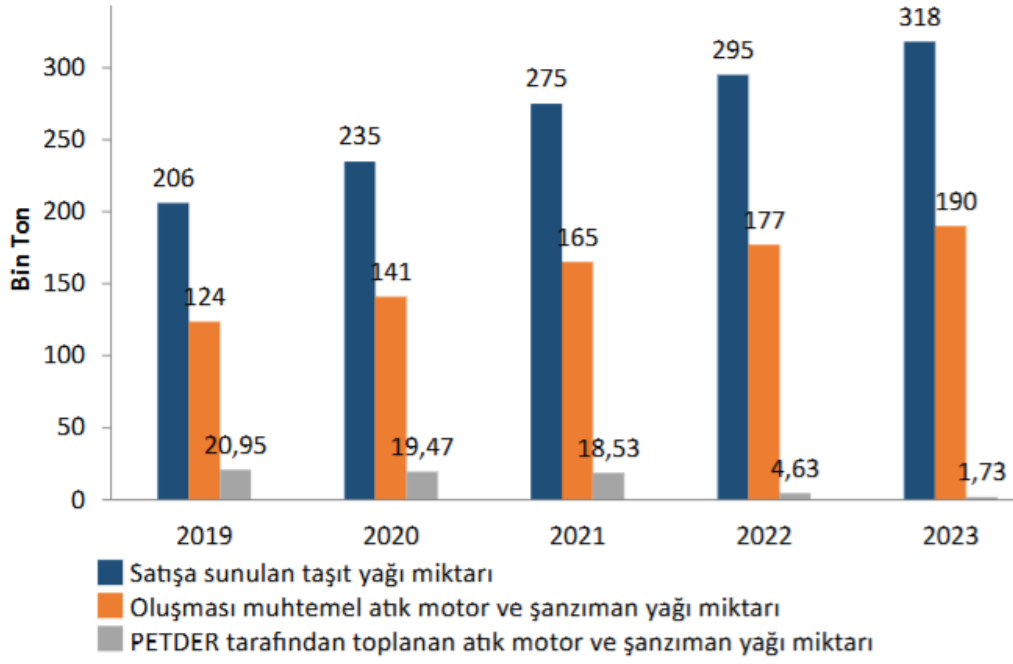
Şekil 2.2. Atık yemeklik yağın oleokimyasal uygulamalarda kullanımı (Foo vd., 2022)

Atık yağlar, içerdikleri ağır metaller, klorlu bileşikler ve diğer toksik katkı maddeleri nedeniyle yüksek ekotoksositeye sahip tehlikeli atıklar sınıfında yer almaktadır. Atık yağlar, içerdikleri ağır metaller ve diğer kalıcı kirleticiler nedeniyle çevre ve insan sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkilere sahiptir. Özellikle, motor yağlarına katılan katkı maddelerinden kaynaklanan fenoller, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ile çinko, klor ve fosfor içeren bileşikler, kullanıldıktan sonra yağın içinde kalmakta ve bu durum, atık yağları yüksek toksisiteye sahip hale getirmektedir (Fuentes vd., 2007). Bu bileşenlerin doğrudan toprak veya su kaynaklarına dökülmesi hem yüzey hem de yer altı sularının kirlenmesine yol açmakta; aynı zamanda sucul ve karasal ekosistemlerdeki biyolojik çeşitliliği ciddi şekilde tehdit etmektedir (Gökalp vd., 2019, Jia vd., 2015). Su yüzeyine dökülen atık yağ, ince bir film tabakası oluşturarak oksijen transferini engeller ve bu da sudaki çözünmüş oksijen seviyesinin düşmesine yol açar. Bu durum, sucul yaşam için yaşamsal öneme sahip olan fotosentez sürecini sekteye uğratarak özellikle fitoplankton ve zooplankton gibi birincil üreticilerin büyümesini baskılar (Almeda et al., 2014). Aynı zamanda, güneş ışınlarının suyun derinliklerine ulaşmasını engelleyen bu film tabakası, su ekosisteminin enerji döngüsünü bozar (Singh vd., 2020). Özellikle bir litre kullanılmış motor yağının, yaklaşık bir milyon litre suyu kullanılmaz ve beş milyon litre suyu içilemez hale getirme potansiyeline sahip olduğu bildirilmektedir (Gong vd., 2014). Bununla birlikte, atık yağların yakılması da çevre açısından son derece sakıncalıdır. İçeriğinde bulunan ağır metallerin ve klorlu organik bileşiklerin yakma sırasında atmosfere salınması, hava kirliliğine ve toksik emisyonlara neden olduğundan, bu tür yağların evsel ısınma amaçlı sobalarda veya kontrolsüz yakma sistemlerinde kullanılması yasaklanmıştır (UNEP, 2015).

2008/98/EC sayılı Avrupa Birliği Direktifi, atık yağların yönetiminde çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından kaynağında ayrı toplanmasının kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Direktif, atık yönetiminin, atıkların oluşumundan bertarafına kadar geçen tüm süreçleri kapsayan yaşam döngüsü analizleri temelinde, çevreye en yüksek faydayı sağlayacak yöntemlere öncelik verilerek gerçekleştirilmesini öngörmektedir. Bu bağlamda, Atık Yönetim Hiyerarşisi sırasıyla; atığın oluşumunun önlenmesi, yeniden kullanımı, geri dönüşüm yoluyla hammadde kazanımı, enerji geri kazanımı ve en son seçenek olarak bertaraf edilmesi biçiminde yapılandırılmıştır (Avrupa Birliği Direktifi, 2008). Atık yağların bu hiyerarşi

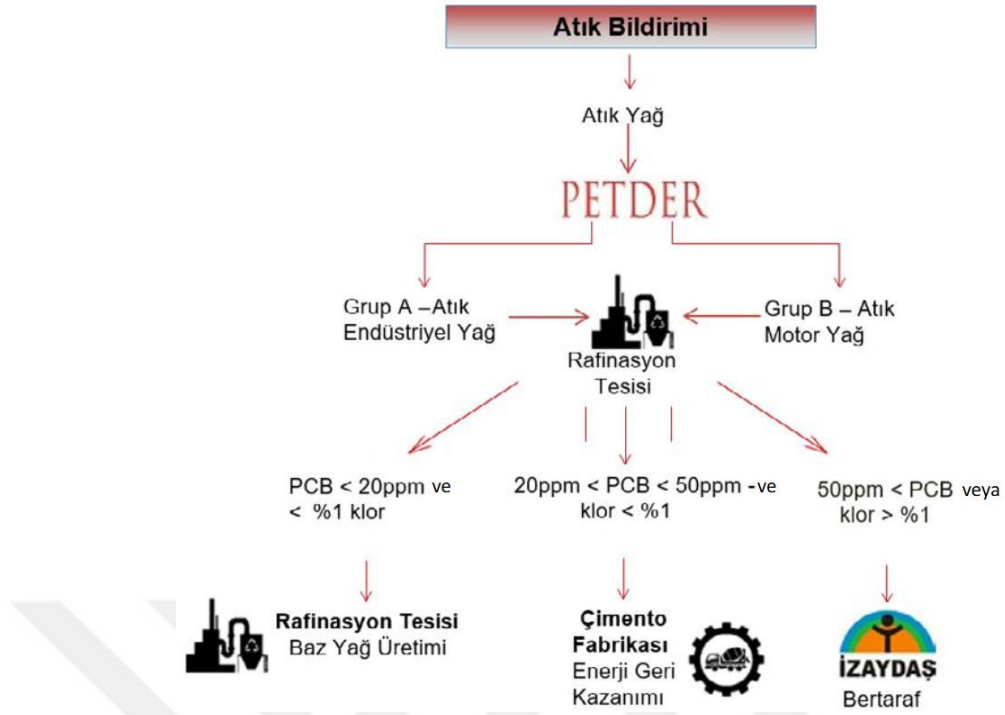
çerçevesinde ele alınması, özellikle farklı rafinasyon teknolojileri kullanılarak baz yağ üretimi veya enerjiye dönüştürülmesi gibi uygulamaların çevresel etkiler açısından değerlendirilmesinde yaşam döngüsü analizlerinin önemli katkılar sunduğunu göstermektedir (Özbey ve Metin, 2013). Avrupa Komisyonu tarafından hazırlanan raporda, atık yağların baz yağa geri kazanımı amacıyla uygulanan çeşitli rafinasyon yöntemleri (örneğin vakum distilasyonu, termal kraking vb.) ile çimento tesislerinde enerji elde etmek üzere yakıt olarak kullanılması senaryoları, çevresel etkiler açısından kapsamlı biçimde karşılaştırılmıştır. Değerlendirme kapsamında fosil yakıt tüketimi, su kullanımı, iklim değişikliğine katkı, katı atık oluşumu, partikül emisyonları gibi çok boyutlu çevresel etkiler analiz edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, rafinasyon ve enerji geri kazanımı arasında çevresel açıdan kesin bir üstünlük ilişkisinin kurulamadığı görülmüştür. Her iki alternatifin de farklı çevresel kriterler açısından avantajlar sunduğu, dolayısıyla en uygun yöntemin bağlam ve öncelikli çevresel hedefler doğrultusunda belirlenmesi gerektiği ortaya konmuştur. Örneğin, sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından enerji geri kazanımı daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkarken; asidifikasyon potansiyelinin azaltılması bakımından rafinasyon süreci daha olumlu çevresel sonuçlar vermektedir (Avrupa Komisyonu, 2001).

Türkiye’de 30 Temmuz 2008 tarihli ve 26952 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanan yeni Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği hükümleri çerçevesinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Petrol Sanayi Derneği İktisadi İşletmesi (PETDER) yetkilendirilmiş kuruluş olarak atanmıştır. Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği ile söz konusu atıkların kaynağında doğru şekilde sınıflandırılması, izlenebilir biçimde kayıt altına alınması, uygun koşullarda toplanması ve Avrupa Birliği çevre mevzuatına uyumlu yöntemlerle bertaraf edilmesi hedeflenmektedir (Atık Yağların Yönetimi Yönetmeliği, 2019). PETDER 2023 Atık Yağların Yönetimi Projesi Faaliyet Raporuna göre ülkemizde 2023 yılında 318 bin ton motor yağı satışa sunulmuş olup oluşması muhtemel atık motor yağı miktarı 190 bin ton olarak belirlenmiştir. Ancak oluşması muhtemel atık motor yağın sadece 1730 tonu PETDER tarafından toplanabilmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. 2019-2023 yılları arasında satışa sunulan ve fiilen toplanan atık motor ve şanzıman yağları miktarları (bin ton) (PETDER, 2023)

Toplanan atık yağları özellikle enerji santralleri, enerji üretim tesisleri ile çimento, demirçelik ve kireç fabrikaları gibi tesislerde enerji ve ısı ihtiyacının karşılanması amacıyla yakılmaktadır. 2 galonluk motor atık yağı 7.5 günlük televizyonun çalışmasına yetecek kadar enerji üretebilmektedir (Çetin, 2011). Atık yağların geri kazanımında 2 temel yol izlenmektedir (Şekil 2.4). İlki atık yağ içerisindeki katkı maddelerinin düzeyi ile fiziksel ve kimyasal işlevselliği analiz edildikten sonra, herhangi bir kompleks kimyasal dönüşüme tabi tutulmaksızın, basit mekanik veya fiziksel işlemler (örneğin süzme, çöktürme, santrifüjleme) uygulanarak tortu, su ve partiküllerden arındırılır. Bu iyileştirme işlemleri sonucunda yağ, sınırlı teknik uygulamalarda yeniden kullanılabilir hale getirilebilir. İkinci olarak ise atık yağ, lisanslı ve çevre mevzuatına uygun çalışan rejenerasyon tesislerinde, içeriğindeki kirleticilerin türü ve yoğunluğuna bağlı olarak gelişmiş proseslerden (örneğin vakum distilasyonu, hidrojenasyon, solvent ekstraksiyonu) geçirilir. Bu süreç sonucunda, ilk kullanım özelliklerine yakın kalitede baz yağ elde edilerek, madeni yağ üretim zincirine geri kazandırılır (PETDER, 2023). Bu yöntem hem çevresel yükün azaltılmasına hem de ekonomik değerin korunmasına katkı sağlamaktadır (Taherkhani ve Noorian, 2020; Asli vd., 2012).



Şekil 2.4. Atık motor ve endüstriyel yağların geri kazanım ve değerlendirme sürecinin şematik yapısı (PETDER, 2023)

2.1. Atık Yağların Modifikasyon ve Gençleştirme Adına Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanımına İlişkin Yapılan Bilimsel Çalışmalar

Fang vd. (2021) yaptıkları çalışmada, atık asfalt bağlayıcılarının yeniden kullanılabilirliğini artırmak amacıyla biyolojik gençleştiricilerin kullanımını çok yönlü olarak ele almıştır. Yaşlanmış asfaltın geri kazanılmasında kullanılan geleneksel gençleştiricilerin çevresel ve ekonomik sınırlılıklarına dikkat çekilmiş ve biyolojik kaynaklı alternatiflerin sunduğu potansiyeli kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, biyolojik gençleştiricilerin çeşitleri, teknik gereklilikleri, uygulama yöntemleri ve bunların asfalt performansına etkileri detaylandırılmıştır. Çalışmada atık bitkisel yağlar, atık yemeklik yağlar, atık soya yağı gibi çeşitli biyokütle kaynaklarından elde edilen gençleştiricilerin hem kimyasal hem de reolojik özellikleri ele alınmıştır. Bu malzemeler, bitüm yaşlanmasıyla kaybolan aromatik ve hafif fraksiyonların yerini alarak, yeniden esneklik ve yapışkanlık kazandırmayı hedeflemektedir. Çalışmada, bu biyolojik malzemelerin, yaşlanmış bağlayıcının penetrasyon, viskozite ve yumuşama noktası gibi temel parametrelerini optimize edebildiği gösterilmiştir. Gençleştirme uygulamalarında dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden birinin uyumluluk olduğunu vurgulanmaktadır. Biyolojik

gençleştiricilerin asfalt matrisiyle olan etkileşimleri, onların etkinliğini doğrudan belirlemektedir. Ayrıca, kullanılan oranın asfaltın viskoelastik özellikleri üzerindeki etkisi önemli bir değişken olarak tanımlanmıştır. Aşırı gençleştirici kullanımı, karışımın stabilitesini bozabilirken, yetersiz miktar ise beklenen performans iyileşmesini sağlayamamaktadır. Karıştırma süreci ve sıcaklık kontrolü de uygulamanın başarısını etkileyen başlıca teknik faktörlerdendir. Biyolojik gençleştiricilerin etkin şekilde asfalt ile karışabilmesi için belirli sıcaklık aralıklarında, yeterli süreyle karıştırılmaları gerekmektedir. Çalışmada yer verilen çeşitli laboratuvar çalışmaları, bu süreçlerin optimizasyonuna yönelik farklı yaklaşımları ortaya koymaktadır. Yenilenmiş asfaltın performansına ilişkin bulgular, biyolojik gençleştiricilerin düşük sıcaklık deformasyonu, yorulma direnci ve esneklik gibi parametrelerde belirgin iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Ancak, bazı durumlarda yüksek sıcaklıkta deformasyon direncinde düşüş olabileceği bildirilmiş ve bu durumun uygun katkılarla dengelenmesi gerektiği önerilmiştir. Sonuç olarak bu kapsamlı derleme, biyolojik gençleştiricilerin sürdürülebilir asfalt kazanımı açısından umut verici bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu alanda henüz standart bir uygulama protokolü bulunmadığı için, gelecekte daha fazla deneysel ve saha araştırmasına ihtiyaç olduğu vurgulanmaktadır.

Wang vd. (2022) yaptıkları çalışmada, atık yağ bazlı gençleştiricilerin asfalt geri dönüşümündeki etkinliğini moleküler düzeyde incelemişlerdir. Bu çalışma, yaşlanmış asfalt bağlayıcının yapısal bozulmalarını iyileştirmek ve yeni bağlayıcı ile etkili bir şekilde bütünleşmesini sağlamak amacıyla atık yağların difüzyon (yayılma) ve füzyon (kaynaşma) davranışlarını modellemek üzere moleküler dinamik simülasyonlarını kullanmaktadır. Çalışmanın yenilikçi yönü, geleneksel makroskopik testler yerine moleküler ölçekli etkileşimlerin sayısal olarak modellenmesidir. Araştırmada üç farklı türde atık yağ bazlı gençleştirici incelenmiştir: atık yemeklik yağ (WCO), atık bitkisel yağ (WVO) ve atık motor yağı (WEO). Bu gençleştiricilerin yaşlanmış asfaltın mikroyapısı içerisine karıştırıldığında, yeni asfalt bağlayıcısı ile nasıl etkileşime girdiği ayrıntılı olarak simüle edilmiştir. Bu süreçte, özellikle asfalten-malten etkileşimleri, moleküller arası boşluklar, difüzyon hızları ve yapısal entegre olma süreleri analiz edilmiştir. Bulgular, her üç gençleştiricinin de yaşlanmış asfaltın viskoelastik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir; ancak bu etkinin gençleştirici türüne ve miktarına göre farklılaştığı belirlenmiştir. WCO ve WEO'nun daha hızlı

difüzyon ve daha güçlü füzyon etkisi gösterdiği, WVO'nun ise daha zayıf bir moleküler etkileşim yarattığı gözlemlenmiştir. WCO'nun düşük dozajlarda oldukça etkili olduğu, ancak %6'nın üzerindeki oranlarda karışımın stabilitesini bozabileceği ve bağlayıcı fazlar arasında homojenliği azaltabileceği belirtilmiştir. WEO'nun, zincir benzeri yapısıyla, asfaltten kümeleri arasında daha fazla mesafe oluşturarak difüzyonu desteklediği ve yapısal rijitliği azalttığı anlaşılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, atık yağların varlığı asfalt bağlayıcısındaki zincir moleküllerinin gevşemesini ve yeniden yapılandırılmasını kolaylaştırmaktadır. Özellikle WEO içeren sistemlerde, trans konfigürasyondaki moleküllerin varlığı, bağlayıcı fazlar arasındaki geçişleri hızlandırmış ve mikroyapıdaki faz ayrımını azaltarak kaynaşmayı kolaylaştırmıştır. Bu durum hem difüzyon süresini kısaltmakta hem de asfaltın tekrar kullanılabilirliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, atık yağ bazlı gençleştiricilerin asfalt geri dönüşüm süreçlerine entegre edilmesinin çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyel taşıdığı vurgulanmaktadır. Ayrıca moleküler dinamik simülasyonların geleneksel asfalt test yöntemlerine tamamlayıcı olarak kullanılabileceği ve özellikle malzeme tasarımında ileri düzey öngörüler sunabileceği ifade edilmiştir. Bu bağlamda çalışma hem malzeme bilimi hem de asfalt mühendisliği alanlarında önemli katkılar sağlamaktadır.

Liu vd. (2023) yaptıkları çalışmada, atık motor yağı (WEO) ile gençleştirilmiş edilmiş asfalt bağlayıcılarının yeniden yaşlandırma sürecindeki kimyasal ve reolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, gençleştirilmiş asfalt bağlayıcılarının uzun vadeli performansını ve dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla, bağlayıcılar farklı yaşlandırma seviyelerine tabi tutulmuş ve bu süreçlerin etkileri analiz edilmiştir. Araştırmada; orijinal bağlayıcı, yaşlandırılmış bağlayıcı, WEO ile gençleştirilmiş bağlayıcı, gençleştirilmiş ve yeniden yaşlandırılmış bağlayıcı ve sadece yeniden yaşlandırılmış bağlayıcı olmak üzere beş farklı bağlayıcı örneği kullanılmıştır. Bu örnekler, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Dinamik Kayma Reometresi (DSR) kullanılarak kimyasal ve reolojik açıdan değerlendirilmiştir. FTIR analizleri, WEO'nun yaşlandırılmış bağlayıcının kimyasal yapısını kısmen geri kazandırdığını, ancak yeniden yaşlandırma sürecinin bu iyileştirmeleri tersine çevirdiğini göstermiştir. Özellikle, karbonil ve sülfoksit gruplarının yoğunluklarında artış gözlemlenmiş, bu da oksidatif yaşlanmanın yeniden başladığını ve bağlayıcının kimyasal stabilitesinin azaldığını ortaya koymuştur. Reolojik değerlendirmeler, WEO

ile gençleştirilmiş bağlayıcının başlangıçta düşük sıcaklık performansını artırdığını, ancak yeniden yaşlandırma sonrasında bu iyileşmelerin azaldığını göstermiştir. DSR testleri, kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) gibi parametrelerde, yeniden yaşlandırılmış bağlayıcının sertlik ve elastikiyet özelliklerinde olumsuz değişiklikler olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, gençleştirilmiş bağlayıcının uzun vadeli performansının, yeniden yaşlandırma sürecinden olumsuz etkilendiğini göstermektedir. Sonuç olarak çalışma, WEO'nun yaşlandırılmış asfalt bağlayıcısının kısa vadeli performansını iyileştirebileceğini, ancak yeniden yaşlandırma sürecinin bu iyileştirmeleri sınırlayabileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, WEO'nun gençleştirici olarak kullanımında, uzun vadeli performansın dikkate alınması gerektiğini ve ek stabilizatörlerin veya modifikasyonların gerekliliğini vurgulamaktadır.

Li vd. (2022) yaptıkları çalışmada, atık yağların asfalt kaplama malzemelerinde yeniden kullanımı üzerine kapsamlı bir derleme sunmuşlardır. Çalışma, özellikle atık yemeklik yağ (WCO) ve atık motor yağı (WEO) gibi atık yağların yaşlanmış asfaltın yenilenmesinde kullanılabilirliğini değerlendirmiştir. Araştırmada, WCO ve WEO'nun yaşlanmış asfalt bağlayıcısının temel performansını geri kazandırma potansiyeli incelenmiştir. Bulgular, her iki atık yağın da yaşlanmış asfaltın düşük sıcaklık performansını iyileştirdiğini ve temel reolojik özelliklerini restore ettiğini göstermiştir. Ancak, yüksek sıcaklık performansının tamamen geri kazanılamadığı ve optimum yağ içeriği ile bile sınırlı bir iyileşme sağlandığı belirtilmiştir. Çalışma, WCO ve WEO'nun içerdiği hafif bileşenlerin, yaşlanmış asfaltın yenilenmesinde kilit rol oynadığını vurgulamaktadır. Bu hafif bileşenler, asfaltın viskozitesini azaltarak işlenebilirliğini artırmakta ve düşük sıcaklıkta çatlama direncini iyileştirmektedir. Ancak, bu yağların yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkileri sınırlı kalmaktadır. WCO ve WEO'nun tek başına kullanımının sınırlamalarını göz önünde bulundurarak, bu iki atık yağın birleşiminden oluşan bileşik bir gençleştiricinin geliştirilmesini önermektedirler. Bu yaklaşımın, atık yağların daha etkili bir şekilde geri kazanılmasını sağlayabileceği ve çevresel baskıyı azaltabileceği ifade edilmektedir. Ayrıca, bileşik gençleştiricinin yaşlanmış asfalt ile uyumluluğunun artırılması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, atık yağların asfalt yenileme süreçlerinde kullanılmasının çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu uygulamaların etkinliğini artırmak ve uzun

vadeli performansını değerlendirmek için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmasına ihtiyaç duyulduğu düşünülmektedir.

Asli vd. (2012) yaptıkları çalışmada, yaşlanmış bitümün fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla atık yemeklik yağın (WCO) gençleştirici olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, orijinal, yaşlandırılmış ve WCO ile yenilenmiş bitüm örnekleri hazırlanarak, bu örneklerin fiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Penetrasyon, yumuşama noktası ve Brookfield viskozitesi gibi standart bitüm testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, WCO'nun yaşlanmış bitümün fiziksel özelliklerini orijinal bitüme benzer hale getirebildiğini göstermiştir. Araştırmada, farklı penetrasyon derecelerine sahip yaşlanmış bitüm grupları (50/60, 40/50 ve 30/40) için optimum WCO yüzdeleri belirlenmiştir. Bu gruplar için sırasıyla %1, %3-4 ve %4-5 WCO eklenmesiyle, yaşlanmış bitümün fiziksel özelliklerinin orijinal 80/100 bitüme yakın değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. İstatistiksel analizler, orijinal bitüm ile WCO ile yenilenmiş bitüm arasında anlamlı bir fark olmadığını ortaya koymuştur. WCO'nun yenileyici etkisi, bitümün viskozitesini azaltarak işlenebilirliğini artırması ve düşük sıcaklıkta çatlama direncini iyileştirmesiyle açıklanmıştır. Ancak, yüksek sıcaklık performansının tamamen geri kazanılamadığı ve optimum yağ içeriği ile bile sınırlı bir iyileşme sağlandığı belirtilmiştir. Bu durum, WCO'nun yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkilerinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, çalışma, WCO'nun yaşlanmış bitümün fiziksel özelliklerini iyileştirmede etkili bir yenileyici olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, yüksek sıcaklık performansının tamamen geri kazanılamaması, WCO'nun tek başına kullanımının sınırlamalarını göstermektedir. Bu nedenle, WCO'nun diğer yenileyicilerle kombinasyonu veya ek katkı maddeleri ile birlikte kullanımı önerilmektedir.

Liu vd. (2018) yaptıkları çalışmada, atık motor yağının (WEO) farklı asfalt bağlayıcılarının kimyasal ve reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, üç farklı asfalt bağlayıcısı %4 ve %8 oranlarında WEO ile modifiye edilmiştir. WEO'nun ana kimyasal bileşenleri gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS) ile belirlenmiş; moleküler ağırlık dağılımları ve fonksiyonel gruplardaki değişiklikler ise jel geçirgenlik kromatografisi (GPC) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile analiz edilmiştir. Reolojik özellikler, dönel viskozimetre (RV) ve dinamik kayma reometresi (DSR) testleri ile değerlendirilmiştir. Analizler,

WEO'nun ağırlıklı olarak aromatik çözücüler, parafin yağı ve poliolefin yağı içerdiğini ve asfaltla benzer fonksiyonel gruplara sahip olduğunu göstermiştir. WEO'nun asfalt bağlayıcısına eklenmesi, büyük moleküllerin oranını azaltarak karbonil fonksiyonel gruplarının varlığını düşürmüştür. Bu, asfaltın kimyasal yapısında yaşlanmaya bağlı olarak oluşan oksidatif grupların azalmasına işaret etmektedir. Reolojik test sonuçları, WEO'nun asfalt bağlayıcısının viskozitesini önemli ölçüde azalttığını ve bu sayede yapım sıcaklıklarını düşürdüğünü ortaya koymuştur. Ayrıca, WEO ilavesiyle kompleks modül değerlerinde azalma ve faz açısı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu, bağlayıcının daha yumuşak ve daha viskoz hale geldiğini, dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direncinin azaldığını ancak düşük sıcaklıklarda yorulma davranışının iyileştiğini göstermektedir. Sonuç olarak, çalışma, WEO'nun asfalt bağlayıcılarının reolojik ve kimyasal özelliklerini değiştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. WEO'nun, asfaltın düşük sıcaklık performansını artırırken, yüksek sıcaklık performansını olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir.

El-Shorbagy vd. (2019) yaptıkları çalışmada, sürdürülebilir yol kaplama uygulamaları kapsamında, atık yemeklik yağ (WCO) ve atık motor yağı (WEO) gibi atık yağların, geri kazanılmış asfalt kaplamalardan (RAP) elde edilen yaşlanmış bitümün yenileyicileri olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, yaşlanmış bitüm örnekleri çeşitli oranlarda (%3.5 ve %4) WCO ve %5.5 ve %6) WEO ile modifiye edilerek fiziksel ve reolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Fiziksel özelliklerin değerlendirilmesinde penetrasyon, yumuşama noktası ve Brookfield viskozitesi testleri uygulanmıştır. Reolojik özellikler ise Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Eğilen Kiriş Reometresi (BBR) testleri ile incelenmiştir. Kimyasal analizler için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) kullanılmıştır. Ayrıca, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yüzey morfolojisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, her iki atık yağın da yaşlanmış bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Özellikle, %3.5 WCO ve %5.5 WEO ilavesiyle, yenilenmiş bitümün viskozite değerleri orjinal bitümüne benzer seviyelere ulaşmıştır. DSR testleri, yenilenmiş bitümün kısa vadeli yaşlanmaya karşı daha az eğilim gösterdiğini ortaya koymuştur. BBR test sonuçları ise, yenilenmiş bitümün düşük sıcaklık performansının orjinal bitümüne yakın olduğunu göstermiştir. FTIR ve EDX analizleri, atık yağ ilavesinin yaşlanmış bitümün kimyasal yapısında olumlu değişikliklere yol açtığını ortaya koymuştur. Özellikle,

yüksek moleküler ağırlıklı asfaltın oranının azalması ve malten oranının artması, bitümün daha yumuşak ve işlenebilir hale gelmesini sağlamıştır. SEM görüntüleri, yenilenmiş bitümün yüzey morfolojisinin orjinal bitümüne benzer olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, çalışma, WCO ve WEO'nun yaşlanmış bitümün fiziksel, reolojik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmede etkili gençleştiriciler olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, atık yağların sürdürülebilir yol kaplama uygulamalarında değerlendirilmesi için önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Liu vd. (2019) yaptıkları çalışmada, yaşlanmış asfalt bağlayıcılarının performansını iyileştirmek amacıyla atık motor yağı (WEO) kullanılarak modifiye edilen asfalt bağlayıcılarının yaşlanma davranışını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışma, sürdürülebilir malzeme yönetimi ve asfalt geri dönüşümünde çevre dostu yaklaşımların teşvik edilmesi açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Araştırmada hem fiziksel hem reolojik hem de kimyasal düzeyde çok boyutlu analizler yapılmıştır. Araştırmanın deneysel tasarımı üç aşamalı yaşlandırma sürecine dayanmaktadır: kısa vadeli yaşlandırma için RTFOT, uzun vadeli yaşlandırma için PAV ve yoğun yaşlandırma için çift PAV protokolü uygulanmıştır. Bu protokoller, saha koşullarını laboratuvar ortamında simüle etmek amacıyla kullanılmıştır. WEO, farklı oranlarda (%2, %4, %6) yaşlanmış bağlayıcılara eklenmiş ve elde edilen bağlayıcıların yaşlanmaya karşı gösterdiği direnç analiz edilmiştir. Konvansiyonel test sonuçları, WEO'nun bitümün penetrasyon değerini artırarak yumuşattığını, viskoziteyi düşürdüğünü ve yumuşama noktasını azalttığını göstermiştir. Özellikle düşük WEO oranları (%2–%4), yaşlanmış bağlayıcının işlenebilirliğini iyileştirirken mekanik bütünlüğünü korumaktadır. Ancak %6 oranında WEO eklenmesi, bağlayıcının yüksek sıcaklık performansında belirgin bir düşüşe yol açmıştır. Bu da optimum WEO dozajının kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Reolojik analizlerde Dinamik Kayma Reometresi (DSR) testleri, WEO-modifiye bağlayıcının kompleks kayma modülünde azalma ve faz açısında artış sergilediğini göstermiştir. Bu bulgular, bağlayıcının elastik karakterinde zayıflama olduğunu ve yüksek sıcaklıklarda deformasyona karşı daha hassas hale geldiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte Eğilen Kiriş Reometresi (BBR) testleri, düşük sıcaklık çatlama direncinde belirgin iyileşmeler göstermiştir. Bu durum, WEO'nun özellikle soğuk iklim koşullarında avantajlı olabileceğini düşündürmektedir. Kimyasal analizlerde, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) kullanılarak bağlayıcı içindeki fonksiyonel grupların

değişimi takip edilmiştir. Sonuçlar, WEO ilavesiyle karbonil (C=O) ve sülfoksit (S=O) gruplarının yoğunluğunda azalma olduğunu göstermiştir; bu da oksidatif yaşlanmanın kısmen tersine çevrildiğine işaret etmektedir. Ek olarak, moleküler dağılımda gözlemlenen iyileşmeler, asfaltın yeniden çözünürlüğünü artırmakta ve bağlayıcının yapısal bütünlüğünü yeniden kazandırmaktadır. Çalışma, mikroskopik düzeyde ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile bağlayıcının yüzey morfolojisini incelemiş ve WEO ilavesinin agregasyon yapısını azalttığını, bağlayıcı homojenliğini artırdığını göstermiştir. Bu durum, fiziksel testlerle elde edilen bulgularla paralellik göstermektedir. Sonuç olarak, WEO'nun yaşlanmış asfalt bağlayıcılarında yenileyici etkisinin bulunduğunu ve özellikle düşük sıcaklık performansını artırdığını ortaya koymuştur. Ancak yüksek sıcaklık performansında görülen düşüş, bu tür atık yağların tek başına değil, başka katkı maddeleriyle birlikte kullanılması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışma, asfalt geri dönüşümünde WEO'nun potansiyelini ortaya koymakla birlikte, dengeli performans için formülasyon optimizasyonunun zorunlu olduğunu da vurgulamaktadır.

Luo vd. (2021) yaptıkları çalışmada, atık yağlarla yenilenen asfalt bağlayıcılarının ikincil yaşlanma sürecinde performanslarının nasıl bozulduğunu ve bu bozulmanın bileşen değişimleriyle ilişkisini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada, atık yemeklik yağ (WCO), atık biyo yağ (WBO) ve atık motor yağı (WEO) olmak üzere üç farklı atık yağ türü kullanılarak gençleştirilen asfaltlar değerlendirilmiştir. Araştırmanın temel amacı, bu farklı atık yağların yenilenen asfaltların yaşlanma sürecindeki performans bozulmalarına etkilerini belirlemek ve bu etkilerin bileşen değişimleriyle nasıl ilişkili olduğunu ortaya koymaktır. Çalışmada, SARA (Doymuş, Aromatik, Reçine ve Asfaltin) fraksiyon analizi kullanılarak, gençleştirilen asfaltların bileşen değişimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. WCO ile gençleştirilen asfaltlarda, doymuş bileşenlerin artışı gözlemlenmiş, ancak bu durum yeni oluşan kolloidlerin hafif bileşenlerini kolayca kaybetmesine ve düşük stabiliteye yol açmıştır. WEO ile yenilenen asfaltlarda ise, metal kalıntılarının oksidasyon ve polikondenzasyon süreçlerini katalize ettiği ve bu nedenle yaşlanma sırasında performansın ciddi şekilde bozulduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, WBO ile yenilenen asfaltlar daha stabil bir kolloidal yapıya sahip olmuş ve kül içermemesi nedeniyle yaşlanma sürecinde en stabil ve makul performans bozulmasını sergilemiştir. Bu bulgular, WBO'nun diğer atık yağlara kıyasla yenilenen asfaltlarda

daha uzun ömürlü ve stabil performans sağladığını göstermektedir. Araştırma, yenilenen asfaltın performansını değerlendirirken sadece başlangıçtaki performans iyileşmelerine odaklanmanın yetersiz olduğunu vurgulamaktadır. Yenilenen asfaltların ikincil yaşlanma sürecindeki performanslarının korunması, uzun vadeli dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, yenileyici olarak kullanılan atık yağların bileşenlerinin ve bu bileşenlerin yaşlanma süreçlerindeki davranışlarının detaylı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Sonuç olarak çalışma, atık yağlarla yenilenen asfaltların ikincil yaşlanma süreçlerindeki performans bozulmalarının, kullanılan atık yağın türüne ve bileşenlerine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, sürdürülebilir ve uzun ömürlü asfalt yenileme stratejileri geliştirmek için atık yağların bileşenlerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tabatabaei vd. (2024) yaptıkları çalışmada, asfalt üretiminde sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, yüksek oranda geri kazanılmış asfalt kaplaması (RAP) içeren karışımlarda atık çelik hadde yağı (WSRO) kullanımının etkilerini kapsamlı şekilde incelemiştir. Geleneksel gençleştiricilerin sınırlı bulunabilirliği ve yüksek maliyetleri, alternatif atık bazlı malzemelerin araştırılmasını zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, çalışma WSRO'nun yaşlanmış bitüm üzerindeki rejeneratif etkisini hem kimyasal hem de mekanik açıdan analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, farklı oranlarda WSRO ilavesiyle modifiye edilen yaşlanmış bağlayıcılar ve bu bağlayıcılarla üretilen yüksek RAP içerikli karışımlar değerlendirilmiştir. Deneysel tasarım kapsamında, bitümlerin temel fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite deneyleri ile test edilmiş; kimyasal bileşimler FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) ile, mikroyapısal değişimler ise FESEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) ile incelenmiştir. Ayrıca, karışım performansını değerlendirmek üzere Yarım Daire Eğilme (SCB) analizi, nem hassasiyeti için dolaylı çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular, WSRO'nun yaşlanmış bitüm içinde iyi bir şekilde dağıldığını ve bu bağlayıcının mikroyapısında daha homojen bir yapı oluşturduğunu göstermiştir. FTIR analizleri, yaşlanmanın göstergesi olan karbonil ve sülfoksit gruplarının yoğunluğunda WSRO etkisiyle belirgin bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Bu, WSRO'nun yaşlanma belirtilerini kimyasal düzeyde tersine çevirebileceğini ve bağlayıcının esnekliğini artırabileceğini göstermektedir. Ek olarak, SEM görüntüleri, WSRO ilavesiyle daha düzgün ve çatlak oluşumuna dirençli yüzey morfolojileri

gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Mekanik performans testleri, WSRO ilavesi ile elde edilen yüksek RAP içerikli karışımların hem tekerlek izi oluşumuna karşı direncinde hem de düşük sıcaklık çatlama performansında belirgin iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Bu karışımlar kısa vadeli ve uzun vadeli performans açısından kabul edilebilir değerler sunmuştur. Ayrıca, dolaylı çekme testleri nem hassasiyetinde de iyileşme olduğunu ortaya koymuş, bu durum WSRO'nun su ile etkileşimleri sınırlandırarak aderans sorunlarını azaltabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak, çalışma WSRO'nun sürdürülebilir asfalt üretimi için umut vadeden bir atık kaynaklı geliştirici olabileceğini göstermektedir. Hem bağlayıcının kimyasal ve fiziksel özelliklerini geliştirmesi hem de asfalt karışımlarının yapısal dayanımını artırması, bu malzemenin pratik uygulamalarda değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, WSRO'nun uzun vadeli reolojik performansı, çevresel etkileri ve maliyet-etkinliği gibi yönlerinin daha ayrıntılı şekilde incelenmesine ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Qurashi ve Swamy (2018) yaptıkları çalışmada, atık motor yağının (WEO) yaşlanmış ve orjinal bağlayıcı içeren asfalt karışımlarının viskoelastik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, farklı oranlarda WEO, yaşlanmış bağlayıcı ve orjinal bağlayıcı içeren çeşitli asfalt karışımları hazırlanarak, bu karışımların mühendislik ve viskoelastik özellikleri değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, WEO ilavesinin asfalt bağlayıcının viskozitesini ve yumuşama noktasını düşürdüğünü göstermiştir. Bu durum, bağlayıcının daha akışkan hale gelmesine ve işlenebilirliğinin artmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, WEO eklenmesiyle kompleks modülü değerlerinde tüm frekanslarda azalma gözlemlenmiş, bu da bağlayıcının sertliğinin azaldığını ve daha esnek hale geldiğini göstermektedir. Faz açısı değerlerinde ise artış tespit edilmiştir; bu, bağlayıcının daha viskoz davranış sergilediğini ve elastik özelliklerinin azaldığını ifade etmektedir. Black space diyagramları kullanılarak yapılan karşılaştırmalar, kısa süreli yaşlandırılmış karışımların, yaşlandırılmamış karışımlara kıyasla belirgin değişiklikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle, WEO içeriğinin artmasıyla birlikte gevşeme modülünde düşüş gözlemlenmiş, ancak bu azalma %6 WEO ilavesinden sonra belirgin olmamıştır. Bu bulgular, WEO'nun yaşlanmış bağlayıcının olumsuz etkilerini azaltabileceğini ve bağlayıcının elastikiyetini artırarak esnekliğini iyileştirebileceğini göstermektedir. Genel olarak, %2 ve %4 oranlarında WEO ilavesinin, yaşlanmış bağlayıcının neden

olduğu olumsuz etkileri dengeleyebileceği ve bağlayıcının elastikiyetini artırarak esnekliğini iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır. Çalışma sonuçları WEO'nun asfalt bağlayıcılarında gençleştirici olarak kullanılabileceğini ve sürdürülebilir asfalt üretimi için potansiyel bir katkı maddesi olabileceğini göstermektedir.

Li ve arkadaşları (2023) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, atık bitkisel yağ (WVO) kullanılarak geliştirilen bir rejuvenatörün, asfalt bağlayıcısının ultraviyole (UV) yaşlanması altındaki performansına etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, WVO'nun asfalt bağlayıcısının viskoelastik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. WVO ilavesiyle bağlayıcının viskozitesinde azalma gözlemlenmiş, bu da bağlayıcının daha akışkan hale gelmesine ve işlenebilirliğinin artmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca, WVO'nun bağlayıcının elastikiyetini artırarak esnekliğini iyileştirdiği belirlenmiştir. UV yaşlanması sonrasında, WVO ile modifiye edilmiş bağlayıcının yaşlanma direncinde iyileşme tespit edilmiştir. Bu durum, WVO'nun bağlayıcının UV ışınlarına karşı daha dayanıklı hale gelmesine katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, WVO'nun bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki performansını artırdığı ve çatlama direncini iyileştirdiği belirlenmiştir. Kimyasal analizler, WVO ilavesinin bağlayıcının kimyasal bileşiminde olumlu değişikliklere neden olduğunu ortaya koymuştur. Bu değişiklikler, bağlayıcının oksidatif yaşlanmaya karşı direncini artırmış ve uzun ömürlü asfalt kaplamalarının geliştirilmesine katkı sağlamıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, atık bitkisel yağın asfalt bağlayıcısında gençleştirici olarak kullanılmasının, bağlayıcının viskoelastik özelliklerini iyileştirdiğini, UV yaşlanmasına karşı direncini artırdığını ve sürdürülebilir asfalt üretimi için potansiyel bir katkı maddesi olabileceğini göstermektedir.

Banerji vd. (2022) yaptıkları çalışmada, yaşlanmış bitümün fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla atık pişirme yağı (WCO) ve atık motor yağı (WEO) kullanımının etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Araştırma, sürdürülebilir malzeme kullanımı ve çevresel etkilerin azaltılması hedefiyle, bu atık yağların asfalt bağlayıcılarında gençleştirici olarak potansiyelini değerlendirmektedir. Çalışmada, yaşlanmış bitüm numunelerine belirli oranlarda WCO ve WEO eklenerek, bu modifikasyonların bağlayıcının fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite gibi temel fiziksel testler uygulanarak, atık

yağların bağlayıcının sertlik ve esneklik özelliklerine katkıları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular hem WCO hem de WEO ilavesinin yaşlanmış bitümün sertliğini azalttığını ve esnekliğini artırdığını göstermiştir. Bu durum, atık yağların bağlayıcının düşük sıcaklık performansını iyileştirebileceğini ve çatlama direncini artırabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, yüksek oranlarda atık yağ ilavesinin bağlayıcının viskozitesini aşırı derecede düşürebileceği ve bu durumun bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir. Çalışma ile atık pişirme yağı ve atık motor yağının asfalt bağlayıcılarında gençleştirici olarak kullanılmasının, yaşlanmış bitümün fiziksel özelliklerini iyileştirebileceğini ve sürdürülebilir asfalt üretimi için potansiyel bir katkı maddesi olabileceğini göstermektedir. Ancak, optimum performansın elde edilmesi için atık yağların uygun oranlarda kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır.

Abd Ali vd., (2024) yaptıkları çalışmada, atık motor yağının geri kazanılmış asfalt karışımlarının performansını artırmada bir gençleştirici madde olarak kullanılması potansiyelini araştırmaktadır. Özellikle, atık motor yağlarının asfalt karışımlarında kullanımı, asfalt yüzeylerde yaygın olarak görülen deformasyon türlerinden biri olan tekerlek izi probleminin önlenmesinde etkili olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada farklı oranlarda atık motor yağı katkılı geri kazanılmış asfalt karışımları hazırlanmış ve bu karışımların tekerlek izi direnci laboratuvar ortamında detaylı olarak incelenmiştir. Atık motor yağının, bitüm içeriğinde yaptığı kimyasal ve fiziksel değişimlerin asfaltın deformasyona karşı direncine etkisi üzerine yoğunlaşmıştır. Test sonuçları, atık motor yağı katkısının karışımların esneklik ve bağlayıcılık özelliklerini iyileştirdiğini, böylece yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumunu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bu bulgular, atık motor yağının asfalt geri dönüşüm süreçlerinde gençleştirici ajan olarak işlev görebileceğine dair önemli kanıtlar sunmaktadır. Bunun yanı sıra, çalışmada kullanılan metotlar, malzeme karakterizasyonu ve performans testlerinin ayrıntılı analizine yer verilmiştir. Laboratuvar testlerinde elde edilen veriler, karışımın tekerlek izi performansının yanı sıra dayanıklılık ve deformasyon şekilleri hakkında kapsamlı bilgi sağlamıştır. Ayrıca, atık motor yağı katkısının optimum kullanım oranları belirlenmiş ve bu oranların aşılmasının asfalt karışımının mekanik dayanıklılığını olumsuz etkileyebileceği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, araştırma atık motor yağlarının geri kazanılmış asfalt karışımlarında kullanılarak hem çevresel bir atığın değerlendirilmesi hem de asfalt

yüzeylerin mekanik performansının artırılması açısından önemli bir çözüm sunduğunu göstermiştir.

Suo vd. (2021) yaptıkları çalışmada bitkisel veya mineral yağlar ile gençleştirilmiş geri kazanılmış asfalt betonunun kısa ve uzun zamanlı yaşlanma davranışları incelemişlerdir. Son yıllarda farklı asfalt karışımların yaşlanma davranışlarının oldukça önemli bir araştırma alanı olduğu belirtilen çalışmada, toplamda 18 adet gençleştirilmiş içerikli geri kazanılmış asfalt numune incelenerek yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış geri kazanılmış asfalt binderin viskozitesi farklı sıcaklıklar için test edilmiştir. Marshall tasarım metodu ile geri kazanılmış asfalt oranı belirlenmiş ayrıca indirekt çekme dayanımı testi yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, geri kazanılmış asfalt içerisine gençleştirici yağın eklenmesinin viskozite açısından oldukça önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Geri kazanılmış asfalt içerisine eklenen gençleştirici bitkisel yağ bitümün daha düşük viskoziteye ulaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca yapılan bu çalışmada mineral gençleştiriciler ve bitkisel yağ gençleştiriciler arasındaki farklar da incelenmiştir. Bitkisel yağ gençleştiricisi ile yapılan karışımlar da daha az ağırlık kaybı, daha düşük kompleks modülü (G) gözlenmiştir. Geri kazanılmış bitümün viskozite azalması gençleştiricinin tipine ve gençleştiricinin oranına bağlı olduğu gözlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, viskoziteyi en optimum düzeyde azaltan sıcaklık ve süre, bitkisel yağ gençleştiricileri ile 135 derecede 2 saat boyunca uygulandığında sağlanmaktadır. Ayrıca ne kadar çok gençleştirici eklenirse o kadar fazla viskozite azalma görülmüştür. Çalışmada son olarak bitkisel yağlar ile gençleştirmenin yüksek yaşlanma karşıtı özellikler sağladığı gösterilmiştir. Bu durumun bitkisel yağlardaki doymamış karbon zinciri ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Bu özellik sayesinde bitkisel yağların geri dönüştürülmüş asfaltların mikro yapısında daha iyileştirici özellikler sağladığı öngörülmektedir.

Dokandari vd. (2021) yaptıkları çalışmada geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) bitümünde kullanılan gençleştiricilerin reolojik ve mikro-yapısal etkilerini Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılarak araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan RAP bitümü ekstraksiyon yöntemi ile elde edilmiş, iki farklı türde atık yağ ve bir ticari gençleştirici kullanılarak gençleştirilmiştir. Gençleştirilen bitüm numuneleri hem reolojik hem de mikro yapısal açıdan değerlendirilmiş, kullanılan gençleştiricilerin etkinliğini araştırmak için

karışım testleri de gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, gençleştirilmiş, gençleştirilmemiş ve saf bitüm örneklerinin davranışlarını incelemek için kontrollü stres altında çalışan bir Malvern Dinamik Kayma Reometresi (DSR) kullanılmıştır. DSR bitümün sıcaklık ve yükleme koşullarında performansını değerlendirmek için önemli sonuçlar sağlamaktadır. Çalışma sonuçları, ticari ve atık yağlar gibi gençleştirici ajanların, yaşlanmış bitümün penetrasyon derecesini istenilen seviyeye artırdığını göstermiştir. Ayrıca, gençleştiriciler uygulandığında yaşlanmış RAP bitümünün viskozitesinin de istenilen şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Atık motor yağı (WEO) ve atık bitkisel yağ (WVO) gençleştirici ajanları, geleneksel test sonuçları açısından birbirine benzer performans gösterirken, ticari gençleştiricinin (CRA) atık yağlardan daha etkili olduğu görülmüştür. Uygulanan DSR analizi sonuçlarına göre gençleştiricilerin kullanılması, yaşlanmış RAP bitümünün reolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. WEO ve WVO, yaşlanmış RAP bitümünün tekerlek izi dayanımı performansını benzer şekilde iyileştirirken, CRA daha iyi bir performans sergilemiştir. Atık yağlar kullanılarak, yenilenmiş bitümlerin saf bitüm ile aynı reolojik özelliklere sahip olması mümkün olmasa da gençleştirici ajanların yaşlanmış bitüm üzerinde etkileyici bir etkisi bulunmaktadır. CRA, yaşlanmış bitümün reolojik özelliklerini orijinal haline geri kazandırmada daha önemli bir rol oynamaktadır. Tüm gençleştirici ajanlar, yaşlanmış bitümün PG (Penetration Grade) seviyesini geri kazandırmaktadır. Yenilenmiş bitüm örnekleri, RTFO sonrası kriter limitlerine uymaktadır, ancak RTFO sonrası özellikler, saf bitümün özellikleriyle kıyaslandığında daha düşük seviyededir. Tüm bitüm örneklerinin AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) görüntüleri incelendiğinde, saf bitüm yüzeyinde gözlemlenen arı görünümlü yapılar, yaşlanmış bitümün mikro yüzeyinde görünmemektedir. Gençleştirme sonrasında gençleştirilmiş bitüm örneklerinde küçük arı yapıları gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, tüm gençleştirici ajanlar, yaşlanmış bitümün mikro topografyasını ve faz dağılımını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bağlayıcı ve karışım testleri, performans ve yaşlanma özellikleri açısından yüksek tutarlılık ve uyum sergilemiştir. Sonuçlar, atık yağların RAP içinde gençleştirici ajanlar olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Gençleştiricilerin yaşlanmış RAP bitümünün özelliklerini önemli ölçüde geri kazandırabilir olduğu ve bitümlü karışımlarda RAP malzeme kullanım oranını arttırabileceği görülmüştür.

Antunes vd. (2022) yaptıkları çalışmada geri kazanılmış bitümün reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla DSR kullanmış, ayrıca RAP'in çoklu geri dönüşüm kapasitesini

değerlendirmişlerdir. Çalışma çoklu geri dönüşüm döngüleri sırasında bitüm özelliklerindeki değişiklikleri, yaşlanma öncesini ve sonrasını kapsayacak şekilde ele almaktadır. Geri kazanılmış bitümün reolojik yapısı DSR kullanılarak karakterize edilmiş, yumuşama noktası ve penetrasyon değeri de belirlenmiştir. Çalışmada bakır malzemeler ve 35/50 penetrasyon sınıfına sahip saf bitüm içeren bitümlü bir karışım, bir yol bakım ve onarım operasyonundan elde edilen %75 RAP ve %25 bakır malzeme içeren bir karışım ve iki geri dönüşüm döngüsünü simüle etmek için laboratuvarda üretilmiş %75 RAP ve %25 bakır malzeme içeren bir karışım olmak üzere 3 ayrı karışım kullanılmıştır. Elde edilen karışımlar laboratuvar ortamında kısa ve uzun dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen karışımlardan bitümlü bağlayıcı dönen buharlaştırıcı ekstraksiyon yöntemi ile ayrıştırılmıştır. Birinci geri dönüşüm döngüsü RAP karışımı bir yol bakım ve onarım operasyonundan elde edilen, yüzey tabakasının değiştirilmesiyle oluşan RAP kullanılarak üretilmiştir. İkinci geri dönüşüm döngüsü RAP karışımı ise, birinci RAP karışımından elde edilen yaşlanmış karışımların laboratuvarda kırılmasıyla üretilmiştir. Her iki RAP karışımı da RAP bitüm özelliklerini geri kazandırmak amacıyla yenilenebilir biyolojik bazlı ve kağıt endüstrisinin yan ürü olan ham tall yağı (Crude Tall Oil-CTO) gençleştirici olarak kullanılmıştır. Kısa dönem yaşlandırma sıkıştırılmamış serbest numunelere, uzun dönem yaşlandırma ise sıkıştırılmış numunelere laboratuvar ortamında uygulanmıştır. Bitüm santrifüjlü bir ekstraktör ve dönen evaporatör cihazı yardımıyla karışımlardan ayrıştırılmıştır. Bu işlem, tüm numuneler için eşit şekilde, bitümün karıştırma sıcaklığının altında ve sınırlı bir süre boyunca gerçekleştirilerek yaşlanmaya etki etmesi önlenmiştir. Ayrıca, bu işlem tüm numuneler için eşit şekilde uygulanmış ve sonuçların karşılaştırılabilirliği sağlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ikinci geri dönüşüm döngüsünden elde edilen bitüm, birinci geri dönüşüm döngüsünden elde edilen bitüme kıyasla daha düşük bir yumuşama noktası (%4.4 ve %4.1) ve daha yüksek penetrasyon değeri (%60.0 ve %50.7) göstermiştir. Yaşlanmamış saf karışımdaki bitüm için -1.00 olan penetrasyon indeksi, ikinci geri dönüşüm döngüsündeki yaşlanmış RAP karışımı için 0.16'ya yükselmiştir. Bu durum, geri dönüşüm döngüleri ve yaşlandırma ile yaşlanmaya karşı duyarlılığın azaldığını göstermektedir. Analizler, bitümün özelliklerinin birden fazla geri dönüşüm döngüsünden sonra bile geri kazanılabileceğini göstermiştir. İkinci geri dönüşüm döngüsünden elde edilen bitüm, birinci geri dönüşüm döngüsüyle karşılaştırıldığında kompleks modülde ortalama %45'lik bir azalma sergilemiştir. RAP karışımlarından

elde edilen bitüm, yaşlanmaya benzer bir duyarlılık göstermiştir. Analizler, RAP malzemesinin çoklu geri dönüşüm için potansiyele sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

Chen vd. (2014) atık bitkisel yağ ile gençleştirilmiş bitümlü bağlayıcının fiziksel kimyasal ve reolojik özelliklerini incelemiştir. 3 farklı penetrasyon değerine sahip bitümlü bağlayıcı laboratuvar ortamında Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deney yöntemleri ile yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma prosedürü tamamlanan farklı penetrasyona sahip bitümlü bağlayıcılara kütlece farklı oranlarda (%0, 3, 4, 5, 6 ve 7) atık bitkisel yağ eklenerek gençleştirme prosedürü tamamlanmıştır. Elde edilen bitümlü bağlayıcının fiziksel özelliklerinin tayini için penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve viskozite deneyleri uygulanmıştır. Reolojik özelliklerinin tayini için dinamik kesme reometresi (DSR), sürünme geri kazanımı (tekerlek izi gerçek yükleme koşulu), yorulma ve sıcaklık tarama deneyleri uygulanmıştır. Kimyasal özelliklerinin tayini için 4 bileşenli analitik metot, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometrisi (FTIR) ve Diferansiyel tarama kalorimetrisi testleri uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre atık yemeklik yağ ile gençleştirilen bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerinde iyileşme görülmüştür. Ayrıca tekerlek izine karşı direnç ve yaşlanma direncinde artma ve elastik geri gelme davranışında saf bitümlere oranla iyileşme gözlenmiştir. Atık yemeklik yağ ile gençleştirilen bitümlü bağlayıcının asfaltten içeriğinde azalma gözlenmiş ayrıca karbonil ve sülfoksit yaşlanmasında düşme görülmüştür. Çalışma sonucunda atık yemeklik yağ ile gençleştirme prosedürünün optimum oranlar çerçevesinde yapılmasının önemli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca düşük sıcaklık esnekliği, elastisite ve termal stabilite özelliklerinde daha farklı uygulamalarla geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Saha vd. (2020) yaptıkları çalışmada, geri kazanılmış asfalt kaplama içeren karışımlarda biyo yağların bitüm ve karışım özelliklerine etkisini incelemiştir. Sınırlı doğal kaynakların verimli kullanılabilmesi amacıyla geri kazanılmış asfaltın yeni yapılan kaplamalarda ve rehabilitasyon amacıyla kullanımının sürekli arttığından bahsetmiştir. Geri kazanılmış asfalt ile hazırlanan karışımların daha sağlıklı olarak hizmet edilebilmeleri için çeşitli modifikasyonlara tabii tutulabileceği ve oldukça fazla miktarda bulunabilmelerinden dolayı atık yemeklik yağ ve soya yağı gibi biyo yağların

potansiyel katkılardan olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada geri kazanılmış asfalttan elde edilen bitümlerin biyo yağlar ile modifikasyonu sonucunda oluşacak etkiler incelenmiştir. Yüksek oranlı geri kazanılmış asfaltlar da kullanılan biyo yağlar bir iyileştirici ve sertlik azaltıcı özellik göstermektedir. Çalışmada, 2 farklı agrega karışımı ve saf bitüm ile geri dönüştürülmüş asfaltlardan elde edilen bitüm kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş asfalttan kaplamadan elde edilen bitüm laboratuvar ortamında biyo yağlar ile modifiye edilmiş ve testler bu şekilde yapılmıştır. Farklı oranlarda geri dönüştürülmüş bitüm ve biyo yağlara göre testler tekrarlamıştır. Hazırlanan modifiye bitümlerin reolojik özellikleri incelenmiş, bu bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımlara (BSK) eşitli testler uygulanarak, tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık kırılma dayanımı test edilmiştir. Test sonuçları normal BSK'lara göre biyo yağlar ile modifiye edilmiş BSK'ların daha iyi performansı gösterdiği kanıtlanmıştır.

Majidifard vd. (2019) yaptıkları çalışmada, atık pişirme yağı içeren yüksek oranda geri kazanılmış asfalt kaplama bitümünün kısa ve uzun süreli performansını incelemiştir. %60 ve %100 oranlarında geri kazanılmış asfaltı atık yemeklik yağ ve bir geri dönüşüm malzemesi olan lastik kırıntısını karıştırarak performansını incelemişlerdir. Geri kazanılmış asfaltların çevresel ve ekonomik olarak birçok faydası olduğundan dolayı son yıllarda dikkatleri üzerine çektiği ifade edilen çalışmada, hammadde ve enerji fiyatlarındaki artışın bu durumu tetiklediği söylenmiştir. Bu bakımdan geri kazanılmış asfaltın ekonomik olduğu ve çevresel karbon ayak izini azaltacağı açıklanmıştır. Bu pozitif özelliklerine karşın geri kazanılmış asfaltlar ile yapılan karışımların, düşük sıcaklık çatlaklarına ve düşük işlenebilirlik kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni bitümün yüksek sertlik değeridir. Geri dönüşüm malzemeleri bitüme eklenerek bu eksiklik iyileştirmek istenmiştir. Geri dönüşüm malzemeleri geri kazanılmış bitümün bu zayıf özelliklerini iyileştirmektedir ancak bu malzemelerin hangi oranlarda kullanılması gerektiği hem kısa hem de uzun süreli performans testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmadan elde edilen laboratuvar sonuçlarına göre, yüksek oranda geri dönüştürülmüş asfalt içeren karışımlarda, artan miktarda geri dönüşüm malzemesi kullanımı işlenebilirliği ve düşük sıcaklık performansını arttırmakta iken nem kaynaklı bozulmaları ve tekerlek izi dayanımını azaltmaktadır. Ayrıca uzun süreli yaşlanma davranışları test edilmiştir. Yapılan testler

sonucunda ne kadarlık bir geri dönüşüm malzemesi kullanımının karışım performansı üzerine optimum sonuç verdiği hesaplanmıştır.

Zargar vd. (2012) atık yemeklik yağların yaşlanmış bitümlü bağlayıcılar için gençleştirici ajan olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yapılan çalışmada saf bitüm, yaşlandırılmış bitüm ve atık yemeklik yağ ile gençleştirilmiş bitümlere bağlayıcı deneylerinden penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, dinamik kesme reometresi (DSR) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) deneyleri uygulanmış ve elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Laboratuvar ortamında pervaneli karıştırıcı yardımı ile 80-100 penetrasyon değerine sahip olan bitümlü bağlayıcıya uygulanan bitüm yaşlandırması işlemi hızlandırılmış şekilde simüle edilmiştir. Bitümlü bağlayıcı yaşlandırma işlemi sonucunda 40-50 penetrasyona sahip bitüm elde edilmiştir. Uygulanan dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ile bitümlü kaplamanın yapımı süresince yaşlanması simüle edilmiştir. Yaşlandırılan bitümlü bağlayıcı kütlece farklı oranlarda (%1, %2, %3, %4 ve %5) atık yemeklik yağ ile modifiye edilerek gençleştirilmiştir. Uygulanan deneyler sonucu elde edilen verilere göre kütlece %3 ve %4 oranlarında atık yemeklik yağ ile modifiye edilen yaşlandırılmış bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerinin saf bitüm ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Atık yemeklik yağ ile gençleştirilen yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcının kısa dönem yaşlanmasına karşı daha az hassas olduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışma ile atık yemeklik yağın yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıda gençleştirici ajan olarak özellik gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Mamun ve Al-Abdul Wahhab (2018) geri kazanılmış asfalt kaplamalarda atık motor yağının kullanımını araştırmıştır. Çalışmada kullanılacak olan geri kazanılacak asfalt kaplama ekstraksiyon işlemine tabi tutularak agrega ve bitümlü bağlayıcı olarak ayrıştırılmıştır. Ayrıştırılan bitümlü bağlayıcıya ayrı ayrı olmak üzere belirli oranlarda atık motor yağı veya ticari gençleştirici eklenmiştir. Ayrıştırılan agrega karışımına ise gradasyon ve özgül ağırlık analizleri uygulanmıştır. Daha sonra Marshall karışım tasarım metoduna uygun şekilde optimum bağlayıcı miktarı belirlenmiştir ve karışım tasarımı yapılmıştır. Saf bitüm ve geri kazanılmamış agrega ile Marshall karışım tasarımı ile optimum bitüm oranına uygun olacak şekilde numune hazırlanmıştır. Kütlece farklı oranlarda (%7, 13 ve 20) atık motor yağı ve ticari gençleştirici ile ayrı ayrı gençleştirilmiş, kütlece %30, %40 ve %50 oranında geri kazanılmış bitüm ve

agrega numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere indirekt çekme dayanımı testi uygulanmış, esneklik modülleri ve dayanımları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre kütlece %40 oranından fazla geri kazanılmış asfalt kaplama ve kütlece %7 oranından fazla atık motor yağı katkısının indirekt çekme dayanımını kayda değer şekilde düşürdüğü gözlenmiştir. Kütlece %40 oranına kadar geri kazanılmış asfalt kaplama içeren ve kütlece %7 oranında atık motor yağı ile gençleştirilen numunelerin ticari gençleştirici ile gençleştirilen numuneler ile yakın indirekt çekme dayanımı gösterdiği görülmüştür. Atık motor yağı ile gençleştirilen tüm numunelerin (kütlece %50 oranına kadar geri kazanılmış asfalt kaplama içeren numuneler) izin verilen nem hassasiyeti dayanımından %20 oranında daha düşük nem hassasiyeti dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

Tadele ve Quezon (2021) yaptıkları çalışmada atık motor yağı gençleştiricilerin kısa süreli asfalt bitümü yaşlanması üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında bitümün yaşlanma davranışını zamana bağlı olduğunu belirtmişler ve bu zamana bağlı yaşlanma özelliklerinin atık motor yağı ile gençleştirilmiş 80-100 penetrasyon değerine sahip bitümlerin ve yüksek oranda yaşlandırılmış bitüm performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Deneyler için aynı ağırlıkta 80-100 penetrasyon değerini sahip dört bitüm örnek olarak toplanmıştır. İlk numune kalite gerekliliklerini test etmek için kullanılmıştır. Diğer üç numuneye dönel ince film etüvü ile 85, 115 ve 145 dakika boyunca yaşlandırılmış böylece asfalt üretimi, taşınması ve sıkıştırılma süreçleri simüle edilmiştir. Yüksek oranda yaşlandırılmış bitüm kütlece %2, %5 ve %10 oranlarında atık motor yağı ile gençleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, yaşlanma süresi arttıkça penetrasyon ve düktilitenin azaldığı, yumuşama noktası, parlama noktası ve yanma noktasının arttığı gözlenmiştir. 145 dakika yaşlandırılmış %10 atık motor yağı içeren karışımda gençleştirici etkinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç, gençleştirilmiş bitüm sıcaklığın 70 °C derecenin üstüne çıktığı durumlarda kaplamanın tekerlek izine daha yatkın olduğudur. Sonuç olarak 70 °C sıcaklık altında gençleştirme yapmanın daha etkili olduğu gösterilmiştir.

Nassar vd. (2021) yaptıkları çalışmada farklı bileşenlere sahip yeşil biyo-katkı malzemeleri kullanarak asfalt için çevre dostu bir bağlayıcı alternatifini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan yeşil biyo-katkı malzemeleri %10 ila %40

oranları arasında değişen atık yemeklik yağ kullanılarak hazırlanmıştır. Ayrıca alışma kapsamında % 90 ıla %60 arasında değişen oranlarda atık Stiren Butadien Kauçuk (SBR) ve atık Polistiren (WPS) endüstriyel atıkları kullanılmıştır. 60/70 ve 80/100 penetrasyon sınıfına uygun olarak 2 farklı bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. evre dostu bağlayıcı alternatifi oluşturulurken ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında biyo-katkı malzemesi yüksek hızlı karıştırıcı kullanılarak modifikasyon işlemi tamamlanmıştır. Elde edilen alternatif bağlayıcıya penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmış ve penetrasyon indeksi hesaplanmıştır. Elde edilen evre dostu bağlayıcı dinamik viskozite deneyine tabi tutulmuş ayrıca penetrasyon sıcaklığı hassasiyeti ve kesme gerilmesi bakımından değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ışığında sadece atık yemeklik yağ kullanımı ile yumuşak kıvamlı bir bağlayıcı elde edilirken sadece polimer katkısı kullanımı ile sert kıvamlı bir bağlayıcı elde edildiği görülmüştür. Atık yemeklik yağ ve polimer katkının birlikte kullanımı ile hem evre dostu bir bağlayıcı elde edilmiş hem de fiziksel ve reolojik özellikleri saf bitümlü bağlayıcıdan daha iyi olan bir bağlayıcı elde edilmiştir. Ayrıca ağırlıkça %60 oranında atık polimer içeren ve %40 oranında atık yağ içeren evre dostu bağlayıcının optimum sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Optimum evre dostu bağlayıcı ağırlıkça % 50 bitümlü bağlayıcı ve %50 biyo-katkı malzemesi ile elde edilmiştir bu da maliyeti yarı yarıya düşmesi anlamına gelmektedir.

Fernandes vd. (2017) yaptıkları çalışmada kısmi olarak elastomer modifiyer ve atık motor yağı ile modifiye edilmiş asfalt karışımının performans artışını incelemişlerdir. Atık araç motor yağının viskoziteyi büyük oranda azalttığı ve asfalt karışımının tekerlek izi oluşma potansiyelini arttırdığı belirtilen çalışmada motor yağına ek olarak polimer modifiyerlerin kullanılmasının dengeleyici bir rol üstleneceği belirtilmiştir. Bu nedenle çalışmada %10 atık motor yağı ve %5 oranında SBS ile modifiye edilmiş karışımın performans özelliklerini incelenmiştir. Ayrıca hızlı proliz ile elde edilmiş biyolojik yağ karışımı ve öğütülmüş lastik tekerlek ile modifiye edilmiş karışımın özelliklerini bu yeni karışımla karşılaştırmışlardır. Elde edilen asfalt binderi Fourier kızılötesi spektrum ve dinamik kesme reolojisi ile değerlendirilmiştir. Ardından nem hassasiyeti, yorulma çatlağı dayanımı, dinamik modül ve tekerlek izi dayanımı özellikleri incelenmiştir. Kontrol numunesi olarak B35/50 sınıfı asfalt binderi kullanılan çalışmada, atık motor yağı ve elastomer modifiyer ile modifiye edilmiş asfalt karışım performansının arttığı gözlenmiştir. Elde edilen karışımın tekerlek izine

ve çatlak oluşumuna karşı direncinin oldukça iyi olduğu ve bu karışımın uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Xue vd. (2021) yaptıkları çalışmada Lignin ve atık motor yağı ile modifiye edilmiş asfalt binderinin ve bu binder ile oluşturulan karışımın yüksek ve düşük sıcaklıktaki performansını incelemişlerdir. Lignin %4 ve %6, atık motor yağı ise %3 ve %5 olmak üzere iki farklı oranda kullanılarak PG 58-28 asfalt binderi modifiye edilmiştir. Elde edilen asfalt binderinin yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri Brookfield viskozimetresi ve dinamik kesme reometresi testleri ile değerlendirilmiştir. Düşük sıcaklık reolojik özellikleri ise -18 ve -12 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta eğilen kiriş reometresi testi ile incelenmiştir. Bu test ile rijitlik ve m-değeri bulunmuştur. Lignin ve atık yağ ile modifiye edilmiş asfalt karışımının yüksek ve düşük sıcaklıklardaki performansı tekerlek izi testi ve düşük sıcaklık eğilen kiriş testi ile belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, lignin katkısı ile dönel viskozite ve tekerlek izi faktörünün arttığı, atık motor yağ katkısı ile ise azalttığı gözlenmiştir. Asfalt binderindeki lignin miktarının artması ile elastik özelliklerin iyileştiği buna karşın atık motor yağı ile bu elastik özelliklerin azaldığı belirlenmiştir. Eğilen kiriş reometresi sonuçlarına göre asfalt binderinin rijitliği %6 oranında lignin kullanıldığında (LO60) şartnamedeki gereklilikleri sağlamamaktadır. Ancak atık motor yağı katkısının asfalt binderinin şartnamedeki gereklilikleri sağlamasında etkin olduğu gözlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre atık motor yağının kullanımı özellikle düşük sıcaklık performansını arttırdığını göstermektedir. Dinamik stabilite sırasıyla %4 lignin ve %6 lignin (LO40-LO60) için %9.05 ve %17.41 oranlarında arttığı gözlenmiştir. Atık motor yağı katkısının %0'dan %5'e çıkarılması durumunda sırasıyla %4 ile %6 lignin içeren binderin maksimum çekme gerilmesinin %16.39 ve %25.28 oranlarında arttığı gözlenmiştir. Son olarak kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında %6 oranında lignin ve %5 oranında atık yağ içeren (LO65) binderin düşük ve yüksek sıcaklık performanslarının arttığı gösterilmiştir.

Ren vd. (2021) atık yağ ve SBR (Styrene-Butadiene Rubber) katkılı yaşlandırılmış asfaltın viskoelastisite ve yaşlanma özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada atık yağ olarak hem pişirme yağı hem de motor yağı kullanılmıştır. Performans ölçümlerinde dönel viskozimetre, dinamik kesme reometresi, eğilen kiriş reometresi metodları kullanılmış ve asfaltın gençleşme özellikleri de incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda

hem atık pişirme hem de atık motor yağlarının kullanımının viskozite parametreleri ile yorulma ve kırılma özelliklerini iyileştirdiği ancak ısı hassasiyeti, tekerlek izi direnci, elastik geri gelme ve yaşlanmayı olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Ancak atık yağlar ile beraber SBR katkısının bu negatif özellikleri giderdiği ve düşük-yüksek sıcaklık performansları ile gençleşme özelliklerini arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca, atık pişirme yağının yorulma çatlağı direnimini iyileştirirken, atık motor yağının tekerlek izi direncini ve elastik geri gelmeyi iyileştirdiği belirlenmiştir. Tüm durumlar göz önüne alındığında optimum atık yağ ve SBR oranının sırasıyla %10 ve %3 olması uygun görülmüştür.

Fernandes vd. (2018) yaptıkları çalışmada atık motor yağı ile modifiye edilen bitümlerde atık lastik kırıntısı, atık polietilen ve SBS katkılarını ayrı ayrı olmak üzere kullanmışlardır. Yapılan çalışmada hem atık ağır ve hafif taşıtlardan elde edilen motor yağı hem de atık yağ tortularından geri dönüştürülmüş motor yağı ayrı ayrı olmak üzere kullanılmıştır. Kullanılan geri dönüştürülmüş atık yağ gerçekleştirilen işlem sonucu yüksek viskoziteye sahip olmaktadır. Elde edilen numuneler penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda atık motor yağı ve geri dönüştürülmüş atık yağ ile yapılan modifikasyonun termal hassasiyetinin ticari katkılar ile yapılan modifikasyona göre daha düşük olarak gözlenmiştir. Ayrıca atık yağ modifikasyonları ile yüksek sıcaklıkta tekerlek izi oluşumunun daha az olduğu ve düşük sıcaklıklarda daha esnek davranış sergilendiği gözlenmiştir. Atık yağ modifikasyonu ile sağlanan tekerlek izi oluşumuna karşı performansının başarısı ile geri kazanılmaz sünme yatkınlığı da azalmıştır. Ayrıca yapılan çalışma ile atık motor yağı tortularıyla elde edilen geri dönüştürülmüş malzemenin saf bitüm özelliğinde olduğu da görülmüştür.

Xinxin vd. (2018) yaptıkları çalışmada geri kazanılmış asfalt kullanılan karışımlarda atık bitkisel yağların gençleştirici olarak kullanımını incelemişlerdir. Bitkisel yağın asfalt performansına olan etkilerini; yaşlanma özellikleri testi, güvenlik özellikleri testi ve kaplama performans testleri ile belirlemeye çalışmışlardır. Yapılan bu çalışmalara göre hem güvenlik hem de yaşlanma özelliklerine bakıldığında atık bitkisel yağların geri kazanılmış asfaltlarla beraber gençleştirici olarak kullanımı sayesinde asfalt karışımları şartnamelerde istenen reolojik ve performans özelliklerine ulaşabildiği tespit edilmiştir. Çalışmada incelenen temel performans indekslerine göre

(penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite), geri kazanılmış asfaltın atık bitkisel yağlar ile gençleştirilmesi ile kaplama performansı katkısız asfalt ile hazırlanan karışımla aynı noktaya gelmiştir.

Bilema vd. (2021) yaptıkları çalışmada atık kızartma yağı ve lastik kırıntısı ile modifiye edilerek geri kazanılmış asfalt kaplamaların performansını araştırmıştır. %25 ve %40 oranlarında geri kazanılmış asfalt kaplamaya %2.7 ve %4.6 oranlarında atık kızartma yağı ile %1.5 oranında lastik kırıntısı eklenerek modifikasyon işlemi yapılmıştır. Elde edilen bağlayıcı numunelerine yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve viskozite testleri uygulanmıştır. Yine geri kazanılarak elde edilen agregalara çeşitli performans deneyleri uygulanmıştır. Optimum bağlayıcı miktarı hesaplanmış Superpave karışım metoduna uygun olarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler indirekt çekme dayanım (ITS) testine tabi tutulmuştur. Ayrıca nem hassasiyeti, esneklik modülü, dinamik kayma ve tekerlek izi deneyleri uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre geri kazanılmış asfalt kaplama oranının artmasıyla indirekt çekme dayanımının yükseldiği gözlenmiştir. %25 ve %40 oranlarında geri kazanılmış asfalt kaplama içeriğinin indirekt çekme dayanım oranını düşürdüğü ve sadece %25 oranının şartname indirekt çekme dayanım oranı (TSR) değerini sağladığı gözlenmiştir. %25 ve %40 oranlarında geri kazanılmış asfalt kaplama içeriğinin esneklik modülü değerinin saf bitüme oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca geri kazanılmış asfalt kaplama içeriğinin saf bitümlü karışıma oranla daha yüksek deformasyon performansına sahip olup, kalıcı deformasyon açısından ise daha dayanıklı olduğu söylenebilmektedir Bu çalışma ile atık kızartma yağı ve lastik kırıntısının birlikte kullanımının birbirinin eksikliklerini giderdiği görülmüştür. Atık kızartma yağı geri dönüştürülmüş asfalt kaplamanın performans özelliklerini iyileştirmiş, lastik kırıntısı ise hem tekerlek izi direncine katkı sağlamış hem de daha iyi bir işlenebilirlik katmıştır. Bu sonuçlar ışığında atık kızartma yağı ve lastik kırıntısının birlikte kullanımı ile nem hassasiyeti direnci, sertlik ve tekerlek izi direncinde kayda değer iyileşme sağlanabileceği görülmektedir.

Gökalp ve Uz (2021) yaşlanma karşıtı bitümün sürdürülebilir üretiminde atık motor yağı ile modifikasyonun kullanımını araştırmıştır. Saf bitüm kütlece farklı oranlarda (%1, 2, 3, 4 ve 5) atık motor yağı ile pervaneli karıştırıcı kullanılarak modifiye edilmiştir. Elde edilen modifiye bitümler ve saf bitüm Dönel ince film halinde ısıtma

(RTFO) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneylerine tabi tutularak kısa ve uzun dönem olmak üzere yaşlandırma prosesedürü tamamlanmıştır. Ayrıca kalıcı deformasyon ve yorulma çatlak direncinin tespiti için dinamik kesme reometresi (DSR) ve termal çatlak direncinin tespiti için eğilen kiriş reometresi (BBR) testleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda yaşlanmış bitümlerin atık motor yağı modifikasyonu ile yenilenebileceği görülmüştür. Özellikle kısa süreli yaşlanmaya dayanıklılık için kütlece %3.5 atık motor yağı modifikasyonunun, uzun süreli yaşlanmaya dayanıklılık için ise kütlece %5.8 atık motor yağı modifikasyonunun etkili olduğu tespit edilmiştir. Atık motor yağı modifikasyonu ile yaşlanmış bitümün reolojik özelliklerinde değişimler görülmüş, kalıcı deformasyon (tekerlek izi) direnci azalırken yorulma ve termal çatlak direncinde artış görülmüştür. Çalışma sonucunda sert bitümlerin gençleştirilmesinde kütlece daha düşük oranda atık motor yağı gerekirken, yumuşak bitümlerin gençleştirilmesinde ise kütlece daha yüksek oranda atık motor yağı gerektirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bitümün termo-viskoelastik davranışından dolayı test sıcaklığının etkili bir parametre olduğu görülmüştür.

Li vd. (2019) atık yemeklik ve atık motor yağının performans geliştirici olarak yaşlanmış bitümlerde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yaşlanmış bitümlere uygulanan atık yemeklik yağ ve atık motor yağı katkısının bitümün fiziksel, kimyasal ve reolojik özelliklerinde ne gibi bir iyileşme sağladığı yapılan çalışma ile incelenmiştir. Laboratuvar ortamında 163 °C İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT) ile farklı yaşlanma derecelerine (5,7, 9, 11, 13 ve 15 saat) sahip bitümler elde edilmiştir. Elde edilen yaşlanmış bitümlere kütlece farklı oranlarda (%1, 2, 3, 4 ve 5) atık yemeklik yağ ve atık motor yağı ayrı ayrı eklenmiş ve modifikasyon işlemi yapılmıştır. Saf bitüm, yaşlandırılmış bitümlere ve modifiye edilen bitümlere fiziksel özelliklerinin tayini için penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve duktilite testleri uygulanmıştır. Kimyasal özelliklerin tayini için alev iyonizasyon algılamalı ince tabaka kromatografisi (TLC-FID) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) testleri uygulanmıştır. Reolojik özelliklerin tayini için dinamik kesme reometresi (DSR) testi uygulanmıştır. Ayrıca tüm numunelere tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) görüntülemesi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre optimum oranlarda atık motor yağı ve atık yemeklik yağ modifikasyonu ile farklı derecelerde yaşlandırılmış bitümlerin saf bitüme benzer özellikler gösterdiği

görülmüştür. Atık yemeklik yağ modifikasyonunun atık motor yağ modifikasyonuna göre bitümün reolojik özelliklerinde daha iyileştirici etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Atık motor yağına kıyasla kütlece daha düşük atık yemeklik yağ modifikasyonu ile yaşlanmış bitümün temel fiziksel özelliklerinin iyileştiği görülmüştür.

Li vd. (2021) atık motor yağı ve atık yemeklik yağ kullanarak yenilenmiş asfalt kaplamalarda yaşlanmış bitümün performansının geliştirilmesinde kullanımını araştırmıştır. Çalışmada kullanılan saf bitüm laboratuvar ortamında farklı yaşlanma derecelerinde ince film halinde ısıtma (TFOT) test düzeneği ile yaşlandırılmıştır. Saf bitüm ve farklı derecelerde yaşlandırılmış bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve viskozite deneyleri uygulanmıştır. Yaşlandırılmış bitümler kütlece farklı oranlarda (%1, 2, 3 ve 4) atık motor ve yemeklik yağ ile gençleştirilmiştir. Saf bitüme, farklı derecelerde yaşlandırılmış bitümlere ve atık yemeklik yağ ile gençleştirilmiş bitümlere taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleme yapılmıştır. Ayrıca atık yemeklik yağ ile gençleştirilmiş kaplamanın hem düşük hem yüksek sıcaklık performansının analizi için hazırlanan numuneler tekerlek izi testine tabi tutulmuştur. Marshall Stabilite test metoduna göre numuneler 2 ayrı gruba ayrılmış, her grup birbirinden farklı sürelerde su banyosunda tutularak numunelerin su hassasiyeti hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre, atık yağ oranının artmasının temel bitüm özelliklerini iyileştirdiği ancak optimum miktardan fazla atık yağın eklenmesinin viskozite değerinde düşmeye sebep olduğu gözlenmiştir. Bu veriler ışığında araştırmacılar tarafından önerilen atık yağ oranı %1-4 aralığındadır. SEM verilerine göre yaşlandırılmış bitümlerde yüzey düzgünsüzlükleri gözlenmiş, %3 oranında atık yemeklik yağ eklenmesinden sonra yüzeyin ciddi oranda saf bitümle benzerlik gösterdiği görülmüştür. Çalışma kapsamında yapılan kimyasal analizler sonucunda atık yemeklik yağ kullanımının yaşlanmış asfaltın doygunluğunu arttırdığı gözlenmiştir. Marshall karışım performans testi sonucu verileri sonucunda %45 oranında dinamik stabilite, eğilme gerilme dayanımı artışı meydana gelmiştir. Hem atık yemeklik yağın hem de atık motor yağın yaşlanmış bitümün su hassasiyetini ve kaplama performansını iyileştirdiği görülmüştür.

Taherkhani ve Noorian (2020) yaptıkları çalışmada tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak, atık yağ ve geri kazanılmış asfalt içeren asfalt betonunun Marshall Karışım Tasarımı ve hacimsel özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında farklı

oranlarda atık yemeklik ve motor yağı ile gençleştirilmiş geri kazanılmış bitüm içeren numunelerin Marshall Stabilitesi (MS), akma ve mineral agregadaki boşluk (VMA) değerlerini tepki yüzeyi metodolojisini kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada, geri kazanılmış asfalt kaplama içeriği toplam agreganın kütlece %25, %50 ve %75'i oranlarında, atık yağlar ise toplam bitümün kütlece %5, %10 ve %15'i oranlarında seçilmiştir. İkinci dereceden ve lineer iki faktörlü ilişki modellerinin deneysel sonuçlar ile uyum gösterdiği saptanmıştır. Oluşturulan modelin varyansı incelendiğinde elde edilen model farklı geri kazanılmış asfalt ve atık yağ oranlarına göre MS, akmayı ve mineral agregadaki boşluğu tahmin etme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, geri kazanılmış asfalt kaplamasının karışımdaki oranının artması ile MS, akma ve mineral agregadaki boşluk oranının arttığı ancak atık yağ oranının artması ile bu özelliklerin azaldığı tespit edilmiştir. Atık motor yağı ve yemeklik yağı kullanımının da karşılaştırıldığı bu çalışmada, aynı miktarda atık motor yağı ve yemeklik yağı kullanıldığı durumlarda motor yağı kullanılan karışımların stabilite, akma ve mineral agregadaki boşluk oranı değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, geri kazanılmış asfalt kaplaması içeriği, yağ içeriğinin ve yağ tipinin karşılıklı etkileşim durumları göz önüne alınarak incelenmiştir. Optimizasyon analizlerinin sonuçlarına göre %10.6 oranında atık yemeklik yağ ve %15 oranında atık motor yağı kullanımının maksimum geri kazanılmış asfalt kaplama kullanımına olanak sağladığı gösterilmiştir. Bu oranlar ile kullanılabilecek geri dönüştürülmüş asfalt kaplama oranı sırasıyla %75 ve %51.77 olarak bulunmuştur. Bu değerler kontrol numunesi ile benzer özellikleri göstermiştir.

3. MATERYAL

Materyal bölümünde tez çalışması kapsamında kullanılan malzemelerden bahsedilecektir. Öncelikle saf bitümlü bağlayıcı ve agrega tanıtılacak ardından çalışma kapsamında kullanılan atık yağlar; atık yemeklik yağı, atık endüstriyel yağ ve atık motor yağı hakkında bilgi verilecektir. Tez kapsamında kullanılan bütün materyaller kullanım amacına uygun olacak şekilde temin edilmiştir.

3.1. Bitüm

Avrupa standardı EN 12597'ye göre bitüm, ham petrolden elde edilen veya doğal asfalt içerisinde bulunan, toluende tamamen veya neredeyse tamamen çözünebilen, oda sıcaklığında oldukça viskoz veya neredeyse katı halde bulunan, uçucu olmayan, yapışkan ve su geçirmez bir malzeme olarak tanımlanmaktadır (European Committee for Standardization, 2000).

Tez çalışmasında Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesinden tedarik edilmiş AC 50-70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Bitüm üzerine standart performans deneylerinden olan penetrasyon (TS EN 1426), yumuşama noktası (TS EN 1427), düktilite (TS EN 13589) ve özgül ağırlık (TS EN 15326 + A1) deneyleri uygulanarak, Çizelge 3.1'de verilen değerler elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan bitüme ait fiziksel özellikler

Özellik	Standart	Birim	Sonuç
Penetrasyon (25 °C)	TS EN 1426	0.1 mm	50.48
Yumuşama Noktası	TS EN 1427	°C	47.7
Düktilite (5cm/dk)	TS EN 13589	cm	>100
Özgül Ağırlık	TS EN 15326 +A1	gr/cm ³	1.005

3.2. Agrega

Çalışmada kırmataş ocaklarında üretilen kireçtaşı agrega kullanılmıştır (Çizelge 3.2). Bu kireçtaşı agrega malzemesi Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesi'nden temin

edilmiştir. Agregaların sert, sağlam ve organik maddelerden arındırılmış olmasına dikkat edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan agregaların birim hacim ağırlık (TS EN 1097 – 6), su emme oranları, Los Angeles Aşınma (ASTM C 131 – 03) ve Mikro – Deval Aşınma (TS EN 1097 – 1) oranları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar 2013 Karayolu Teknik Şartnamesinde (KTŞ, 2013) bulunan sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan agregaların KTŞ'ye uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan agregaya ait fiziksel özellikleri

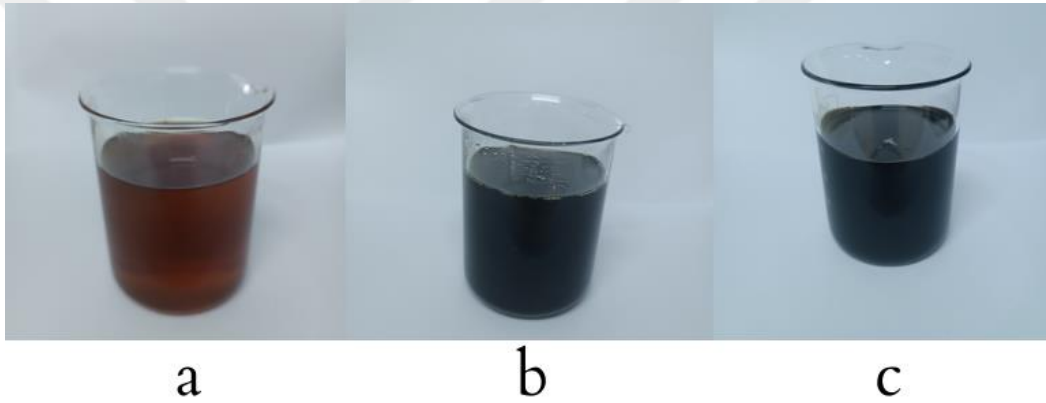
Elek Çapı	Özellik	Standart	Sonuç	Sınır Değer
4.75-0.075 mm	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		2.625	–
	Yüzey Kuru Özgül Ağırlık	TS EN 1097-6	2.646	–
	Su Emme (%)		0.008	≤2.0
	Los Angeles Aşınma (%)	ASTM C 131-03	19.2	≤27
	Mikro-Deval Aşınma (%)	TS EN 1097-1	8.8	≤20
25-4.75 mm	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		2.485	–
	Yüzey Kuru Özgül Ağırlık	TS EN 1097-6	2.527	–
	Su Emme (%)		0.016	≤2.0
0.075 mm	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS EN 1097-6	2.703	–

3.3. Atık yağ

Atık yağlar, kullanım ömrünü tamamlayarak işlevselliğini yitiren ve artık birincil amaçları doğrultusunda kullanılamayan yağlardır. Bu kapsamda, evsel mutfak atıklarından kaynaklanan bitkisel yağlar, çeşitli endüstriyel süreçlerde kullanılan makine yağları ve motorlu taşıtlardan elde edilen motor yağları önemli kaynaklar arasında yer almaktadır. Atık yağların uygun yöntemlerle bertaraf edilmesinin veya yeniden kullanımının yönetilmemesi durumunda, toprağın, su kaynaklarının ve çevresel dengenin ciddi şekilde zarar görmesi kaçınılmazdır. Özellikle kontrolsüz şekilde doğaya bırakılan atık yağlar, su yüzeyinde film tabakası oluşturarak oksijen geçişini engellemekte ve su ekosistemlerinde kalıcı tahribata neden olabilmektedir. Bu bağlamda, atık yağların kaynağında ayrı toplanması, geri dönüşüm süreçlerine

kazandırılması veya enerji geri kazanımında değerlendirilmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir.

Doktora tez çalışması kapsamında laboratuvar ortamında yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı atık yemeklik yağı, atık endüstriyel yağ ve atık motor yağı olmak üzere 3 ayrı atık yağ grubu ile ilerleyen bölümlerde detaylı şekilde sunulacak olan ağırlıkça 3 farklı oranda modifiye edilerek gençleştirilmiştir. Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan 3 ayrı atık yağ grubu ile ilgili genel bilgiler sunulacaktır. Atık yağ gruplarına uygulanan analizler ve sonuçları bu başlık altında verilmiştir. Çalışmada kullanılan atık yağ grupları sırasıyla atık endüstriyel yağ ve atık motor yağı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Atık yemeklik yağ (a), Atık endüstriyel yağ (b), Atık motor yağı (c)

3.3.1. Atık yemeklik yağ (AYY)

Atık yemeklik yağı (AYY), esas olarak yüksek sıcaklıklarda kullanılan kızartma ve pişirme yağlarını, mutfak atıklarıyla karışmış yenilebilir yağları ve doğrudan kanalizasyon sistemine deşarj edilen yağlı atık suları kapsamaktadır (Foo vd., 2022; Li vd., 2016). Bitkisel yağlar, özellikle kızartma işlemleri sırasında yüksek sıcaklıklara (genellikle 180°C ve üzeri) maruz kaldıklarında, çeşitli kimyasal reaksiyonlara girerek yapılarını bozulmaktadır. Bu süreçte meydana gelen başlıca reaksiyonlar arasında oksidasyon, polimerizasyon ve izomerizasyon yer alır. Bu reaksiyonlar sonucunda, yağlarda serbest yağ asitleri, aldehitler, ketonlar ve trans yağ asitleri gibi zararlı bileşikler oluşur (Hosseinzadeh-Bandbafha vd. 2022; Şenköylü, 2001; Dobarganes ve Márquez-Ruiz, 2003; Gertz ve Klostermann, 2002; Cloe ve Min, 2007). AYY’nin

kanalizasyon sistemine direkt olarak boşaltılması, atıksu akışını engelleyerek atık suların arıtma tesislerine ulaşmasını zorlaştırmakta ve böylelikle su kirliliğine yol açmaktadır (Lapuerta vd., 2008; Dülger vd., 2016). Atık yemeklik yağların su kirliliğini oluşturmaktaki payı tek başına %25 gibi ciddi bir orandadır (Kang ve Ağbaba, 2020; Öztürk, 2018). Aynı zamanda bu su kirliliğinin temizlenmesi normal su arıtmasından litre başına 700 kat daha maliyetlidir (Hillairet vd., 2016; Kang ve Ağbaba, 2020). Ayrıca, AYY'nin belediye katı atık depolama sahalarına dökülmesi durumunda ise toprak kirliliği meydana gelmektedir (Kalam vd., 2011). Çalışma kapsamında kullanılacak olan atık yemeklik yağı zincir bir fastfood restoranından temin edilmiştir.

Atık yemeklik yağların karakterizasyonu amacıyla uygulanan Gaz Kromatografisi–Kütle Spektrometresi (GC–MS) analizi, yağ içerisindeki uçucu organik bileşenlerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan hassas bir tekniktir. Ancak özellikle kızartma işlemine uzun süre maruz kalan veya oksidatif bozunmaya uğramış yağlarda uçucu bileşenlerin buhar basıncının azalması nedeniyle GC–MS analizinde anlamlı bir uçucu bileşen tespit edilemeyebilir (Huang vd., 2021). Çalışma kapsamında kullanılacak olan atık yemeklik yağı için Gaz Kromatografisi – Kütle Spektroskopisi (GC–MS) analizi uygulanmış ancak atık yemeklik yağı içeriğinde herhangi bir uçucu bileşene rastlanmamıştır.

GC–FID analizine başlamadan önce, yağ örneğindeki trigliserit yapıdaki yağ asitleri, bir esterifikasyon işlemiyle yağ asidi metil esterlerine dönüştürülür. Bu işlem, yağdaki polar ve büyük molekülleri daha uçucu ve analize uygun hale getirir. Dönüştürülen FAME bileşenleri daha sonra gaz kromatografisine enjekte edilir. Gaz fazında ayrılan bu bileşikler, karbon temelli yapılarından dolayı alev iyonizasyon dedektörü (FID) tarafından algılanır. FID, karbon-hidrojen bağlarını yüksek duyarlılıkla tespit ettiğinden, özellikle yağ asitlerinin miktar tayini açısından oldukça uygundur (Jayaprabakar vd., 2024). Çalışmada kullanılacak olan atık yemeklik yağı için Gaz Kromatografisi –Alev İyonizasyon Dedektörü (GC–FID) kullanılarak yağ asidi metil ester (FAME) analizi gerçekleştirilmiştir.

Analiz vasıtasıyla atık yemeklik yağın içerdiği yağ asidi profili ve miktarı tespit edilmiş ve analiz sonuçları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

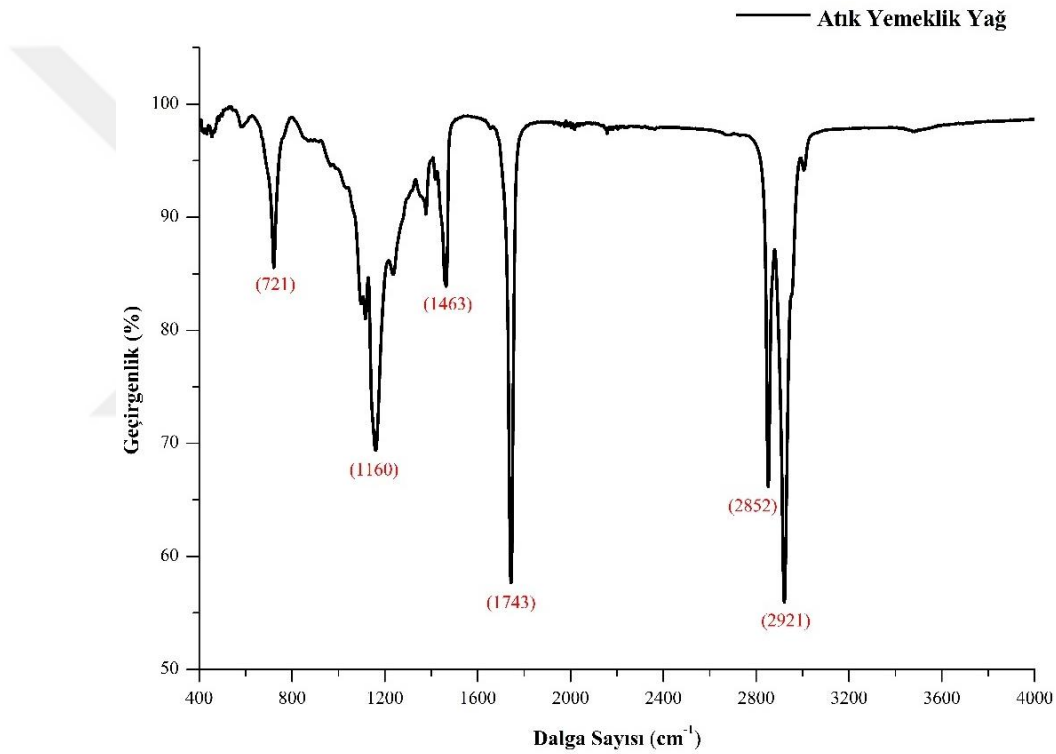
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan atık yemeklik yağın FAME analiz sonuçları

Karbon Zinciri Uzunluğu	Metil Ester Adı	Alan (%)	Sınıfı
C12:0	Laurik Asit ME	0.18	Doymuş
C14:0	Miristik Asit ME	0.83	Doymuş
C15:0	Pentadekanoik Asit ME	0.04	Doymuş
C16:0	Palmitik Asit ME	37.18	Doymuş
C16:1	Palmitoleik Asit ME	0.19	Tekli Doymamış
C17:0	Heptadekanoik Asit ME	0.1	Doymuş
C18:0	Stearik Asit ME	4.57	Doymuş
C18:1n9c	Oleik Asit ME	42.06	Tekli Doymamış
C18:2n6t	Linolelaidik Asit ME	0.15	Çoklu Doymamış
C18:2n6c	Linoleik Asit ME	13.52	Çoklu Doymamış
C18:3n6- γ	Linolenik Asit ME	0.42	Çoklu Doymamış
C20:1- cis-11	Aikosanoik Asit ME	0.16	Tekli Doymamış
C21:0	Heneikosanoik Asit Me	0.05	Doymuş
C22:0	Behenik Asit ME	0.15	Doymuş
C24:0	Lignoserik Asit ME	0.08	Doymuş
C20:5n3- cis-5,8,11,14,17	Eikosapentaenoik Asit ME (EPA)	0.05	Çoklu Doymamış

Elde edilen FAME analiz sonuçlarına göre çalışmada kullanılacak olan atık yemeklik yağın yüksek oranda Oleik Asit ve Palmitik Asit içerdiği görülmektedir. Atık yemeklik yağ analiz sonuçlarında en çok karşılaşılan içerikler oleik asit ve palmitik asit (Foo vd., 2022; Chen vd., 2023; Awogbemi vd., 2019; Banani vd., 2015; Hellier vd., 2015) tez çalışmasında kullanılan atık yemeklik yağda da görülmektedir. Oleik asit, tekli doymamış bir yağ asidi olup özellikle bitkisel kaynaklı yağlar arasında yer alan ayçiçek yağı (Gupta, 2014; Sobrino vd., 2003; Guinda vd., 2003), kanola yağı (Aslam vd., 2009), pekan yağı (Toro-Vazquez vd., 1999) ve makadamiya yağı (O'Hare vd., 2019) gibi birçok yağda yüksek oranlarda bulunmaktadır. Bununla birlikte, oleik asit yalnızca bitkisel kaynaklarla sınırlı kalmayıp, bazı hayvansal yağlarda da önemli miktarda bulunabilen yaygın bir doymamış yağ asididir (Wallis ve Watts, 2002). Öte

yandan, palmitik asit hem bitki hem de hayvan organizmalarında doğal olarak bulunan ve en yaygın rastlanan doymuş yağ asitlerinden biridir (Poudyal vd., 2013). Tez çalışması kapsamında kullanılan atık yemeklik yağa uygulanan FAME analizi sonuçları değerlendirildiğinde atık yemeklik yağ numunesinin karışık kaynaklı (heterojen) bir atık yağ olduğu anlaşılmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan atık yemeklik yağın yapısında bulunan fonksiyonel grupların tespiti için FTIR analizi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Atık yemeklik yağ FTIR analizi sonucu

Elde edilen FTIR analizi verileri değerlendirildiğinde atık yemeklik yağın kendi kimyasal yapısı ile ilgili 721, 1160, 1463, 1743, 2852 ve 2921 cm⁻¹ dalga boylarında karakteristik pikler gösterdiği gözlenmiştir. Bu absorpsiyon piklerinden 1746 cm⁻¹ dalga boyu karbonil gruplarının (C=O) gerilme titreşimlerine aittir. Ayrıca 1463 cm⁻¹ dalga boyunda alkanlardaki -CH₂'ye, 1160 cm⁻¹ dalga boyunda polisakkaritlere (C-O-C), 721 cm⁻¹ dalga boyunda parmak izi bölgesi (C-H) ile ilişkili aromatik bandı işaret eden absorpsiyon pikleri gözlemlenmiştir. 2922 ve 2853 cm⁻¹ dalga boylarında

ise karboksilik asitlere (O–H) ait absorpsiyon piklerine rastlanmaktadır (Chen vd., 2014; Zargar vd., 2021; Bilema vd.,2021)

Tez çalışmasında kullanılan atık yemeklik yağın yoğunluğu (25°C’de) 0.740 gr/c³, viskozitesi (40° C’de) 0.065 Pa.s olarak belirlenmiştir. Atık yemeklik yağın antioksidanlık oranını belirlemek için fenolik maddelerin hidrojen bağlama yeteneği 2,2-difenil-1-pikril-hidrazil (DPPH) Serbest radikalleri yakalama aktivitesi analizi (Dorman vd., 2003) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan atık yemeklik yağın DPPH analizi sonuçları

Örnek	Oran %
Atık Yemeklik Yağ	0.98±0.62

Elde edilen analiz sonuçlarına göre tez kapsamında kullanılacak atık yemeklik yağ numunesinin antioksidan kapasitesinin oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, numunenin ciddi düzeyde bozulmaya uğramış ve gerçek anlamda atık özellikler taşıdığını göstermektedir. Ayrıca atık yemeklik yağın ileri düzeyde kullanım sonucu özelliklerini kaybetmiş bir atık yağ olduğunu da doğrulamaktadır.

3.2.2. Atık endüstriyel yağ (AEY) ve atık motor yağı (AMY)

Atık yağlar, ilk kullanım amaçları için artık uygun olmayan yağlardır. Kullanım sürecinden sonra bu yağlar ya özelliklerini yitirmeleri ya da su, metal parçacıkları, toz, bozunmuş katkı maddeleri gibi kirleticilerin varlığı nedeniyle, orijinal amaçları doğrultusunda kullanılamaz hâle gelirler (Basel Sözleşmesi, 2017).

Kullanılmış yağlar, taşıtlar ve endüstriyel sistemlerde görevini tamamladıktan sonra atık hale gelen yağları ifade eder. Bu yağlar elde edildikleri alanlara göre motor yağları ve endüstriyel yağlar olmak üzere 2 ana gruba ayrılmaktadır.

Motor Yağları; benzinli ve dizel motor yağları, şanzıman ve diferansiyel yağları, transmisyon yağları, iki zamanlı motor yağları, hidrolik fren sıvıları, antifrizler, gresler

ve diğ er özel taşıt yağları bu gruba dahildir. Bu yağlar, taşıtların mekanik aksamalarının düzgün çalışmasını sağlamak amacıyla kullanılır ve zamanla fiziksel ve kimyasal özelliklerini kaybederek atık hale gelirler.

Endüstriyel Yağlar; hidrolik sistem yağları, türbin ve kompresör yağları, kızak yağları, açık ve kapalı dişli sistem yağları, sirkülasyon yağları, metal kesme ve işleme yağları, metal çekme yağları, tekstil makineleri yağları, ısı  illem yağları, ısı transfer yağları, izolasyon ve koruyucu yağlar, pas ve korozyon önleyici yağlar, trafo yağları, kalıp yağları, buhar silindiri yağları, pnömatik sistem koruyucu yağlar, gıda ve ilaç endüstrisi yağları, genel amaçlı yağlar, kağıt makinesi yağları, yatak yağları ve diğ er özel endüstriyel yağlar ile endüstriyel gresler bu kategoride yer alır. Bu yağlar, endüstriyel makinelerin ve ekipmanların verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kullanılır ve zamanla kontaminasyona uğrayarak atık hale gelirler.

Ayrıca, bu yağların performansını artırmak veya kullanım özelliklerini değiştirmek amacıyla eklenen kalınlaştırıcılar, koruyucular, temizleyiciler gibi özel müstahzarlar da kullanım sonrası atık olarak değerlendirilir. Bu müstahzarlar, yağların işlevselliğini artırmak için kullanılsa da zamanla kontaminasyona uğrayarak çevresel risk oluşturabilirler. Kullanılmış yağlar, uygun şekilde yönetilmediğinde  evre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle, atık yağların toplanması, taşınması, depolanması ve bertarafı süreçlerinde  evre mevzuatına uygun hareket edilmesi büyük önem taşımaktadır (Acıöz, 2025; Mishra ve Mishra, 2025).

Çalışma kapsamında kullanılacak atık endüstriyel ve motor yağ grupları Konya ili Selçuklu ilçesinde bulunan  evre, şehircilik ve  klim Değişikliği Bakanlığı tarafından atık yağ toplama konusunda yetkilendirilen Acıöz Petrol Hurdacılık Nakliye Demir  r nleri San. ve Tic. Ltd. şti.'den temin edilmiştir. Temin edilen atık endüstriyel yağ Grup A olarak belirtilen atık hidrolik yağlar kapsamındadır. Temin edilen atık motor yağı ise Grup B olarak belirtilen atık motor, şanzıman ve yağlama yağları kapsamındadır (Atık Yağların Yönetmeliği- Ekler, 2020).

Atık motor yağın yoğunluğu (25 C'de) 0.890 gr/cm³, viskozitesi (40  C'de) 0.093 Pa.s olarak belirlenmiştir. Atık endüstriyel yağın yoğunluğu (25 C'de) 0.820 gr/cm³, viskozitesi (40  C'de) 0.081 Pa.s olarak belirlenmiştir.

Döner Disk Elektrot Optik Emisyon Spektrometresi (RDE-OES) yöntemi, ASTM D6595 standardına uygun olarak geliştirilmiş ve kullanılmış yağlarda aşınma metallerinin, katkı maddelerinin ve kirleticilerin tespitinde kullanılan hızlı ve hassas bir analiz yöntemidir. Bu teknikte, yağ numunesi dönen bir grafit disk üzerine uygulanır; yüksek frekanslı elektrik arkı ile oluşan plazma ortamında elementler uyarılarak karakteristik emisyonlar üretir. Bu emisyonlar optik sistemle algılanarak ppm düzeyinde elementel tayin gerçekleştirilir. RDE-OES, özellikle Fe, Cu, Al, Cr, Pb, Zn, Si ve P gibi elementlerin eşzamanlı analizinde etkilidir (ASTM International, 2016).

Çalışma kapsamında kullanılacak olan atık endüstriyel yağ Döner Disk Elektrot Optik Emisyon Spektrometresi (RDE-OES) metodu (ASTM D6595) ile elementel analizine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan atık motor yağ kimyasal içerik sonuçları Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Çalışmada kullanılan atık endüstriyel yağın elementel analizi sonuçları

Parametreler	Birim	Atık Yağ
Gümüş (Ag)	mg/kg	0
Kalsiyum (Ca)		31,1
Demir (Fe)		9,46
Potasyum (K)		2,16
Magnezyum (Mg)		2,2
Sodyum (Na)		5,27
Nikel (Ni)		0,12
Fosfor (P)		181,86
Antimon (Sb)		0
Silisyum (Si)		2,26
Çinko (Zn)		200,6

Elde edilen analiz sonuçlarına göre atık endüstriyel yağ içeriğinde en yüksek oranda bulunan elementler sırasıyla Zn, P, Ca Fe ve Na’dır. Özellikle Fe gibi elementlerin bulunması atık yağın bünyesinde aşınma metallerinin varlığının kanıtıdır. Ayrıca Ca, P, Zn, Mg elementlerinin varlığı endüstriyel yağ içerisindeki aşınma karşıtı katkıların

varlığını desteklemektedir. Na ve K gibi elementler ise dış kaynaklı kirleticilerin varlığını göstermektedir (Rahimi vd., 2012).

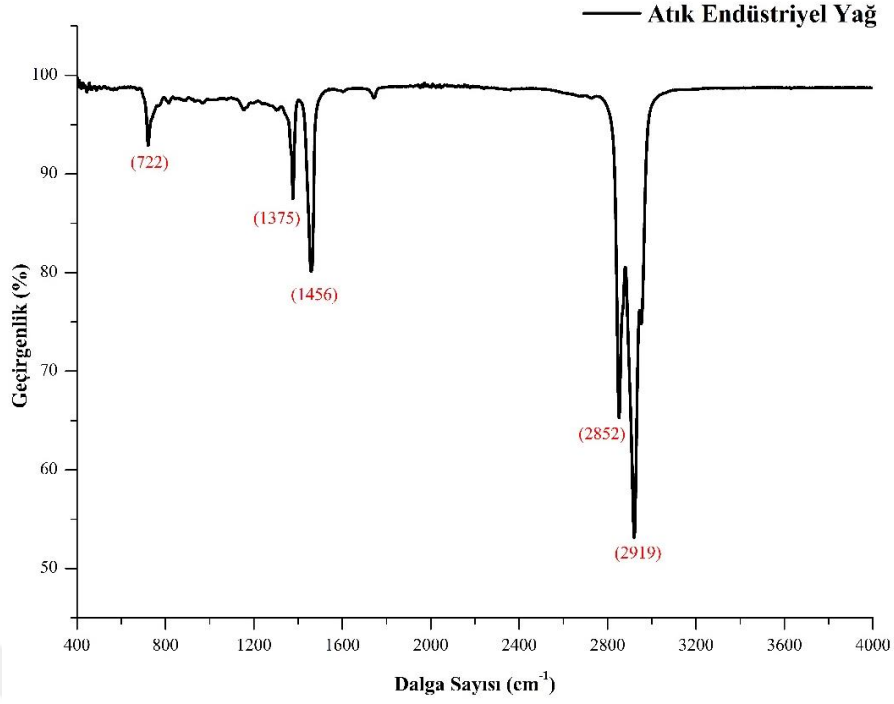
Çalışma kapsamında kullanılacak olan atık motor yağı Döner Disk Elektrot Optik Emisyon Spektrometresi (RDE-OES) metodu (ASTM D6595) ile elementel analizine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan atık motor yağ kimyasal içerik sonuçları Çizelge 3.6’de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Çalışmada kullanılan atık motor yağının elementel analizi sonuçları

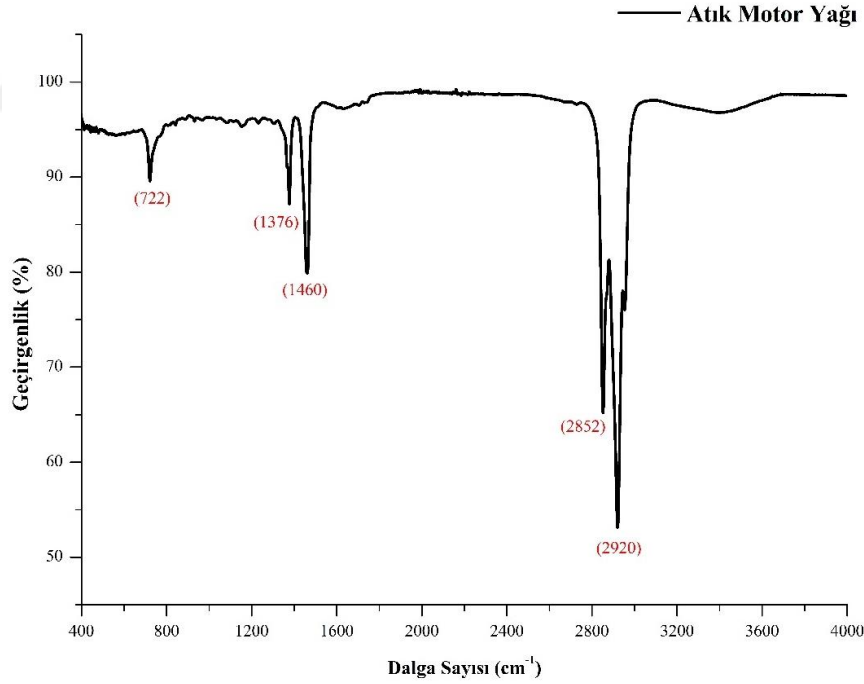
Parametreler	Birim	Atık Yağ
Gümüş (Ag)	mg/kg	0,15
Kalsiyum (Ca)		1769,5
Demir (Fe)		209,64
Potasyum (K)		62,22
Magnezyum (Mg)		148,69
Sodyum (Na)		153,15
Nikel (Ni)		1,68
Fosfor (P)		847,47
Antimon (Sb)		0
Silisyum (Si)		68,67
Çinko (Zn)		509,79

Elde edilen analiz sonuçlarına göre atık motor yağ içeriğinde en yüksek oranda bulunan elementler sırasıyla Ca, P, Zn, Fe, Na ve Mg’dir. Çalışmada kullanılacak AMY’nin literatürde de karşılaşılan Fe, Ni, Zn, Mg gibi ağır metalleri içerdiği görülmüştür (Al-Saffar vd.,2021; Al-Ghouti ve Al-Atoum, 2009; Atsar vd. 2013)

Tez çalışmasında kullanılan atık endüstriyel yağın yapısında bulunan fonksiyonel grupların tespiti için FTIR analizi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar atık endüstriyel yağ için Şekil 3.3’de, atık motor yağ için Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Atık endüstriyel yağ FTIR analizi sonucu



Şekil 3.4. Atık motor yağ FTIR analizi sonucu

Elde edilen FTIR analizleri değerlendirildiğinde atık endüstriyel ve motor yağların neredeyse birebir aynı karakteristik piklere sahip olduğu görülmüştür. Atık endüstriyel ve motor yağın kendi kimyasal yapısı ile ilgili yaklaşık 722, 1375, 1456, 2852 ve 2919

cm^{-1} dalga boylarında karakteristik pikler gösterdikleri gözlenmiştir. Yaklaşık 722 cm^{-1} dalga boyundaki pik uzun zincirli metilen gruplarının $-(\text{CH}_2)_n$ eğilme titreşimini gösterirken; yaklaşık 1460 cm^{-1} dalga boyundaki pik, CH_2 ve CH_3 gruplarındaki C–H bağlarının asimetrik eğilme titreşimlerini göstermektedir. Yaklaşık 1375 cm^{-1} dalga boyundaki pik ise CH_3 grubu içindeki C–H bağlarının simetrik eğilme titreşimlerine aittir. Ayrıca atık endüstriyel yağ alifatik zincirlerdeki C–H gerilme titreşimlerine karşılık gelen $2850\text{--}2960 \text{ cm}^{-1}$ aralığında pikler gösterdiği görülmektedir (Liu vd., 2018; Chen vd., 2024).



4. METOT

Metot bölümünde ilk olarak doktora tez çalışmasında kullanılan bitümlü bağlayıcının tez kapsamında geliştirilen laboratuvar ortamında yaşlandırma yönteminden bahsedilecektir. Geliştirilen yaşlandırma yöntemi ile yaşlandırılan bitümlü bağlayıcıların tez çalışmasında kullanılacak olan 3 ayrı atık yağ grubu ile ağırlıkça farklı oranlarda genişletilmesi bitüm modifikasyon aşaması olarak sunulacaktır. Ayrıca tez çalışmasında kullanılan saf bitümlü bağlayıcı, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı ve modifiye bitümlü bağlayıcıların kimyasal özelliklerini belirlemede kullanılan analizler ve fiziksel özelliklerinin tayininde kullanılan deneysel yöntemler bu başlık altında sunulacaktır. Tez çalışmasında kullanılacak olan numunelerin hazırlanması için yararlanılan Superpave Hacimsel Tasarım Yöntemi, malzeme seçimi ve gradasyon, optimum bitümlü bağlayıcı miktarının belirlenmesi, nem hassasiyetinin ve karışım performansının değerlendirilmesi ve tekerlek izi deneyi basamakları hakkında bilgi verilecektir.

4.1. Bitümlü Bağlayıcı Yaşlandırma Simülasyonu İçin Geliştirilmiş Laboratuvar Yöntemi

Tez çalışmasının ana unsuru olan Sürdürülebilir Ulaşım kavramı üzerinde durulduğunda bitümlü bağlayıcının atık yağlar ile modifikasyonu konusu detaylıca değerlendirilmiş olup, çeşitli koşullar sebebiyle yaşanan bitümlü bağlayıcının modifikasyonda kullanımının araştırılması tez çalışmasının ana konusu haline gelmiştir. Bu kapsamda gerekli literatür taraması çalışması yapılmış, görülen eksikliklerin tez kapsamında giderilmesi amaçlanmıştır.

Yapım aşamasında ve hizmet ömrü boyunca sıcaklık, nem, ultraviyole ışınlar, oksidasyon gibi etkenlerin bir araya gelmesiyle kaçınılmaz olarak sertleşmektedir (Jiang vd., 2021; Tauste vd., 2018). Bu sertleşme olayına genellikle gevrekleşme veya yaşlanma adı verilir. Yaşlanma, bitümlü malzemenin viskozitesinin artmasına ve daha kırılğan hale gelmesine neden olur. Aynı zamanda, asfalt yüzeyinde çatlaklara ve su kaynaklı bozulmalara karşı daha duyarlı hale gelir. Yaşlanmanın genellikle kısa dönem ve uzun dönem olarak iki aşamada meydana geldiği bilinmektedir. Kısa dönem yaşlanma, karışımın depolanması, plente taşınması, plente karıştırılması, şantiyeye

taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması gibi işlemler sırasında ortaya çıkmaktadır (Ye vd., 2019; Yan vd., 2017). Diğer yandan, uzun dönem yaşlanma yolun servis ömrü boyunca gerçekleşmektedir (Lin vd., 2016; Miró vd., 2015).

Bitümlü bağlayıcılarda uzun dönem yaşlanmayı etkileyen temel faktörler, yapısal sertleşme ve oksidasyon gibi arazi koşullarından kaynaklanırken, kısa dönem yaşlanma özellikle asfalt karışımının hazırlığı ve uygulanması sırasında bitümün buharlaşmasına bağlıdır (Tejeshwini vd., 2025; Lu ve Isacson, 2002). Kısa dönem yaşlanmanın simülasyonu için yaygın olarak kullanılan test yöntemleri, İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT) ve Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) gibi yöntemlerdir. Uzun dönem bağlayıcı yaşlanması için ise Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi ve Dönel Silindir Yaşlandırma Deneyi (RCAT) gibi oksidasyona dayalı testler en çok kabul gören yöntemlerdir (Verma ve Saboo, 2024). Malzemenin performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan Superpave sistemi, kısa vadeli yaşlanma için RTFOT ve uzun vadeli yaşlanma için PAV yöntemini benimsemektedir.

Bitümlü bağlayıcının laboratuvar ortamında yaşlandırılması ile ilgili en bilinen ve kabul gören metot Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT), AASHTO T-240 standardı gereğince uygulanmakta ve bitümlü bağlayıcının kısa dönem yaşlanmasını temsil etmektedir (Saltan vd., 2017). RTFO deneyinde düşey ekseninde bulunan dönen raf içerisinde 8 adet cam şişe mevcuttur. Cam şişeler 35 gram bitüm içerecek şekilde doldurulmaktadır. RTFO deneyi 163 °C’ de 75 dakika süre ile gerçekleşmektedir (Sutanto vd., 2018, Airey, 2003). Cam şişelerin bulunduğu raf 15 devir/dakika ile dönmekte olup RTFO cihazı içerisine 4000 ml/dakika olacak şekilde ısıtılmış hava gönderilmektedir. Bitümlü bağlayıcıların uzun dönem yaşlanmasını temsil etmek amacıyla sıklıkla kullanılan yöntem Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyidir ve AASHTO R28 standardı gereğince uygulanmaktadır (Pavement Interactive, 2025). PAV deneyi kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı kalıntısının cihaz yardımı ile okside edilmesi yolu ile uygulanmaktadır. Kısa dönem yaşlandırılmış 50 gram bitümlü bağlayıcı 140 cm’lik kaplara boşaltılarak bitümlü bağlayıcı kıvamına uygun olacak şekilde 90, 100 veya 110 °C’ de 20 saat deneye tabi tutulmaktadır. Deney süresince 2,1 MPa basınçlı sıcak hava deney cihazına gönderilmektedir (Uz ve Gökalp, 2020; Airey, 2003).

Mevcut yaşılandırma yöntemlerinin (RTFOT ve PAV) laboratuvar ortamında gerçek koşullardaki bitümlü bağlayıcının yaşılanmasını temsil etmesi gibi avantajlarının olmasının yanında çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajların başında mevcut yöntemler ile çok az miktarda yaşılanmış bitüm elde edilmesi gelmektedir. Yaşılanmış bitümün performansının detaylı şekilde değerlendirilmesi için bir dizi deneysel analize ihtiyaç varken elde edilen kısıtlı miktardaki yaşılandırılmış bitüm bu konuda yetersiz kalmaktadır. Özellikle yaşılanmış bitümün laboratuvar ortamında üretilmesi, asfalt karışımlarının performansını artırmak ve sürdürülebilir çözümler geliştirmek için kritik bir adımdır. Standart yaşılandırma metotları RTFOT ve PAV kullanılarak sırasıyla 20 gr ve 40 gr'lık yaşılandırılmış bitümlü bağlayıcı elde edilmektedir. Ancak tez çalışması kapsamında bitümlü bağlayıcıya uygulanacak deneyler için çok daha fazla miktarda bitümlü bağlayıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu miktar standart yaşılandırma metotları defalarca kez uygulanarak elde edilebilecektir. Tez çalışmasının ana ilkesi olan Sürdürülebilirlik gözetilerek standart metotların defalarca uygulanması yerine yeni bir metot geliştirmek hedeflenmiştir. Bu bağlamda daha önce kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve özgün bir yaşılandırma metodu geliştirilmiştir.

Mevcut yaşılandırma yöntemleri (RTFOT ve PAV) küçük miktarda numune üretmeye olanak sağlarken, geliştirilen metot sayesinde daha fazla miktarda yaşılandırılmış bitüm daha az maliyet ve iş gücü ile elde edilebilecektir. Böylelikle üniversiteler ve araştırma enstitüleri tarafından asfalt teknolojisi üzerine yapılan çalışmalarda kullanılabilirliği kolaylaşacaktır. Böylelikle özellikle asfalt karışım tasarımı, yaşılanmaya karşı dirençli malzemelerin geliştirilmesi ve geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) kullanımı gibi alanlarda daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, daha fazla miktarda yaşılanmış bitüm üretimi, laboratuvar testlerinden endüstriyel uygulamalara geçiş sürecini hızlandırarak, AR-GE çalışmalarının verimliliğini artıracaktır. Bu durum, asfalt endüstrisinde yenilikçi çözümlerin daha hızlı bir şekilde hayata geçirilmesine ve sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaşmasına önemli bir katkı sunacaktır.

Metot geliştirme sürecinde öncelikle yaşılanmış bitümlü bağlayıcı elde etmek amacıyla kullanılan mevcut ve mevcut dışı yöntemler üzerine gerekli literatür taramaları yapılmıştır. Gerçek koşullarda yaşılanmış asfalt kaplamalardan bitümlü bağlayıcının

ayrıştırılması için kullanılan çözücü ile ekstraksiyon yöntemi üzerinde durulmuştur. Ancak ekstraksiyon yöntemi ile doktora tez çalışmasında kullanılacak olan yaşlanmış bitümün elde edilmesi için işlemin defalarca tekrar edilmesi gerektiği görülmüştür. Aynı zamanda ekstraksiyon için gereken çözücü de maliyet açısından olumsuz bir etken olarak düşünülmüştür. Ayrıca ekstraksiyon sonucu hem karışım içerisinde bulunan filler agregadan hem de işlem sırasında kullanılan çözücünden arınmış %100 saf olarak yaşlanmış bitümlü bağlayıcıyı elde etmek imkansız olarak görülmüştür.

Daha sonra literatürde karşılaşılan farklı yaşlandırma metotları incelenmiştir. Zargar vd. (2012) yaptıkları çalışmada pervaneli mikseri bitümün laboratuvar ortamında yaşlandırma sürecini hızlandırmak amacıyla standart dışı bir yöntemin simülasyonu olarak kullanılmıştır. Yaşlandırılmış bitümün hazırlanması için, orijinal 80/100 penetrasyon sınıfındaki bitüm yaklaşık 1,5–2 saat boyunca 160 °C sabit sıcaklıkta fırında ısıtılarak akışkan hale getirilmiştir. Tamamen eridikten sonra yaklaşık 900 gram bitüm, 5 litrelik silindirik kaba dökülmüştür. Ardından, erimiş bitüm sıcak plak üzerine yerleştirilmiş ve pervane mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Yaşlandırma işlemi, 350 rpm sabit hızda 7 saat boyunca devam ettirilmiş ve böylece 40/50 penetrasyon grubuna ait yaşlandırılmış bitüm elde edilmiştir. Yaşlanma işlemi tamamlandıktan sonra, yaşlandırılmış bitümün hangi penetrasyon grubuna ait olduğunu belirlemek amacıyla penetrasyon testi uygulanmıştır. Gökalp ve Uz (2019) yaptıkları çalışmada mevcut yaşlandırma metotlarında (RTFOT ve PAV) karşılaşılan elde edilen yaşlandırılmış bağlayıcının yetersiz miktarı sebebiyle yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda oksi-yaşlanma prensibi kullanılmıştır. 500 gr bitüm metal bir kap içerisine dökülmüş ve 140 ± 5 °C sıcaklıkta, dakikada 1000 devir hızında çalışan bir pervaneli mikser ile beş saat karıştırılmıştır. Bu işlem, kısa dönem yaşlanma için bir kez ve uzun dönem yaşlanma için bir kez olmak üzere toplam on saat boyunca uygulanmıştır. Kısa ve uzun dönem yaşlanma için belirlenen karıştırma süreleri, hem standart yaşlanma yöntemleri (RTFOT ve PAV) hem de Oksi-yaşlanma yaklaşımı ile kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümlere uygulanan penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testlerinin sonuçlarına göre belirlenmiştir. Oksi-yaşlanma yönteminin kabul edilebilirliğinde %85 güven düzeyi esas alınmıştır.

Standart asfalt kaplama yaşlandırma yöntemleri olan AASTHO R-30 (American Association of State Highway and Transportation Officials-Amerikan Devlet Yolları

ve Ulaştırma İdaresi) ve NCHRP 09-54 (National Cooperative Highway Research Program-Ulusal Kooperatif Karayolu Araştırma Programı) yöntemleri de detaylı şekilde incelenmiştir. AASTHO R-30 (2010) yöntemi kısa dönem yaşlandırma için sıkıştırılmamış gevşek halde bulunan asfalt karışımının hava sirkülasyonlu etüvde 135 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca yaşlandırılmasını içermektedir. Uzun dönem yaşlandırma için ise yine hava sirkülasyonlu etüvde kısa dönem yaşlandırılan numunenin sıkıştırılarak 85 °C sıcaklık ve 120 saat süre ile koşullandırılmasını içermektedir. NCHRP 09-54 yönteminde ise yine AASTHO R-30 yöntemindeki kısa dönem yaşlandırma koşulları kullanılmaktadır (Durmaz vd., 2020). Uzun dönem yaşlandırma için ise yine kısa dönem yaşlandırılmış gevşek numune 95 °C’de, yöntem içinde verilen denklem ile arazi koşullarına uygun olarak hesaplanan süre (gün) kullanılmaktadır.

Tüm bitümlü bağlayıcı ve asfalt karışım laboratuvar yaşlandırma metotları değerlendirildiğinde geliştirilen laboratuvar ortamında bitümlü bağlayıcı yaşlandırma yöntemi için asfalt teknik alanında faaliyet gösteren hemen hemen her araştırma merkezi ve laboratuvarında kolaylıkla bulunabilecek bir ekipman olan hava sirkülasyonlu etüv kullanılmasının hem ulaşılabilirlik hem de genel bir teknik oluşturabilmek adına daha doğru olacağına karar verilmiştir. Bu bağlamda geliştirilen yöntemde kullanılacak olan NST-120 Kuru Hava Sterilizatörü (Hava Sirkülasyonlu Etüv) Doktora tez çalışmasının desteklendiği FDK-2022-8810 proje Nolu Süleyman Demirel Üniversitesi (SDÜ) Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) bütçesi ile temin edilmiştir. Hava sirkülasyonlu etüv asfalt laboratuvarımızda asfalt karışımları hazırlarken agrega kurutma, bağlayıcı ve agregaları deney sıcaklığına ısıtma gibi birçok kritik aşamada kontrollü ve güvenilir sıcaklık ortamı sağlamak için kullanılmaktadır. Isının fan destekli sirkülasyon sistemiyle iç ortamda eşit olarak dağılması sebebiyle geliştirilen laboratuvar ortamında bitümlü bağlayıcı yaşlandırma metodunda da tercih edilmiştir. Burada marka ya da model verilmesinin sebebi aslında metot için kullanılan ekipmanı tanımlamaktır. Geliştirilen yöntem kullanılan NST-120 marka ve model hava sirkülasyonlu etüv benzeri her asfalt araştırma merkezi ya da laboratuvarında bulunan etüv ile gerçekleştirilebilecek şekilde standarda sahip olması adına optimum bağlayıcı yüksekliği, sıcaklık ve süre belirlenmiştir. Hava sirkülasyonlu etüv tekniği asfalt kaplamaların gevşek ya da sıkıştırılmış koşullarda yaşlandırılması için mevcut AASTHO R-30 ve NCHRP 09-54 standart yöntemlerinde

de kullanıldığı görülmüştür. Mevcut yöntemlerde de kullanılan hava sirkülasyonlu etüvün model/marka bilgisinin bulunmaması aslında yöntemin herhangi bir hava sirkülasyonlu etüvde kolaylıkla gerçekleştirilebileceğinden kaynaklanmaktadır. Tez çalışması kapsamında SDÜ BAP bütçesi ile temin edilen NST-120 hava sirkülasyonlu etüvünün sadece metodu uygulamak adına temin edildiği göz ardı edilmemelidir.

Geliştirilen laboratuvar ortamında bitümlü bağlayıcı yaşlandırma metodunda birçok defa sıcaklık ve süre denemesinin ardından optimize edilen bitümlü bağlayıcı kalınlığı, yaşlandırma süresi ve sıcaklık metodun ana hattını oluşturmaktadır. Geliştirilen yöntem ‘Bitüm Yaşlandırma Simülasyonu İçin Geliştirilmiş Kısa ve Uzun Dönem Bitümlü Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemi’ başlığı ile uluslararası patent başvurusu sürecindedir. Mevcut standart kısa dönem yaşlandırma yöntemi olan RTFOT ve yine uzun dönem yaşlandırma yöntemi olan PAV ile yaşlandırılmış numuneler geliştirilen metot ile yaşlandırılan kısa ve uzun dönem olmak üzere ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için bitümlü bağlayıcı temel performans deneylerinden olan Penetrasyon Deneyi (TS EN 1426) ve Yumuşama Noktası Deneyi (TS EN 1427) standartlara uygun olacak şekilde uygulanmıştır. Ayrıca yine bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin ve sıcaklık karşısındaki davranışını tespit etmek için kullanılan en önemli yöntemlerden olan Brookfield Dönel Viskozimetre Deneyi (ASTM D 4402) standardına uygun olacak şekilde uygulanmıştır. Tüm deneyler saf bitümlü bağlayıcı, mevcut standart yöntem RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar ve tez kapsamında geliştirilen yöntem ile yaşlandırılan numunelere uygulanmıştır. Yaşlandırma prosedürlerine başlamadan önce hava sirkülasyonlu etüv önceden ilgili sıcaklığa gelebilmesi için en az 1 saat olacak şekilde ısıtılmıştır. Ayrıca bitümlü bağlayıcının da ilgili prosedür sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Deneysel sonuçların standart yöntemle olan ilişkisi varyasyon bağıntısı ile belirlenmiştir.

Standart yaşlandırma yöntemi (RTFOT-PAV) ve geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv yöntemi arasındaki varyasyonel bağıntı aşağıdaki bağıntı (Denklem 4.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Varyasyon (\%)} = \frac{|\text{Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi} - \text{Standart Yöntem}|}{\text{Standart Yöntem}} * 100 \quad (4.1)$$

Hem standart yaşlandırma yöntemi ile elde edilen deneysel sonuçları hem de tez çalışması kapsamında geliştirilen Hava sirkülasyonlu etüv yöntemine ait kısa dönem yaşlandırma sonuçları Çizelge. 4.1' de verilmiştir. Çizelge 4.1'de standart RTFOT yöntemi ile kısa dönem yaşlandırılmış numune RTFOT olarak ifade edilmiştir. Hava sirkülasyonlu etüv yöntemine ait kısa dönem yaşlandırılmış numuneler ise KY ile isimlendirilmiştir. KY1 135 °C'de 2 saat kısa dönem yaşlandırmayı, KY2 135 °C'de 4 saat kısa dönem yaşlandırmayı, KY3 145 °C'de 5 saat kısa dönem yaşlandırmayı ve KY4 ise 145 °C'de 6 saat kısa dönem yaşlandırmayı ifade etmektedir. Yine Çizelge 4.1'de bulunan Var1 KY1'e ait varyasyonel %'yi, Var2 KY2'e ait varyasyonel %'yi, Var3 KY3'e ait varyasyonel %'yi ve Var4 KY4'e ait varyasyonel %'yi ifade etmektedir. Varyasyon değerleri incelenmiş ve KY4 olarak isimlendirilen 145 °C'de 6 saat kısa dönem yaşlandırma sıcaklık ve süre koşulları Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi kısa dönem yaşlandırma simülasyonu olarak seçilmiştir.

Hava sirkülasyonlu etüv yöntemine ait kısa dönem yaşlandırma sonuçları Çizelge. 4.2' de verilmiştir. Hava sirkülasyonlu etüv yönteminde uzun dönem yaşlandırılan numuneler yöntem kapsamında belirlenen kısa dönem yaşlandırma yöntemi (145 °C'de 6 saat kısa dönem yaşlandırma) ile yaşlandırılan numunelerdir. Çizelge 4.2'de standart PAV yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılmış numune PAV olarak ifade edilmiştir. Hava sirkülasyonlu etüv yöntemine ait uzun dönem yaşlandırılmış numuneler ise UY ile isimlendirilmiştir. UY1 95 °C'de 20 saat uzun dönem yaşlandırmayı, UY2 95 °C'de 72 saat uzun dönem yaşlandırmayı, UY3 95 °C 'de 120 saat uzun dönem yaşlandırmayı ve UY4 ise 105 °C'de 144 saat uzun dönem yaşlandırmayı ifade etmektedir. Yine Çizelge 4.2'de bulunan Var1 UY1'e ait varyasyonel %'yi, Var2 UY2'e ait varyasyonel %'yi, Var3 UY3'e ait varyasyonel %'yi ve Var4 UY4'e ait varyasyonel %'yi ifade etmektedir. Varyasyon değerleri incelenmiş ve UY4 olarak isimlendirilen öncelikle Hava sirkülasyonlu etüv yönteminde belirlenen kısa dönem yaşlandırma yöntemi (145 °C'de 6 saat kısa dönem yaşlandırma) ile yaşlandırılan numunelere uygulanan 105 °C'de 144 saat uzun dönem yaşlandırma sıcaklık ve süre koşulları Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi uzun dönem yaşlandırma simülasyonu olarak seçilmiştir.

Hava sirkülasyonlu etüv yönteminde optimize edilen bitüm film kalınlığıyla ilgili farklı denemeler yapılmıştır. Yöntemde tepsi boyutlarından ziyade film kalınlığı üzerinde durulmuştur. Tepsi boyutu yöntem için kullanılacak hava sirkülasyonlu etüv

için uygun olacak herhangi bir tepsi olabilmektedir. Burada asıl önemli olan seçilen bitüm film kalınlığıdır. Bitümlü bağlayıcının yüzey alanını genişletmek ve ince bir tabaka halinde kullanmak diğer standart ya da standart dışı yöntemlerde olan karıştırma ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Ayrıca hava sirkülasyonlu etüv yönteminde sadece etüvün hava sirkülasyonundan faydalanılmıştır. Herhangi bir farklı hava basıncı veya gaz kullanımı söz konusu değildir. Çizelge 4.3'te Hava sirkülasyonlu etüv kısa dönem yaşlandırma koşulu için 2 farklı kalınlık denemesine ait sonuçlar bulunmaktadır. Kısa dönem yaşlandırma için saf bitümlü bağlayıcıya 145 °C'de 6 saat yaşlandırma prosedürü uygulanmıştır. Hava sirkülasyonlu etüv yöntemine ait kısa dönem yaşlandırılmış numuneler K ile isimlendirilmiştir. K1 4 cm kalınlığında bitümlü bağlayıcı kullanımı sonucu kısa dönem yaşlandırma sonuçlarını ifade etmektedir. K2 ise 2 cm kalınlığında bitümlü bağlayıcı kullanımı sonucu kısa dönem yaşlandırma sonuçlarını ifade etmektedir. Yine Çizelge 4.3'te bulunan Var1 K1'e ait varyasyonel %'yi, Var2 K2'e ait varyasyonel %'yi ifade etmektedir. Varyasyon değerleri incelenmiş ve Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi için kısa dönem yaşlandırma (145 °C'de 6 saat) sıcaklık ve süre koşulları için 2 cm'lik bitüm film kalınlığı optimize edilmiş kalınlık olarak seçilmiştir.

Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi kısa dönem yaşlandırma simülasyonu olarak seçilmiştir. Çizelge 4.4'te ise Hava sirkülasyonlu etüv uzun dönem yaşlandırma koşulu için 2 farklı kalınlık denemesine ait sonuçlar bulunmaktadır. Uzun dönem yaşlandırma kısa dönem yaşlandırma prosedürü olan 145 °C'de 6 saat uygulanmış bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Kısa dönem yaşlandırılan bitümlü bağlayıcı 105 °C'de 144 saat uzun dönem yaşlandırılmıştır. Hava sirkülasyonlu etüv yöntemine ait uzun dönem yaşlandırılmış numuneler U ile isimlendirilmiştir. U1 4 cm kalınlığında bitümlü bağlayıcı kullanımı sonucu uzun dönem yaşlandırma sonuçlarını ifade etmektedir. U2 ise 2 cm kalınlığında bitümlü bağlayıcı kullanımı sonucu uzun dönem yaşlandırma sonuçlarını ifade etmektedir. Yine Çizelge 4.4'te bulunan Var1 U1'e ait varyasyonel %'yi, Var2 U2'e ait varyasyonel %'yi ifade etmektedir. Varyasyon değerleri incelenmiş ve Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi için uzun dönem yaşlandırma (105 °C'de 144 saat) sıcaklık ve süre koşulları için 2 cm'lik bitüm film kalınlığı optimize edilmiş kalınlık olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.1. Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi kısa dönem yaşlandırma sonuçları

Deney Adı	SAF BİTÜM	RTFOT	KY1	KY2	KY3	KY4	Var1 (%)	Var2 (%)	Var3 (%)	Var4 (%)
Penetrasyon (0.1 mm)	50.48	24.78	36.00	26.06	25.80	24.90	45.3	5.2	4.1	0.5
Yumuşama Noktası (°C)	47.70	58.20	52.20	53.10	55.40	57.80	10.3	8.8	4.8	0.7
Dönel Viskozimetre (135 °C) (Pa.s)	5.97	10.01	6.60	6.88	10.51	10.11	34.1	31.3	5.0	0.9
Dönel Viskozimetre (165 °C) (Pa.s)	1.56	1.91	1.65	1.69	1.78	1.90	13.9	11.8	7.2	0.9

Çizelge 4.2. Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi uzun dönem yaşlandırma sonuçları

Deney Adı	SAF BİTÜM	PAV	UY1	UY2	UY3	UY4	Var1 (%)	Var2 (%)	Var3 (%)	Var4 (%)
Penetrasyon (0.1 mm)	50.48	15.80	28.33	18.70	17.20	15.90	79.3	18.4	8.9	0.6
Yumuşama Noktası (°C)	47.70	60.70	53.30	56.80	55.50	60.20	12.2	6.4	8.6	0.8
Dönel Viskozimetre (135 °C) (Pa.s)	5.97	10.59	7.05	8.40	9.58	10.50	33.4	20.7	9.6	0.8
Dönel Viskozimetre (165 °C) (Pa.s)	1.56	2.16	1.70	1.78	1.96	2.14	21.1	17.6	9.1	0.9

Çizelge 4.3. Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi kısa dönem yaşlandırma farklı bitümlü bağlayıcı kalınlık sonuçları

Deney Adı	SAF BİTÜM	RTFOT	K1	K2	Var1 (%)	Var2 (%)
Penetrasyon (0.1 mm)	50.48	24.78	32.70	24.90	32.0	0.5
Yumuşama Noktası (°C)	47.70	58.20	54.10	57.80	7.0	0.7
Dönel Viskozimetre (135 °C) (Pa.s)	5.97	10.01	7.43	10.11	25.8	0.9
Dönel Viskozimetre (165 °C) (Pa.s)	1.56	1.91	1.70	1.90	11.1	0.9

Çizelge 4.4. Hava Sirkülasyonlu Etüv Yöntemi uzun dönem yaşlandırma farklı bitümlü bağlayıcı kalınlık sonuçları

Deney Adı	SAF BİTÜM	PAV	U1	U2	Var1 (%)	Var2 (%)
Penetrasyon (0.1 mm)	50.48	15.80	28.63	15.90	81.2	0.6
Yumuşama Noktası (°C)	47.70	60.70	54.20	60.20	10.7	0.8
Dönel Viskozimetre (135 °C) (Pa.s)	5.97	10.59	6.46	10.50	39.0	0.8
Dönel Viskozimetre (165 °C) (Pa.s)	1.56	2.16	1.69	2.14	21.7	0.9

Elde edilen veriler ışığında kısa dönem ve uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcılar Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve tez kapsamında kullanılacak olan farklı atık yağ grupları ile farklı oranlarda modifiye edilmiştir.

4.2. Bitümlü Bağlayıcı Modifikasyonu

Bitümlü sıcak karışım kaplamalar (BSK), esnek üstyapı sistemlerinin en yaygın kullanılan türlerinden biridir ve taşıma kapasitesi ile hizmet ömrünün doğrudan belirleyicisi olan bağlayıcı ve agrega sistematğine dayanmaktadır. Bu kaplamalar, trafiğin neden olduğu tekrarlı yüklemeler ile termal döngülerin oluşturduğu genleşme ve büzülme etkilerine karşı direnç gösterecek şekilde tasarlanmalıdır (Brown vd., 2001). Ancak mevcut standartlara uygun şekilde üretilen bitümlü karışımlar, ağır aks yükleri ve zorlu çevresel koşullar nedeniyle erken dönemde performans kayıpları gösterebilmekte; çatlama, deformasyon ve yüzeysel bozulmalara yol açabilmektedir (Huang, 2004).

Bitüm, yapısal olarak hem viskoelastik hem de termoplastik özellikler gösteren kompleks bir bağlayıcıdır (Airey vd., 2002). Viskoelastik karakteri nedeniyle hem sıcaklığa hem de yükleme süresine karşı oldukça duyarlıdır. Bu özellik, düşük sıcaklıklarda bitümün gevrekleşmesine ve termal çatlamaya (Navarro vd., 2009), yüksek sıcaklıklarda ise akışkanlığının artarak kalıcı deformasyonlara neden olmasına yol açmaktadır (Charhi ve Baba, 2024). Bu bağlamda, bitümün sıcaklık ve yükleme koşullarına karşı daha dirençli hale getirilmesi amacıyla çeşitli modifikasyon teknikleri uygulanmaktadır (Behnood ve Gharehveran, 2019). Bu tekniklerle elastikiyetin artırılması, termal stabilitenin iyileştirilmesi ve uzun vadeli dayanıklılığın sağlanması hedeflenmektedir (Joohari ve Giustozzi, 2020). Asfalt karışımlar için bağlayıcıların kalitesini artırmanın en etkili yolu, bitümlü bağlayıcıyı modifiye etmektir. Modifikasyon işlemi, bağlayıcının yapışma, dayanım ve deformasyon özelliklerini önemli ölçüde arttırmaktadır; böylelikle yol yüzeyinin genel performansını da iyileştirmektedir (Provatorova ve Vikhrev, 2020).

Tez çalışması kapsamında yapılacak bitüm modifikasyonu ile bitümlü bağlayıcının geri kazanımı ve mevcut özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanacaktır. Böylelikle kaplama ömrü uzayacak bu da yüksek bütçeler gerektiren yeniden yapım ve onarım

maliyetinin azalmasına, dolayısıyla ulusal ekonomiye büyük oranda katkıda bulunacaktır.

Yürütülen tez çalışması kapsamında geliştirilen laboratuvar ortamında yaşlandırma metodu ile kısa ve uzun dönem yaşlandırma laboratuvar ortamında simüle edilmiş ve yaşlandırılmış bitüm üretilmiştir. Elde edilen kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümler her atık yağ grubu için (atık yemeklik, endüstriyel ve motor yağ) ağırlıkça 3 farklı oranda (%1, %3 ve %5) modifiye edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında bitüm modifikasyonu amacıyla kullanılan atık yağların hazırlanma süreci, modifikasyonun etkinliği ve elde edilen bağlayıcının performansı açısından kritik bir aşama olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan atık yağlar, farklı kaynaklardan temin edilmiş olup özellikle atık yemeklik yağ bu kapsamda öne çıkan katkı malzemelerinden biri olmuştur. Ancak bu tür yağların, kullanım süreçleri sonucunda çeşitli fiziksel kirleticiler (gıda parçacıkları, karbon birikintileri vb.) içerebilmesi nedeniyle, modifikasyon işlemine alınmadan önce filtrasyon işlemine tabi tutulmaları gerekmiştir. Bu amaçla, atık yemeklik yağlar filtre edilerek mekanik safsızlıklardan arındırılmış, böylelikle bitümle olan karışım sırasında olası agregasyon veya yapısal düzensizliklerin önüne geçilmiştir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan tüm atık yağlar modifikasyon işlemine geçilmeden önce, sistemde homojenlik sağlanması amacıyla belirli süre boyunca karıştırılmıştır. Bu ön karıştırma işlemi, farklı viskozite ve yoğunluğa sahip atık yağların birbiriyle uyumlu hale gelmesini sağlamak ve nihai karışımın bitümle daha dengeli bir şekilde etkileşmesini kolaylaştırmaktadır. Elde edilen karışım, ardından modifikasyon sıcaklığına getirilmiştir. Bu ısıtma işlemi, yalnızca viskoziteyi azaltarak karışımın işlenebilirliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda bitüm ile yağlar arasında gerçekleşecek kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin verimini de yükseltmektedir.

Bu hazırlık süreci, modifiye bitüm üretiminde hem reolojik hem de morfolojik açıdan tutarlı ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edebilmek adına büyük önem taşımaktadır. Uygulanan tüm işlemler, literatürde önerilen ön işleme protokolleriyle uyumlu şekilde

gerçekleştirilmiş ve modifikasyon aşamasına geçilmeden önce her bir parti materyal kontrollü koşullarda hazırlanmıştır.

Bitüm modifikasyonu amacıyla yaklaşık olarak 135 ± 5 °C'ye kadar ısıtılan bitüm ve her atık yağ grubu için ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında atık yağ ile 135 ± 5 °C'ye ısıtılan yüksek devirli karıştırıcı kalıbına aktarılmıştır. 2000 devir/dakika hıza sahip yüksek devirli karıştırıcı 15 dakikalık süre ile çalıştırılmış ve bitüm ile atık yağ gruplarının homojen olarak karışması sağlanmıştır (Li vd., 2019).

Çalışma kapsamında bitüm modifikasyonunda ağırlıkça çeşitli oranlarda kullanılan atık yağ grupları için oluşturulan kısaltmalar Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Çalışmada kullanılan bitümlü bağlayıcı numune gruplarının kısaltmaları

	Ağırlıkça Oranlar					
	Kısa Dönem Yaşlandırma			Uzun Dönem Yaşlandırma		
	1%	3%	5%	1%	3%	5%
Saf Bitüm	S					
Kısa dönem yaşlandırma	K					
Uzun dönem yaşlandırma	U					
Atık Yemeklik Yağ	Y1-K	Y3-K	Y5-K	Y1-U	Y3-U	Y5-U
Atık Endüstriyel Yağ	E1-K	E3-K	E5-K	E1-U	E3-U	E5-U
Atık Motor Yağı	M1-K	M3-K	M5-K	M1-U	M3-U	M5-U

4.3. Standart Bitümlü Bağlayıcı Deneyleri

Tez çalışmasında kullanılacak olan saf bitümlü bağlayıcı, Geliştirilen Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile yaşlandırılan kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcılar ve atık yağ grupları ile modifiye edilen bitümlerin fiziksel özelliklerin belirlenebilmesi için geleneksel bitüm deneylerinden olan penetrasyon (TS EN 1426), yumuşama noktası (TS EN 1427), düktilite (TS EN 13589), özgül ağırlık (TS EN 15326 + A1) deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca tez kapsamında kullanılan bütün bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları konusunda bilgi sahibi olmamıza yarayan dönel viskozimetre (ASTM D 4402) deneyi uygulanmıştır. Elde edilen penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri vasıtasıyla penetrasyon indeksleri

hesaplanarak tüm bitüm numunelerinin sıcaklık hassasiyetleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

4.4. Bitümlü Bağlayıcı Karakterizasyonu

Tez çalışmasında kullanılacak olan atık yağlar, saf bitüm, Geliştirilen Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile yaşlandırılan kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümler ve atık yağ grupları ile modifiye edilen bitümlerin bu başlık altında detaylarından bahsedilen analizler vasıtasıyla malzeme karakterizasyonları yapılmıştır. Bitümün reolojik özelliklerinin yalnızca makro düzeydeki fiziksel parametrelerle değil, aynı zamanda içerdiği kompleks kimyasal bileşiklerin mikro ve nano ölçekli yapılarıyla da yakından ilişkili olduğu net biçimde ortaya konmuştur. Literatürde, asfalt bağlayıcının viskoelastik davranışının; yapısındaki reçineler, aromatikler, doymuşlar ve asfaltanlar (SARA fraksiyonları) arasındaki etkileşimlere doğrudan bağlı olduğu gösterilmiştir (Sakib, 2018). Bu bağlamda, tez çalışmasında kullanılacak olan tüm bitümlü bağlayıcıların malzeme karakterizasyonunun detaylı biçimde analiz edilebilmesi için bu başlık altında detaylarından bahsedilecek olan Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Enerji dağılımlı X – ışını spektroskopisi (EDS) ve X-ışını difraktometresi (XRD) analizlerinden faydalanılmıştır.

4.4.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), bitümün kimyasal yapısını nitelendirmede yaygın olarak kullanılan güçlü bir analitik tekniktir. Özellikle oksidasyon, modifikasyon ya da katkı maddeleri gibi süreçlerin ardından bitümde meydana gelen kimyasal değişiklikler, FTIR spektrumları üzerinden moleküler düzeyde güvenilir bir şekilde izlenebilmektedir. Genel olarak, FTIR gibi kızılötesi spektroskopi tekniklerinin amacı, belirli bir dalga boyu aralığında bir örneğin ne kadar ışık (yani kızılötesi radyasyon) absorbe ettiğine dair bilgi elde etmektir (Hofko vd., 2017). FTIR spektroskopisi, moleküllerin yalnızca kendilerine özgü kimyasal yapıya bağlı olarak belirli frekansları absorbe etmesi ilkesine dayanır. Bu nedenle, her fonksiyonel grup FTIR cihazında kendine özgü, ayırt edilebilir bir spektruma sahiptir (Hasan vd., 2017).

Tez çalışması kapsamında kullanılan atık yağların ve bitüm numunelerinin kimyasal yapısını analiz etmek amacıyla FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. FTIR analizleri için Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde Jasco FT/IR – 4700 cihazı kullanılmıştır. FTIR analizleri için kullanılan tarama hızı 2 mm/s ve spektral çözünürlük 4 cm⁻¹'dir. Genellikle bitüm numunelerinde bulunan fonksiyonel grupların 4000 – 400 cm⁻¹ dalga boylarındaki çözünürlük kullanılmıştır (Elahi vd., 2021).

4.4.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X – ışını spektroskopisi (EDS)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), yüksek enerjili bir elektron demetinin numune yüzeyinde tarama yapması sonucu ortaya çıkan fiziksel sinyalleri algılayarak sanal bir görüntü oluşturur. Elektronların, numunedeki atomlar ve çekirdek dışı elektronlarla etkileşime girmesi sonucunda çeşitli fiziksel sinyaller meydana gelir. Bu sinyallerin işlenmesiyle numunenin yüzey morfolojisine ilişkin yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir (Jiang vd., 2018, Xiao vd., 2022). Literatür çalışmalarında da gösterildiği gibi, bu yöntem asfalt beton örneklerinin mikroyapısal karakterizasyonunda oldukça değerli bilgiler sunmaktadır (Navaro vd., 2012).

SEM cihazı, yüksek vakum ortamında çalışmakta olup, bu sayede yüksek çözünürlüklü görüntülerin yanı sıra stabil EDS (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, cihazda kullanılan ikincil elektron detektörü, gelen elektronların çarptığı yüzeyden yayılan çekirdek dışı elektronları algılayarak, numunenin yüzey özelliklerini oldukça hassas biçimde ortaya koymaktadır. Bunun yanında gerçekleştirilen EDS analizleri sayesinde, numunenin kimyasal bileşimi hakkında detaylı bilgi edinilmekte; elementlerin miktarları ve yüzeydeki dağılımları haritalandırılarak nitel ve nicel değerlendirme yapılabilmektedir (Castorena vd., 2016).

Tez çalışması kapsamında kullanılan saf bitüm, Geliştirilen Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile yaşlandırılan kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümler ve atık yağ grupları ile modifiye edilen bitümler Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM'de bulunan,

yüksek büyütme oranı ve çözünürlük özelliklerine sahip olan FEI Quanta FEG 250 cihazı vasıtasıyla, SEM ve EDS analizlerine tabi tutulmuştur.

4.4.3. X-ışını difraktometresi (XRD)

X-ışını Kırınımı (XRD) analizi, kristal yapıların tanımlanmasında yaygın olarak kullanılan güçlü bir karakterizasyon tekniğidir ve özellikle bitüm ile modifiye edilmiş asfalt malzemelerinde kullanılan mineral katkıların faz analizinde önemli bir rol oynamaktadır (Zhang vd., 2012). Bu yöntem, örneğe gönderilen X-ışınlarının kristal düzlemlerden kırınımına uğraması esasına dayanır; böylece malzemenin kristal yapısı, faz bileşenleri ve kristallik derecesi hakkında nitel ve nicel bilgiler tahribatsız şekilde elde edilir (Geçkil, 2019). Özellikle asfalt karışımlarında kullanılan filler ve mineral katkı maddelerinin hidratasyon davranışları, amorf ve kristalin faz bileşimleri bu yöntemle hassas bir şekilde değerlendirilebilmektedir (Stutzman vd., 2016).

Tez çalışması kapsamında kullanılan saf bitüm, Geliştirilen Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile yaşlandırılan kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümler ve atık yağ grupları ile modifiye edilen bitüm numuneleri Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM’de bulunan Bruker D8 Advance Twin-Twin difraktometresi vasıtasıyla analize tabi tutulmuş ve XRD desenleri elde edilmiştir. Numunelerin kristalografik yapıları, oda sıcaklığında gerçekleştirilen XRD analizi ile karakterize edilmiştir. Ölçümler, dalga boyu 1.54060 Å olan CuK α radyasyonu kullanılarak, 40 kV hızlandırma voltajı ve 40 mA tüp akımı koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Verilerin tamamı 2 θ aralığı 10° ile 80° arasında olacak şekilde, 0.01° adım aralığında ve 2°/dakika tarama hızıyla elde edilmiştir. Bu parametreler, numunelerin kristal yapısının ayrıntılı ve yüksek çözünürlüklü şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

4.3. Superpave Bağlayıcı Deneyleri

SUPERPAVE bağlayıcı testleri, asfalt bağlayıcının doğrudan saha koşullarındaki davranışını yansıtan fiziksel niteliklerini ölçmeyi amaçlamaktadır. Bu test yöntemi, bağlayıcının karşılaşılabileceği geniş sıcaklık aralıklarını ve kaplamada hasarın en olası olduğu kritik zaman dilimlerini dikkate alarak, bitümlü malzemelerin performansını sistematik bir şekilde değerlendirir ve sınıflandırır (Federal Highway Administration,

2000). Bitümlü kaplamanın servis ömrü boyunca düşük orta ve yüksek sıcaklık maruziyetleri göz önünde bulundurularak hazırlanan Superpave performans deneyleri kullanım amaçları ve performans parametreleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Superpave performans deneyleri (Geçkil vd., 2011)

Deney Adı	Kullanım Amacı	Performans Parametresi
Dönel viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek servis sıcaklıklarındaki özelliklerini belirlemek	Aktarma ve pompalama
Dinamik kesme reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklıklardaki özelliklerini belirlemek	Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlağı direnci
Eğilen kırış reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarındaki özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci
Doğrudan çekme (DTT)		

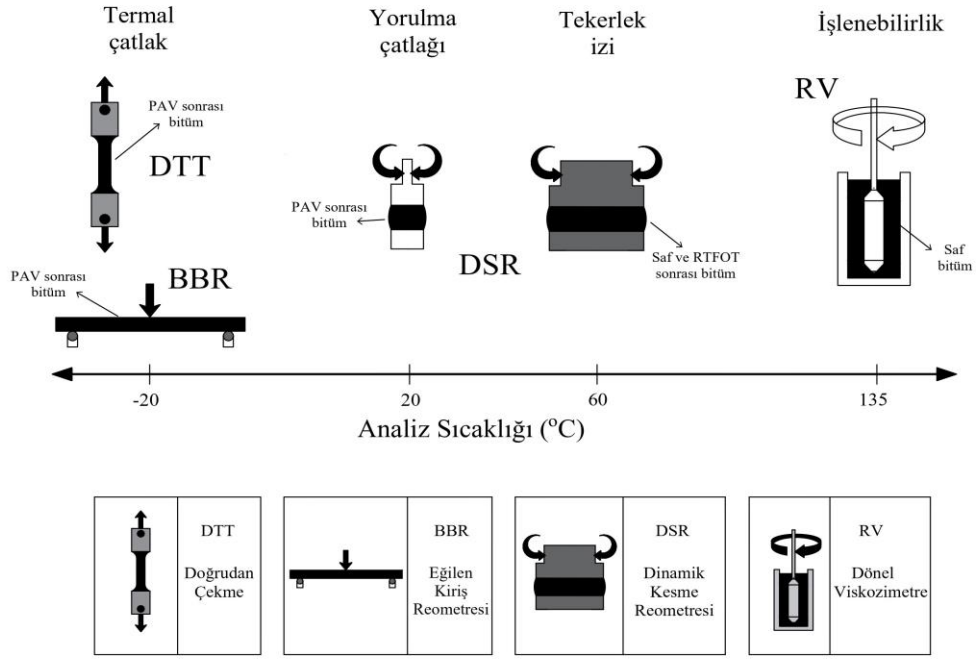
Kaplamanın yüksek sıcaklık maruziyeti sebebiyle kalıcı deformasyon olarak gözlemlenen tekerlek izi kaplama imalatından sonra gerçekleşirken, yorulma çatlakları bitümlü bağlayıcının zaman içerisinde sertleşip özelliklerini yitirmesinden dolayı gerçekleşmektedir. Aynı zamanda gözlemlenen termal çatlaklara ek olarak kaplamanın düşük sıcaklık maruziyeti ile termal çatlaklar oluşmaktadır. Superpave performans şartnamesine göre bitümlü bağlayıcının işlenebilirliği hakkında bilgi sahibi olmak için dönel viskozimetre (RV) deneyi uygulanmaktadır (Sağlık, 2009). Tekerlek izi tayini için hem saf bitüme hem de RTFOT ile kısa dönem yaşlandırılmış bitümlere DSR deneyi uygulanmaktadır. Ayrıca yorulma çatlaklarının tayini için DSR deneyi PAV ile uzun dönem yaşlandırılmış bitümlere uygulanmaktadır. Yine aynı şekilde termal çatlakların tayini için BBR deneyi PAV ile uzun dönem yaşlandırılmış bitümlere uygulanmaktadır. Superpave performans deneyleri ve bu deneylerde kullanılacak olan bitümlere karşılık gelen numuneler Çizelge 4.7’de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Superpave deneylerinde kullanılacak bitümlü bağlayıcı numunesinin durumu

Deney Adı	Kullanılacak Numune Durumu
Dönel viskozimetre (RV)	Saf Bitümlü Bağlayıcı
Dinamik kesme reometresi (DSR)	Saf Bitümlü Bağlayıcı RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcı PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı
Eğilen giriş reometresi (BBR)	PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı
Doğrudan çekme (DTT)	PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı

Çizelge 4.7’de, bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin değerlendirilmesine yönelik olarak kullanılan temel deney yöntemleri ve her bir deney için gerekli numune hazırlık düzeyleri sistematik bir biçimde sunulmaktadır. Bu deneysel prosedürler, hem bağlayıcı malzemenin hizmet süresince karşılaşılabilecek termal ve mekanik koşullara karşı davranışını anlamak hem de performans temelli sınıflandırma sistemine veri sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Reolojik karakterizasyon sürecinde kullanılan deney yöntemleri; bağlayıcının yüksek sıcaklıklarda viskoz davranışı, orta sıcaklıklarda elastik geri kazanım kapasitesi, düşük sıcaklıklarda ise kırılma ve çatlama direnci gibi mühendislik açısından temel parametrelerini ölçmeyi hedeflemektedir. Özellikle PG kapsamında uygulanan bu deneyler, bağlayıcının farklı çevresel koşullar ve trafik yükleri altında uzun vadeli performansını öngörebilmek adına geliştirilen standartlaştırılmış test protokollerini içermektedir. Bu kapsamda yer alan DSR, BBR, RV gibi cihazlarla yapılan ölçümler, bağlayıcının reolojik davranışını belirleyen viskoelastik parametrelerin sayısal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, bu testler yalnızca yeni bağlayıcılara değil, yaşlandırılmış numunelere (RTFO ve PAV sonrası) de uygulanarak bağlayıcının zamanla nasıl bir değişime uğradığı ve performansının nasıl etkilendiği de analiz edilmektedir. Böylece gerek tasarım aşamasında gerekse kalite kontrol süreçlerinde güvenilir ve bilimsel temellere dayalı kararlar alınması mümkün olmaktadır.

Superpave performans deneyleri özet gösterimine ait görsel Şekil 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Superpave deneyleri özet gösterim

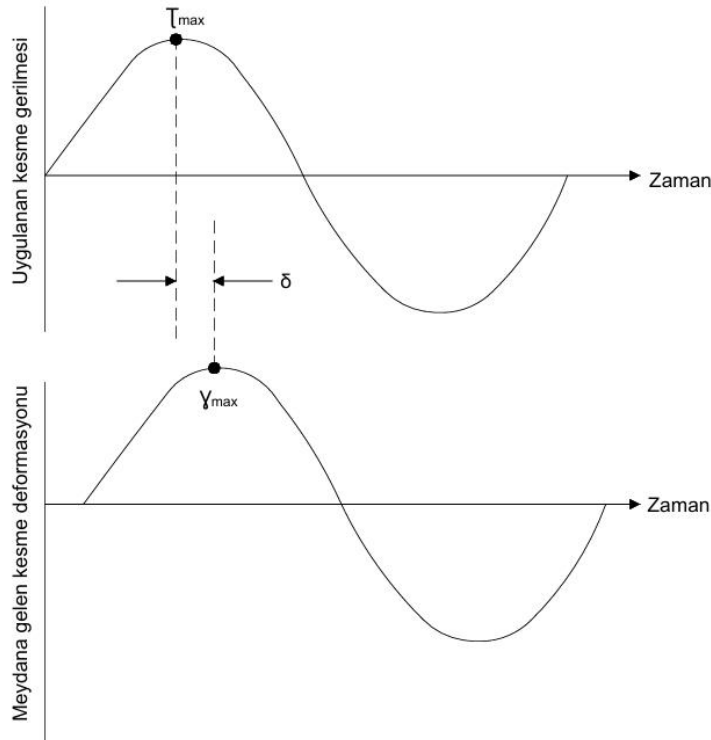
Superpave performans derecelendirme (PG) sistemi içerisinde bitümlü bağlayıcının viskoelastik özelliklerini ve kıvamlılığı tayin etmek için kullanılan en önemli yöntem DSR yöntemidir. DSR yöntemi bitümlü kaplamanın servis ömrü boyunca özellikle ilk dönemlerinde yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen tekerlek izine karşı direncin ve son dönemlerinde yorulma çatlaklarına karşı direncin tayin edilmesine olanak sağlamaktadır (Hunter vd, 2015; Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

4.3.1. Dinamik kesme reometresi (DSR)

Superpave performans derecelendirme (PG) sistemi içerisinde bitümlü bağlayıcının viskoelastik özelliklerini ve kıvamlılığı tayin etmek için kullanılan en önemli yöntem DSR yöntemidir. DSR yöntemi bitümlü kaplamanın servis ömrü boyunca özellikle ilk dönemlerinde yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen tekerlek izine karşı direncin ve son dönemlerinde yorulma çatlaklarına karşı direncin tayin edilmesine olanak sağlamaktadır (Hunter vd, 2015; Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Bitümlü bağlayıcıların sertlik ve viskoelastik davranışlarını orta ve yüksek servis sıcaklıklarında değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Orta servis sıcaklık aralığı 4 °C

ile 40 °C arasında 3 °C artış oranıyla değişmektedir. Yüksek servis sıcaklığı aralığı ise 46 °C ile 82 °C arasında 6 °C artış oranıyla değişmektedir.

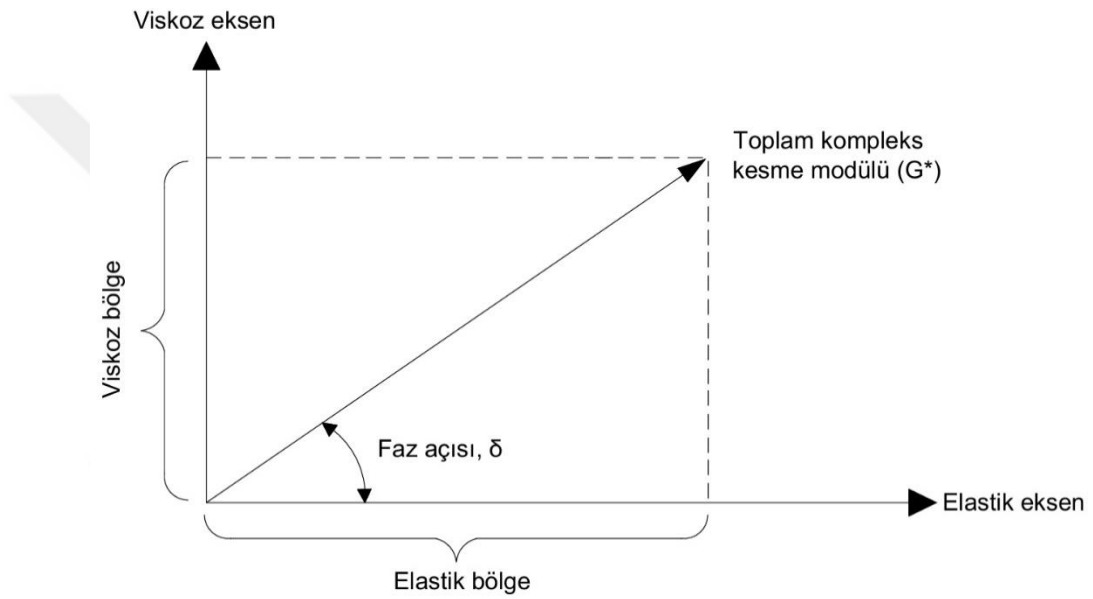
Viskoelastik bir malzeme olan bitümlü bağlayıcılar, yükleme karşısında yüklemenin ortadan kalmasıyla kısmen elastik, yükleme ortadan kalksa bile deformasyonun gerçekleşmesiyle de kısmen viskoz olarak davranmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda geri dönme kapasitesi düşük viskoz akışkan gibi davranan bitümlü bağlayıcı, düşük sıcaklıklarda ise elastik davranış sergilerken normal sıcaklıklarda hem viskoz hem de elastik davranış göstermektedir (Tunç, 2007). Bitümlü bağlayıcının kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri DSR (TS EN 14770) ile ölçülmektedir. Kompleks kesme modülü malzemenin sürekli olarak maruz kaldığı kesme gerilmelerinin oluşturduğu deformasyona karşı direnç olarak tanımlanmaktadır. Faz açısı ise kesme gerilmeleri ile gerçekleşen deformasyon arasındaki gecikme olarak ifade edilmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Faz açısının oluşumu

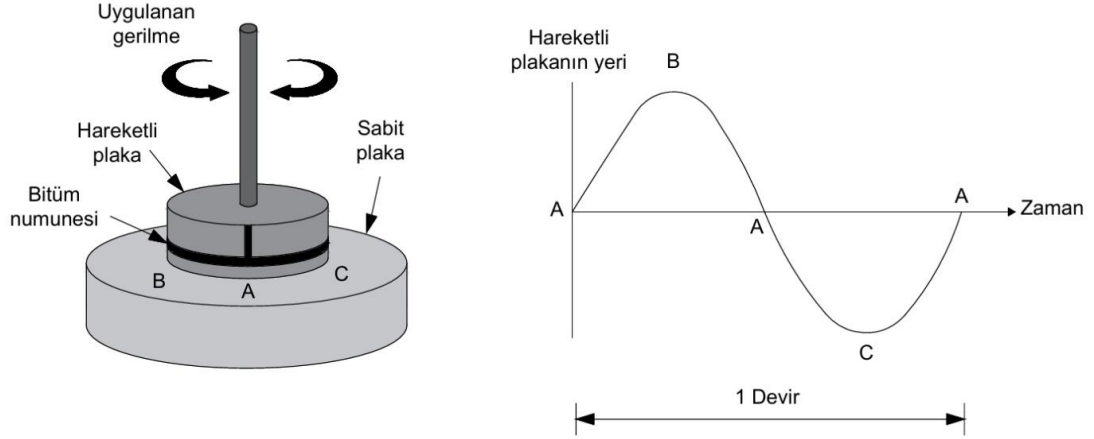
Bitümlü bağlayıcının viskozitesi ile faz açısı arasında doğrusal bir bağıntı bulunmaktadır (Şekil 4.3). Bitümlü bağlayıcının tekerlek izi direniminin yeterli olabilmesi için bağlayıcının sert ve elastik bir yapıda olması gerekmektedir. $G^*/\sin\delta$

(kompleks kesme modülünün elastik kısmı) değeri tekerlek izi faktörü olarak kabul edilmektedir ve bu değerin tekerlek izi direnimi açısından yüksek olması beklenmektedir. Kaplamanın servis ömrü boyunca tekrarlı yüklerin etkisi altında olması kaplamada çeşitli deformasyonlara sebep olmaktadır. Ayrıca bitümlü bağlayıcının yorulma çatlağı direniminin yeterli olabilmesi için ise bağlayıcının elastik fakat çok sert olmaması gerekmektedir. $G^* \cdot \sin \delta$ (kompleks kesme modülünün viskoz kısmı) değeri yorulma faktörü olarak kabul edilmektedir ve yorulma çatlağı direnimi açısından minimum olması beklenmektedir (Kaçaroğlu, 2019).



Şekil 4.3. Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışı

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcı numunesi ince bir tabaka halinde iki paralel plaka arasında gerçekleştirilir. Alt plaka sabit iken, üst plaka 10 rad/s (1,59 Hz) hız ile kesme gerilmesi meydana getirecek şekilde salınım yapmaktadır. DSR yükleme hızı 90 kilometrelik trafik hızını simüle etmektedir. DSR deneyi çalışma prensibinde 1 devir üst plakanın A noktasından B'ye gelip, tekrar A noktasından geriye doğru hareketle C noktasına ulaşıp A noktasına dönmesi hareketidir (Şekil 4.4). Bu hareket DSR deneyi sonuna kadar devam eder (Pavement Interactive, 2011; Federal Highway Administration, 2000).



Şekil 4.4. DSR cihazı çalışma prensibi

TS EN 14770 standardına göre gerçekleştirilen DSR deneyinde kullanılacak plaka çapı ve plakalar arasındaki boşluk miktarı bitümlü bağlayıcının türüne ve amacına bağlı olarak değişmektedir. Tekerlek izi dayanımı parametresinin belirlemek için saf veya kısa dönem yaşlandırılmış bitüm numuneleri ile 25 mm çapa sahip plaka ve 1000 mikron (1 mm) plakalar arası boşluk kullanılır. Yorulma dayanımını belirlemek için ise uzun dönem yaşlandırılmış bitüm numuneleri ile 8mm çapa sahip plaka ve 2000 mikron (2 mm) plakalar arası boşluk kullanılır.

DSR deneyinde bitümlü bağlayıcı, akışkan hale gelene kadar ısıtıldıktan sonra, belirtilen çaplardaki plakalar arasında disk formunu alabilmesi için, aynı çaplarda hazırlanmış silikon kalıplara uygun miktarda dökülür. Soğuyan numuneler, sıcak durumda ve cihaza takılı olan üst plakaya yerleştirilir. Disk formundaki numuneler, iki plaka arasında sıkıştırılmadan önce fazla kısımlarının kesilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, plakalar arasındaki boşluk, numune yerleştirilmeden önce, kullanılan numuneye bağlı olarak hedeflenen boşluk değerine ek olarak 50 mikron (0,05 mm) artırılarak ayarlanır. Plakalar bu konumdayken, numunenin fazlalıkları kesilerek boşluk hedef değere getirilir. Bu işlem tamamlandığında, plakalar arasındaki numunenin dışa doğru hafif bir şişme göstermesi beklenir. Numune sıcaklığının dengeye ulaşmasıyla deney başlatılır ve deney parametreleri bilgisayar destekli bir program yardımıyla kontrol edilerek sonuçlar kaydedilir. Uygulanan gerilme ve oluşan deformasyon arasındaki ilişkiye dayanarak, program tarafından G^* (kompleks modül) ve δ (faz açısı) değerleri hesaplanır.

Bitümün tekerlek izi direncini sağlayabilmesi için yeterince sert ve elastik bir yapıda olması gerekir. Bu özellik, “tekerlek izi faktörü” olarak bilinen $G^*/\sin\delta$ (kompleks kesme modülünün elastik bileşeni) değerinin yüksekliği ile ilişkilidir. Üstyapıda her bir trafik geçişi, tekrarlanan yüklerin etkisiyle birikerek deformasyona yol açan iş üretir. Bu işin bir bölümü elastik olarak geri kazanılırken, geri kalanı kaplama içerisinde kalıcı deformasyon veya çatlaklar şeklinde yayılır. Dolayısıyla, tekerlek izi oluşumunun önlenmesi için, kaplama içerisinde yayılan işin en düşük seviyede tutulması gereklidir. Sabit bir gerilme altında, her bir yükleme döngüsü sırasında kaplama içerisinde yayılan iş, aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir (Denklem 4.2).

$$W_c = \pi \sigma_0^2 \left(\frac{1}{G^*/\sin\delta} \right) \quad (4.2)$$

Burada; W_c , yükleme döngüsü başına kaplama içinde yayılan iş; σ , yükleme döngüsü sırasında uygulanan basıncı; G^* , kompleks kesme modülünü ve δ ise faz açısını ifade etmektedir.

Kaplama içerisinde yayılan enerjinin en aza indirilebilmesi için $G^*/\sin\delta$ değerinin mümkün olan en yüksek seviyede olması gereklidir. Bu nedenle, performans sınıflarının belirlenmesinde şartnamede; orijinal bitümlü bağlayıcılar için $G^*/\sin\delta$ faktörü alt sınır değeri 1,00 kPa, RTFOT ile kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise 2,20 kPa olarak belirlenmiştir. Bu sınır değerlerin altına düşülmesi durumunda deney sonlandırılır (Pavement Interactive, 2011).

Tez çalışması kapsamında saf bitüm, Geliştirilen Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile yaşlandırılan kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümler ve atık yağ grupları ile belirli oranlarda modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı numuneleri üzerine DSR deneyi uygulanarak numunelerin yüksek sıcaklık performansları AASHTO T 315 standardına uygun olarak belirlenmiştir. DSR analizi için Anton Paar marka SmartPave 102e model reometre cihazı kullanılmıştır. DSR analizleri İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret AŞ (İSFALT) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.3.2. Kiriş eğilme reometresi (BBR)

Asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklık koşullarındaki mekanik davranışlarını değerlendirmek amacıyla uygulanan Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) testi, AASHTO T 313 standardına uygun olarak gerçekleştirilir. BBR analizi, bağlayıcının düşük sıcaklıklarda rijitlik ve gerilim rahatlama kapasitesini ölçerek soğuk iklimlerde çatlama riskine karşı performansını belirlemek için kullanılır. Testte, belirli boyutlarda hazırlanmış bir numune üzerine sabit bir yük uygulanarak zamanla oluşan deformasyon ölçülür.

BBR testinde kullanılan numuneler, standartlara uygun olarak 125 mm uzunluk, 12.5 mm genişlik ve 6.25 mm kalınlık ölçülerinde hazırlanır. Test sırasında bu bağlayıcı numunesi, her iki ucundan desteklenen bir kiriş gibi yerleştirilir ve ortasına 980 ± 5 mN'lik sabit bir kuvvet uygulanır. Kuvvetin uygulama süresi 60 saniye olup, bu süre boyunca numunenin ortasında oluşan düşey sapma (defleksiyon) değeri hassas bir şekilde kaydedilir (Geçkil vd., 2011).

BBR testi, bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki davranışını gözlemlemek amacıyla genellikle 0 °C'den başlanarak -36 °C'ye kadar uzanan bir sıcaklık aralığında yürütülür. Bu aralık içinde sıcaklıklar çoğunlukla 6 °C'lik adımlarla azaltılarak test tekrarlanır. Amaç, bağlayıcının kırılma sıcaklığına kadar testin sürdürülmesi ve bu noktaya kadar elde edilen verilerle düşük sıcaklık performansının objektif olarak değerlendirilmesidir.

BBR analizi sonucunda rijitlik modülü (S) ve m-değeri olmak üzere iki temel parametre elde edilir (Wang vd., 2011). Rijitlik modülü, bağlayıcının uygulanan yüke karşı ne derece direnç gösterdiğini ifade ederken; m-değeri, bağlayıcının zamanla oluşan gerilimi ne kadar rahatlatabildiğini gösterir. Bu değerler asfaltın gevrekleşme eğilimi ve termal çatlama karşı dayanıklılığı hakkında doğrudan bilgi sağlar (Romero, 2019). AASHTO T 313 standardına göre, iyi performans sergileyen bir bağlayıcının $S(60 \text{ sn}) \leq 300 \text{ MPa}$ ve $m(60 \text{ sn}) \geq 0.300$ değerlerini sağlaması beklenir. Bu iki kriter, bağlayıcının çatlama karşı yeterli dirence sahip olup olmadığını ortaya koyar.

BBR testi sonuçları, asfalt bağlayıcının Superpave Performans Sınıfı (PG) belirlenirken temel alınır. Bu sınıflandırmada bağlayıcının hem yüksek hem de düşük sıcaklıktaki davranışı dikkate alınır. Yüksek sıcaklık performansı için DSR testi kullanılırken, düşük sıcaklık sınıfı BBR testiyle belirlenir. Deney numunesinin sünme sertliği Denklem 4.3 eşitliği ile belirlenir.

$$S_m(t) = \frac{P \times L^3}{4 \times b \times h^3 \times \delta(t)} \quad (4.3)$$

Burada; $S_m(t)$ t anındaki eğilme – sünme rijitliğini (MPa); P, ölçülen deney yükünü (N); L, destekler arası mesafeyi (mm); d, deney numunesinin genişliğini (mm); h, deney numunesinin kalınlığını (mm); $\delta(t)$, t anında deney numunesinin sapmasını (mm) ifade etmektedir.

Tez çalışması kapsamında saf bitüm, Geliştirilen Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile yaşlandırılan uzun dönem yaşlanmış bitümler ve atık yağ grupları ile belirli oranlarda modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı numuneleri üzerine BBR deneyi uygulanarak numunelerin yüksek sıcaklık performansları belirlenmiştir. BBR analizi için Cannon marka TE-BBR-F model reometre cihazı kullanılmıştır. BBR analizleri İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret AŞ (İSFALT) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.4. Bitümlü Karışımların Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı Yöntemine göre Hazırlanması ve Değerlendirilmesi

Superpave hacimsel karışım tasarımı yöntemi, asfalt karışımlarının uzun ömürlü ve performans temelli şekilde tasarlanmasını amaçlayan kapsamlı bir sistemdir. Bu yöntem, AASHTO R 35 ve AASHTO M 323 standartlarına dayalı olarak bağlayıcı içeriğinin, agrega gradasyonunun ve karışımın hacimsel özelliklerinin optimize edilmesine odaklanmaktadır (Tran vd., 2019). Tasarım süreci, asfaltın maruz kalacağı trafik ve iklim koşullarına göre belirlenen bağlayıcı performans derecesi (PG), uygun agrega yapısı ve optimum bitüm oranının tespitini içermektedir.

Sistemin ilk adımı, uygun agregaların seçilmesi ve Superpave agrega spesifikasyonlarına göre sınıflandırılmasıdır. AASHTO M 323 standardına göre,

agrega karışımının içinde yer alan iri ve ince malzemenin dengesi, boşluk yapısı ve kırmataş yüzey oranı gibi parametreler kontrol edilir. Bu agrega özellikleri, karışımın mekanik dayanımı ve uzun vadeli deformasyon direnci açısından kritik öneme sahiptir (Hettiarachchi ve Mampearachchi, 2025).

4.4.1. Agrega gradasyonunun belirlenmesi

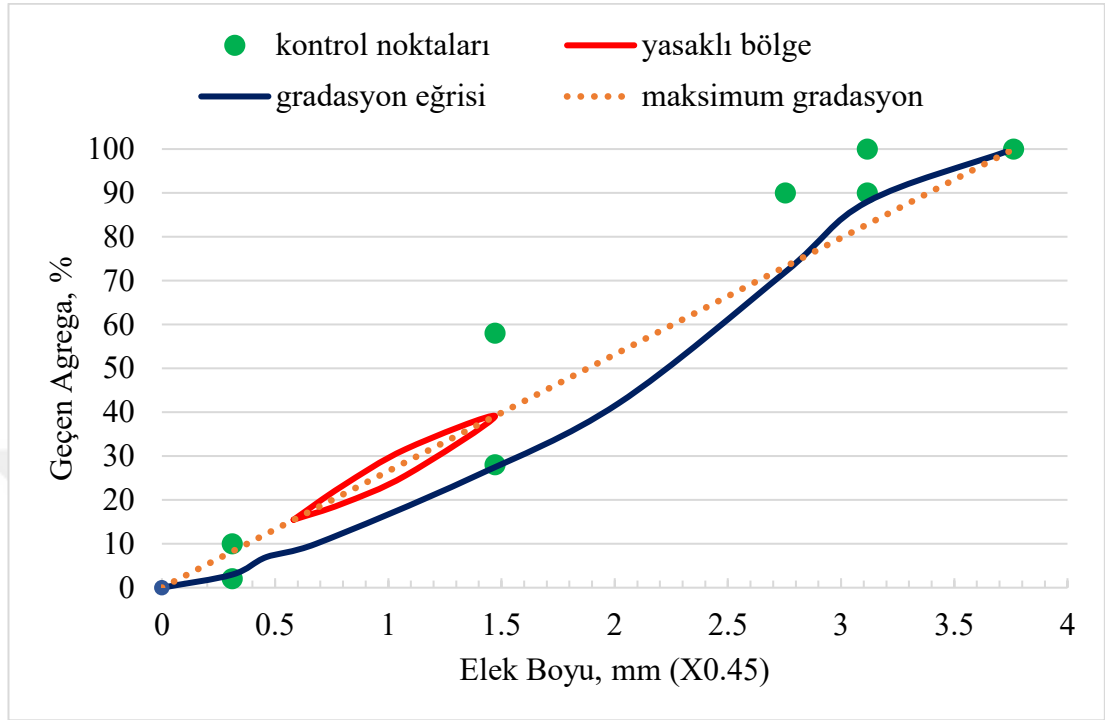
Tez çalışması kapsamında kullanılacak olan agrega gradasyonu Superpave hacimsel karışım tasarım yöntemine uygun olarak seçilmiştir. Tez çalışmasında nominal maksimum dane boyutu 12.5 mm olan bir agrega gradasyonu tercih edilmiştir. Superpave gradasyon tasarımı yapılırken, AASHTO MP2 standartlarına uygunluk sağlanması amacıyla dört temel kontrol noktası dikkate alınmalıdır. Bu kontrol noktaları; maksimum nominal dane boyu, nominal dane boyu, 2.36 mm ve 0.075 mm elek açıklıklarıdır. Ayrıca, gradasyon eğrisinin yasaklı bölgeye düşmemesi, karışım performansı açısından kritik bir tasarım gerekliliğidir. Bu kriterlerin tümü, AASHTO ve Federal Highway Administration (FHWA) tarafından belirlenen teknik esaslara dayanmaktadır (FHWA, 2002).

Çalışmada kullanılan tüm karışımlarda aynı gradasyon oranı kullanılmıştır. Sürekli gradasyon seçilerek oluşturulan numuneler için gradasyon limitleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Kullanılan agrega gradasyonu

Elek Çapı (mm)	Limit % Geçen	Gradasyon % Geçen	Ağırlık (gr)
19 mm (3/4")	100	100	0
12.5 mm (1/2")	88-100	88	144
9.5 mm (3/8")	72-90	72	192
4.75 mm (No. 4)	42-52	42	360
2mm (No. 10)	25-35	25	204
0.425 mm (No. 40)	10-20	10	180
0.18 mm (No. 80)	7-14	7	36
0.075 mm (No. 200)	3-8	3	48
Filler (<No. 200)	0	0	36
Toplam	%100	%100	1200

Bu gradasyon seçiminde Superpave tasarım yöntemine bağlı kalınmıştır ve oranlar buna göre seçilmiştir. Bu gradasyona ait gradasyon eğrisi Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Çalışmada kullanılan agrega gradasyon eğrisi

4.4.2. Optimum bitüm miktarının saptanması

Superpave asfalt karışım tasarım süreci, karışımda kullanılacak agregaların uygun gradasyonunun belirlenmesiyle başlar. Gradasyon içindeki her bir agrega fraksiyonu için özgül ağırlık değerleri ayrı ayrı hesaplanır. Aynı şekilde, kullanılacak bağlayıcı ister modifiye edilmiş ister modifiye edilmemiş olsun özgül ağırlığı belirlenir. Bu veriler doğrultusunda, önceden ısıtılmış agrega karışımı, belirlenen oranlarda hazırlanan bitüm ile karıştırılır. Karışımın homojenliği açısından, agregaların bitümle tam ve düzgün şekilde kaplanmış olması büyük önem taşır.

Optimum bitüm miktarının belirlenebilmesi için dört farklı agrega gradasyonu hazırlanarak deneysel çalışma başlatılır. Her bir gradasyon tipi, uygun sıcaklıklarda etüvde ısıtılarak, yoğurmalı sıkıştırma ekipmanının kalıp ekipmanları ve kullanılacak bitümlü bağlayıcı ile birlikte homojen sıcaklık koşullarına getirilir. Deney sürecinde, her bir agrega gradasyonu için ardışık %0.5 artışlarla dört farklı ağırlıkça bitüm oranı

uygulanır. Superpave hacimsel karışım tasarım yönteminde kullanılan Superpave yoğurmalı kompaktör (Gyratory) arazi koşullarında kaplamanın silindirik sıkıştırılmasını simüle etmektedir (Öz Kıcı ve Saltan, 2020). Hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar, Superpave kompaktör kalıbına yerleştirildikten sonra, uygulama yapılacak yol kesiminin trafik yoğunluğuna bağlı olarak belirlenen tasarım yoğurma sayısı kadar yoğrularak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 4.6). Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, her bir bitüm oranı için karışımın birim hacim kütlesi, hava boşluğu oranı, bitüm ile dolu boşluk oranı (VFA), ve mineral agregalar arası boşluk oranı (VMA) hesaplanır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, bitüm miktarına karşılık gelen grafikler çizilir. Hava boşluğu eğrisinden, KTŞ sınır değeri olan %4 hava boşluğu değerine karşılık gelen bitüm oranı tespit edilerek, bu değer optimum bitüm içeriği olarak belirlenir (KTŞ, 2013). Son aşamada, bu belirlenen bitüm miktarının VMA ve VFA grafiklerinde şartnameyle tanımlanmış alt ve üst sınır değerler içerisinde yer alıp almadığı kontrol edilerek optimum bağlayıcı oranının uygunluğu doğrulanır. Bu bütünsel analiz, asfalt karışımının performansa dayalı olarak en uygun tasarım parametreleriyle oluşturulmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.6. Superpave karışım numunesinin hazırlanması

Tez çalışması kapsamında saf bitümlü bağlayıcı, geliştirilen Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar ve yine Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile kısa ve uzun dönem yaşlandırılıp tez kapsamında kullanılan atık yağ grupları (atık yemeklik yağı, atık endüstriyel yağ ve atık motor yağı) ile 3 farklı oranda (%1, %3 ve %5) modifiye edilen bitümlü bağlayıcılar olmak üzere toplam 21 adet bitümlü bağlayıcının optimum bitüm oranları yukarıda belirtilen şekilde belirlenmiştir. Optimum bitüm oranı belirlenirken 21 adet bitümlü bağlayıcı numunesinin her birinden en az 4 adet numune hazırlanmıştır. İlerleyen bölümlerde numunelerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ve belirlenen optimum bitüm oranları ile ilgili detaylı bilgiler sunulacaktır.

4.4.3. Nem hassasiyetinin değerlendirilmesi

Asfalt kaplamalar, hizmet ömürleri boyunca çeşitli çevresel etkilere maruz kalır ve bu etkilerin başında yağış ve donma-çözülme döngüleri gelir. Özellikle suyun varlığı ve donarak hacim değiştirmesi, kaplama tabakasında çatlaklara, ayrışmalara ve yapısal zayıflıklara yol açabilir. Bu nedenle, kaplamanın uzun vadeli performansını belirleyen en önemli faktörlerden biri nem hassasiyetidir (Öz Kıcı, 2019). Suya karşı direnç göstermeyen karışımlar, zaman içinde dayanıklılığını kaybederek performans kaybı yaşar. Bu bağlamda, nem hassasiyetinin laboratuvar ortamında güvenilir yöntemlerle test edilmesi, asfalt karışımlarının tasarımında kritik bir aşamadır.

Superpave karışım tasarım sisteminde nem hassasiyeti özel olarak dikkate alınır ve bu hassasiyeti belirlemek amacıyla standartlaştırılmış bir prosedür uygulanır. Prosedüre uygun olarak hazırlanan numunelere İndirekt Çekme Dayanımı (ITS) testi uygulanır (AASHTO T 283).

İlk adımda, daha önce belirlenmiş optimum bitüm oranına göre numuneler hazırlanır. Bu numuneler oda sıcaklığında 24 saat boyunca bekletildikten sonra, üç farklı noktadan çap ve yükseklik ölçümleri yapılır. Ardından, numuneler 40 °C sıcaklıktaki etüvde 72 saat boyunca kurutulur ve bu sürenin sonunda kuru ağırlıkları hassas bir terazide kaydedilir. Kurutulan numuneler 25 °C'ye kadar soğutularak bir sonraki aşamaya hazırlanır. Şartlandırılmayacak numuneler, şartlandırılmış numune prosedürünün bitmesine kadar 25 °C sıcaklığında bekletilir. Diğer numuneler ise suya

karşı hassasiyetlerini belirlemek amacıyla şartlandırılır. Bu numuneler, 25 °C sıcaklıkta hazırlanmış su banyosuna alınır ve burada 24 saat süreyle bekletilir. Ardından, vakumlama işlemi için numuneler, üzeri en az 2.5 cm su ile örtülecek şekilde vakum kabına yerleştirilir. Numunelerin doygunluk oranı %55 ile %80 arasında olacak şekilde vakum uygulanır. Vakum sonrası numunelerin sudaki ve yüzey kuru doygun ağırlıkları ölçülerek kaydedilir. Tartımı tamamlanan numuneler, neme ve dona karşı dayanıklılığını test etmek amacıyla su geçirmez filmle kaplanarak -18 °C sıcaklıkta çalışan donma kabinine yerleştirilir. Bu ortamda 16 saat bekletilen numuneler, sonrasında 60 °C sıcaklıktaki su banyosuna aktarılır ve 24 saat boyunca bekletilir. Donma ve çözülme etkisinin tamamlanmasının ardından, numuneler son olarak 25 °C'lık su banyosunda 2 saat daha tutulur. Bu şartlandırma süreci tamamlandığında, şartlandırılmış ve şartlandırılmamış tüm numuneler indirekt çekme mukavemeti testine tabi tutularak dayanım değerleri elde edilir. Şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerin karşılaştırılmasıyla, asfalt karışımının nem hassasiyetine olan tepkisi bilimsel olarak değerlendirilmiş olur. Tüm numuneler için şartlandırılmamış ITS (ITS_{kuru}), şartlandırılmış ITS ($ITS_{ıslak}$) değerleri İndirekt Çekme Dayanımı (ITS) Denklem 4.4' e göre hesaplanır.

$$ITS = \frac{2 \times P_{max}}{\pi \times h \times D} \quad (4.4)$$

Burada ITS, indirekt çekme dayanımını (kPa); P_{max} , kırılma anındaki maksimum yükü (kN); h, numunenin kalınlığını (m); D, numunenin çapını (m) ifade etmektedir.

$ITS_{ıslak}$ ve ITS_{kuru} değerleri elde edildikten sonra Denklem 4.5 yardımıyla hesaplanan dolaylı çekme mukavemeti (TSR) değeri hesaplanmaktadır. Superpave hacimsel karışım tasarım yönteminde TSR değerinin şartname gereği minimum %80 olması gerekmektedir.

$$TSR = \frac{ITS_{ıslak}}{ITS_{kuru}} \times 100 \quad (4.5)$$

Burada, TSR dolaylı çekme mukavemeti oranını (%); $ITS_{ıslak}$ şartlandırılmış numunelerin dayanım değerini (kPa); ITS_{kuru} şartlandırılmamış numunelerin dayanım değerlerini (kPa) ifade edilmektedir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan 21 adet bitümlü bağlayıcının her birinden en az 3 adet şartlandırılmış, 3 adet şartlandırılmamış olmak üzere toplam 6 adet numunenin indirekt çekme dayanımlarının ve dolaylı çekme mukavemeti oranlarının belirlenmesi için yukarıda belirtilen deneysel adımlar uygulanmıştır. İlerleyen bölümlerde elde edilen sonuçlara ait detaylı bilgiler sunulacaktır.

4.5. Hamburg Tekerlek İzi (HWT) Deneyi

Hamburg Tekerlek İzi (HWT) deney yöntemi, asfalt kaplamaların neme karşı duyarlılığını ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek yükü altında oluşan kalıcı deformasyon davranışını değerlendirmek üzere geliştirilmiş gelişmiş bir laboratuvar prosedürüdür. Bu testte, su dolu ve sıcaklığı kontrol edilen bir banyo içerisinde, sıkıştırılmış asfalt numuneleri üzerine ileri-geri doğrultuda hareket eden bir çelik tekerlek aracılığıyla tekrarlı yükleme uygulanmaktadır. Uygulanan bu hareketli yükleme, kaplamanın gerçek trafik koşullarında maruz kalabileceği deformasyon ve nem kaynaklı hasarları simüle etmektedir (Walubita vd., 2020).

Deney sırasında elde edilen tekerlek izi derinliği ve deformasyon miktarı, asfalt karışımının kalıcı şekil değiştirme olan tekerlek izine karşı gösterdiği direnci doğrudan yansıtmaktadır. Aynı zamanda bu yöntem, agregaların mekanik bütünlüğü, bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışı ve asfalt karışımının nem hasarına karşı dayanımı gibi performans belirleyici unsurlar hakkında önemli ipuçları vermektedir. Özellikle bağlayıcının yumuşaklığı, agregaların yapısal bütünlüğü veya nem hasarına karşı direnç eksikliği gibi nedenlerle oluşabilecek erken deformasyonları tespit etmek amacıyla kullanılan HWT deneyi hem tasarım hem de kalite kontrol süreçlerinde kritik bir yer tutar. Numunelere uygulanan yük sayısı arttıkça tekerlek izi derinliği ölçülerek deformasyonun ilerleyişi takip edilebilmektedir. Bu sayede HWT, asfalt kaplamaların servis ömrü boyunca karşılaşacağı yüksek sıcaklık ve nem etkilerine karşı dayanımı önceden tahmin edebilme olanağı sunmaktadır.

Hamburg Tekerlek İzi (HWT) deneyi AASHTO T-324 standardına göre gerçekleştirilir. Laboratuvar ortamında sıkıştırılmış asfalt karışımları üzerinde, zamanla değişen sinüzoidal bir hareketle yük uygulayan çelik bandajlı tekerlek sistemi kullanılmaktadır. Bu yöntemle yalnızca laboratuvar ortamında hazırlanan numuneler değil,

sahadan alınmış karot örnekleri veya plaka tipindeki numuneler de test edilebilmektedir (İskender vd., 2022). Deneyin temel amacı, asfalt karışımının tekrarlı yükleme ve nem etkisi altında deformasyon davranışını ve bağlayıcının agregadan ayrılma eğilimini değerlendirmektir. Testte kullanılan çelik bandajlı tekerlek 203.2 mm çapında ve 47 mm genişliğindedir. Tekerlek, numune üzerine 705 ± 4.5 N büyüklüğünde bir kuvvet uygular. Deney süresince bu tekerlek, numunenin bir ucundan diğer ucuna doğru ileri-geri hareket eder ve dakikada 52 ± 2 geçiş gerçekleştirmektedir. Tekerlek bu hareketi yaparken, numune üzerinde meydana gelen kalıcı deformasyon, yani tekerlek izi derinliği, hassas bir Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT) sensörü aracılığıyla sürekli olarak izlenmekte ve kaydedilmektedir. Elde edilen veriler, tekerlek geçiş sayısına karşılık deformasyon derinliğini gösteren bir grafikte ifade edilmektedir. Bu grafik üzerinde deformasyon eğrisinin ani bir şekilde yükselmesi, asfalt bağlayıcının agrega yüzeyinden ayrılmaya başladığını yani nem hasarının etkisini gösterebilir. Böylece, bu test ile hem kalıcı deformasyon direnci hem de suya karşı dayanıklılık düzeyi aynı anda değerlendirilebilmektedir.

Tez çalışmasında HWT deneyine tabi tutulacak bitümlü karışım numunelerinin üretimi, AASHTO T 312 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Optimum bağlayıcı oranına uygun olarak hazırlanan karışımlar, standartlara uygun şekilde karıştırılıp sıkıştırıldıktan sonra, HWT deneyine yönelik ölçülere getirilmek üzere uygun boyutlarda kesilmiştir (Şekil 4.7). Kesilerek hazırlanan numunelerin yerleştirileceği montaj tablaları, deney öncesinde 50 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosuna alınarak 30 dakika boyunca şartlandırılmıştır. Daha sonra numuneler HWT cihazına yerleştirilerek test süreci başlatılmıştır. Çelik bandajlı tekerlek, her biri bir gidiş ve bir dönüşten oluşan toplamda 20.000 geçiş gerçekleştirecek şekilde programlanmıştır. Ancak, eğer numunenin merkez noktasında ölçülen tekerlek izi derinliği 12.5 mm'ye ulaşırsa, sistem şartname sınır değerine ulaşıldığı için otomatik olarak durdurulmaktadır (Yin vd., 2014). Deneyin tamamlanmasının ardından, elde edilen veriler kullanılarak geçiş sayısına karşılık gelen deformasyon (çökme) değerleri bir grafik üzerinde gösterilir. Bu grafik yardımıyla, karışımın tekerlek yükü altındaki kalıcı deformasyon davranışı detaylı şekilde analiz edilir. Böylece hem deformasyonun ilerleyiş süreci hem de malzemenin neme ve tekrarlı yüke karşı direnci

hakkında kapsamlı bir değerlendirme yapılabilmektedir. Elde edilen HWT analizi sonuçları ileriki bölümlerde detaylı şekilde sunulacaktır.



Şekil 4.7. Hamburg numunesinin hazırlanması

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde ilk olarak doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv yaşlandırma metodu ile hem kısa dönem hem de uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar her atık yağ grubu için ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında ilgili atık yağ ile yüksek devirli karıştırıcı vasıtasıyla modifiye edilmiştir. Modifiye edilen bitümlere; bağlayıcının karakterizasyonu için hem konvansiyonel (standart) bitüm deneyleri hem de performans temelli bitüm testleri yapılmıştır. Ayrıca, malzemelerin kimyasal bileşimini ortaya koymak amacıyla elementel analizler de gerçekleştirilmiştir.

Asfalt karışımlarının optimum bitüm oranları, Superpave karışım tasarımı prosedürleri doğrultusunda belirlenmiş ve bu oranlar doğrultusunda hazırlanan numuneler mekanik dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Bu testler sonucunda karışımların neme karşı hassasiyeti ve dayanım özellikleri değerlendirilmiştir. Karışımların tekerlek izi deformasyonuna karşı direncini ortaya koymak amacıyla ise Hamburg Tekerlek İzi Deneyi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen tüm sonuçlar saf bitüm özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

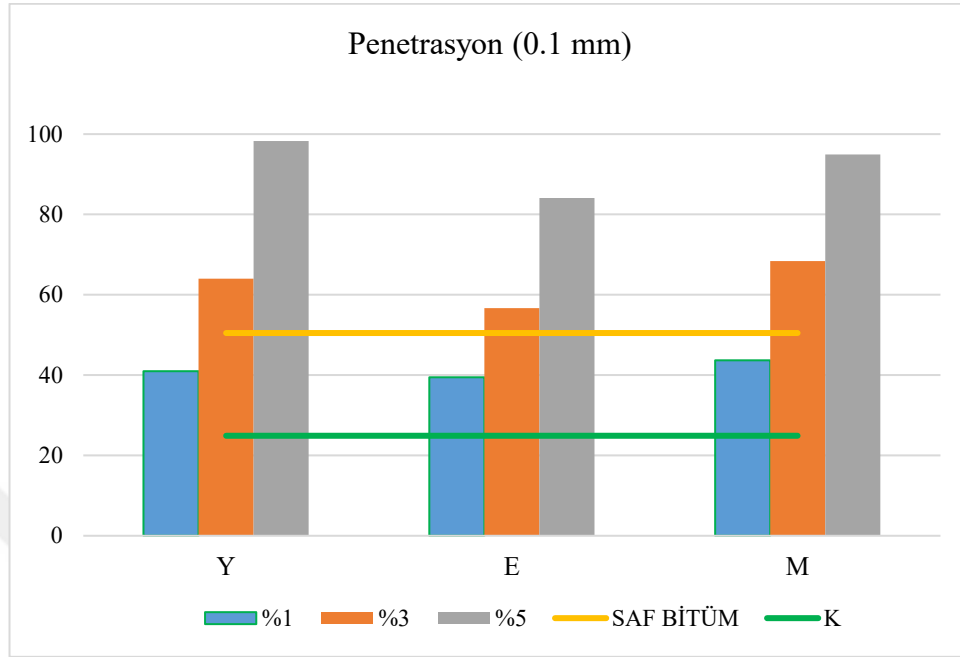
5.1. Standart Bitümlü Bağlayıcı Deneyleri Sonuçları

Atık yemeklik, endüstriyel ve motor yağlar ile gerçekleştirilen bitüm modifikasyonu sonrasında elde edilen bitümlü bağlayıcılara uygulanan standart bağlayıcı deneylerinden olan yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite deneyi ve penetrasyon analizine ait sonuçlar bu bölüm altında verilmiştir.

5.1.1. Penetrasyon deneyi sonuçları

Bitümlü bağlayıcıların kıvamını belirlemede kullanılan penetrasyon deneyi sayesinde bitümlü bağlayıcının sertlik ve kıvamlılık durumu tespit edilmektedir. Sertlik ve kıvamlılık durumu ile bitümün karışım tasarımında bağlanma yeteneği öngörülmektedir.

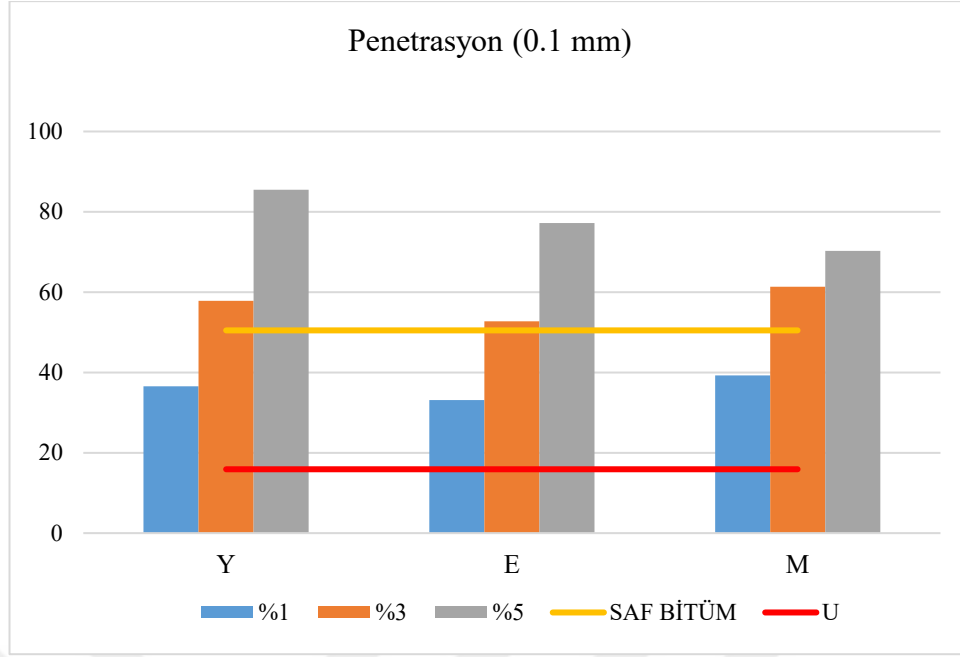
Çalışma kapsamında elde edilen ortalama penetrasyon değerleri kısa dönem yaşlandırma için Şekil 5.1’ de verilmiştir.



Şekil 5.1. Kısa dönem yaşlandırma penetrasyon değerleri

Elde edilen penetrasyon değerlerine göre çalışma kapsamında kullanılan bütün atık yağ grupları için atık yağ modifikasyon yüzdesinin artması penetrasyon değerini yükseltmiştir. En yüksek penetrasyon değeri %5 oranında atık yemeklik yağ modifikasyonuna aittir. Çalışmada kullanılan tüm atık yağ grupları için modifikasyonda kullanılan atık yağ oranının bağlayıcının penetrasyon sınıfını değiştirdiği gözlenmiştir. Kısa dönem yaşlandırma koşullarında her atık yağ grubu için ağırlıkça %3 oranında atık yağ içeren her bir yağ grubuna ait modifiye bitümlerin ve ağırlıkça %1 oranında atık endüstriyel ve motor yağ içeren bitümlerin saf bitüm sınıfı (50/70) içerisinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca %1 oranında atık motor yağı içeren modifiye bitüm saf bitüme en yakın penetrasyon değerini vermektedir.

Çalışma kapsamında elde edilen ortalama penetrasyon değerleri uzun dönem yaşlandırma için Şekil 5.2’ de verilmiştir.



Şekil 5.2. Uzun dönem yaşlandırma penetrasyon değerleri

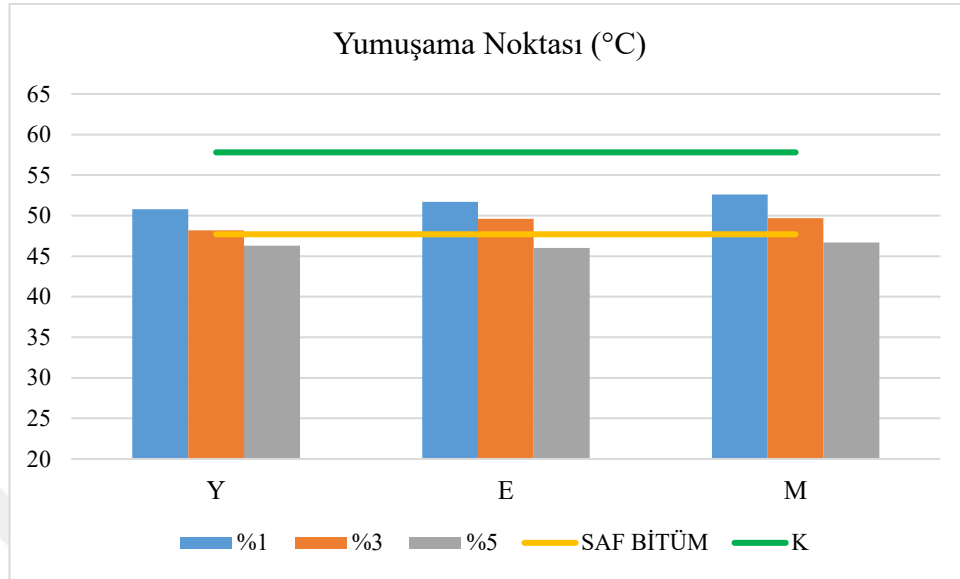
Elde edilen penetrasyon değerlerine göre uzun dönem yaşlandırma koşullarında her bir atık yağ grubu için ağırlıkça yüzdesel atık yağ oranı arttıkça penetrasyon değerinin ciddi oranda arttığı gözlenmektedir. Penetrasyon deney sonuçlarına göre her atık yağ grubu için ağırlıkça %3 oranında atık yağ içeren her bir yağ grubuna ait modifiye bitümlerin saf bitüm sınıfı (50/70) içerisinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca %3 oranında atık endüstriyel yağ içeren modifiye bitüm saf bitüme en yakın penetrasyon değerini vermektedir.

Penetrasyon değerinin atık yağ yüzdesinin artışı ile artmış olması elde edilen modifiye bitümlerin yumuşak bir kıvama geçtiğini göstermektedir.

5.1.2. Yumuşama noktası deneyi sonuçları

Yumuşama noktası deneyi bitümlü bağlayıcıların kıvamını tayin etmekte kullanılan bir deneydir. Yumuşama noktası deneyi ile bitümlü bağlayıcının sıcaklık altında akma davranışı gözlenebilmektedir. Bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri oldukça karmaşık bir yapıdadır. Aynı penetrasyon değerine sahip bitümlü bağlayıcılar farklı yumuşama noktası değerlerine sahip olabilmektedir. Bu sebeple yumuşama noktası tayini önem kazanmaktadır.

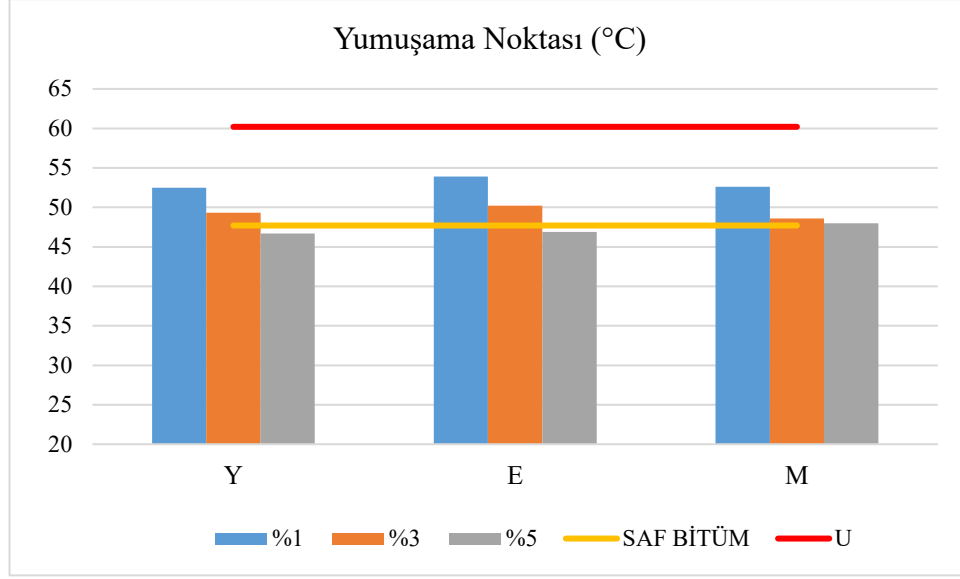
Deneysel yöntemle elde edilen ortalama yumuşama noktası değerleri için karşılaştırmalı grafik kısa dönem yaşlandırma için Şekil 5.3’ de sunulmuştur.



Şekil 5.3. Kısa dönem yaşlandırma yumuşama noktası değerleri

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilere göre uzun dönem yaşlandırma için her atık yağ grubunda da ağırlıkça %3 oranında atık yağ ile modifiye edilen bitümlerin saf bitümle benzer yumuşama noktasına sahip olduğu görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %3 oranında atık yemeklik yağ kullanımının saf bitüme en yakın yumuşama noktası değerini verdiği gözlenmiştir. Kullanılan ağırlıkça atık yağ yüzdesi arttıkça yumuşama noktası değerinde düşüş gözlenmektedir. Bitümlü bağlayıcıların kullanımının daha uygun olacağı bölgeler için yumuşama noktalarına bakılarak çıkarım yapılabilir.

Tez çalışması kapsamında uzun dönem yaşlandırma için elde edilen ortalama yumuşama noktası değerleri karşılaştırmalı grafiği Şekil 5.4’ de sunulmuştur.



Şekil 5.4. Uzun dönem yaşlandırma yumuşama noktası değerleri

Deneyisel çalışma sonucunda elde edilen verilere göre uzun dönem yaşlandırma için her atık yağ grubunda da ağırlıkça %5 oranında atık yağ ile modifiye edilen bitümlerin saf bitümle benzer yumuşama noktasına sahip olduğunu görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %5 oranında atık motor yağı kullanımının saf bitüme en yakın yumuşama noktası değerini verdiği gözlenmiştir. Kullanılan ağırlıkça atık yağ yüzdesi arttıkça yumuşama noktası değerinde düşüş gözlenmektedir. Bitümlü bağlayıcıların kullanımının daha uygun olacağı bölgeler için yumuşama noktalarına bakılarak çıkarım yapılabilir.

5.1.3. Düktilite deney sonuçları

Bitümlü bağlayıcıların elastik ve sünek davranışlarını değerlendirmek amacıyla kullanılan düktilite parametresi, malzemenin deformasyon kapasitesini ortaya koyan önemli bir göstergedir. Yüksek düktiliteye sahip bitümlü bağlayıcılar, agrega yüzeyiyle daha etkili bir yapışma sağlayarak asfalt karışımının bütünlüğünü ve dayanımını artırır.

Düktilite deneyi, 25 °C sabit sıcaklıkta ve 50 mm/dk sabit çekme hızıyla, standart ölçülerdeki bir briket kalıbına yerleştirilen bitümlü bağlayıcının uçlarından çekilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında, bağlayıcının kopmadan önce uzadığı mesafe ölçülür ve sonuç santimetre cinsinden ifade edilir. Elde edilen bu değer,

bağlayıcının süneklik kapasitesi hakkında doğrudan bilgi sunar ve özellikle düşük sıcaklık performansı ile yol kaplamalarının çatlama direnci üzerinde belirleyici bir rol oynar. Çalışma kapsamında elde edilen ortalama düktilite değerleri kısa dönem yaşlandırma için Çizelge 5.1’te verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kısa dönem yaşlandırma için düktilite değerleri

Atık Yağ	S	K	Ağırlıkça Oranlar		
			1%	3%	5%
Y	>100	87	>100	>100	>100
E			>100	>100	>100
M			>100	>100	>100

Karayolları Teknik Şartnamesi gereği modifiye bitümlerin düktilite değeri >100 cm olmalıdır. Hem saf bitümün hem de farklı oranlarda atık yağ ile modifiye edilen bitümlerin sınır değeri sağladığı görülmektedir. Ancak geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile kısa dönem yaşlandırılan bitümlü bağlayıcının şartname sınır değerini karşılamadığı görülmektedir.

Çalışma kapsamında elde edilen ortalama düktilite değerleri uzun dönem yaşlandırma için Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Uzun dönem yaşlandırma için düktilite değerleri

Atık Yağ	S	U	Ağırlıkça Oranlar		
			%1	%3	%5
Y	>100	65	>100	>100	>100
E			>100	>100	>100
M			>100	>100	>100

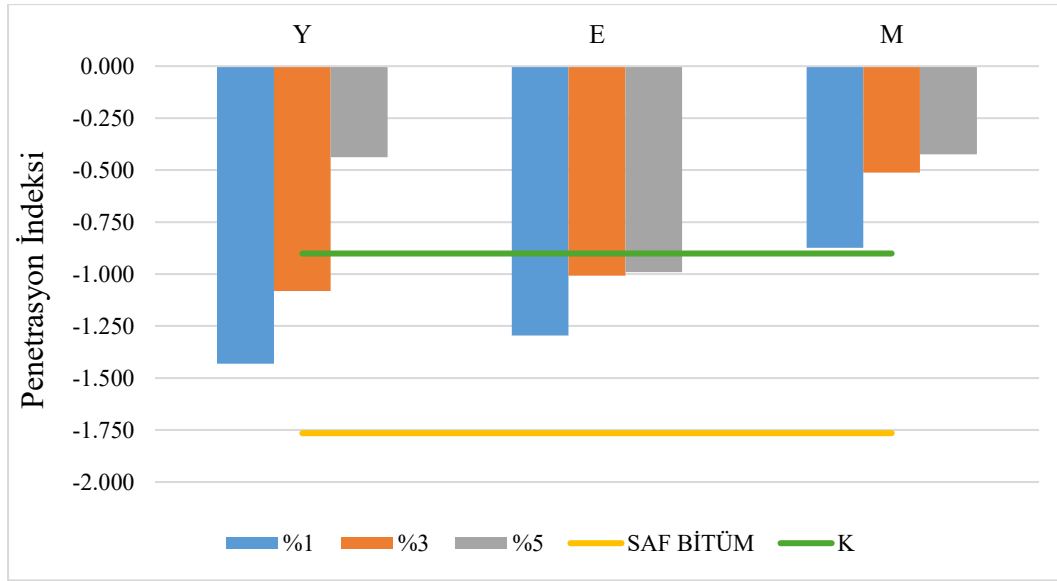
Elde edilen sonuçlardan hareketle uzun dönem yaşlandırıldıktan sonra farklı oranlarda atık yağ ile modifiye edilen bitümlerin şartname sınır değerini sağladığı görülmektedir. Ancak geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılan bitümlü bağlayıcının şartname sınır değerini karşılamadığı görülmektedir. Bitümlü bağlayıcıların esneklik-süneklik davranışını belirlemeye yarayan düktilite; bitümlü bağlayıcının agrega karışımı ile bağlanma kabiliyetini göstermektedir.

5.1.4. Penetrasyon indeksi (PI) analizi sonuçları

Literatür incelemeleri, bitümlü bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetini belirlemek amacıyla kullanılan penetrasyon indeksi (PI) hakkında farklı değerlendirme yaklaşımlarını ortaya koymuştur. Bu yaklaşımlardan ilki, PI değerinin sıcaklık duyarlılığıyla doğrudan ilişkili olduğunu ifade etmektedir. Buna göre, yüksek sıcaklık duyarlılığına sahip bitümlerin PI değeri yaklaşık -3 seviyelerinde iken, yoğun şekilde oksitlenmiş ve düşük sıcaklık duyarlılığı gösteren bitümlerde bu değer +7 civarına kadar çıkabilmektedir. Başlangıçta, PI değeri sıfırın altında olan bitümler düşük performanslı ve yüksek sıcaklık duyarlılığına sahip olarak değerlendirilmiş; bu nedenle uygun görülmemiştir. Ancak güncel yaklaşımlar, PI değeri -1 ile +1 aralığında olan bitümlü bağlayıcıların kabul edilebilir performans sergilediğini belirtmektedir (Brennan & O'Flaherty, 2002). Illston ve Domone (2001) ise daha geniş bir aralık önererek, -2 ile +2 arasında değişen PI değerlerinin de pratikte yeterli olduğunu ifade etmektedir. Yazarlar, düşük PI değerine sahip bitümlerin Newtonyen akış davranışına daha yakın olduğunu ve düşük sıcaklıklarda gevrekleşme eğiliminde olduğunu vurgulamaktadır. Buna karşın, yüksek PI değerine sahip bitümler, viskoelastik özellikler gösterme eğiliminde olup, zamana bağlı deformasyonlara karşı daha dirençli bir yapı sergilemektedir. Bu durum, yüksek PI'ya sahip bitümlerin kalıcı deformasyonlara karşı daha üstün performans göstermesine olanak tanımaktadır.

PI değeri bağlayıcının kullanılacağı iklim bölgesine uygunluğunun belirlenmesinde, modifikasyonun etkinliğinin değerlendirilmesinde ve kalite kontrol süreçlerinde önemli bir göstergedir. Ancak yalnızca referans değeri olarak kullanılmalı, bağlayıcının gerçek reolojik davranışını anlamak için dinamik kesme reometresi (DSR) ve eğilen kiriş reometresi (BBR) gibi gelişmiş reolojik testlerle desteklenmelidir.

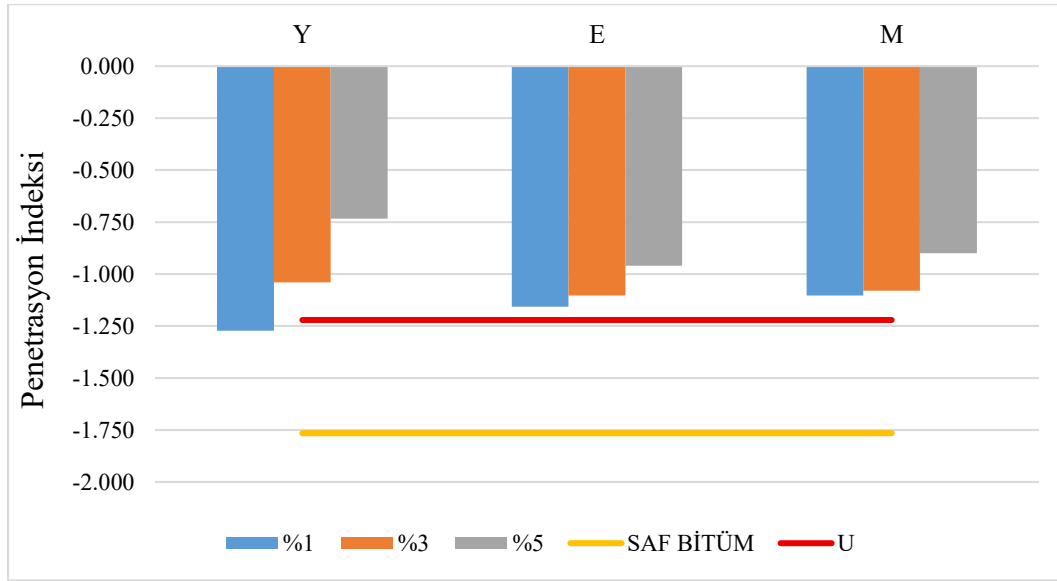
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen Penetrasyon indeksi analizi sonuçları kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için Şekil 5.5'te sunulmuştur.



Şekil 5.5. Kısa dönem yaşlandırma penetrasyon indeksi değerleri

Elde edilen veriler, saf bitümün PI değerinin yaşlanma sonrası kabul edilebilir aralık olan -1 ile +1 sınırlarında kaldığını göstermekte olup, bu durum saf bitümün belirli bir sıcaklık aralığında dengeli bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, atık yağ modifikasyonu yapılan numunelerde düşük katkı oranlarında (özellikle %1) PI değerleri saf bitüme kıyasla daha negatif çıkmış ve sıcaklık hassasiyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, katkıların başlangıçta bağlayıcının düşük sıcaklık kırılma noktasını artırabileceğini göstermektedir. Ancak katkı oranı %5'e çıkarıldığında, PI değerleri belirgin biçimde iyileşmiş ve bazı numuneler saf bitümle benzer ya da daha iyi performans sergilemiştir. Özellikle atık motor yağı içeren numuneler, kısa dönem yaşlandırılmış bitüme kıyasla daha istikrarlı PI değerleri sunarak hem düşük sıcaklıklarda gevreklemeye karşı direnç hem de yüksek sıcaklıklarda deformasyona karşı dayanım açısından avantaj sağlamıştır.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen Penetrasyon indeksi analizi sonuçları uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için Şekil 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.6. Uzun dönem yaşlandırma penetrasyon indeksi değerleri

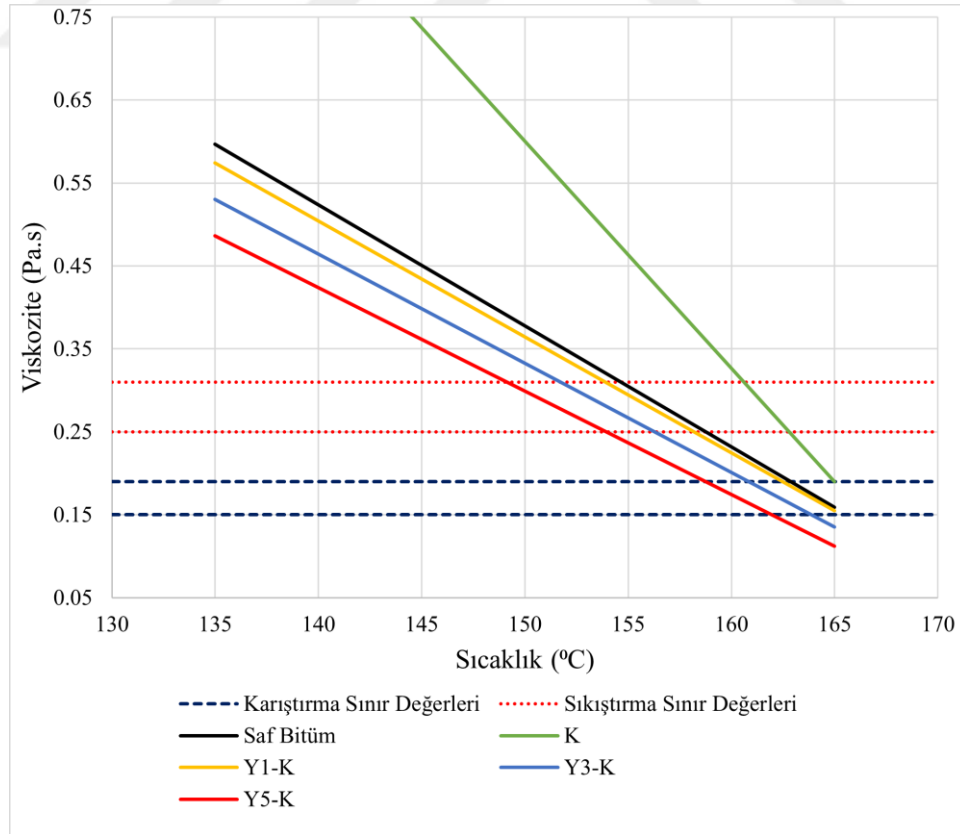
Elde edilen sonuçlara göre atık yağ modifiye bitümlerde PI değerleri, uzun dönem yaşlandırılmış bitüme göre daha az negatif çıkmış ve modifikasyon oranı arttıkça yaşlanmanın olumsuz etkilerinin belirgin biçimde azaldığı görülmüştür. Özellikle %5 oranında atık motor yağı içeren numunelerde PI değerleri -1 seviyesine yaklaşarak hem yaşlandırılmış saf bitümden hem de diğer atık yağ türlerinden daha üstün performans sergilemiştir. Atık endüstriyel ve yemeklik yağ modifiyeli numuneler de modifikasyon oranı arttıkça PI yönünden iyileşme göstermiştir; ancak atık motor yağı, uzun dönem yaşlanma koşullarında bağlayıcının termal stabilitesini en etkin şekilde koruyan gençleştirici katkı türü olarak öne çıkmıştır. Bu sonuçlar, atık motor yağının uygun oranlarda kullanılması durumunda uzun süreli çevresel etkiler altında dahi bağlayıcının sıcaklık duyarlılığının azaltılabileceğini ve performans sürekliliğinin sağlanabileceğini göstermektedir.

5.1.5. Dönel viskozimetre deney sonuçları

Dönel viskozite, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akma davranışını değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan reolojik bir ölçümdür. Bu ölçüm, özellikle asfalt karışımlarında karıştırma ve sıkıştırma işlemleri sırasında bitümün işlenebilirliğini belirlemek için kritik öneme sahiptir. Çalışmada kullanılan bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenebilmesi amacıyla, dönel viskozimetre kullanılarak viskozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dönel viskozimetre

deneyi 135 °C ve 165 °C olmak üzere iki ayrı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıcaklık-viskozite verileri kullanılarak, şartnamede belirtilen viskozite eşik değerleri ile grafiksel olarak kesişim noktaları belirlenmiş ve bu sayede işlem sıcaklık aralıkları tespit edilmiştir. Karıştırma işlemi için hedeflenen viskozite aralığı şartname sınır aralığı olan 0.17 ± 0.02 Pa·s, sıkıştırma işlemi için ise 0.28 ± 0.03 Pa·s olarak alınmıştır. Bu viskozite değerleri ile grafik üzerinde yapılan analizler, optimum işlem sıcaklıklarının belirlenmesinde temel kriterleri oluşturmuştur.

Dönel viskozimetre deney sonuçlarının net şekilde değerlendirilebilmesi adına her atık yağ grubuna ait kısa ve uzun dönem yaşlandırma için 2 ayrı grafik elde edilmiştir. Elde edilen dönel viskozimetre verileri değerlendirildiğinde tüm atık yağ modifikasyonları için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının saf bitüme kıyasla düştüğü görülmektedir. Ayrıca modifikasyon oranının artması ile bu düşüş eğilimi artmaktadır. Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile kısa dönem yaşlandırılmış ardından atık yemeklik yağ ile 3 farklı oranda gençleştirilmiş numunelerin dönel viskozimetre deney sonuçları Şekil 5.7’de verilmiştir.

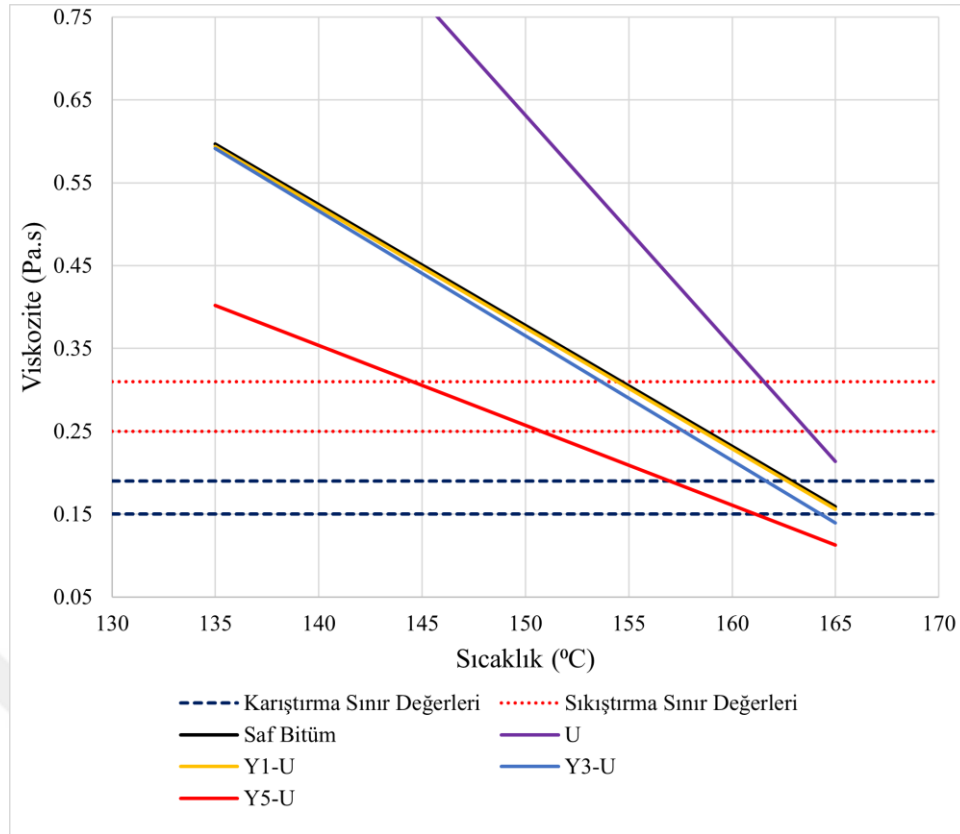


Şekil 5.7. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kısa dönem yaşlandırılıp atık yemeklik yağ modifikasyonu ile gençleştirilen bitümler arasında en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları %5 atık yemeklik yağ içeren Y5-K numunesinde görülmüştür. Şekil 5.7 ve detaylı şekilde değerlendirildiğinde görüldüğü gibi saf bitümün karıştırma sıcaklığı 164.3 °C, sıkıştırma sıcaklığı ise 156.75 °C'dir. Kısa dönem yaşlandırılmış karıştırma sıcaklığı 165.75 °C, sıkıştırma sıcaklığı ise 161.7 °C'dir. Atık yemeklik yağ modifikasyonu karıştırma sıcaklıkları sırasıyla Y1-K için 163.95 °C, Y3-K için 162.4 °C, Y5-K için ise 160.4 °C'dir. Yine Şekil 5.7'de görüldüğü gibi sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla Y1-K için 156.05 °C, Y3-K için 154 °C, Y5-K için ise 151.55 °C'dir. Atık motor yağ modifikasyonunda en yüksek katkı oranı %5 için (Y5-K) saf bitüme kıyasla karıştırma sıcaklığı yaklaşık olarak %2.4, sıkıştırma sıcaklığı ise yaklaşık olarak %3.3 oranında azalmıştır. Tüm kısa dönem atık yemeklik yağ modifikasyonu için değerlendirme yapıldığında daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları işlenebilirliğin saf bitüme oranla arttığının kanıtıdır. İşlenebilirliğin artması ile düşük sıcaklıklarda kaplama üretim ve inşaa çalışmalarına imkân sağladığından, bitümlü bağlayıcının atık yağlar ile modifikasyonu ile üstyapı inşaa maliyeti ve harcanan enerji azalacaktır.

Bitümlü bağlayıcının daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında hedef viskozite değerlerine ulaşılabilmesi, daha az enerji ile yeterli akışkanlığa erişmesini mümkün kılmakta; bu durum, asfalt üretim tesislerinde daha düşük sıcaklıklarda üretimin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle enerji tüketiminin azaltılması ve emisyon kontrolünün ön plana çıktığı günümüz sürdürülebilir altyapı politikaları çerçevesinde, bağlayıcının viskozitesindeki bu tür düşüşler hem ekonomik verimliliği artırmakta hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sunmaktadır. Bu bağlamda, viskoziteye bağlı sıcaklık optimizasyonu, sürdürülebilir asfalt teknolojileri için önemli bir tasarım kriteri haline gelmiştir.

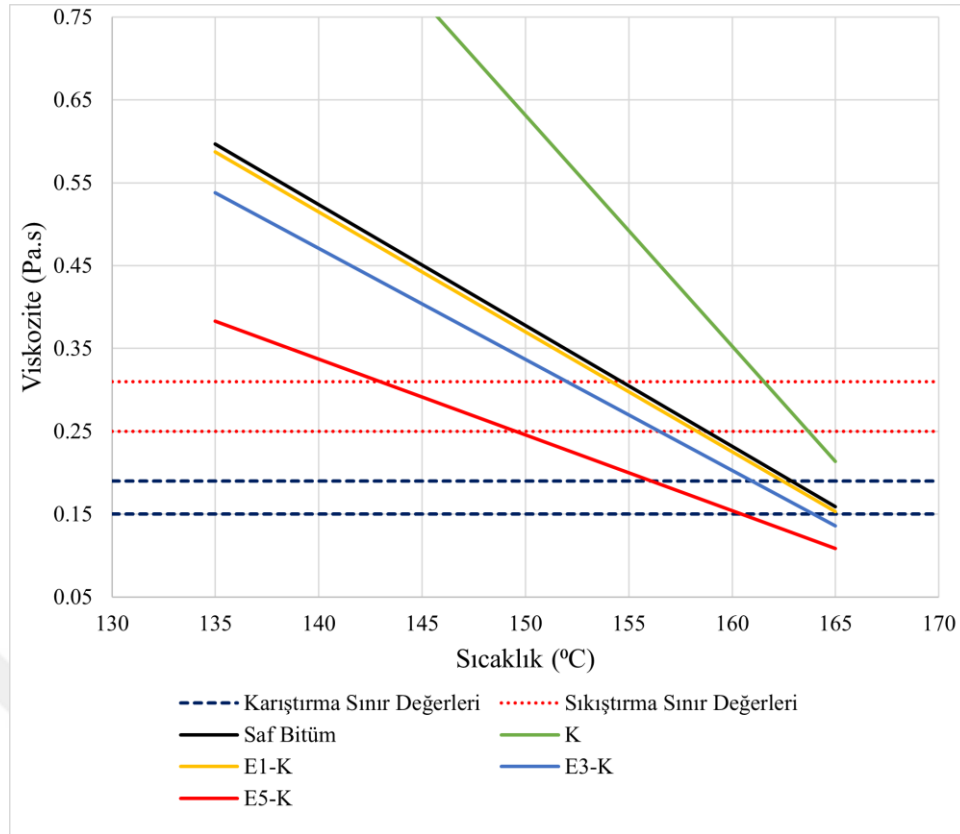
Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılmış ardından atık yemeklik yağ ile 3 farklı oranda gençleştirilmiş numunelerin dönel viskozimetre deney sonuçları Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda uzun dönem yaşlandırılıp atık yemeklik yağ modifikasyonu ile gençleştirilen bitümler arasında en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları %5 atık yemeklik yağ içeren Y5-U numunesinde kaydedilmiştir. Şekil 5.8 detaylı şekilde değerlendirildiğinde görüldüğü gibi saf bitümün karıştırma sıcaklığı 164.3 °C, sıkıştırma sıcaklığı ise 156.75 °C'dir. Uzun dönem yaşlandırılmış karıştırma sıcaklığı 166.55 °C, sıkıştırma sıcaklığı ise 162.65 °C'dir. Atık yemeklik yağ modifikasyonu karıştırma sıcaklıkları sırasıyla Y1-U için 164.1 °C, Y3-U için 162.95 °C, Y5-U için ise 159.1 °C'dir. Yine Şekil 5.8'de görüldüğü gibi sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla Y1-U için 156.55 °C, Y3-U için 155.7 °C, Y5-U için ise 147.7 °C'dir. Uzun dönem yaşlandırma koşullarında atık yemeklik yağ modifikasyonunda en yüksek katkı oranı %5 için (Y5-U) saf bitüme kıyasla karıştırma sıcaklığı yaklaşık olarak %3.2, sıkıştırma sıcaklığı ise yaklaşık olarak %5.8 oranında azalmıştır.

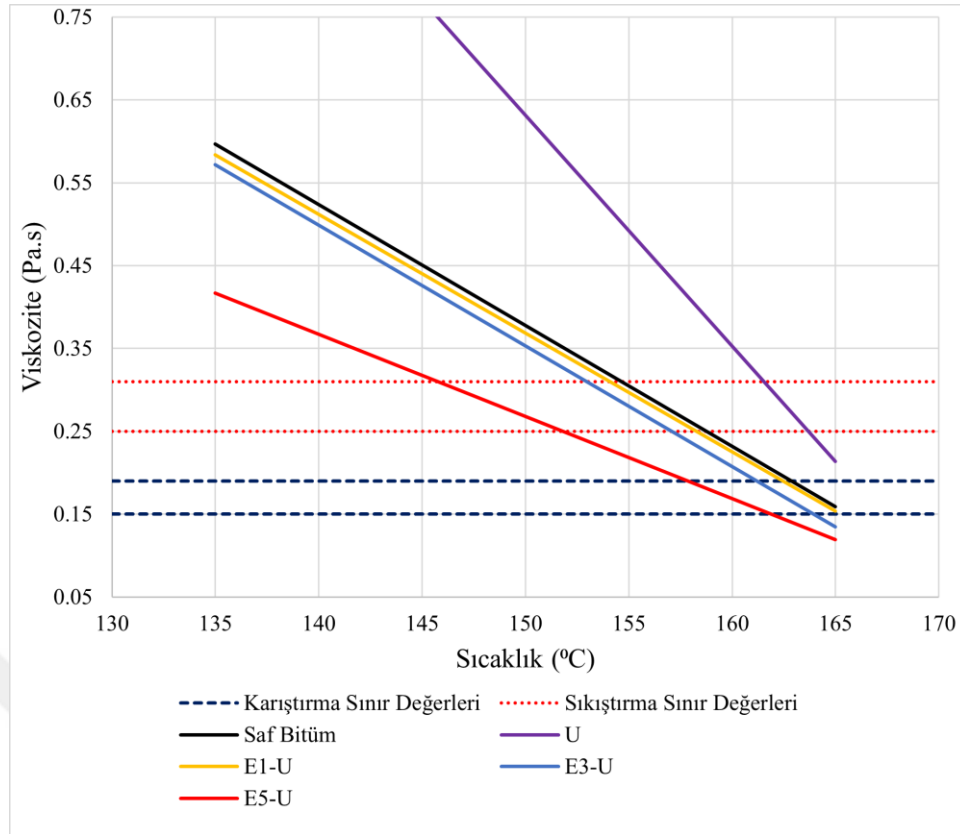
Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile kısa dönem yaşlandırılmış ardından atık endüstriyel yağ ile 3 farklı oranda gençleştirilmiş numunelerin dönel viskozimetre deney sonuçları Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma dönел viskozimetre değерleri

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kısa dönem yaşlandırılıp atık endüstriyel yağ modifikasyonu ile gençleştirilen bitümler arasında en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları %5 atık endüstriyel yağ içeren E5-K numunesinde kaydedilmiştir. Atık endüstriyel yağ modifikasyonu karıştırma sıcaklıkları sırasıyla E1-K için 163.9 °C, E3-K için 162.4 °C, E5-K için ise 160.4 °C'dir. Yine Şekil 5.9'de görüldüğü gibi sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla E1-K için 156.3 °C, E3-K için 154.2 °C, E5-K için ise 146.3 °C'dir. Kısa dönem yaşlandırma koşullarında atık endüstriyel yağ modifikasyonunda en yüksek katkı oranı %5 için (Y5-U) saf bitüme kıyasla karıştırma sıcaklığı yaklaşık olarak %2.4, sıkıştırma sıcaklığı ise yaklaşık olarak %6.6 oranında azalmıştır.

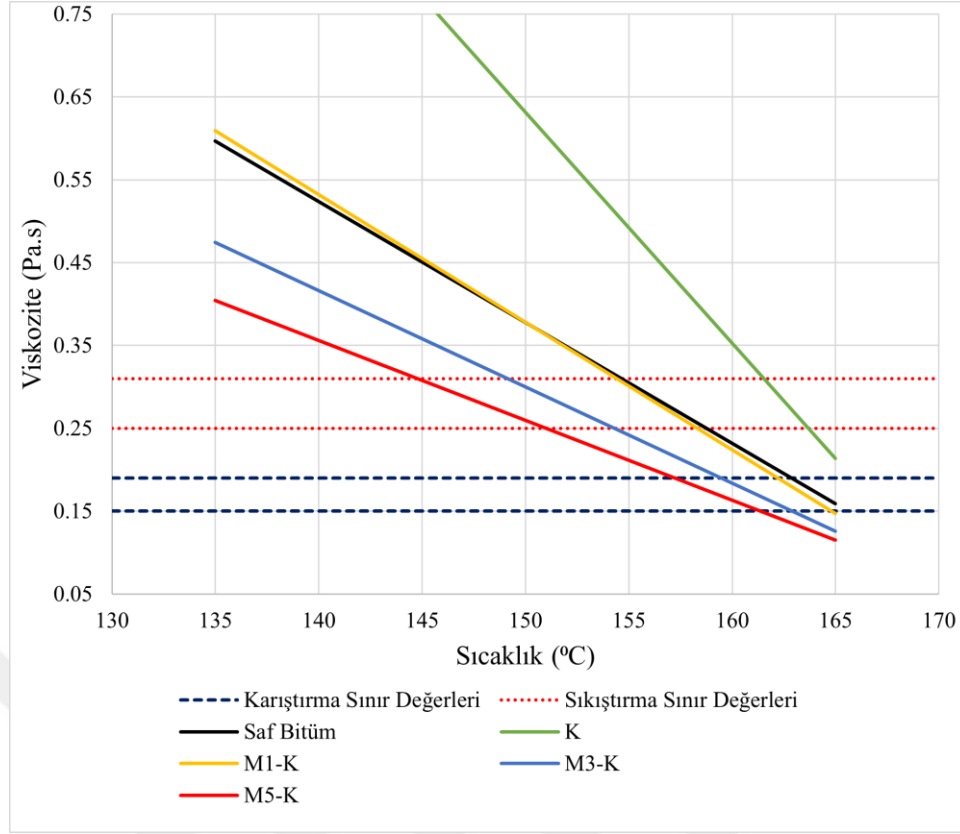
Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılmış ardından atık endüstriyel yağ ile 3 farklı oranda gençleştirilmiş numunelerin dönел viskozimetre deney sonuçları Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda uzun dönem yaşlandırılıp atık endüstriyel yağ modifikasyonu ile gençleştirilen bitümler arasında en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları %5 atık endüstriyel yağ içeren E5-U numunesinde kaydedilmiştir. Atık endüstriyel yağ modifikasyonu karıştırma sıcaklıkları sırasıyla E1-U için 163.85 °C, E3-U için 162.6 °C, E5-U için ise 159.9 °C'dir. Yine Şekil 5.9'de görüldüğü gibi sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla E1-U için 156.3 °C, E3-U için 155.05 °C, E5-U için ise 148.75 °C'dir. Uzun dönem yaşlandırma koşullarında atık endüstriyel yağ modifikasyonunda en yüksek katkı oranı %5 için (E5-U) saf bitüme kıyasla karıştırma sıcaklığı yaklaşık olarak %2.7, sıkıştırma sıcaklığı ise yaklaşık olarak %5.1 oranında azalmıştır.

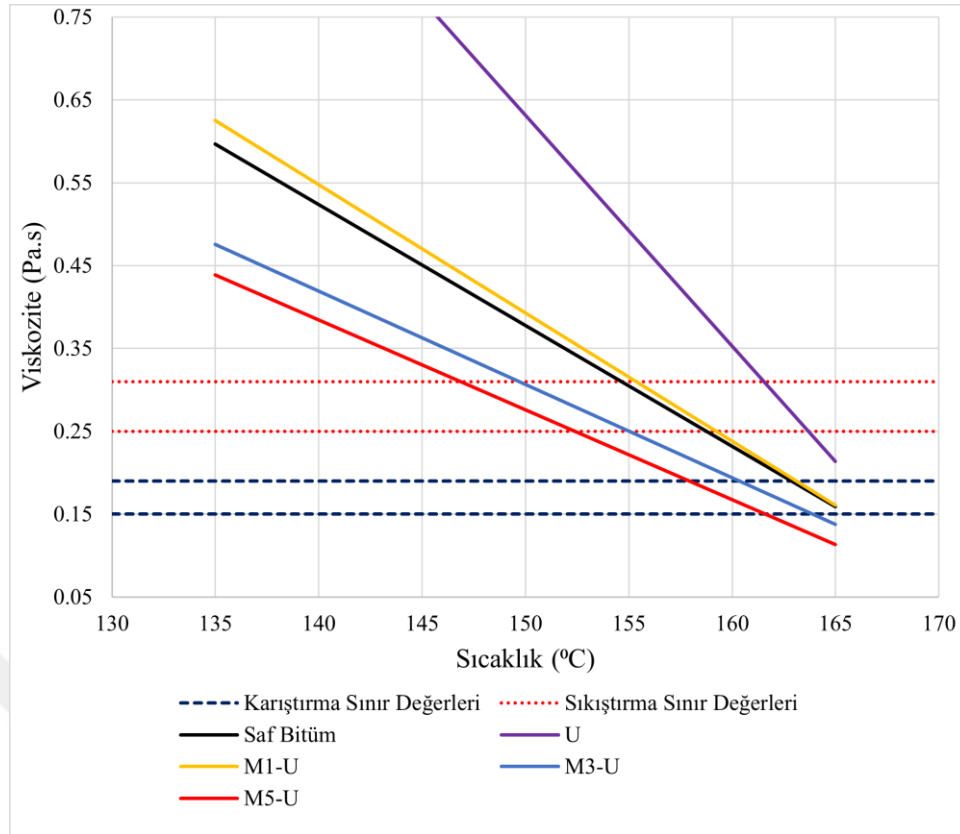
Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile kısa dönem yaşlandırılmış ardından atık motor yağ ile 3 farklı oranda gençleştirilmiş numunelerin dönel viskozimetre deney sonuçları Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kısa dönem yaşlandırılıp atık motor yağ modifikasyonu ile gençleştirilen bitümler arasında en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları %5 atık motor yağ içeren M5-K numunesinde kaydedilmiştir. Atık motor yağ modifikasyonu karıştırma sıcaklıkları sırasıyla M1-K için 163.5 °C, M3-K için 161.3 °C, M5-K için ise 159.5 °C'dir. Yine Şekil 5.11'de görüldüğü gibi sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla M1-K için 156.4 °C, M3-K için 151.8 °C, M5-K için ise 147.9 °C'dir. Kısa dönem yaşlandırma koşullarında atık motor yağ modifikasyonunda en yüksek katkı oranı %5 için (M5-U) saf bitüme kıyasla karıştırma sıcaklığı yaklaşık olarak %3, sıkıştırma sıcaklığı ise yaklaşık olarak %5.6 oranında azalmıştır.

Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılmış ardından atık motor yağ ile 3 farklı oranda gençleştirilmiş numunelerin dönel viskozimetre deney sonuçları Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma dönel viskozimetre değerleri

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda uzun dönem yaşlandırılıp atık motor yağ modifikasyonu ile gençleştirilen bitümler arasında en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları %5 atık motor yağ içeren M5-U numunesinde kaydedilmiştir. Atık motor yağ modifikasyonu karıştırma sıcaklıkları sırasıyla M1-U için 164.5 °C, M3-U için 162.2 °C, M5-U için ise 159.9 °C'dir. Yine Şekil 5.12'de görüldüğü gibi sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla M1-U için 157.4 °C, M3-U için 152.5 °C, M5-U için ise 149.6 °C'dir. Uzun dönem yaşlandırma koşullarında atık motor yağ modifikasyonunda en yüksek katkı oranı %5 için (M5-U) saf bitüme kıyasla karıştırma sıcaklığı yaklaşık olarak %2.7, sıkıştırma sıcaklığı ise yaklaşık olarak %4.6 oranında azalmıştır.

Genel bir değerlendirme yapıldığında kısa dönem yaşlandırma için atık yağ modifikasyonları içerisinde en düşük karıştırma sıcaklığı M5-K numunesinde, en düşük sıkıştırma sıcaklığı ise E5-K numunesinde kaydedilmiştir. Uzun dönem yaşlandırma için atık yağ modifikasyonları içerisinde en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı Y5-U numunesinde kaydedilmiştir. Bu sonuçlar farklı yaşlandırma koşullarında atık yağların farklı etki gösterdiğini göstermektedir.

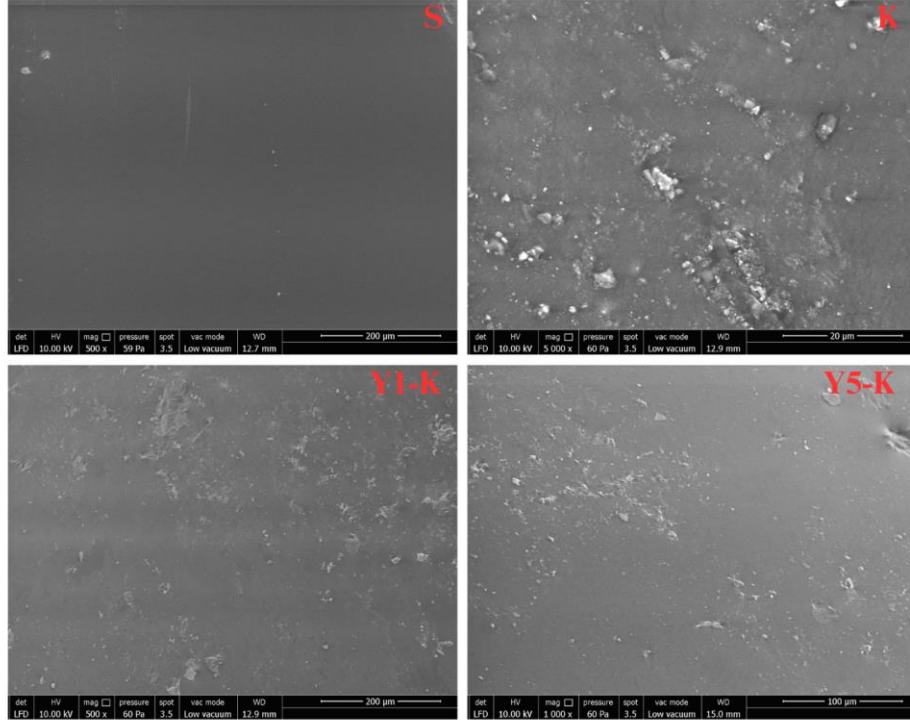
5.2. Bitümlü Bağlayıcı Karakterizasyonu Sonuçları

Tez kapsamında kullanılan atık yağlara ait analizler, her bir malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine uygun analitik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular, ilgili malzeme başlıkları altında ayrı ayrı sistematik biçimde sunulmuştur. Bununla birlikte, çalışmada referans olarak kullanılan saf bitüm ile atık yağ ile atık yağ modifikasyonları sonucunda elde edilen tüm modifiye bitüm örnekleri, kapsamlı bir yapısal ve kimyasal karakterizasyon sürecine tabi tutulmuştur. Bu süreçte, modifikasyonun bağlayıcı mikro yapısı ve kimyasal bileşimi üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla farklı analitik tekniklerden yararlanılmıştır. Yüzey yapısının detaylı şekilde incelenmesi için SEM kullanılmıştır. Malzemelerin içerdiği elementlerin belirlenmesi amacıyla EDS yöntemi uygulanmıştır. Kristal yapının analizinde ise XRD tekniğinden yararlanılmıştır. Son olarak, kimyasal bağlar ve fonksiyonel grupların tespiti FTIR yöntemi ile yapılmıştır. Elde edilen veriler, modifiye bitümlerin mikro yapısal ve kimyasal düzeyde nasıl değişiklikler gösterdiğini ortaya koymak amacıyla bu başlık altında kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

Bu çok yönlü analitik yaklaşım, saf bitüm ile atık yağ modifiye bitümler arasındaki yapısal ve bileşimsel farklılıkları hem mikroskobik düzeyde hem de kimyasal bağ yapısı açısından ortaya koyarak, modifikasyonun bağlayıcının genel performansına etkisini bilimsel temelde değerlendirmeyi mümkün kılmıştır. Elde edilen veriler, sürdürülebilir modifikasyon stratejilerinin anlaşılması açısından önemli katkılar sunmaktadır.

5.2.1. SEM ve EDS sonuçları

Tez çalışması kapsamında kullanılan saf bitümlü bağlayıcı, geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv ile kısa ve uzun dönem yaşlandırılan bitümler ve yüzey yapılarının net şekilde görülebilmesi adına her atık yağ grubu için en düşük ve en yüksek modifikasyon oranlarına sahip bitümler (%1 ve %5) SEM ve EDS analizlerine tabi tutulmuştur. SEM analiz sonuçlarının net şekilde değerlendirilmesi amacıyla her atık yağ grubu için kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümler ayrı ayrı görselleştirilmiştir. Kısa dönem yaşlandırmaya ait atık yemeklik yağ modifikasyonu SEM analizi Şekil 5.13'te verilmiştir.



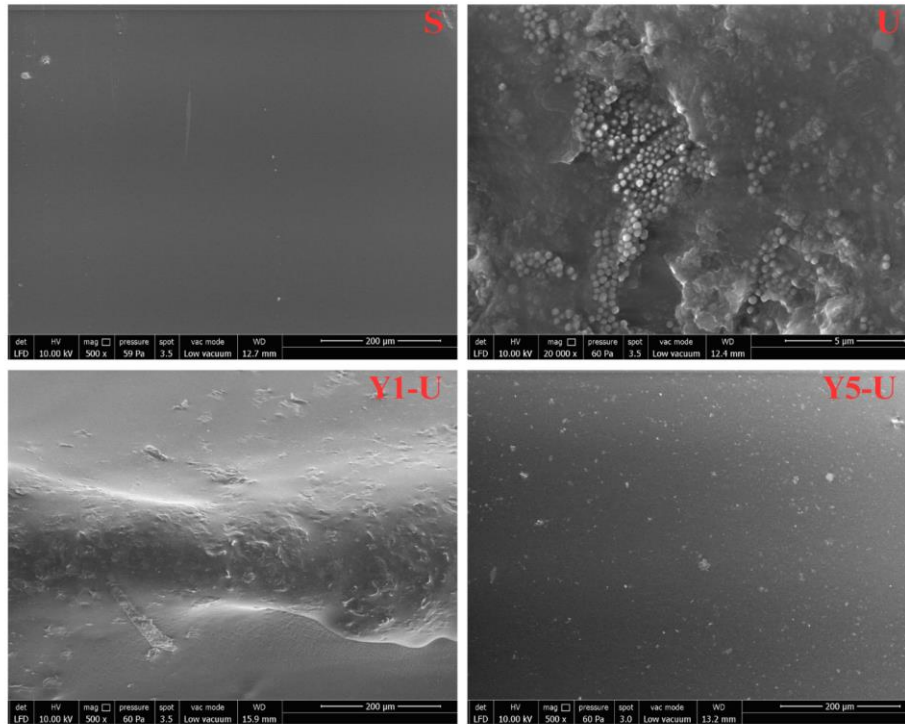
Şekil 5.13. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma SEM görüntüleri

Şekil 5.13 detaylı şekilde incelendiğinde kısa dönem yaşlandırılmış bitüm (K) yüzey morfolojisinde, çeşitli boyutlarda dağınık şekilde gözenekler bulunmaktadır. Bu durumun atık yemeklik yağ modifikasyonu sayesinde ortadan kalktığını ve saf bitüme benzer yüzey görünümü elde edildiği görülmektedir. Y1-K ve Y5-K yüzey morfolojisinde belirgin bir farklılığının bulunmadığı gözlenmiştir. Ayrıca Y1-K ve Y5-K numunelerinde görüldüğü şekilde belirgin morfolojik yapıların gözükmemesi atık yemeklik yağın numune içerisinde homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Kısa dönem yaşlandırmaya ait atık yemeklik yağ modifikasyonu EDS analizi Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma EDS sonuçları

Numuneler	Elementler (Ağırlıkça, %)				
	C	O	S	Al	Ca
Saf Bitüm	91	2.14	6.86	-	-
K	58.6	37.78	0.35	2.42	0.86
Y1-K	87.89	3.25	8.87	-	-
Y5-K	91.75	3.92	4.33	-	-

Çizelge 5.3 detaylı şekilde incelendiğinde kısa dönem yaşlandırılmış bitüm numunesi K'nın saf bitüm numunesi olan S ye oranla oksijen miktarında artış gözlenmiştir. Bu durum oksidatif yani oksijen kaynaklı yaşlanmanın varlığını kanıtlar niteliktedir. Ayrıca K numunesinde yine yaşlanmış bağlayıcılarda görülen Alüminyum ve Kalsiyum gibi elementlerin bulunması yaşlanmanın varlığının kanıtıdır (El-Shorbagy vd., 2019). Kullanılan atık yemeklik yağın bitkisel kaynaklı olması sebebiyle içeriğinde herhangi bir elementel bileşiğe rastlanmamıştır. Atık yemeklik yağın bitüme benzer şekilde elementel bileşime sahip olması bitümle uyumlu bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Y1-K ve Y5-K numunelerinin oksijen oranları kısa dönem yaşlandırılmış bitüme kıyasla düşmesi atık yemeklik yağın gençleştirme konusunda etkin bir malzeme olduğunu göstermektedir. Uzun dönem yaşlandırmaya ait atık yemeklik yağ modifikasyonu SEM analizi Şekil 5.14'te, EDS analizi Çizelge 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.14. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma SEM görüntüleri

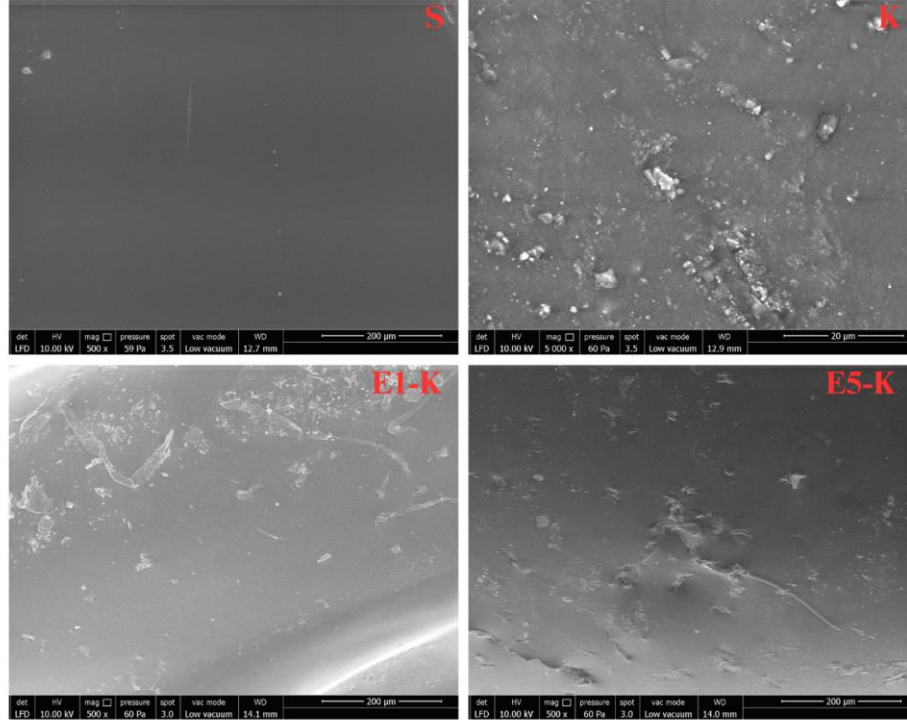
Çizelge 5.4. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma EDS sonuçları

Numuneler	Elementler (Ağırlıkça, %)					
	C	O	S	Al	N	Si
Saf Bitüm	91	2.14	6.86	-	-	-
U	62.87	11.72	4.77	1.7	-	18.89
Y1-U	83.55	5.8	6.98	0.36	3.31	-
Y5-U	92.04	2.68	5.28	-	-	-

Şekil 5.14 detaylı şekilde incelendiğinde uzun dönem yaşlandırılmış bitüm (U) yüzey morfolojisinde, çeşitli boyutlarda toparlanmış şekilde gözenekler yoğun olarak bulunmaktadır. Bu durum, Çizelge 5.4’de görüldüğü gibi yaşlandırılmış bitümde bulunan özellikle silisyum varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir (El-Shorbagy vd., 2019).

Atık yemeklik yağ ile gerçekleştirilen modifikasyonun ardından, bitüm yüzeyinde yaşlanmanın mikroyapısal göstergesi olarak kabul edilen bozulmuş morfolojik yapının belirgin şekilde ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. EDS analizlerinden elde edilen verilere göre, yaşlanmanın olumsuz etkilerine işaret eden elementlerden olan silisyum (Si) ve alüminyum (Al) varlığı, uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcının atık yemeklik yağ ile %5 oranında modifikasyonu sonucu hazırlanan Y5-U numunesinde tamamen kaybolmuştur. Bu durum, yaşlanma kaynaklı oksidatif ve fiziksel bozulmaların atık yemeklik yağ katkısı ile etkili biçimde giderilebildiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bu bulgu, atık yemeklik yağ katkısının, yaşlanmış bağlayıcılarda gençleştirici etkisinin güçlü olduğunu bilimsel olarak desteklemektedir. Bu etki hem bağlayıcının yeniden kullanılabilirliğini artırmakta hem de atıkların döngüsel ekonomi çerçevesinde asfalt endüstrisine yeniden kazandırılması açısından çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, yeni bağlayıcı ihtiyacını azaltarak ekonomik maliyetleri düşürme potansiyeline de sahiptir.

Kısa dönem yaşlandırmaya ait atık endüstriyel yağ modifikasyonu SEM analizi Şekil 5.15’te verilmiştir.



Şekil 5.15. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma SEM görüntüleri

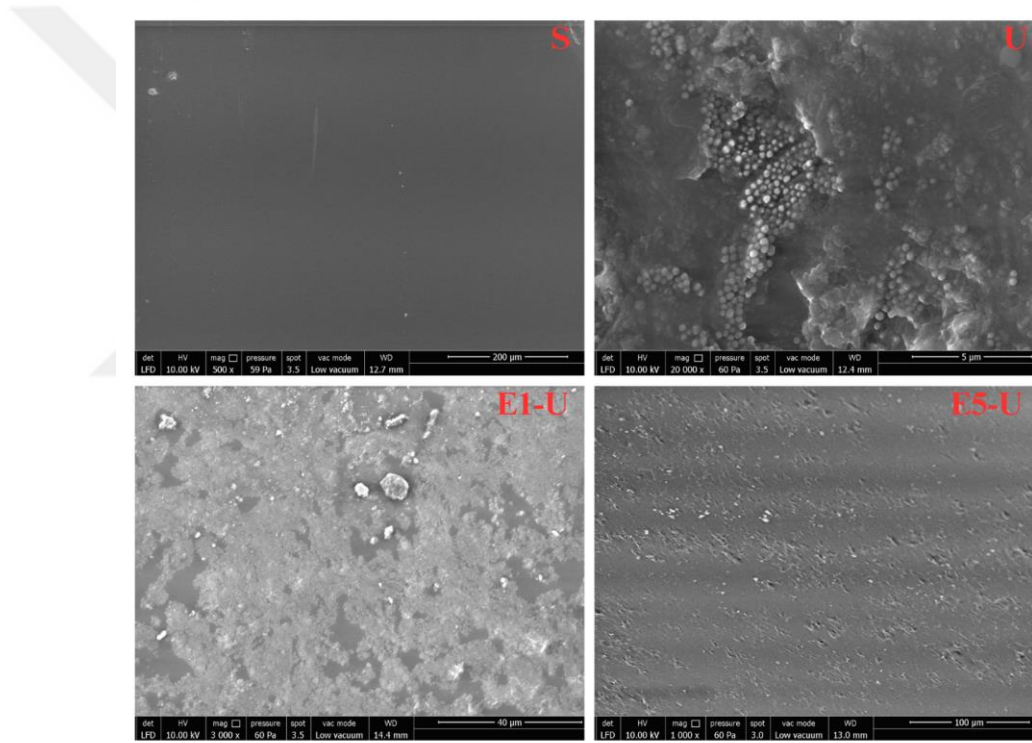
Şekil 5.15 detaylı şekilde incelendiğinde kısa dönem yaşlandırılmış bitümün (K) yüzey morfolojisinde bulunan gözenek ve yapıların atık endüstriyel yağ modifikasyonu sonucu ortadan kalktığı görülmektedir. Modifikasyon sonucu saf bitüm yakın pürüzsüz bir yüzey görüntüsü elde edilmiştir. E1-K ve E5-K yüzey morfolojisinde belirgin bir farklılığının bulunmadığı gözlenmiştir. Ayrıca E1-K ve E5-K numunelerinde belirgin ve farklı şekilli morfolojik yapıların gözükmemesi atık endüstriyel yağın numune içerisinde homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Kısa dönem yaşlandırmaya ait atık endüstriyel yağ modifikasyonu EDS analizi Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma EDS sonuçları

Numuneler	Elementler (Ağırlıkça, %)											
	C	O	S	Al	Ca	Mg	Si	K	Ba	Fe	Na	Sr
Saf Bitüm	91	2.14	6.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	58.6	37.78	0.35	2.42	0.86	-	-	-	-	-	-	-
E1-K	72.85	13.61	7.12	0.14	4.43	-	1.25	0.11	0.36	0.12	-	-
E5-K	27.81	35.18	1.68	0.2	34.08	0.25	-	-	-	-	0.53	0.28

Çizelge 5.5 detaylı şekilde incelendiğinde Saf bitümlü bağlayıcının literatür kaynaklarında da görüldüğü şekilde karbon, kükürt ve oksijen elementlerini içerdiği belirlenmiştir. Atık endüstriyel yağ modifikasyonu numunelerinde (E1-K ve E5-K) farklı elementlerin varlığı görülmektedir. Bu durum önceki bölümlerde atık endüstriyel yağ içerik analizleriyle de örtüşmektedir. Kullanılmış madeni yağların kurşun, çinko, baryum, kadmiyum, cıva, krom, arsenik ve vanadyum gibi ağır metaller içerdiği bilinmektedir (Acıöz, 2024).

Uzun dönem yaşlandırmaya ait atık endüstriyel yağ modifikasyonu SEM analizi Şekil 5.16’da, EDS analizi Çizelge 5.6’da verilmiştir.



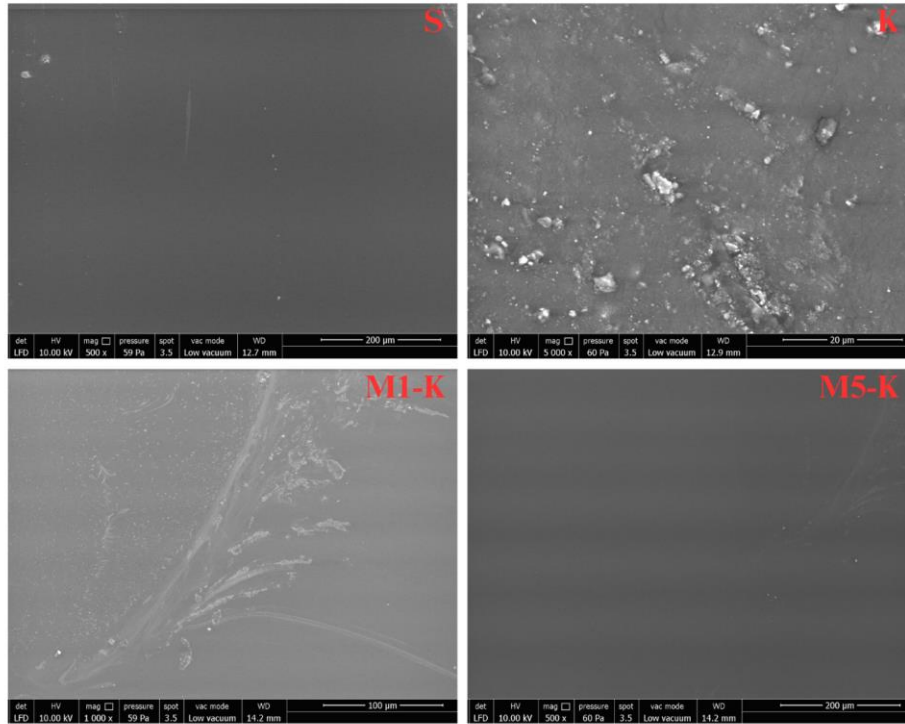
Şekil 5.16. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma SEM görüntüleri

Çizelge 5.6. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma EDS sonuçları

Numuneler	Elementler (Ağırlıkça, %)										
	C	O	S	Al	Cu	Na	Si	Ca	Mg	K	Fe
Saf Bitüm	91	2.14	6.86	-	-	-	-	-	-	-	-
U	62.87	11.72	4.77	1.7	-	-	18.9	-	-	-	-
E1-U	90.06	4.23	4.48	0.32	0.34	0.3	0.15	-	-	-	-
E5-U	43.27	32.14	1.41	7.13	-	1.8	9.43	3.78	0.25	0.44	0.35

Şekil 5.16 detaylı şekilde incelendiğinde uzun dönem yaşlandırılmış bitüm (U) yüzey morfolojisinde, çeşitli boyutlarda dağınık şekilde bulunan gözeneklerin atık endüstriyel yağ modifikasyonu sonucunda azaldığı görülmüştür. Ancak uzun dönem yaşlandırma koşulları için atık endüstriyel yağ gençleştirme etkisinin atık yemeklik yağdan daha az olduğu gözlenmektedir. Bu durum Çizelge 5.6’da görüleceği gibi E1-U ve E5-U numunelerinde silisyum varlığının devam etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yine kullanılmış madeni yağların içeriğinde bulunan ağır metallerin varlığı burada da görülmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan atık madeni yağların (endüstriyel ve motor) atık yağ toplama tesisinden temin edilmesinden dolayı çoğul kaynaklı bir atık yağ yapısına sahip olduğu içeriğinde barındırdığı ağır metallerin çeşitliliğinden de anlaşılmaktadır.

Kısa dönem yaşlandırmaya ait atık motor yağ modifikasyonu SEM analizi Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma SEM görüntüleri

Şekil 5.17 detaylı şekilde incelendiğinde kısa dönem yaşlandırılmış bitüm (K) yüzey morfolojisinde, çeşitli boyutlarda dağınık şekilde gözenekler bulunmaktadır. Bu durumun atık motor yağ modifikasyonu sayesinde ortadan kalktığını ve saf bitüme

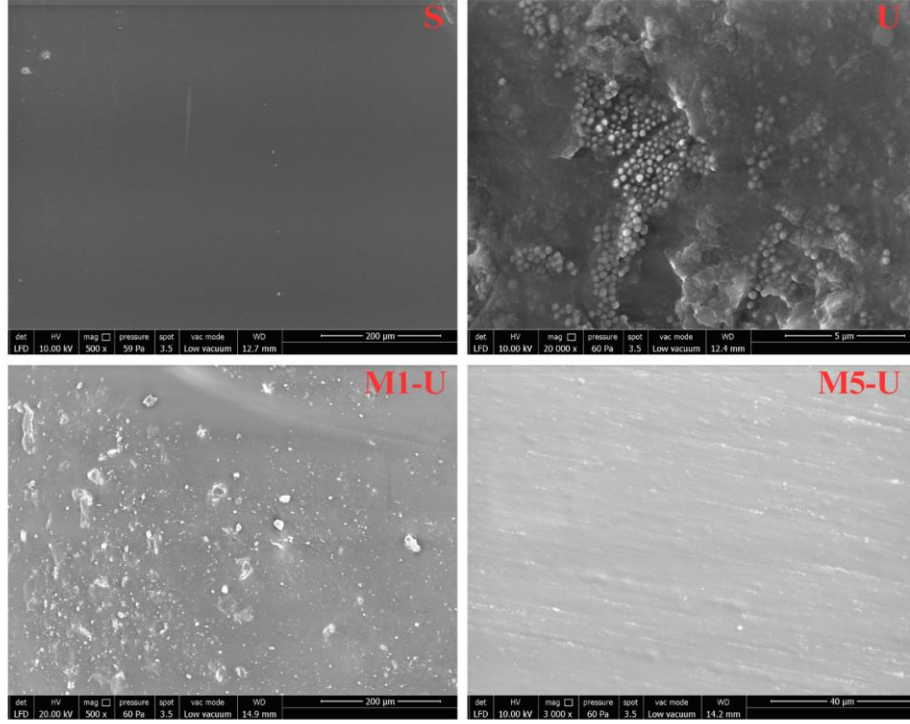
benzer yüzey görünümü elde edildiği görülmektedir. Hatta atık motor yağı modifikasyon %'sinin arttığı M5-K numunesinde neredeyse saf bitüm ile bire bir örtüşen bir yüzey morfolojisi görülmüştür. Bu durum SEM analizleri için kısa dönem yaşlandırma bazında en etkin sonucun motor atık yağa ait olduğunu göstermektedir. M1-K ve M5-K yüzey morfolojisinde belirgin bir farklılığının bulunmadığı gözlenmiştir. Ayrıca M1-K ve M5-K numunelerinde görüldüğü şekilde belirgin morfolojik yapıların gözükmemesi atık motor yağın numune içerisinde homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Kısa dönem yaşlandırmaya ait atık motor yağ modifikasyonu EDS analizi Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma EDS sonuçları

Numuneler	Elementler (Ağırlıkça, %)									
	C	O	S	Al	Ca	Mg	Si	K	Ba	Ce
Saf Bitüm	91	2.14	6.86	-	-	-	-	-	-	-
K	58.6	37.78	0.35	2.42	0.86	-	-	-	-	-
M1-K	90.76	2.71	6.53	-	-	-	-	-	-	-
M5-K	83.25	6.98	5.57	0.19	0.31	-	0.12	-	3.18	0.39

Çizelge 5.7 detaylı şekilde incelendiğinde saf bitümlü bağlayıcının literatür kaynaklarında da görüldüğü şekilde karbon, kükürt ve oksijen elementlerini içerdiği belirlenmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış numunenin olumsuz etkilerinin kanıtı olan alüminyum varlığı atık motor yağ modifikasyonu ile azaltılmıştır. EDS analizi ile elde edilen veriler önceki bölümlerde atık motor yağ içerik analizleriyle de örtüşmektedir.

Uzun dönem yaşlandırmaya ait atık motor yağ modifikasyonu SEM analizi Şekil 5.18'de, EDS analizi Çizelge 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.18. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma SEM görüntüleri

Çizelge 5.8. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma EDS sonuçları

Numuneler	Elementler (Ağırlıkça, %)											
	C	O	S	Al	Cu	Na	Si	Ba	Ca	N	K	Cl
Saf Bitüm U	91	2.14	6.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	62.87	11.72	4.77	1.7	-	-	18.89	-	-	-	-	-
M1-U	76.65	15.62	4.92	0.45	0.16	0.53	0.41	0.17	0.37	-	0.31	0.42
M5-U	62.66	16.59	2.68	-	-	1.57	-	-	-	13.06	2.16	1.3

Şekil 5.18 detaylı şekilde incelendiğinde uzun dönem yaşlandırılmış bitüm (U) yüzey morfolojisinde, çeşitli boyutlarda dağınık şekilde bulunan gözeneklerin atık motor yağ modifikasyonu sonucunda azaldığı görülmüştür. Uzun dönem yaşlandırma koşulları için atık motor yağ gençleştirme etkisinin atık endüstriyel yağdan daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Bu durum Çizelge 5.8’de görüleceği gibi M1-U ve M5-U numunelerinde silisyum varlığının olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yine kullanılmış madeni yağların içeriğinde bulunan ağır metallerin varlığı burada da görülmektedir. Ayrıca M5-U numunesindeki yüksek oranda nitrojen varlığı literatür çalışmaları ile de örtüşmektedir (Liu vd., 2018). Çalışma kapsamında kullanılan atık madeni yağların (endüstriyel ve motor) atık yağ toplama tesisinden

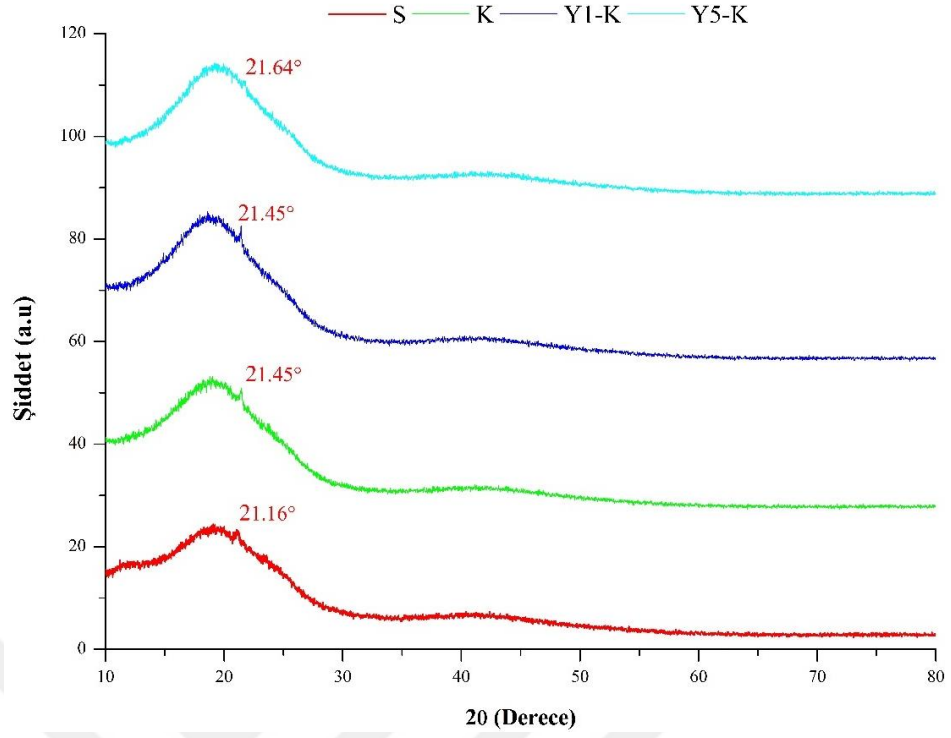
temin edilmesinden dolayı çoğul kaynaklı bir atık yağ yapısına sahip olduğu içeriğinde barındırdığı ağır metallerin çeşitliliğinden de anlaşılmaktadır.

5.2.2. XRD sonuçları

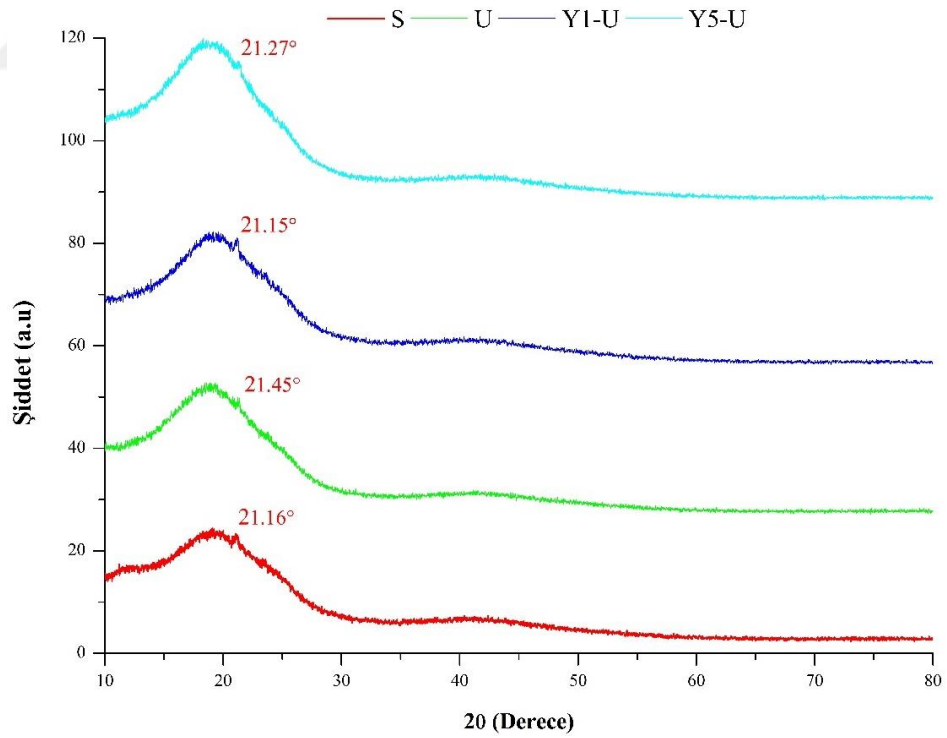
Tez çalışması kapsamında kullanılan saf bitümlü bağlayıcı, geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv ile kısa ve uzun dönem yaşlandırılan bitümler ve her atık yağ grubu için en düşük ve en yüksek modifikasyon oranlarına sahip bitümlerin (%1 ve %5) kristalografik yapıları hakkında bilgi edinmek amacıyla XRD analizlerine uygulanmıştır.

Bir XRD deseninde dar, keskin ve yüksek yoğunlukta gözlemlenen pikler, analiz edilen malzemenin yüksek kristallik düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. Bu tür pikler, belirli kafes düzlemlerinin varlığını yansıtarak, malzemenin fiziksel karakteristiklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Aynı zamanda, bu tür pikler numunenin yüksek saflık derecesine işaret ederken, kristal yapı içerisinde düzenli, periyodik ve karakteristik atomik yerleşimlerin bir yansıması olarak değerlendirilmektedir (Kaçaroglu, 2025; Kavussi ve Barghabany, 2016).

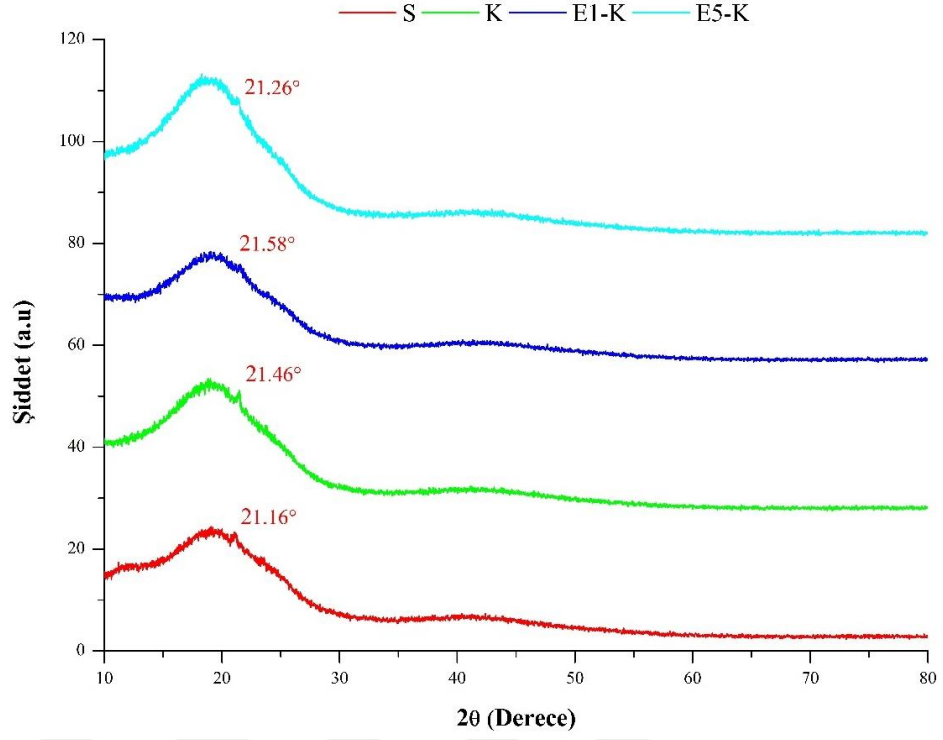
Kısa dönem yaşlandırmaya ait atık yemeklik yağ modifikasyonu XRD analizi Şekil 5.19'da, uzun dönem yaşlandırmaya ait atık yemeklik yağ modifikasyonu XRD analizi Şekil 5.20'de, kısa dönem yaşlandırmaya ait atık endüstriyel yağ modifikasyonu XRD analizi Şekil 5.21'de, uzun dönem yaşlandırmaya ait atık endüstriyel yağ modifikasyonu XRD analizi Şekil 5.22'de, kısa dönem yaşlandırmaya ait atık motor yağ modifikasyonu XRD analizi Şekil 5.23'de, uzun dönem yaşlandırmaya ait atık motor yağ modifikasyonu XRD analizi Şekil 5.24'de verilmiştir.



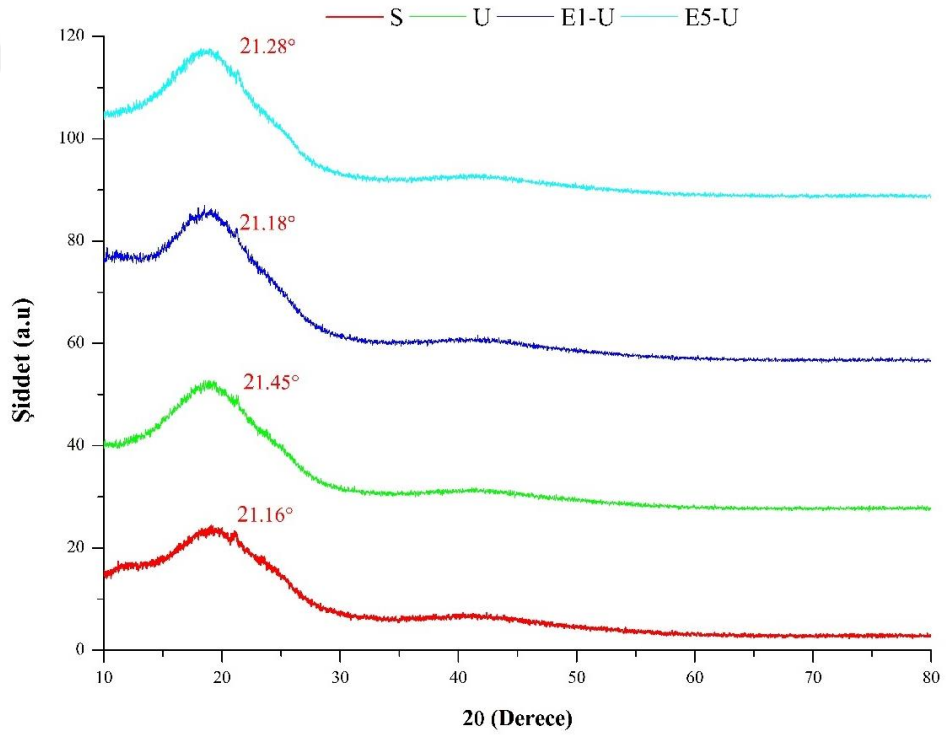
Şekil 5.19. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma XRD sonuçları



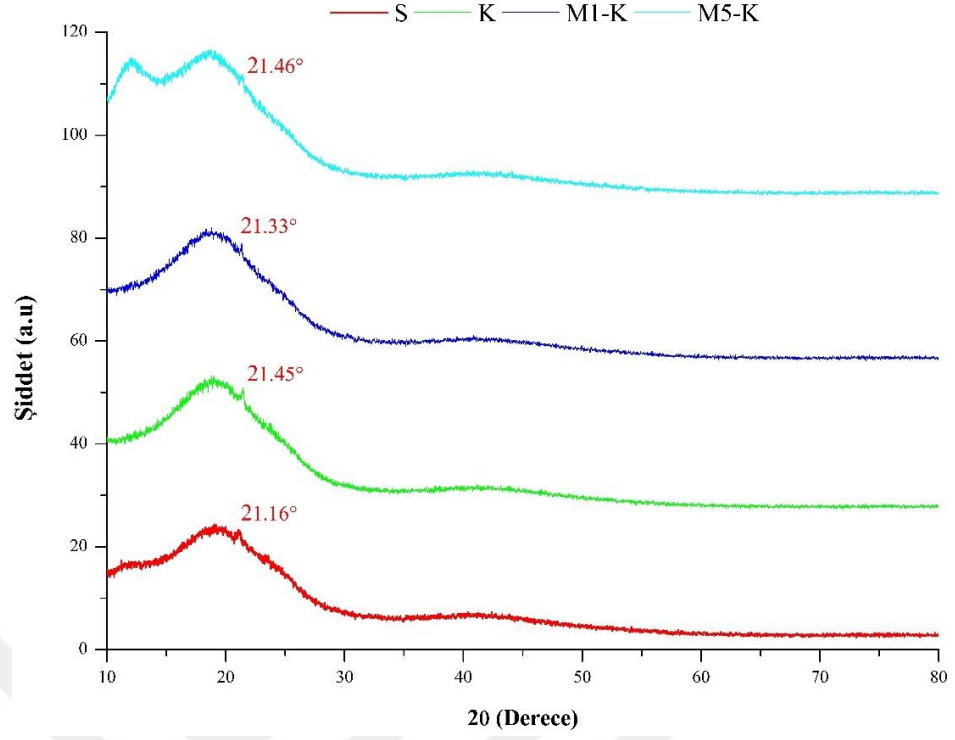
Şekil 5.20. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma XRD sonuçları



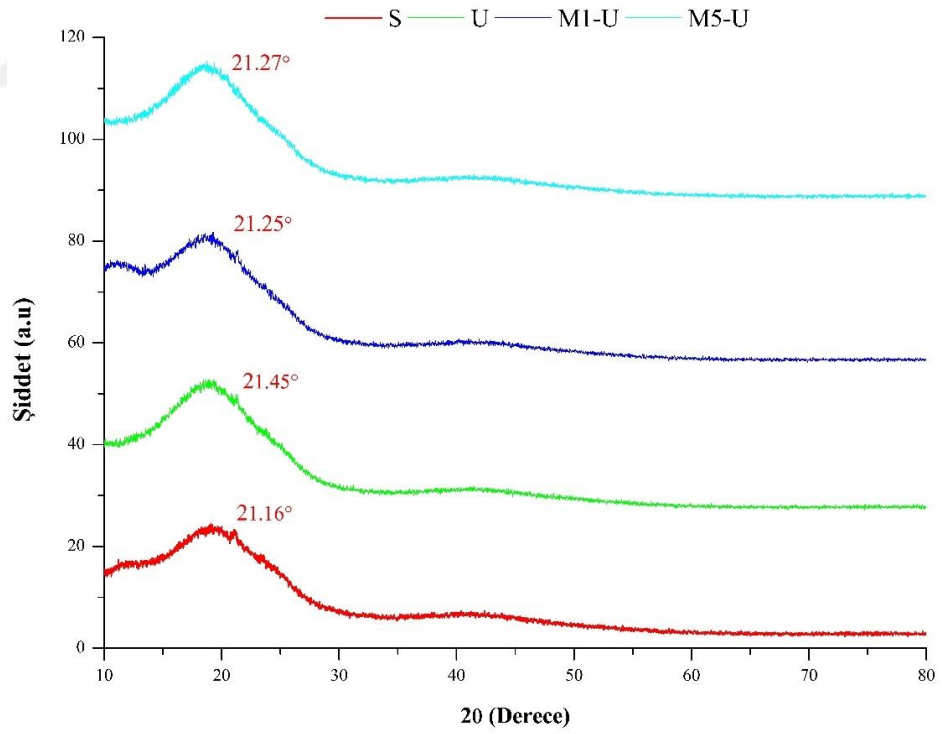
Şekil 5.21. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma XRD sonuçları



Şekil 5.22. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma XRD sonuçları



Şekil 5.23. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma XRD sonuçları



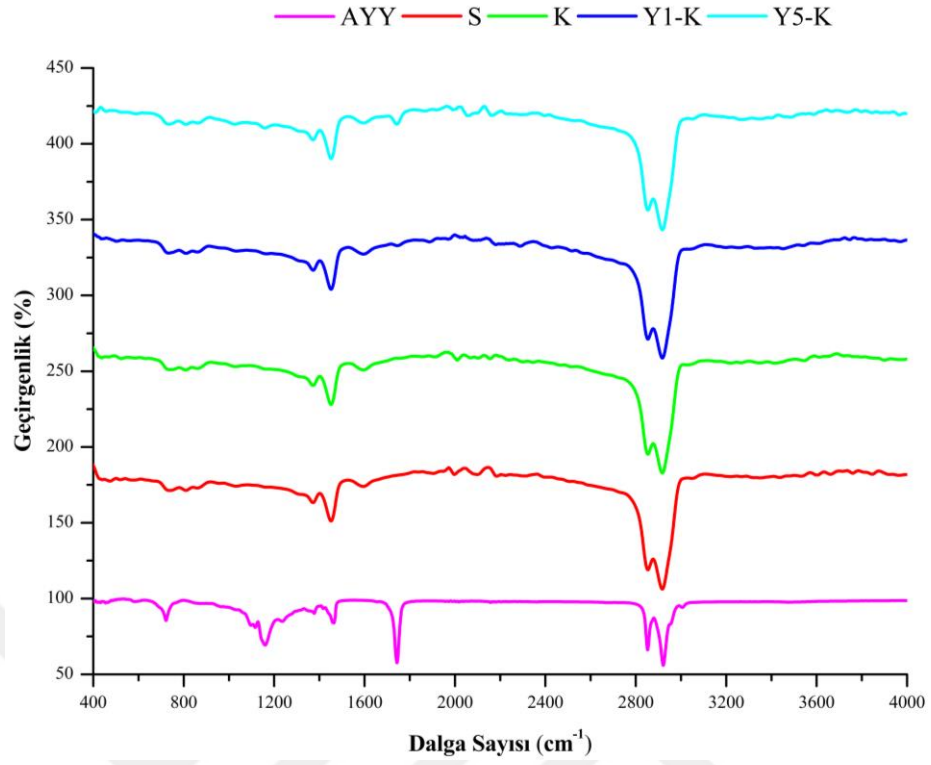
Şekil 5.24. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma XRD sonuçları

XRD analizi verileri değerlendirildiğinde; referans değer olan saf bitümlü bağlayıcının (S) yaklaşık yaklaşık olarak $2\theta=21^\circ$ 'de bulunan tek pike sahip olduğu görülmüştür. Saf bitümlü bağlayıcıda mevcut olan karakteristik geniş pik dışında belirgin yeni faz açıları ya da ayırt edici kristal yapılar gözlemlenmemiştir. Bu durum, XRD analizinde pik yoğunluğunda ve konumunda bazı küçük değişimler olsa da oda sıcaklığındaki fiziksel özelliklerinden ötürü atık yemeklik, endüstriyel ve motor yağlar gibi katkıların kristal yapılarının belirlenememesi ve amorf yapı özelliği sergilemeleriyle ilişkilidir. Dolayısıyla, tez çalışmasında kullanılan atık yağların bağlayıcının mevcut amorf yapısı üzerinde kristalografik düzeyde anlamlı bir değişim oluşturmadığı sonucuna varılabilir. Ayrıca XRD analizi sonucunda elde edilen veriler tez çalışmasında kullanılan tüm atık yağ çeşitleri ile gerçekleştirilen modifikasyonların bitüm içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı ve matrisle uyumlu bir yapı oluşturduğunu göstermektedir (Azahar vd., 2019).

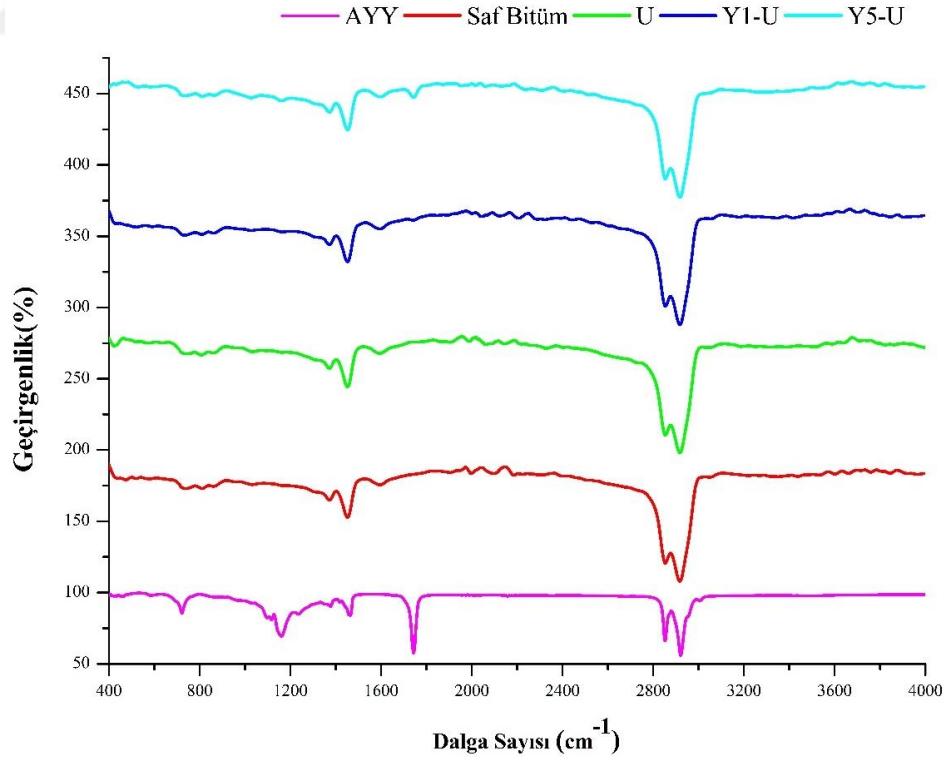
5.2.3. FTIR sonuçları

Tez çalışması kapsamında kullanılan saf bitümlü bağlayıcı, geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv ile kısa ve uzun dönem yaşlandırılan bitümler ve her atık yağ grubu için en düşük ve en yüksek modifikasyon oranlarına sahip bitümlerin (%1 ve %5) moleküler düzeyde kimyasal yapılarını ayrıntılı olarak değerlendirebilmek amacıyla FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, tez çalışmasında kullanılan atık yağların bitümlü bağlayıcıların kimyasal yapısı üzerinde herhangi bir değişime yol açıp açmadığı daha net bir şekilde değerlendirilebilecektir. Böylelikle atık yağ etkisinin ayırt edilmesi kolaylaşacaktır. Bu yaklaşım, atık yağ-bitüm etkileşimlerinin niteliksel olarak incelenmesine ve kimyasal uyumluluğun yorumlanmasına bilimsel bir temel sunmaktadır.

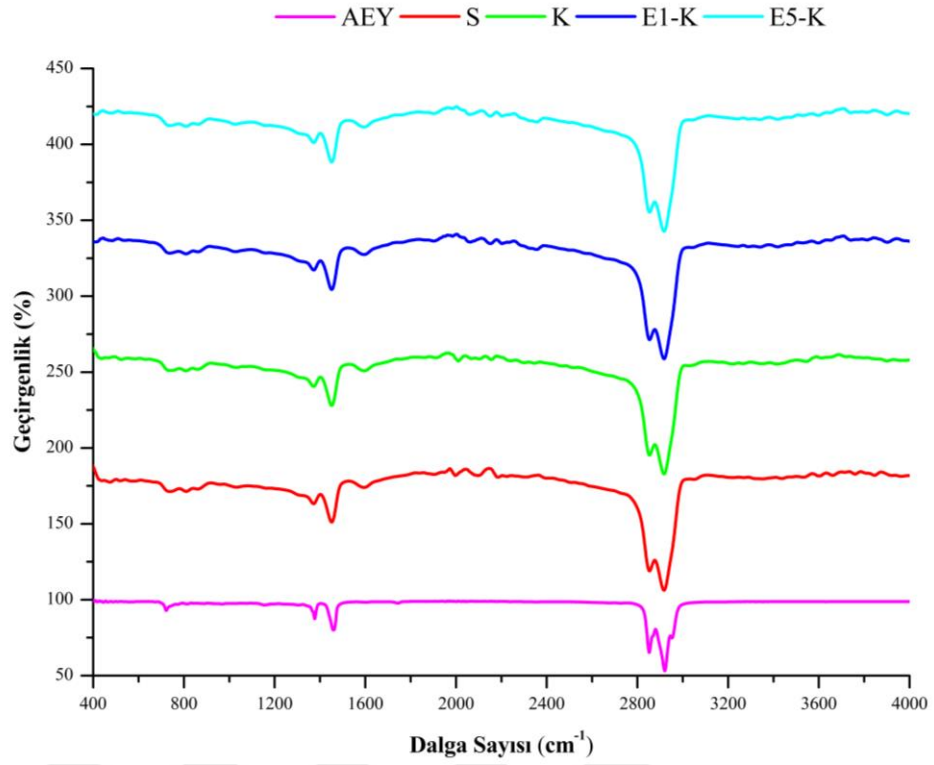
Kısa dönem yaşlandırmaya ait atık yemeklik yağ modifikasyonu FTIR analizi Şekil 5.25'de, uzun dönem yaşlandırmaya ait atık yemeklik yağ modifikasyonu FTIR analizi Şekil 5.26'da, kısa dönem yaşlandırmaya ait atık endüstriyel yağ modifikasyonu FTIR analizi Şekil 5.27'de, uzun dönem yaşlandırmaya ait atık endüstriyel yağ modifikasyonu FTIR analizi Şekil 5.28'de, kısa dönem yaşlandırmaya ait atık motor yağ modifikasyonu FTIR analizi Şekil 5.29'da, uzun dönem yaşlandırmaya ait atık motor yağ modifikasyonu FTIR analizi Şekil 5.30'da verilmiştir.



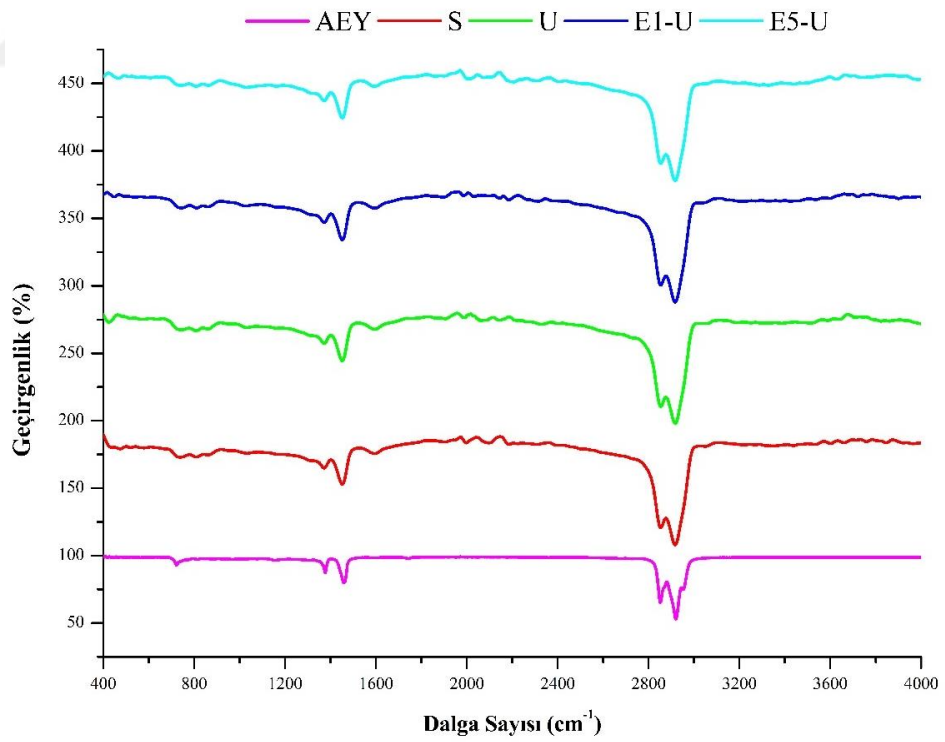
Şekil 5.25. Atık yemeklik yağ kısa dönem yaşlandırma FTIR sonuçları



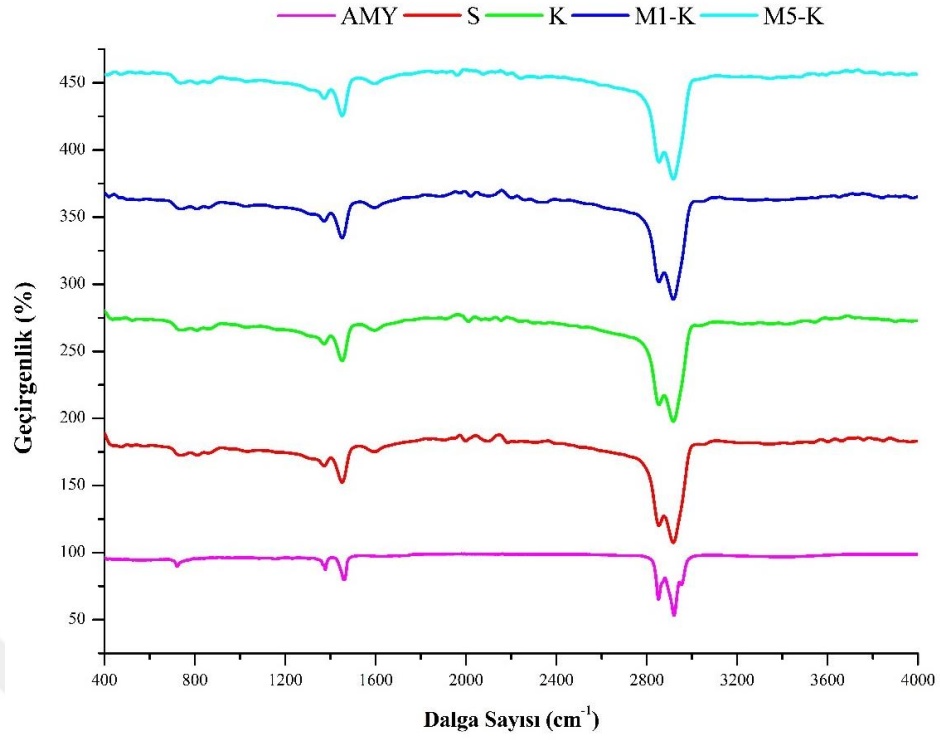
Şekil 5.26. Atık yemeklik yağ uzun dönem yaşlandırma FTIR sonuçları



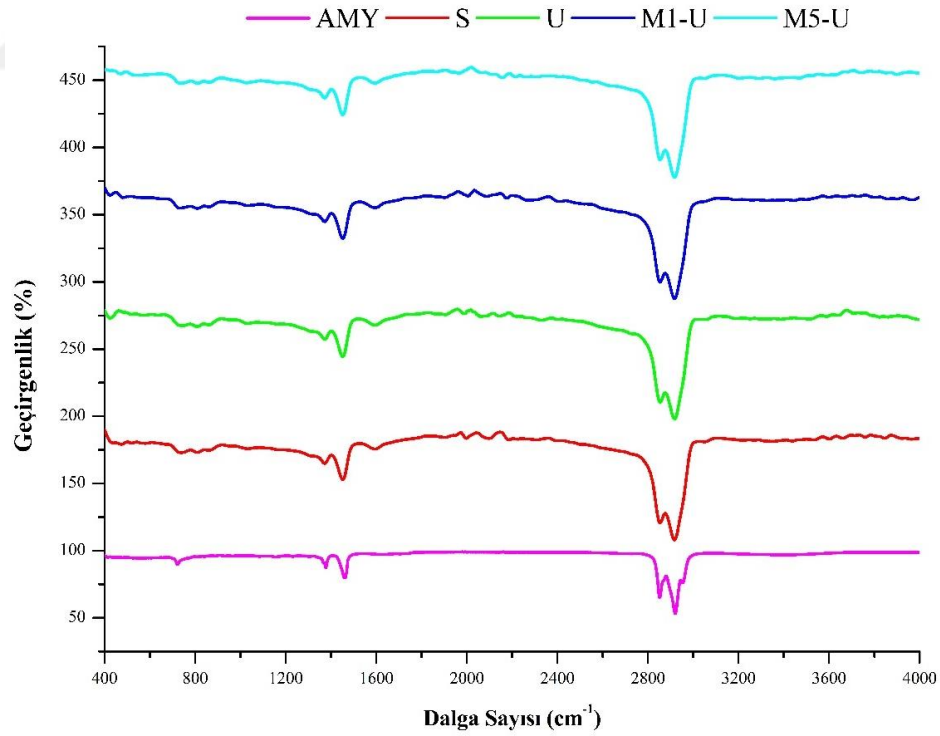
Şekil 5.27. Atık endüstriyel yağ kısa dönem yaşlandırma FTIR sonuçları



Şekil 5.28. Atık endüstriyel yağ uzun dönem yaşlandırma FTIR sonuçları



Şekil 5.29. Atık motor yağ kısa dönem yaşlandırma FTIR sonuçları



Şekil 5.30. Atık motor yağ uzun dönem yaşlandırma FTIR sonuçları

Atık yemeklik, endüstriyel ve motor yağlarının FTIR analiz sonuçları tez çalışmasının Malzeme bölümünde detaylı şekilde sunulmuştur. Bu bölümde daha detaylı şekilde karşılaştırma yapabilmek adına her analiz için saf bitüm ve atık yağ modifikasyon sonuçları ile birlikte ilgili atık yağ FTIR sonucu birlikte verilmiştir. FTIR analizleri detaylı şekilde değerlendirildiğinde saf bitümlü bağlayıcıya ait karakteristik piklerin atık yağ modifikasyonlarında da aynı şekilde devam ettiği görülmektedir. Yaklaşık 1375 ve 1450 cm^{-1} dalga sayılarında gözlemlenen pikler, alifatik hidrokarbon yapısında yer alan alkan grubuna ait metil (CH_3) fonksiyonel grubunun C–H bağlarının simetrik ve asimetrik eğilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Buna ek olarak, 2850 ve 2920 cm^{-1} civarındaki çift pik oluşumları ise yine alkan sınıfındaki metilen (CH_2) gruplarının C–H bağlarında meydana gelen simetrik ve asimetrik gerilme titreşimlerinin göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Bu karakteristik pikler, alifatik yapıların FTIR analizinde tipik spektral izlerini oluşturmaktadır (Zhang vd., 2024; Kumar vd., 2019). FTIR analizlerinde görüldüğü gibi atık yağ modifikasyonlarının tamamında saf bitüme kıyasla yeni ve farklı piklerin olmaması; gerçekleştirilen modifikasyonun kimyasal yapıda herhangi bir değişikliğe sebep olmadığını, fiziksel bir süreç olduğunu göstermektedir.

5.3. Superpave Bağlayıcı Deney Sonuçları

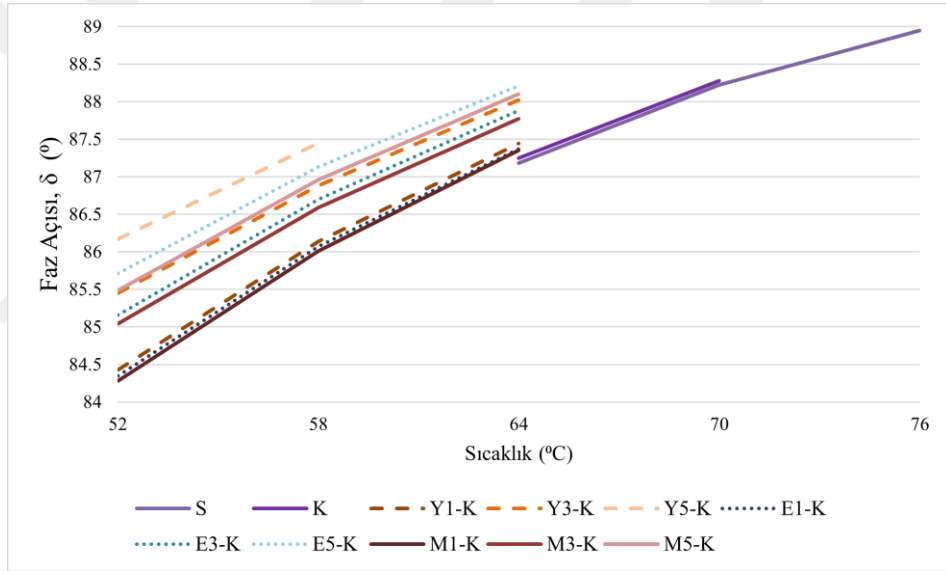
Bitümlü bağlayıcıların performans özelliklerinin değerlendirilmesinde Superpave sistemine dayalı deney yöntemleri kullanılmaktadır. Bu sistem, bitümlü bağlayıcının hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı iklim ve trafik koşullarını dikkate alarak, bağlayıcının uygunluğunu belirlemeyi amaçlamaktadır. Tez çalışması kapsamında kullanılan bütün bitümlü bağlayıcı numunelerine DSR analizi, kısa dönem yaşlandırılmış ve modifiye edilmiş bitümlere ise BBR analizi uygulanmıştır. Analiz sonuçları bu başlık altında sunulacaktır.

5.3.1. Dinamik kesme reometresi deney sonuçları

AASHTO T 315 standardına göre gerçekleştirilen analizlerde tez çalışması kapsamında geliştirilen laboratuvar ortamında yaşlandırma metodu ile kısa dönem yaşlandırılmış ve atık yemeklik, atık endüstriyel ve atık motor yağ grupları ile ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında modifiye edilerek gençleştirilen bitümlü bağlayıcıların G^*

(kompleks kesme modülü) ve δ (faz açısı) değerleri elde edilmiştir. Saf bitüm ve kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin, yüksek sıcaklıklarda $G^*/\sin\delta$ değerleri belirlenerek, tekerlek izi oluşumuna karşı dirençleri belirlenmiştir. DSR analizleri 6 °C'lık aralıklar ile 52 °C ila 76 °C aralığında gerçekleştirilmiştir. Superpave tasarım metodunda belirtildiği üzere bitümlü bağlayıcının ilgili test sıcaklığında yüksek sıcaklık sınıfına uygun olması için; $G^*/\sin\delta$ değerinin orijinal numunede minimum 1000 Pa, RTFO ile kısa dönem yaşlandırılmış numunede ise minimum 2200 Pa eşik değerlerini karşılaması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen DSR analizi sonucu elde edilen faz açısı değerlerini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla Şekil 5.31 elde edilmiştir.

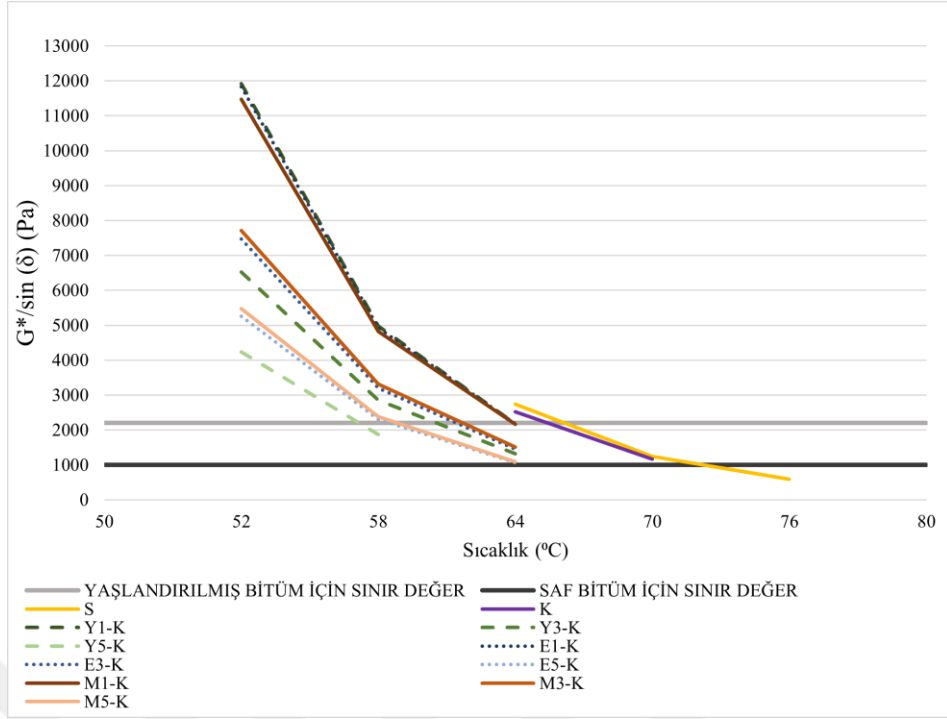


Şekil 5.31. Kısa dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların faz açısı değerleri

Şekil 5.31'de görüldüğü gibi, çalışmada kullanılan saf bitümlü bağlayıcı (S) için DSR analiz sıcaklık aralığı 64-76 °C, geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile kısa dönem yaşlandırılan bitümlü bağlayıcı (K) için DSR analiz sıcaklık aralığı ise 64-70 °C'dir. Laboratuvar ortamında kısa dönem yaşlandırılmış ve atık yemeklik, atık endüstriyel ve atık motor yağ grupları ile ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında modifiye edilerek gençleştirilen bitümlü bağlayıcıların DSR analiz sıcaklık aralığı ise 52-64 °C olarak kaydedilmiştir. Çalışmada kullanılan bitümlü bağlayıcılar için ortak DSR analiz sıcaklığı olan 64 °C'de ise daha net bir şekilde karşılaştırma yapılabilir. Daha küçük faz açısı değeri daha iyi elastik toparlanma anlamına gelmektedir. Buradan yola

çıkarak kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcının saf bitüme oranla daha viskoz yapıda olduğu görülmektedir. Aynı şekilde 64 °C’de atık yağ grupları ile modifiye bitümlerin faz açısı değerleri K ve S numunelerinin faz açısı değerlerinden daha yüksek olarak gözlenmiştir. Buradan hareketle atık yağ grupları ile modifikasyon sonucu elde edilen bitümlü bağlayıcıların saf bitüme kıyasla daha viskoz davrandığı görülmektedir. Ayrıca 64 °C’de atık yağ grupları içerisinde de ayrıca bir kıyaslama yapıldığında atık motor yağı modifiyeli bitümlü bağlayıcıların aynı modifikasyon oranlarında diğer modifiye bitümlere oranla daha düşük faz açısına sahip olduğu görülmektedir. Özellikle en düşük modifikasyon oranı olan ağırlıkça %1’e karşılık gelen faz açısı değerleri kıyaslandığında atık motor yağ modifikasyonunun saf bitümlü bağlayıcının faz açısı değerine en yakın sonuçtur. M1-K numunesini, sırasıyla E1-K ve Y1-K takip etmektedir. Her atık yağ modifikasyon oranı için bu sıralama geçerlidir. Ayrıca Y5-K numunesi diğer modifiye bitümlerin ulaşabildiği 64 °C’ye ulaşamamıştır. Buradan hareketle Y5-K numunesinin sıcaklık hassasiyetinin diğer atık yağ modifikasyon oranlarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Faz açısı sonuçları her atık yağ grubu bazında değerlendirildiğinde %1 modifikasyon oranına sahip bitümlerin (Y1-K, E1-K ve M1-K) saf bitüme en yakın faz açısına sahip olduğu ve atık yağ yüzdesi arttıkça faz açısının da arttığı görülmüştür.

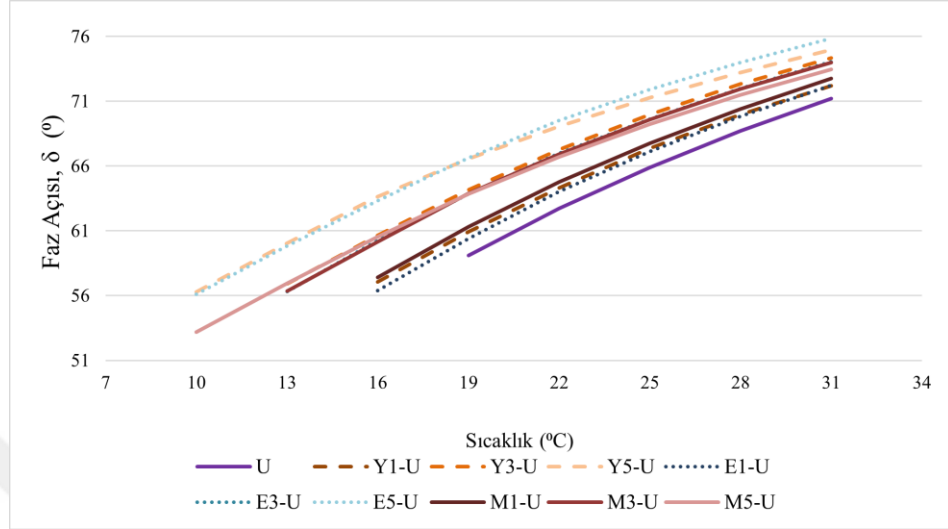
Çalışma kapsamında kısa dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanan DSR analizi verilerinden; G^* (kompleks kesme modülü) ve δ (faz açısı) ile elde edilen tekerlek izi faktörü $G^*/\sin\delta$ değerlerini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla Şekil 5.32 elde edilmiştir. $G^*/\sin\delta$ değeri doğrudan bitümlü bağlayıcının tekerlek izine karşı direnci ile ilişkilidir. Superpave teknik şartnamesinde belirtildiği üzere bitümlü bağlayıcının DSR analizi için ilgili test sıcaklığında yüksek sıcaklık sınıfına uygun olması için; $G^*/\sin\delta$ değerinin orijinal numunede minimum 1000 Pa, kısa dönem yaşlandırılmış numunede ise minimum 2200 Pa eşik değerlerini karşılaması gerekmektedir.



Şekil 5.32. Kısa dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerleri

Tez çalışmasında kullanılan kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için ortak DSR analiz sıcaklığı olan 64 °C’de daha net bir şekilde karşılaştırma yapılabilmektedir. Yüksek tekerlek izi faktörü, bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık deformasyonuna karşı daha iyi direnç gösterdiğinin kanıtıdır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, 64 °C’de S numunesinin tekerlek izi faktörünün diğer bitümlü bağlayıcılara kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. S numunesi 70 °C’de şartname sınır değerini karşılamaktadır. Ayrıca tüm kısa dönem yaşlandırılmış numuneler içerisinde %1 atık yağ modifikasyon oranına sahip bitümlerin saf bitümlü bağlayıcıya en yakın tekerlek izi faktörüne sahip olduğu görülmüştür. Y5-K numunesi diğer modifiye bitümlerin ulaşabildiği 64 °C’ye ulaşamamıştır. Buradan hareketle Y5-K numunesinin sıcaklık hassasiyetinin diğer atık yemeklik yağ modifikasyon oranlarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Kısa dönem yaşlandırılmış bitümler için şartname sınır değeri olan 2200 Pa, Y1-K, Y3-K, E1-K, E3-K, E5-K, M1-K, M3-K ve M5-K numuneleri 58 °C’de, Y5-K numunesi ise 52 °C’de sağlanmaktadır. Saf bitüme en yakın tekerlek izi faktörü değeri Y1-K numunesine aittir.

Çalışma kapsamında uzun dönem yaşlandırılmış bitüm numuneleri için gerçekleştirilen DSR analizi sonucu elde edilen faz açısı değerlerini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla Şekil 5.33 elde edilmiştir.

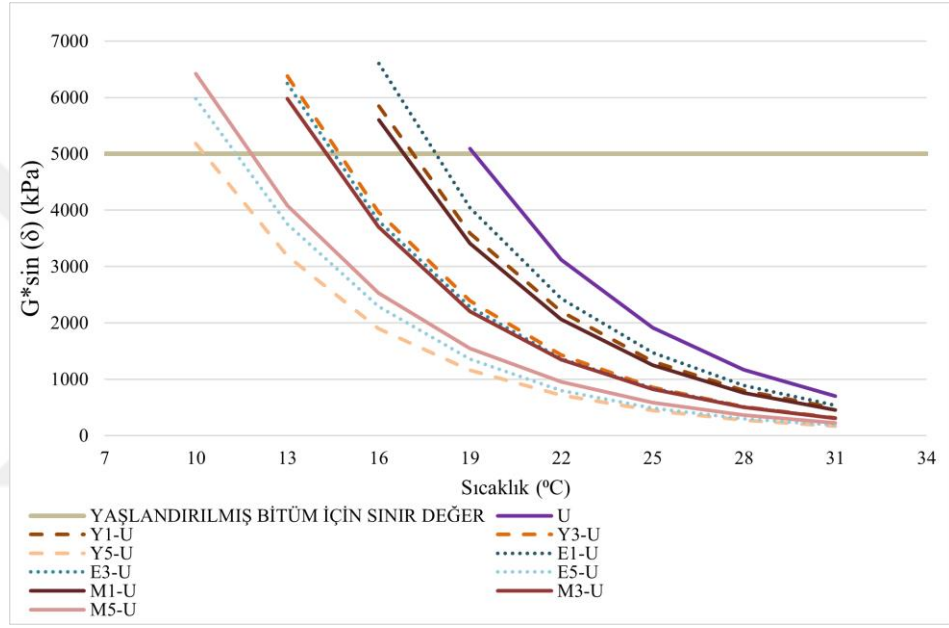


Şekil 5.33. Uzun dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların faz açısı değerleri

Şekil 5.33'de görüldüğü gibi, çalışmada kullanılan hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılan bitümlü bağlayıcı (U) için DSR analiz sıcaklık aralığı ise 19-31 °C'dir. Laboratuvar ortamında kısa dönem yaşlandırılmış ve atık yemeklik, atık endüstriyel ve atık motor yağ grupları ile ağırlıkça %1 oranında modifiye edilerek gençleştirilen bitümlü bağlayıcıların (Y1-U, E1-U ve M1-U) DSR analiz sıcaklık aralığı ise 16-31 °C olarak kaydedilmiştir. % oranında modifiye edilerek gençleştirilen bitümlü bağlayıcıların (Y3-U, E3-U ve M3-U) DSR analiz sıcaklık aralığı ise 13-31 °C olarak kaydedilmiştir. %5 oranında modifiye edilerek gençleştirilen bitümlü bağlayıcıların (Y5-U, E5-U ve M5-U) DSR analiz sıcaklık aralığı ise 10-31 °C olarak kaydedilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, tüm numuneler için sıcaklık artışıyla faz açısının arttığı görülmektedir. Daha küçük faz açısı değeri daha iyi elastik toparlanma anlamına gelmektedir. Aynı şekilde 31 °C'de atık yağ grupları ile modifiye bitümlerin faz açısı değerlerinin U numunesinin faz açısı değerlerinden daha yüksek olarak gözlenmiştir. Buradan hareketle atık yağ grupları ile modifikasyon sonucu elde edilen bitümlü bağlayıcıların U numunesine kıyasla daha viskoz davrandığı görülmektedir. Faz açısı sonuçları her atık yağ grubu bazında değerlendirildiğinde %1 modifikasyon oranına sahip bitümlerin (Y1-U, E1-U ve M1-U) U numunesine en yakın faz açısına sahip olduğu ve atık yağ yüzdesi arttıkça faz açısının da arttığı

görülmüştür. Özellikle en düşük modifikasyon oranı olan ağırlıkça %1'e karşılık gelen faz açısı değerleri kıyaslandığında atık yemeklik yağ modifikasyonunun en düşük faz açısı değerine sahip olduğu görülmüştür.

Çalışma kapsamında uzun dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanan DSR analizi verilerinden; G^* (kompleks kesme modülü) ve δ (faz açısı) ile elde edilen yorulma çatlağı direnci göstergesi olan $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla Şekil 5.34 elde edilmiştir.



Şekil 5.34. Uzun dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri

Düşük $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerine sahip bitümlerin, yorulma çatlaklarına karşı daha dirençli oldukları bilinmektedir ve şartnamede bu değer en fazla 5000 kPa olması beklenir. Sıcaklığın azalmasıyla tüm numunelerin, $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Tez çalışmasında kullanılan uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için ortak DSR analiz sıcaklığı olan 31 °C'de daha net bir şekilde karşılaştırma yapılabilir. Orta sıcaklıklarda yorulma çatlaklarının oluşumu bakımından en iyi performansı, en düşük $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerine sahip olan %5 atık yemeklik yağ modifikasyonu numunesi Y5-U göstermiştir. Ayrıca yorulma çatlağı oluşumu şartnamede sınır değerine, her atık grubu için %1 modifikasyon oranına sahip numuneler (Y1-U, E1-U ve M1-U) 19 °C'de, %3 modifikasyon oranına sahip numuneler (Y3-U, E3-U ve M3-U) 16 °C'de ve %5 modifikasyon oranına sahip

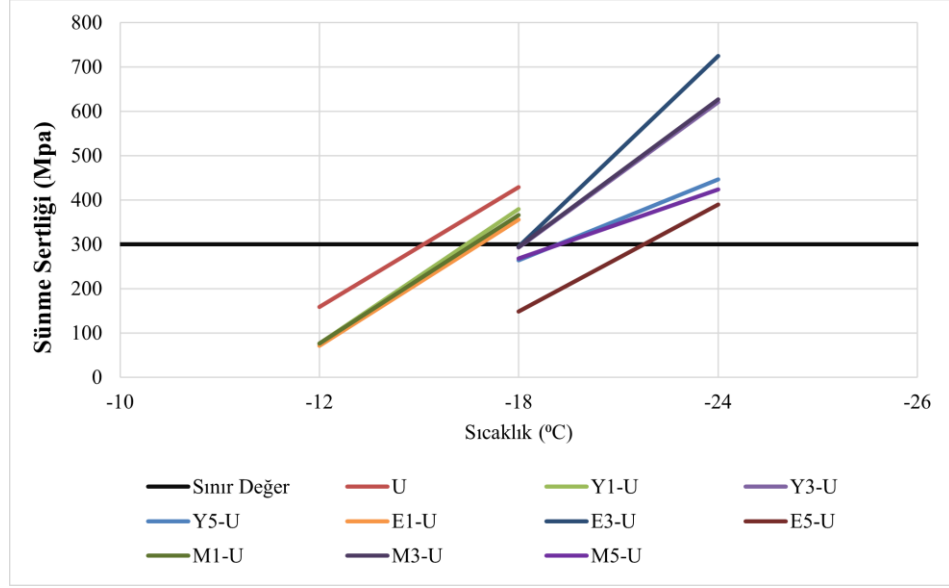
numuneler (Y5-U, E5-U ve M5-U) 13 °C’de ulaşmıştır. Bu sonuç %5 modifikasyon oranına sahip tüm numunelerin yorulma çatlağı oluşumuna karşı diğer numunelere kıyasla daha iyi direnç gösterdiği anlamına gelir. Genel olarak ise tüm atık yağ modifiye bitümler uzun dönem yaşlandırılmış bitüme göre yorulma çatlağına karşı daha dirençlidir.

5.3.2. Kiriş eğilme reometresi deney sonuçları

BBR analizi bitümlü bağlayıcıların termal çatlama direncini belirlemek amacıyla, geliştirilen hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılmış ve atık yemeklik, atık endüstriyel ve atık motor yağ grupları ile ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında modifiye edilerek gençleştirilen bitümlü bağlayıcılara AASHTO T 313 standardına uygun olarak uygulanmıştır.

BBR analizi sonucunda belirlenen bağlayıcı özelliklerinden biri olan sünme sertliği, kaplamanın düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı göstereceği direncin tahmin edilmesinde kritik bir parametredir. Bu bağlamda, daha düşük sünme sertliğine sahip bağlayıcılar, sıcaklık kaynaklı büzülme ve gerilmeler karşısında daha fazla deformasyon kabiliyetine sahip olduğundan, termal çatlak oluşumu riskini azaltır. Diğer bir ifadeyle, sünme sertliği düşük veya sünme oranı yüksek olan bağlayıcılar, düşük sıcaklıklarda daha yüksek çatlama direnci sergiler ve kaplamanın servis ömrünü olumlu yönde etkiler. Şartname gereği S değeri maksimum 300 MPa olması gerekmektedir.

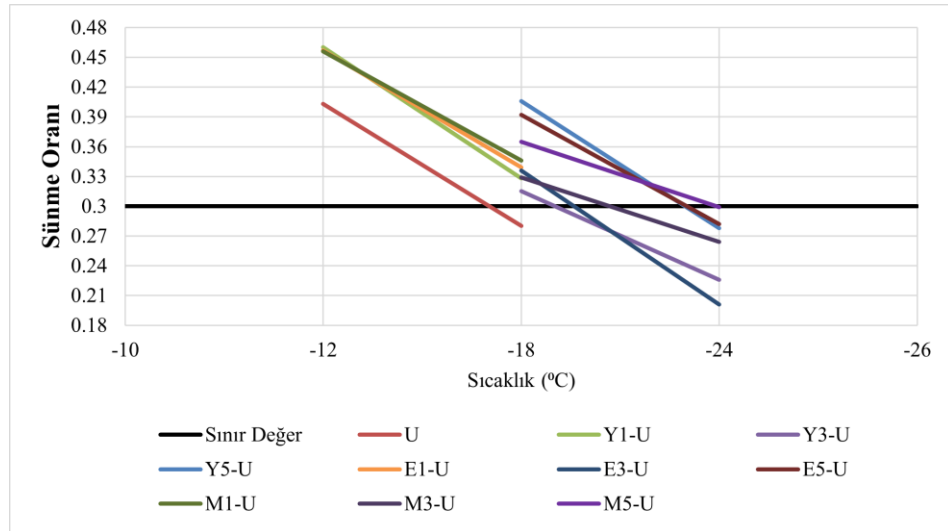
Çalışma kapsamında uzun dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanan BBR deneyi sonucunda uzun dönem yaşlandırılmış numuneler için 60 saniyede elde edilen sünme sertliği değerleri Şekil 5.35’te verilmiştir.



Şekil 5.35. Uzun dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların sünme sertliği değerleri

Hava sirkülasyonlu etüv yöntemi ile uzun dönem yaşlandırılmış bitüm ve her atık yağ grubu için %1 modifikasyon oranına sahip bitüm numuneleri (Y1-U, E1-U ve M1-U) -12 ve -18 °C olmak üzere iki deney sıcaklığında teste tabi tutulmuştur. %3 modifikasyon oranına sahip bitüm numuneleri (Y3-U, E3-U ve M3-U) ve %5 modifikasyon oranına sahip bitüm numuneleri (Y5-U, E5-U ve M5-U) için test sıcaklıkları ise -18 ve -24 °C olarak belirlenmiştir. -12 °C de %1 modifikasyon oranına sahip bitümlerin sünme sertliği değerleri tüm numuneler içinde en düşük değerler olarak kaydedilmiştir. Özellikle en düşük sünme sertliği değerine sahip numune olan E1-U için en yüksek çatlama direncine sahip yorumu yapılabilmektedir. Atık yağ grupları bazında değerlendirme yapılırsa her oran için en düşük sünme sertliği değerleri atık endüstriyel yağ aittir.

Çalışma kapsamında uzun dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanan BBR deneyi sonucunda uzun dönem yaşlandırılmış numuneler için 60 saniyede elde edilen sünme oranı değerleri Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5.36. Uzun dönem yaşlandırma için bitümlü bağlayıcıların sünme oranı değerleri

Şartname gereği sünme oranı değeri 0.3 değerinden büyük olmalıdır. Şartname sınır değerini -12 °C’de %1 modifikasyon oranına sahip bitüm numuneleri (Y1-U, E1-U ve M1-U) sağlarken; %3 modifikasyon oranına sahip bitüm numuneleri (Y3-U, E3-U ve M3-U) ve %5 modifikasyon oranına sahip bitüm numuneleri (Y5-U, E5-U ve M5-U) sınır değerini -18 °C’de sağlamaktadır. Sünme oranının yüksek olması düşük sıcaklıklarda termal çatlamalara karşı daha yüksek direnime sağlamaktadır. -12 °C gibi çok düşük sıcaklıkta bile sünme oranı açısından en yüksek sonuç E1-U ve M1-U numunelerinde görülmüştür. Uzun yaşlandırılmış numuneler bazında bakıldığında sünme oranı yüksek numuneler %1 modifikasyon oranına sahip numunelerdir.

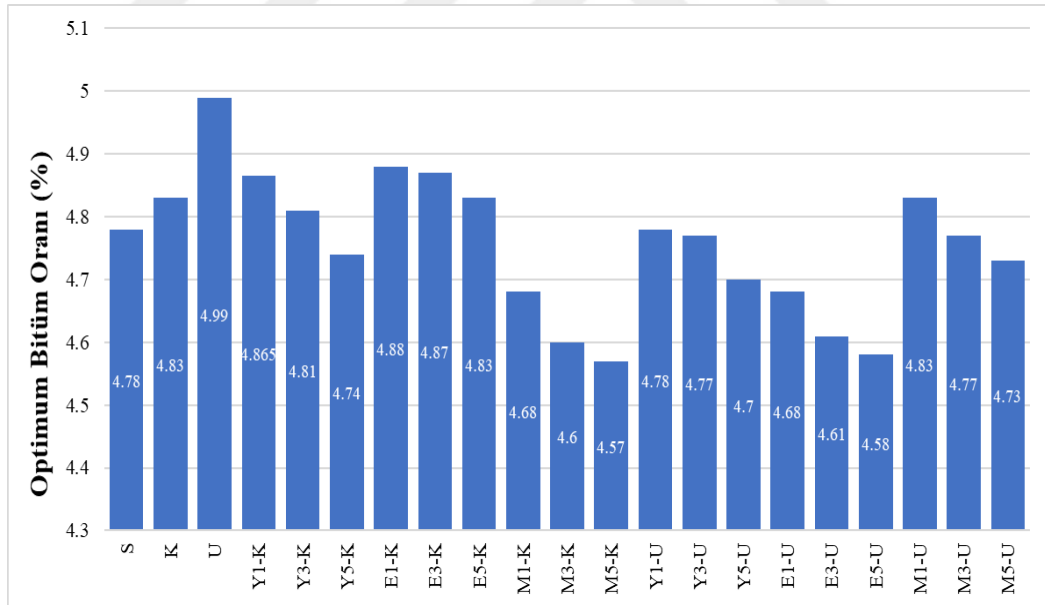
5.4. Bitümlü Karışımlara Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında kullanılan tüm bitümlü bağlayıcılar ve önceki bölümlerde detayları sunulan agrega gradasyonu kullanılarak Superpave karışım tasarım metoduna uygun olacak şekilde optimum bitüm miktarları belirlenmiş, belirlenen bu miktarlara göre sıcak karışım numuneleri üretilmiştir. Sıcak karışım numunelerine indirekt çekme dayanımı ve nem hassasiyeti testleri uygulanmıştır. Bu başlıkta uygulanan test sonuçları detaylı şekilde değerlendirilecektir.

5.4.1. Optimum bitüm oranlarının tayini

Tez çalışması kapsamında kullanılan tüm bitümler için optimum bitüm oranının belirlenmesi amacıyla, farklı bağlayıcı içeriklerine sahip en az 4 numune hazırlanmıştır. Bu numuneler, bağlayıcı oranı %0,5 aralıklarla değiştirilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan ve laboratuvar koşullarında sıkıştırılan bu numuneler üzerinde yapılan analizler sonucunda, %4 hava boşluğu değerine karşılık gelen bağlayıcı oranı, ilgili karışım için optimum bitüm oranı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, Superpave karışım tasarım şartnamesi kapsamında, yalnızca optimum bitüm oranını değil, aynı zamanda VMA ve VFA değerlerinin de belirli sınır aralıkları içerisinde olduğu kontrol edilmiştir. Bu yöntem, asfalt karışımının dayanım ve işlenebilirlik açısından en uygun bağlayıcı miktarını belirlemeyi hedeflemektedir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen optimum bitüm oranları Şekil 5.37’de verilmiştir.



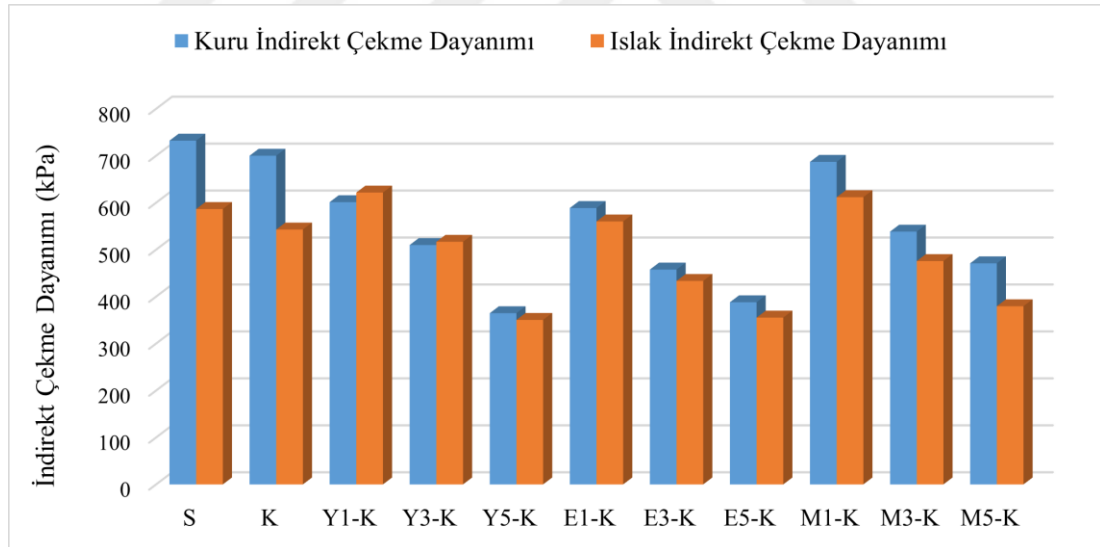
Şekil 5.37. Çalışmada kullanılan optimum bitüm oranları

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda her atık yağ grubu modifikasyonu için ağırlıkça modifikasyon yüzdesinin artışı ile optimum bağlayıcı miktarının düştüğü gözlenmektedir. En yüksek optimum bağlayıcı oranı U yani uzun dönem yaşlandırılmış numuneye aittir. En düşük optimum bağlayıcı oranı ise kısa dönem

yaşlandırılmış ve %5 oranında atık motor yağı kullanılarak gençleştirilmiş MK-5 numunesine aittir.

5.4.2. Nem hassasiyetinin ve dayanım değerlerinin belirlenmesi deney sonuçları

Tez çalışması kapsamında bitümlü sıcak karışımların nem hassasiyetinin ve dayanımlarının belirlenebilmesi amacıyla tayin edilen optimum bitümlü bağlayıcı oranlarına uygun olacak şekilde her bitümlü sıcak karışım grubu için 2 adet ıslak 2 adet kuru olmak üzere toplam 4 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler metot kısmında detayları paylaşılan prosedüre uygun olarak şartlandırılmıştır (AASHTO T-283). Şartlandırılmayan numuneler ise şartlandırılan prosedürü tamamlanıncaya kadar 25 °C'lik etüvde bekletilmiştir. Prosedür tamamlandıktan sonra şartlandırılmamış ve şartlandırılmış numuneler indirekt çekme dayanımı testine tabi tutulmuştur. Şekil 5.38'da 25°C'de kısa dönem yaşlandırılmış numuneler için şartlandırılmamış ITS (ITS_{kuru}) ve şartlandırılmış ITS ($ITS_{ıslak}$) değerleri verilmiştir.

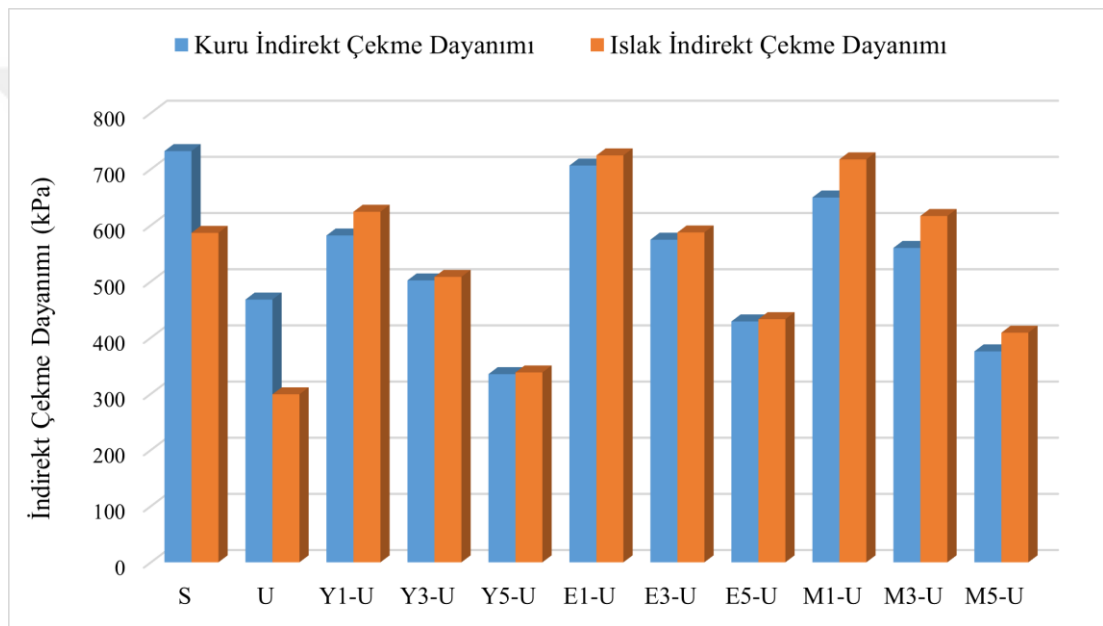


Şekil 5.38. Kısa dönem yaşlandırma için ITS değerleri

Elde edilen ITS sonuçları incelendiğinde tüm numunelerde $ITS_{ıslak}$ değerlerinin ITS_{kuru} değerlerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca atık bitüm yağ oranının artması da $ITS_{ıslak}$ ve ITS_{kuru} değerlerini düşürmektedir. Tez kapsamında elde edilen her sonuç için referans numune olan S, hem kuru hem de ıslak koşullarda yüksek performans sergilemektedir. Atık yağ modifiye bitümler arasında

değerlendirme yapıldığında en düşük modifikasyon oranı olan %1'e sahip bitümlerin (Y1-K, E1-K ve M1-K) atık yağ grupları içerisinde en yüksek ITS_{islak} ve ITS_{kuru} değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Buna karşılık, özellikle Y5-K, E5-K ve M5-K gibi yüksek modifikasyon oranına sahip karışımlarda, ITS değerleri hem kuru hem de ıslak koşullarda belirgin şekilde düşmüştür. M1-K ise hem kuru hem de koşullarda yüksek dayanım göstermiştir ve bu sonuç referans değer olan S'ye en yakın değerdir.

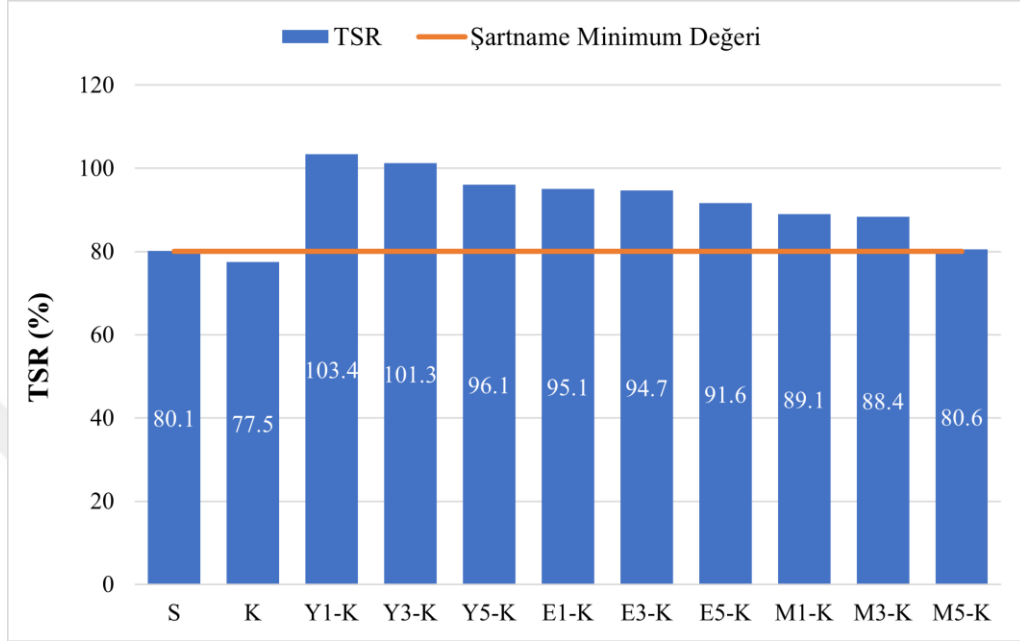
Şekil 5.39'da 25°C'de uzun dönem yaşlandırılmış numuneler için şartlandırılmamış ITS (ITS_{kuru}) ve şartlandırılmış ITS (ITS_{islak}) değerleri verilmiştir.



Şekil 5.39. Uzun dönem yaşlandırma için ITS değerleri

Elde edilen ITS sonuçları incelendiğinde atık yağ modifiye bitümlerin ITS_{islak} değerlerinin ITS_{kuru} değerlerine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle %1 ve %3 modifikasyon oranına sahip atık yağ modifikasyonunun uzun dönem yaşlandırmanın olumsuz etkilerini giderdiği söylenebilmektedir. Atık yağ modifiyeli bitümler değerlendirildiğinde en yüksek ITS_{islak} ve ITS_{kuru} değeri E1-U numunesinde kaydedilmiştir. Modifikasyon oranının artması hem ITS_{islak} hem de ITS_{kuru} değerlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Referans değer saf bitüm numunesine en yakın sonuçların E1-U numunesine ait olduğu görülmüştür.

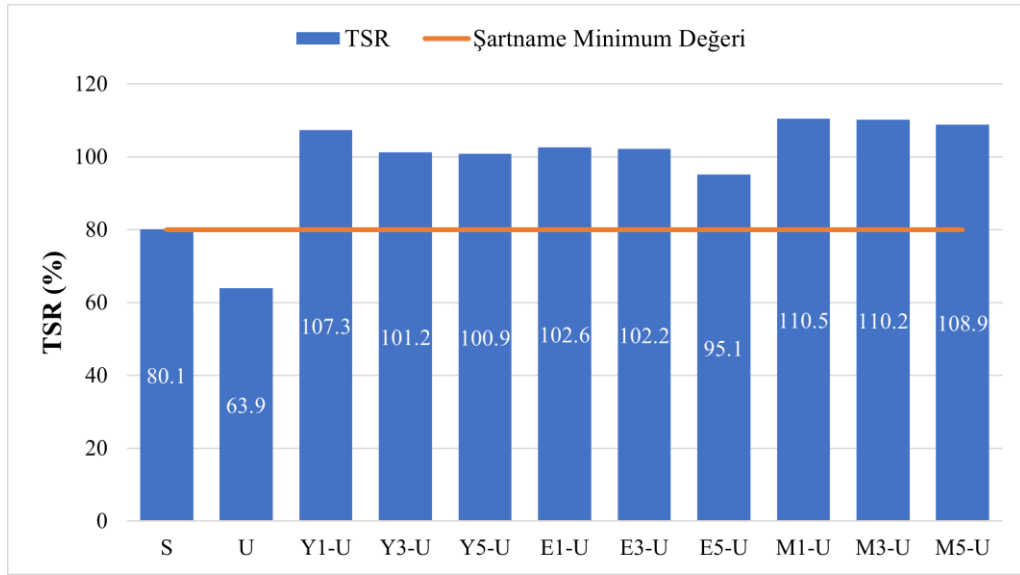
Dayanım değerleri belirlendikten sonra kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin $ITS_{\text{ıslak}}$ ve ITS_{kuru} dayanım oranlarından neme karşı hassasiyeti ifade eden TSR oranı belirlenmiştir (Şekil 5.40).



Şekil 5.40. Kısa dönem yaşlandırma için TSR değerleri

Elde edilen sonuçlara göre kısa dönem yaşlandırılmış numune (K) hariç tüm bitümlerin şartname sınır değeri olan %80 değerini karşıladığı görülmektedir. Her atık yağ grubu kendi içerisinde değerlendirildiğinde modifikasyon oranının artması sonucu TSR değerlerinin düştüğü gözlenmektedir. En yüksek TSR oranı Y1-K numunesine aittir. Aynı zamanda, tüm modifikasyon oranları (%1, %3 ve %5) dikkate alındığında, atık yemeklik yağ ile modifiye edilen karışımlar, diğer atık yağ türlerine kıyasla en yüksek TSR değerlerini vermiştir. Bu durum; kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde atık yemeklik yağ modifikasyonunun, bağlayıcının suya karşı direncini artırmada daha etkili olduğunu ve nem hassasiyetini azaltıcı bir katkı sağladığını göstermektedir.

Dayanım değerleri belirlendikten sonra uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin $ITS_{\text{ıslak}}$ ve ITS_{kuru} dayanım oranlarından neme karşı hassasiyeti ifade eden TSR oranı belirlenmiştir (Şekil 5.41).



Şekil 5.41. Uzun dönem yaşlandırma için TSR değerleri

Elde edilen sonuçlara göre uzun dönem yaşlandırılmış numune (U) hariç tüm bitümlerin şartname sınır değeri olan %80 değerini karşıladığı görülmektedir. Bu bulgu, yaşlanmamış ya da atık yağ ile modifiye edilmiş bağlayıcıların nem hasarına karşı yeterli düzeyde dayanım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Her atık yağ grubu kendi içerisinde değerlendirildiğinde modifikasyon oranının artması sonucu TSR değerlerinin düştüğü gözlenmektedir. En yüksek TSR oranı M1-U numunesine aittir. Aynı zamanda, tüm modifikasyon oranları (%1, %3 ve %5) dikkate alındığında, atık motor yağ ile modifiye edilen karışımlar, diğer atık yağ türlerine kıyasla en yüksek TSR değerlerini vermiştir. Sonuç olarak, atık motor yağı modifikasyonunun, bağlayıcının nem hasarına karşı direncini artırma açısından diğer atık yağ türlerine kıyasla daha etkili bir alternatif sunduğu söylenebilir. Bu bulgular hem performans hem de sürdürülebilir kaynak kullanımı açısından atık motor yağının asfalt teknolojisinde potansiyel bir katkı maddesi olarak değerlendirilebileceğini desteklemektedir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen nem hassasiyetinin ve dayanım değerlerini kapsamlı ve toplu şekilde özetlemek adına Çizelge 5.9’te verilmiştir.

Çizelge 5.9. Bitümlü sıcak karışımların ITSkuru, ITSıslak ve TSR değerleri

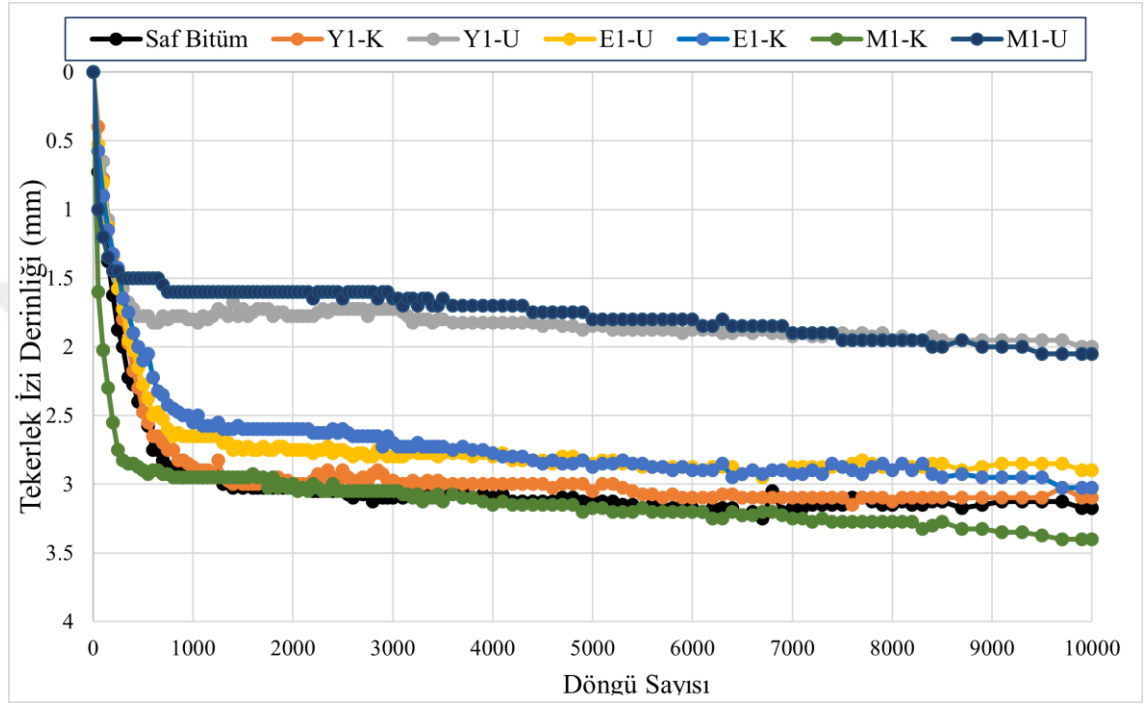
Numune	Kuru ITS (kPa)	Islak ITS (kPa)	TSR (%)
S	732.095	586.485	80.1
K	700	542.835	77.5
U	467.78	299.095	63.9
Y1-K	601.12	621.575	103.4
Y3-K	509.86	516.72	101.3
Y5-K	364.605	350.32	96.1
E1-K	588.62	560.04	95.10
E3-K	457.52	433.32	94.70
E5-K	387.92	355.27	91.60
M1-K	686.94	611.71	89.1
M3-K	538.32	475.69	88.4
M5-K	470.83	379.49	80.6
Y1-U	581.835	624.085	107.3
Y3-U	501.865	508.13	101.2
Y5-U	334.955	338.01	100.9
E1-U	706.34	724.42	102.60
E3-U	574.35	587.26	102.20
E5-U	428.82	432.83	95.10
M1-U	649.47	717.36	110.5
M3-U	559.71	616.57	110.2
M5-U	375.52	408.81	108.9

5.5. Hamburg tekerlek izi deney sonuçları

Hamburg Tekerlek İzi deneyi AASHTO T-324 standartlarına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ortalama tekerlek izi derinlikleri Şekil 5.43 verilmiştir.

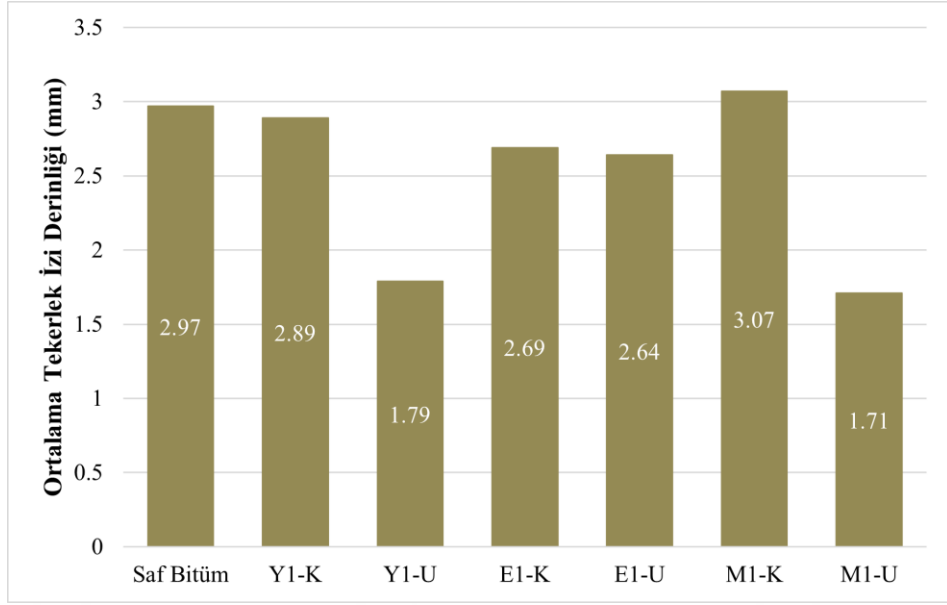
Tez çalışması kapsamında Hamburg Tekerlek İzi uygulanacak numune seçimi için, numunelerin nem hasarına karşı gösterdikleri direnç hakkında değerlendirme olanağı sağlayan TSR oranı dikkate alınmıştır. TSR oranı en yüksek olan numune grupları hem kısa hem uzun dönem numuneler için ayrı ayrı seçilmiş ve HWT deneyi uygulanmıştır.

Buna göre Çizelge 5.9'dan da görüleceği gibi her atık yağ grubu için kısa dönem yaşlandırma koşullarında %1 modifikasyon oranına sahip Y1-K, E1-K ve M1-K seçilmiştir. Uzun dönem yaşlandırma koşullarında ise yine aynı şekilde %1 modifikasyon oranına sahip Y1-U, E1-U ve M1-U seçilmiştir. HWT deneyi için seçilen numunelerin tekerlek izi derinlikleri Şekil 5.42'da sunulmuştur.



Şekil 5.42. Hamburg Tekerlek izi derinliği değerleri

Tekerlek izi derinlikleri ortalama değerleri Şekil 5.43'da verilmiştir. Elde edilen HWT sonuçlar değerlendirildiğinde tekerlek izi derinliğinin şartname sınır değerleri içerisinde kaldığı görülmektedir. En fazla tekerlek izi değeri 3.07 mm olarak M1-K'da görülmüştür. En düşük tekerlek izi derinliği ise 1.71 mm olarak M1-U'da kaydedilmiştir. Genel olarak değerlendirme yapılırsa atık yağ modifikasyonunun özellikle uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi dayanımını saf bitüme oranla iyileştirdiği görülmektedir.



Şekil 5.43. Hamburg Tekerlek izi derinliği ortalama değerleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında laboratuvar ortamında kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların 3 farklı atık yağ ile (yemeklik, endüstriyel ve motor) modifiye edilerek gençleştirilmesi incelenmiştir. Öncelikle mevcut laboratuvar bitümlü bağlayıcı yaşlandırma yöntemleri sonucu elde edilen yaşlanmış bağlayıcının yetersiz kalması nedeniyle, bu sorunu gidermek amacıyla Hava Sirkülasyonlu Etüv yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem ‘Bitüm Yaşlandırma Simülasyonu İçin Geliştirilmiş Kısa ve Uzun Dönem Bitümlü Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemi’ başlığı ile uluslararası patent başvurusu sürecindedir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntem ile elde edilen kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler ayrı ayrı olmak üzere tez çalışmasında kullanılan atık yemeklik, endüstriyel ve motor yağlar ile ağırlıkça (%1, %3 ve %5) oranlarında modifiye edilerek gençleştirilmiştir. Gençleştirme sonucu elde edilen bitümler, kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümler ile saf bitümlü bağlayıcı tez çalışması kapsamında fiziksel, kimyasal ve reolojik analizlere tabi tutulmuştur. Kapsamlı analizler sonucu elde edilen veriler referans değer olan 50/70 penetrasyon sınıfı saf bitüm ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaların ve analizlerin sonuçlarının detaylı şekilde değerlendirilebilmesi adına kısa ve uzun dönem yaşlandırma koşulları her sonuç için ayrı ayrı sunulmuştur. Ayrıca sonuç çıktıları fazla olan deneysel çalışmalar ve analizler için ise kısa dönem ve uzun dönem yaşlanma koşullarının yanı sıra atık yağ grupları da kendi içerisinde ayrı şekilde verilmiştir. Atık yemeklik, endüstriyel ve motor yağlar ile gerçekleştirilen bitüm modifikasyonu sonrasında elde edilen bitümlü bağlayıcılara uygulanan standart bağlayıcı deneylerinden penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, dönel viskozimetre deneyleri ile bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetini konusunda fikir sahibi olmaya yarayan penetrasyon indeksi analizi uygulanmıştır. Ayrıca tez kapsamında kullanılan bitümlerin reolojik özelliklerinin tespiti için Superpave bağlayıcı performans deneyleri DSR ve BBR uygulanmıştır. Yine tez çalışmasında kullanılan bitümlü bağlayıcıların yüzey yapılarının incelenebilmesi için SEM, içerik analizleri için EDS, kristal yapılarının incelenmesi için XRD ve kimyasal bağlar ve fonksiyonel grupların tespiti için FTIR analizleri uygulanmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan tüm bitümlü bağlayıcılar ile seçilen agrega gradasyonu kullanılarak Superpave karışım tasarım metoduna uygun olacak şekilde optimum bitüm miktarları belirlenmiş, belirlenen bu miktarlara göre sıcak karışım numuneleri üretilmiştir. Elde edilen bitümlü sıcak

karışımların nem hassasiyetinin ve dayanımlarının belirlenebilmesi amacıyla indirekt çekme dayanımı ve nem hassasiyeti testleri uygulanmıştır. Ayrıca bitümlü karışımların neme karşı duyarlılığını ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek yükü altında oluşan kalıcı deformasyon davranışını değerlendirmek üzere Hamburg tekerlek izi deneyi uygulanmıştır. Tez çalışması kapsamında elde edilen tüm bulguların özetleri ve yapılması planlanan çalışmalara dair öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Öncelikle uygulanan penetrasyon deneyleri sonucunda kısa ve uzun dönem yaşlandırma koşullarında referans değer olan saf bitümlü bağlayıcıya en yakın atık yağ modifikasyon oranının %3 olduğu görülmüştür. Ayrıca atık yağ modifikasyon oranının artışı ile penetrasyon değeri artış eğilimi göstermektedir. Yumuşama noktası deneyleri sonuçlarına bakıldığında saf bitüme en yakın modifikasyon oranının kısa dönem yaşlandırma koşulları için %3, uzun dönem yaşlandırma koşulları için ise %5 olduğu görülmüştür. Yine beklendiği şekilde atık yağ modifikasyon oranının artışı yumuşama noktası değerlerinde düşüş eğilimine sebep olmaktadır. Bu durum, atık yağların yaşlanmış bağlayıcıları gençleştirmek amacıyla kullanılmasında, modifikasyon oranının kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.
- Bitümlü bağlayıcıların atık yağ modifikasyonunda kullanımı konusundaki en önemli çekincelerden olan sıcaklık hassasiyetini değerlendirmek amacıyla yapılan penetrasyon analizi sonucunda, kısa ve uzun dönem yaşlanmış bitümlerin yanı sıra referans değer saf bitümün de sıcaklık hassasiyetinin iyileştiği sonucuna varılmıştır. Modifikasyon oranının artışı her atık yağ grubu için penetrasyon indeksini artırmış ve yaşlanmanın olumsuz etkilerini daha belirgin şekilde gidermiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar atık motor yağ modifikasyonunun hem kısa hem de uzun dönem yaşlandırma koşulları için daha istikrarlı ve etkin olduğu görülmüştür.
- Bitümlü bağlayıcıların işlenebilirliği konusunda bilgi veren dönel viskozimetre deneyi sonucunda tüm atık yağ modifikasyonları için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları saf bitüme kıyasla düşmüştür. Ayrıca modifikasyon oranının artması ile bu düşüş eğilimi artmaktadır. Kısa dönem yaşlandırma için atık yağ modifikasyonları içerisinde en düşük karıştırma sıcaklığı M5-K numunesinde,

en düşük sıkıştırma sıcaklığı ise E5-K numunesinde kaydedilmiştir. Uzun dönem yaşlandırma için atık yağ modifikasyonları içerisinde en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı Y5-U numunesinde kaydedilmiştir. Bu bulgular, farklı yaşlandırma koşullarında atık yağ modifikasyonunun bitümlü bağlayıcıların işlenebilirliğine farklı düzeylerde etki ettiğini ortaya koymaktadır.

- Malzeme karakterizasyonu amacıyla uygulanan tüm analizler (SEM, EDS, XRD ve FTIR), atık yağların bitümlü bağlayıcılarla uyumlu olduğunu ve bağlayıcı matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymuştur. Özellikle SEM ve EDS analizleri sonucunda yaşlandırmanın olumsuz etkilerinin atık yağ modifikasyonu ile giderildiği net şekilde görülmüştür. Atık yağlar bazında değerlendirildiğinde ise kısa ve uzun dönem yaşlandırmanın etkilerini iyileştirme konusunda atık yemeklik yağ daha etkili olmuştur. Her atık yağ grubu için modifikasyon oranının artması atık yağın gençleştirme etkisini artırmıştır. FTIR analizi sonuçlarında ise atık yağ modifikasyonlarının tamamında saf bitüme kıyasla yeni ve farklı piklerle karşılaşılması gerçekleştirilen modifikasyonun kimyasal yapıda herhangi bir değişikliğe sebep olmadığının, fiziksel bir süreç olduğunun kanıtıdır.
- Superpave performans testlerinden DSR deneyi ile, atık yağ modifikasyonu uygulanarak elde edilen gençleştirilmiş bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıkta deformasyona karşı dayanım performansının saf bitüm ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. DSR sonuçları değerlendirildiğinde atık yağ grupları ile modifikasyon sonucu elde edilen bitümlü bağlayıcıların saf bitüme kıyasla daha viskoz davrandığı görülmektedir. Tüm numuneler için kısa dönem yaşlandırma koşullarında ortak analiz sıcaklığı olan 64 °C’de atık yağ grupları içerisinde kıyaslama yapıldığında atık motor yağı modifiyeli bitümlü bağlayıcıların aynı modifikasyon oranlarında diğer modifiye bitümlere oranla daha düşük faz açısına sahip olduğu görülmektedir. Faz açısı sonuçları her atık yağ grubu bazında değerlendirildiğinde %1 modifikasyon oranına sahip bitümlerin saf bitüme en yakın faz açısına sahip olduğu ve atık yağ yüzdesi arttıkça faz açısının da arttığı görülmüştür. Daha düşük faz açısı daha iyi tekerlek izi

dayanımı anlamına geldiği için, Tekerlek izi dayanımı konusunda kısa dönem yaşlandırma koşullarında atık motor yağı öne çıkmaktadır. Özellikle en düşük modifikasyon oranı olan ağırlıkça %1'e karşılık gelen faz açısı değerleri kıyaslandığında saf bitümlü bağlayıcının faz açısı değerine en yakın sonuçtur. Tekerlek izi faktörü değerleri kısa dönem yaşlandırma koşulları için değerlendirildiğinde ise %1 atık yağ modifikasyon oranına sahip bitümlerin saf bitümlü bağlayıcıya en yakın tekerlek izi faktörüne sahip olduğu görülmüştür. En yüksek tekerlek izi faktörü ise saf bitümden sonra %1 atık yemeklik yağ modifikasyon oranına aittir. Yüksek tekerlek izi faktörü, bitümlü bağlayıcının tekerlek izine karşı yüksek direnç gösterdiğini ifade ettiği için kısa dönem yaşlandırma koşullarında en etkin modifikasyon oranının %1, en etkin atık yağın ise atık yemeklik yağ olduğu söylenebilmektedir. Uzun dönem yaşlandırma koşullarına ait faz açıları değerlendirildiğinde ise atık yağ grupları ile modifikasyon sonucu elde edilen bitümlü bağlayıcıların daha viskoz davrandığı görülmektedir. Faz açısı sonuçları her atık yağ grubu bazında değerlendirildiğinde %1 modifikasyon oranına sahip bitümlerin U numunesine en yakın faz açısına sahip olduğu ve atık yağ yüzdesi arttıkça faz açısının da arttığı görülmüştür. Özellikle en düşük modifikasyon oranı olan ağırlıkça %1'e karşılık gelen faz açısı değerleri kıyaslandığında atık yemeklik yağ modifikasyonunun en düşük faz açısı değerine sahip olduğu görülmüştür. Tüm numuneler için uzun dönem yaşlandırma koşullarında ortak analiz sıcaklığı olan 31 °C'de atık yağ grupları içerisinde kıyaslama yapıldığında orta sıcaklıklarda en iyi yorulma çatlağı direnci %5 modifikasyon oranına sahip atık yemeklik yağı modifikasyonuna aittir. Genel olarak ise tüm atık yağ modifiye bitümler uzun dönem yaşlandırılmış bitüme göre yorulma çatlağına karşı daha dirençlidir.

- Superpave performans testleri kapsamında gerçekleştirilen BBR deneyleri ile, uzun dönem yaşlandırma koşulları için atık yağ modifikasyonu ile gençleştirilmiş bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıkta çatlama dayanımı açısından performans kriterlerinin, saf bitüm ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en düşük sünme sertliği en düşük modifikasyon oranı %1 ile modifiye edilen bitümlerde görülmüştür. Atık yağlar bazında değerlendirildiğinde ise özellikle %1

modifikasyon oranına sahip atık endüstriyel ve motor yağları en yüksek çatlama direncini göstermiştir. Sünme oranı sonuçları değerlendirildiğinde ise -12 °C gibi çok düşük sıcaklıkta bile en iyi düşük sıcaklık termal çatlama direncini gösteren numuneler yine %1 atık yağ modifikasyon oranına sahip numunelerde kaydedilmiştir. Atık yağlar bazında değerlendirmede ise sünme sertliği sonuçları ile benzer şekilde atık endüstriyel ve motor yağı öne çıkmıştır.

- Superpave karışım tasarım metoduna uygun olacak şekilde belirlenen optimum bitüm miktarları atık yağ modifikasyon yüzdesinin artışı ile düşmüştür. Kısa dönem yaşlandırma koşulları için indirekt çekme dayanımı açısından değerlendirildiğinde saf bitümlü bağlayıcının kuru ve ıslak ITS değerine sahip olduğu ve saf numuneye en yakın sonucun %1 atık motor yağ modifikasyonu numunesine ait olduğu görülmüştür. Atık yağ ile modifiye edilen numunelerde, ITS değerleri modifikasyon oranının artmasıyla birlikte azalma eğilimi göstermektedir. Uzun dönem yaşlandırma koşulları indirekt çekme dayanımı açısından değerlendirildiğinde ise atık yağ modifiye bitümlerin $ITS_{\text{ıslak}}$ değerleri ITS_{kuru} değerlerine göre daha yüksek olarak kaydedilmiştir. Özellikle %1 ve %3 modifikasyon oranına sahip atık yağ modifikasyonunun uzun dönem yaşlandırmanın olumsuz etkilerini giderdiği söylenebilmektedir. Atık yağ modifiyeli bitümler değerlendirildiğinde en yüksek $ITS_{\text{ıslak}}$ ve ITS_{kuru} değeri E1-U numunesinde kaydedilmiştir. Modifikasyon oranının artması hem ITS_{kuru} hem de ITS_{kuru} değerlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Referans değer saf bitüm numunesine en yakın sonuçlar %1 atık endüstriyel yağ numunesine aittir.
- Elde edilen kuru ve ıslak ITS değerlerinden elde edilen ve numunelerin neme karşı hassasiyetini ifade eden TSR oranı her iki yaşlandırma koşulu için atık yağ modifikasyon oranının artması ile düşmektedir. Kısa dönem yaşlandırma koşullarında en yüksek TSR oranı %103.4 değeri ile %1 atık yemeklik yağ modifikasyonuna aittir. Atık yemeklik yağ modifikasyonu her modifikasyon oranı için en yüksek TSR değerine sahip olmasıyla kısa dönem yaşlandırma koşulları için öne çıkmaktadır. Uzun dönem yaşlandırma koşullarında en yüksek TSR oranı %110.5 değeri ile %1 atık motor yağ modifikasyonuna aittir. Atık motor yağ modifikasyonu her modifikasyon oranı için en yüksek TSR

değerine sahip olmasıyla uzun dönem yaşlandırma koşulları için öne çıkmaktadır. Bu durum; kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde atık yemeklik yağ modifikasyonunun, uzun yaşlandırma koşullarında ise atık motor yağ modifikasyonunun bağlayıcının suya karşı direncini artırmada daha etkili olduğunu ve nem hassasiyetini azaltıcı bir katkı sağladığını göstermektedir.

- Atık yağ modifikasyonunun en kritik değerlerinden olan tekerlek izi dayanımı sonuçları detaylı şekilde değerlendirilmiş olup, kısa dönem yaşlandırma koşulları dikkate alındığında en düşük tekerlek izi derinliği ise 1.79 mm olarak %1 atık yemeklik yağ numunesinde kaydedilmiştir. Uzun dönem yaşlandırma koşulları dikkate alındığında en düşük tekerlek izi derinliği ise 1.71 mm olarak %1 atık motor yağ numunesinde kaydedilmiştir. Genel olarak değerlendirme yapılırsa atık yağ modifikasyonunun özellikle uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi dayanımını saf bitüme oranla iyileştirdiği görülmektedir.

Elde edilen tüm deneysel veriler bütüncül olarak değerlendirildiğinde, farklı yaşlandırma koşullarında uygulanan farklı tür ve oranlardaki atık yağların bitümlü bağlayıcı özellikleri üzerindeki etkilerinin değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, uygulanan atık yağ modifikasyon oranının, gençleştirilmiş bağlayıcının ve karışımın performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu ve optimum performans için bu oranın dikkatle optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Eğer elde edilen sonuçlar gençleştirilmiş bitümlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından değerlendirilirse atık yemeklik yağ modifikasyonunun diğer atık yağlara kıyasla öne çıktığı görülmüştür. Atık yağ ile gençleştirilmiş bitümlü bağlayıcıların karışım içerisindeki performansı değerlendirildiğinde ise özellikle dayanım, nem hassasiyetine karşı direnç ve tekerlek izi direnci bakımından, atık motor yağı ile yapılan modifikasyonun diğer atık yağ türlerine kıyasla daha üstün performans gösterdiği belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen analiz sonuçları, yalnızca araştırmada kullanılan atık yağ örnekleri ve uygulanan deneysel koşullar çerçevesinde değerlendirilmelidir. Atık yağların kaynak profili, kimyasal bileşimi ve maruz kaldığı ön işlem basamakları, elde edilen verilerin farklı sistemlere doğrudan uygulanabilirliğini sınırlamaktadır.

Bununla birlikte, çalışma boyunca izlenen metodolojik yaklaşım, deneysel tasarım ve değerlendirme ölçütleri, benzer kapsamda yürütülecek ileri araştırmalar için referans niteliği taşımaktadır. Bu yönüyle çalışma, sahip olduğu sistematik ve teknik derinlik sayesinde, literatürdeki boşlukları doldurmanın ötesine geçerek, benzer nitelikteki proses geliştirme çalışmalarına yön verebilecek nitelikte güçlü bir referans niteliği taşımaktadır.

Bu çalışma, üç farklı atık yağ türünün kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar üzerindeki gençleştirici etkilerini karşılaştırmalı olarak inceleyen kapsamlı bir araştırma olarak literatüre katkı sağlamaktadır. Farklı atık yağ türlerinin bağlayıcının reolojik ve mekanik özelliklerine etkisi sistematik biçimde incelenmiş; yaşlanma seviyesine bağlı olarak katkıların performans üzerindeki farklılaştırıcı rolleri detaylı şekilde ortaya konmuştur. Bu yönüyle çalışma, yalnızca atık malzemelerin geri kazanımına yönelik sürdürülebilir bir çözüm sunmakla kalmayıp, aynı zamanda hangi tür atık yağın, hangi yaşlanma koşulunda daha etkili olduğu sorusuna da bilimsel yanıtlar üretmiştir.

Bu tez kapsamında yürütülen çalışma, üç farklı atık yağ türünün hem kısa hem de uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar üzerindeki gençleştirici etkilerini çok yönlü ve karşılaştırmalı olarak inceleyerek, literatürde bu alandaki çalışmalara anlamlı bir katkı sunmaktadır. Çalışmada, her bir atık yağ türünün farklı yaşlanma düzeylerindeki bağlayıcılara etkisi; reolojik, mekanik ve işlenebilirlik parametreleri üzerinden detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, atık yağların yalnızca bitümlü bağlayıcıları yeniden işlevsel hâle getirme kapasitesini değil, aynı zamanda sürdürülebilir altyapı malzemelerinin geliştirilmesinde etkin bir rol üstlenebileceğini de ortaya koymuştur. Bu bağlamda, çevresel açıdan zararlı ve bertarafı güç olan atık yağların kontrollü ve optimize edilmiş oranlarda yeniden kullanımı sayesinde hem çevresel yük azaltılmakta hem de fosil kaynaklı ham madde tüketimi sınırlandırılmaktadır. Bu çalışma, döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde atıkların yeniden kullanımının, yüksek performanslı ve çevresel açıdan sürdürülebilir bitümlü bağlayıcıların geliştirilmesine olanak tanıdığını bilimsel verilerle ortaya koymakta ve sürdürülebilir asfalt teknolojilerine katkı sağlayacak değerli bir kaynak oluşturmaktadır.

Tez çalışması kapsamında yalnızca atık yağların performans etkileri araştırılmakla kalmamış, aynı zamanda laboratuvar koşullarında kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların güvenilir biçimde üretilebilmesine olanak sağlayan kontrollü bir yaşlandırma yöntemi de geliştirilmiştir. Bu yöntem, mevcut standart prosedürleri temel alarak oluşturulmuş ve özellikle saha koşullarını laboratuvar ortamında temsil etme yeterliliği artırılmıştır. Geliştirilen yöntem, bağlayıcıların yaşlanma derecelerini homojen şekilde kontrol etme ve karşılaştırmalı analizler için tutarlı numuneler elde etme açısından önemli bir yenilik sunmaktadır. Bu katkı hem deneysel doğruluk hem de yöntemsel tekrarlanabilirlik açısından literatürdeki çalışmalara kıyasla önemli bir avantaj sunmakta olup, ilerleyen araştırmalarda güvenilir ve standartlaştırılabilir bir yaşlandırma protokolü olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular ve geliştirilen laboratuvar yaşlandırma yöntemi, ileride yapılacak araştırmalar için önemli bir temel teşkil etmektedir. Gelecek çalışmalarda, farklı kimyasal yapıya sahip atık yağ türlerinin bağlayıcı performansı üzerindeki etkileri optimum atık yağ oranı gözetilerek daha ayrıntılı olarak incelenebilir ve bu katkıların kimyasal karakterizasyonları ile performans ilişkileri derinleştirilebilir. Yaşlandırılmış ve atık yağ ile gençleştirilmiş bağlayıcıların asfalt karışımı içerisindeki davranışları sıcak karışım asfalt saha performans testleriyle desteklenerek saha performansı açısından da değerlendirilmelidir. Bunun yanı sıra, atık yağ katkılarının çevresel etkileri, karbon ayak izi ve yaşam döngüsü analizleri ile detaylandırılarak sürdürülebilirlik boyutu daha kapsamlı biçimde ortaya konabilir. Böylece hem malzeme bilimi hem de çevresel mühendislik açısından disiplinler arası çalışmalarla bu alandaki literatür daha da zenginleştirilebilir. Bu bağlamda, ileriye dönük çalışmalarda, kullanılan atık malzemelerin karbon ayak izi, geri dönüşüm potansiyeli ve çevresel etkileri dikkate alınarak yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, atık yağ modifiyeli bağlayıcıların üretim ve uygulama süreçlerinde ortaya çıkan toplam maliyetin, geleneksel bağlayıcılara kıyasla ne düzeyde avantaj sağladığının belirlenmesine yönelik ayrıntılı bir maliyet analiz ileriki çalışmalarda incelenecektir. Bu kapsamda, ileriki çalışmalarda, ekonomik değerlendirmelerin yapılması, sürdürülebilir asfalt teknolojilerinin yaygınlaşmasına katkı sunabilecek politika ve yönetmeliklerin geliştirilmesi açısından önemli bir veri tabanı oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- AASHTO R 28, 2022. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 240, 2022. Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 313, 2021. Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 315, 2020. Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 324, 2019. Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, M323, 2017. Standard specification for Superpave volumetric mix design. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, R35, 2017. Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abd Ali, N. S., Joni, H. H., Al-Rubaei, R. H., 2024. Evaluation of Reclaimed Asphalt Mixtures Rejuvenated with Waste Engine Oil to Resist Rutting Deformation. Open Engineering, 14(1), 20220555.
- Abdalla, A., Faheem, A. F., Alsalihi, M., Sobolev, K., 2022. Investigation of The Influence Of Off-Spec Coal Combustion Waste on Asphalt Binder Rheological Performance and Aging Sensitivity. Cleaner Materials, 4, 100073.
- Acıöz, 2025. Atık Yağlar Hakkında Genel Bilgiler. Erişim Tarihi: 13.03.2025 <https://www.acioz.com.tr/tr/atik-yaglar-hakkinda-genel-bilgiler>
- Aghazadeh Dokandari, P., Topal, A., Kaya Ozdemir, D., 2021. Rheological and microstructural investigation of the effects of rejuvenators on reclaimed asphalt pavement bitumen by DSR and AFM. International Journal of Civil Engineering, 19(7), 749-758.
- Airey, G. D., 2003. State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials. International Journal of Pavement Engineering, 4(3), 165-176.

- Airey, G. D., Rahimzadeh, B., Collop, A. C., 2002. Linear Viscoelastic Limits of Bituminous Binders. *Asphalt Paving Technology*, 71, 89-115.
- Aksoy, A., Şamlioglu, K., Tayfur, S., Özen, H., 2005. Effects of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 19(1), 11-18.
- Al-Abdul Wahhab, H. I., Dalhat, M. A., Habib, M. A., 2017. Storage Stability and High-Temperature Performance of Asphalt Binder Modified with Recycled Plastic. *Road Materials and Pavement Design*, 18(5), 1117-1134.
- Al-Ghouti, M. A., Al-Atoum, L., 2009. Virgin and Recycled Engine Oil Differentiation: A Spectroscopic Study. *Journal Of Environmental Management*, 90(1), 187-195.
- Almeda, R., Hyatt, C., Buskey, E. J., 2014. Toxicity of Dispersant Corexit 9500A and Crude Oil to Marine Microzooplankton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106, 76-85.
- Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Satar, M. K. I. M., Kamarudin, S. N. N., Mahmud, M. Z. H., Ismail, C. R., Mashros, N., 2021. A Review on the Usage of Waste Engine Oil with Aged Asphalt as a Rejuvenating Agent. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2374-2380.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010. *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*.
- Anadolu Ajansı, 2025. Türkiye’de Geçen Yıl Yaklaşık 35 Bin Ton Bitkisel Atık Yağ Toplandı. Erişim Tarihi: 17.04.2025. <https://www.aa.com.tr/tr/yesilhat/sifir-atik/turkiyede-gecen-yil-yaklasik-35-bin-ton-bitkisel-atik-yag-toplandi/1822991>
- Antunes, V., Moreno, F., Rubio-Gámez, M., Freire, A. C., Neves, J., 2022. Assessing RAP Multi-Recycling Capacity by the Characterization of Recovered Bitumen Using DSR, *Sustainability*, 14(16), 10171.
- Aslam, M. N., Nelson, M. N., Kailis, S. G., Bayliss, K. L., Speijers, J., Cowling, W. A., 2009. Canola Oil Increases in Polyunsaturated Fatty Acids and Decreases in Oleic Acid in Drought-Stressed Mediterranean-Type Environments. *Plant Breeding*, 128(4), 348-355.
- Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., 2012. Investigation on Physical Properties of Waste Cooking Oil–Rejuvenated Bitumen Binder. *Construction and Building materials*, 37, 398-405.
- ASTM C 131-03, 2000. *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small–Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Vol 04.02, US.

- ASTM D 4402, 2013. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM International, 2016. Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry.
- Atsar, F. S., Kukwa, D. T., Tyohemba, R. L., Ekpo, A. and Wuana, R. A., 2013. Cleaning of Heavy Metals from Spent Lubrication Oil by Adsorption Process Using Acid Modified Clay. *International Journal of Chemical Science and Technology*, 3(4): 71-75.
- Awogbemi, O., Onuh, E. I., & Inambao, F. L., 2019. Comparative Study of Properties and Fatty Acid Composition of Some Neat Vegetable Oils and Waste Cooking Oils. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(3), 417-425.
- Azahar, W. N. A. W., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Hasan, M. M., Shaffie, E., 2019. X-Ray Diffraction Analysis of Bitumen Containing Untreated and Treated Waste Cooking Oil. *Int. J. Recent Technol. Eng*, 8, 435-438.
- Babagoli, R., Jalali, F., & Khabooshani, M., 2023. Performance Properties of WMA Modified Binders and Asphalt Mixtures Containing PPA/SBR Polymer Blends. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(1), 274-306.
- Banani, R., Youssef, S., Bezzarga, M., Abderrabba, M., 2015. Waste Frying Oil with High Levels of Free Fatty Acids as One of The Prominent Sources of Biodiesel Production. *J. Mater. Environ. Sci*, 6(4), 1178-1185.
- Banerji, A. K., Chakraborty, D., Mudi, A., Chauhan, P., 2022. Characterization of Waste Cooking Oil and Waste Engine Oil on Physical Properties of Aged Bitumen. *Materials Today: Proceedings*, 59, 1694-1699.
- Basel Sözleşmesi, 2017. Practical guidance for the development of inventories of waste oils. Erişim Tarihi: 07. 04.2025. <https://www.basel.int/>
- Behnood, A., Gharehveran, M. M., 2019. Morphology, Rheology, and Physical Properties of Polymer-Modified Asphalt Binders. *European Polymer Journal*, 112, 766-791.
- Bhatia, S. K., Gurav, R., Choi, T. R., Kim, H. J., Yang, S. Y., Song, H. S., Yang, Y. H., 2020. Conversion of Waste Cooking Oil into Biodiesel Using Heterogenous Catalyst Derived from Cork Biochar. *Bioresource Technology*, 302, 122872.
- Bilema, M., Aman, M. Y., Hassan, N. A., Al-Saffar, Z., Mashaan, N. S., Memon, Z. A., Yusoff, N. I. M., 2021. Effects of Waste Frying Oil and Crumb Rubber on the Characteristics of a Reclaimed Asphalt Pavement Binder. *Materials*, 14(13), 3482.

- Bilema, M., Aman, M. Y., Hassan, N. A., Memon, Z. A., Omar, H. A., Yusoff, N. I. M., Milad, A., 2021. Mechanical Performance of Reclaimed Asphalt Pavement Modified with Waste Frying Oil and Crumb Rubber. *Materials*, 14(11), 2781.
- Brennan, M. J., O’Flaherty, C. A., 2002. *Materials Used in Road Pavements*. 5-6. Bölüm, 118(s).
- Brown, E. R., Kandhal, P. S., Zhang, J., 2001. Performance Testing for Hot Mix Asphalt. NCAT Report, 1(05).
- Carpani, C., Bocci, E., Prosperi, E., Bocci, M., 2022. Evaluation of the Rheological and Performance Behaviour of Bitumen Modified with Compounds Including Crumb Rubber from Waste Tires. *Construction and Building Materials*, 361, 129679.
- Castorena, C., Pape, S., Mooney, C., 2016. Blending Measurements in Mixtures with Reclaimed Asphalt: Use of Scanning Electron Microscopy with X-Ray Analysis. *Transportation Research Record*, 2574(1), 57-63.
- Charhi, O. B., Baba, K., 2024. Influence of Temperature on the Viscoelastic Behavior and Durability of Flexible Pavements. *Civil Engineering Journal*, 10(7), 2162-2176.
- Chen, C., Lu, J., Ma, T., Zhang, Y., Gu, L., Chen, X., 2023. Applications of Vegetable Oils and Their Derivatives as Bio-Additives for Use in Asphalt Binders: A Review. *Construction and Building Materials*, 383, 131312.
- Chen, M., Leng, B., Wu, S., & Sang, Y., 2014. Physical, Chemical and Rheological Properties of Waste Edible Vegetable Oil Rejuvenated Asphalt Binders. *Construction and Building materials*, 66, 286-298.
- Chen, Y., Tan, H., Yan, M., Yin, H., He, D., Ouyang, P., Gong, H., 2024. A Comprehensive Understanding on Industrial Waste Oil Pyrolysis Upgrading Process: Physicochemical Properties, Pyrolytic Behavior, Kinetics, and Thermodynamics. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 70, 103956.
- Choe, E., Min, D. B., 2007. Chemistry of Deep-Fat Frying Oils. *Journal of Food Science*, 72(5), R77-R86.
- Çetin, M., 2011. Çevre ve Su Kirliliğinde Makine Yağları, Çevre Etkileri ve Çözüm Önerileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, (1), 41-47.
- D’Angelo, S., Ferrotti, G., Cardone, F., Canestrari, F., 2022. Asphalt Binder Modification with Plastomeric Compounds Containing Recycled Plastics and Graphene. *Materials*, 15(2), 516.
- Dobarganes, C., Márquez-Ruiz, G., 2003. Oxidized Fats in Foods. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 6(2), 157-163.

- Dorman, H. J. D., Peltoketo, A., Hiltunen, R., Tikkanen, M. J., 2003. Characterisation of the Antioxidant Properties of De-Odourised Aqueous Extracts from Selected Lamiaceae Herbs. *Food Chemistry*, 83(2), 255-262.
- Durmaz, Ç., Sengoz, B., Özdemir, D. K., Topal, A., Almusawı, A., 2020. Bitümlü Sıcak Karışımların Laboratuvar Ortamında Yaşlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 541-548.
- Dülger, G. Ç., Geçgel, Ü., Apaydın, D., 2016. Atık Kızartma Yağlarının Biyoyakıt Olarak Değerlendirilmesi. 2. Ulusal Biyoyakıtlar Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 271-276.
- Elahi, Z., Jakarni, F. M., Muniandy, R., Hassim, S., Ab Razak, M. S., Ansari, A. H., 2024. Influence of Novel Modified Waste Cooking Oil Beads on Rheological Characteristics of Bitumen. *Construction and Building Materials*, 414, 134829.
- Elahi, Z., Mohd Jakarni, F., Muniandy, R., Hassim, S., Ab Razak, M. S., Ansari, A. H., Ben Zair, M. M., 2021. Waste Cooking Oil as a Sustainable Bio Modifier for Asphalt Modification: A Review. *Sustainability*, 13(20), 11506.
- Eleyedath, A., Swamy, A. K., 2020. Use of Waste Engine Oil in Materials Containing Asphaltic Components. In *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*, 33-50. Woodhead Publishing.
- El-Shorbagy, A. M., El-Badawy, S. M., Gabr, A. R., 2019. Investigation of Waste Oils as Rejuvenators of Aged Bitumen for Sustainable Pavement. *Construction and Building Materials*, 220, 228-237.
- Erkuş, Y., Kök, B. V., Yılmaz, M., 2020. Evaluation of Performance and Productivity of Bitumen Modified by Three Different Additives. *Construction and Building Materials*, 261, 120553.
- European Committee for Standardization, 2000. EN 12597: Bitumen and Bituminous Binders-Terminology; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- European Council. 2001. Critical Review of Existing Studies and Life Cycle Analysis on the regeneration and incineration of waste Oils. Erişim Tarihi: 05.03.2025 https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste_oil.pdf
- European Parliament and Council. 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*, L312, 3–30.
- Fang, Y., Zhang, Z., Yang, J., Li, X., 2021. Comprehensive Review on the Application of Bio-Rejuvenator in the Regeneration of Waste Asphalt Materials. *Construction and Building Materials*, 295, 123631.

- Feitosa, J. P., de Alencar, A. E., Nelson Filho, W., de Souza, J. R., Branco, V. T. C., Soares, J. B., Ricardo, N. M., 2016. Evaluation of Sun-Oxidized Carnauba Wax as Warm Mix Asphalt Additive. *Construction and Building Materials*, 115, 294-298.
- Fernandes, S. R., Silva, H. M., Oliveira, J. R., 2018. Developing Enhanced Modified Bitumens with Waste Engine Oil Products Combined with Polymers. *Construction and Building Materials*, 160, 714-724.
- Fernandes, S., Peralta, J., Oliveira, J. R., Williams, R. C., Silva, H. M., 2017. Improving Asphalt Mixture Performance by Partially Replacing Bitumen with Waste Motor Oil and Elastomer Modifiers. *Applied Sciences*, 7(8), 794.
- FHWA, 2000. Superpave Fundamentals. U.S. Department of Transportation, NHI Course, 131053, Reference Manual.
- FHWA, 2002. Superpave Asphalt Mixture Design. Erişim Tarihi: 10.03.2025. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/asphalt/mixdsgn.pdf>
- Foo, W. H., Koay, S. S. N., Chia, S. R., Chia, W. Y., Tang, D. Y. Y., Nomanbhay, S., Chew, K. W., 2022. Recent Advances in the Conversion of Waste Cooking Oil into Value-Added Products: A Review. *Fuel*, 324, 124539.
- Fuentes, M. J., Font, R., Gómez-Rico, M. F., Martín-Gullón, I., 2007. Pyrolysis and Combustion of Waste Lubricant Oil From Diesel Cars: Decomposition and Pollutants. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79(1-2), 215-226.
- Geçkil, T., 2019. Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer-Modified Bitumen. *Materials*, 12(6), 921.
- Geçkil, T., Alataş, T., Ahmedzade, P., 2011. Superpave Sisteminde Bölge Meteorolojik Hava Verileri Kullanılarak Performans Dereceli (PG) Bağlayıcı Sınıfı Seçimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 27(1), 88-106.
- Gertz, C., Klostermann, S., 2002. Analysis of Acrylamide And Mechanisms of Its Formation in Deep-Fried Products. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 104(11), 762-771.
- Gong, Y., Zhao, X., Cai, Z., O'Reilly, S. E., Hao, X., 2014. A Review of Oil, Dispersed Oil and Sediment Interactions in the Aquatic Environment. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1-2), 16–33.
- Gökalp, İ., Uz, V. E., 2019. Utilizing of Waste Vegetable Cooking Oil in Bitumen: Zero Tolerance Aging Approach. *Construction and Building Materials*, 227, 116695.
- Gökalp, İ., Uz, V. E., 2021. Sustainable Production of Aging-Resistant Bitumen: Waste Engine Oil Modification. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(4), 04021055.

- Gökalp, İ., Yıldız, A. U., Eren, M. B., Uz, V. E., 2019. Atık Motor Yağı Modifiyeli Bitümün Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(3), 184-193.
- Guinda, A., Dobarganes, M. C., Ruiz-Mendez, M. V., Mancha, M., 2003. Chemical and Physical Properties of a Sunflower Oil with High Levels of Oleic and Palmitic Acids. European Journal of Lipid Science and Technology, 105(3-4), 130-137.
- Gupta, M. K., 2014. Sunflower Oil and Its Applications. Lipid Technology, 26(11-12), 260-263.
- Haliç Çevre, 2025. Bitkisel Atık Yağların Toplanması ve Geri Kazanım Yöntemleri Konusunda Dünyadaki Uygulamalar. Erişim Tarihi: 01.02.2025. <https://www.haliccevre.com/images/sempozyum/13.pdf>
- Hallmark-Haack, B., Middleton, J., Rodrigues, A. L., Forrester, M., Williams, R. C., Cochran, E., 2025. Evaluation of the Mechanical and Chemical Properties of Bitumen Fractionation via Time Efficient Chromatography Techniques. RSC Advances, 15(13), 9594-9604.
- Hasan, M. A., Mannan, U. A., Tarefder, R. A., 2017. Determination of Polymer Content in SBS Modified Asphalt Binder Using FTIR Analysis. In Proceedings of the International Conference on Construction in the Century.
- Hellier, P., Ladommatos, N., Yusaf, T., 2015. The Influence of Straight Vegetable Oil Fatty Acid Composition on Compression Ignition Combustion and Emissions. Fuel, 143, 131-143.
- Hetemoğlu, Y. O., Çubuk, M. K., Gürü, M., 2025. Improvement in Performance Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixtures by Means of Polyvinyl Acetate. Construction Materials, 5(1), 9.
- Hettiarachchi, C., Mampearachchi, W., 2025. Asphalt Mixture Design. In Handbook of Asphalt Technology, Springer, 101-153. Singapore.
- Hillairet, F., Allemandou, V., Golab, K., 2016. Analysis of the Current Development of Household UCO Collection Systems in the Eu. Greenea: Coivert, France.
- Hofko, B., Alavi, M. Z., Grothe, H., Jones, D., Harvey, J., 2017. Repeatability and Sensitivity of FTIR ATR Spectral Analysis Methods for Bituminous Binders. Materials and Structures, 50, 1-15.
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Li, C., Chen, X., Peng, W., Aghbashlo, M., Lam, S. S., Tabatabaei, M., 2022. Managing the Hazardous Waste Cooking Oil by Conversion into Bioenergy Through the Application of Waste-Derived Green Catalysts: A Review. Journal of Hazardous Materials, 424, 127636.

- Hu, X., Zhong, S., Walubita, L. F., 2015. Three-Dimensional Modelling of Multilayered Asphalt Concrete Pavement Structures: Strain Responses and Permanent Deformation. *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), 727-740.
- Huang, S., Liu, Y., Sun, X., Li, J., 2021. Application of Artificial Neural Network Based on Traditional Detection and GC-MS in Prediction of Free Radicals in Thermal Oxidation of Vegetable Oil. *Molecules*, 26(21), 6717.
- Huang, Y. H., 2004. *Pavement Analysis and Design Vol. 2*. Pearson/Prentice Hall, 401-409. Upper Saddle River, New Jersey.
- Hunter, R. N., Self, A., Read, J., Hobson, E., 2015. *The Shell Bitumen Handbook* (Vol. 514). Ice Publishing, London.
- Hussein, A. A., Putra Jaya, R., Yaacob, H., Abdul Hassan, N., Oleiwi Aletba, S. R., Huseien, G. F., Mohd Hasan, M. R., 2021. Physical, Chemical and Morphology Characterisation of Nano Ceramic Powder as Bitumen Modification. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(7), 858-871.
- Illston, J. M., Domone, P., 2001. *Construction Materials: Their Nature and Behaviour*. CRC press, 584p, London.
- Imanbayev, Y., Bussurmanova, A., Ongarbayev, Y., Serikbayeva, A., Sydykov, S., Tabylganov, M., Tileuberdi, Y., 2022. Modification of Bitumen with Recycled PET Plastics From Waste Materials. *Polymers*, 14(21), 4719.
- İskender, E., Seymen, A., Aksoy, A., 2022. Asfalt Kaplamalarda Tabaka Kalınlığının Etkisinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 61-73.
- Jayaprabakar, J., Dawn, S. S., Anish, M., Giri, J., Sudhakar, K., Alarfaj, A. A., Guru, A., 2024. Development of Free Fatty Acid (FFA) Monitoring Device for Evaluation of Oil Samples Used for Biodiesel Production. *Heliyon*, 10(17).
- Jia, X., Huang, B., Moore, J. A., Zhao, S., 2015. Influence of Waste Engine Oil on Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 04015042.
- Jiang, W., Bao, R., Lu, H., Yuan, D., Lu, R., Sha, A., Shan, J., 2021. Analysis of Rheological Properties and Aging Mechanism of Bitumen After Short-Term and Long-Term Aging. *Construction and Building Materials*, 273, 121777.
- Jiang, Y., Gu, X., Zhou, Z., Ni, F., Dong, Q., 2018. Laboratory Observation and Evaluation of Asphalt Blends of Reclaimed Asphalt Pavement Binder with Virgin Binder Using SEM/EDS. *Transportation Research Record*, 2672(28), 69-78.

- Joohari, I. B., Giustozzi, F., 2020. Chemical and High-Temperature Rheological Properties of Recycled Plastics-Polymer Modified Hybrid Bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123064.
- Kabir, I., Yacob, M., Radam, A., 2014. Households' Awareness, Attitudes and Practices Regarding Waste Cooking Oil Recycling in Petaling, Malaysia. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(10), 45-51.
- Kaçaroğlu, G., 2019. Cocamide Diethanolamde Kimyasalının Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 141s, Isparta.
- Kaçaroğlu, G., 2025. Bitümlü Karışımların Sıcaklık ve Nem Hassasiyetlerinin İncelenmesi ve İyileştirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 367s, Isparta.
- Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Jayed, M. H., Liaquat, A. M., 2011. Emission and Performance Characteristics of an Indirect Ignition Diesel Engine Fuelled with Waste Cooking Oil. *Energy*, 36(1), 397-402.
- Kang, S. K., Ağbaba, D., 2020. Niğde Şehrinde Yaşayanların Atık Yemeklik Yağ Toplama Konusunda Bilinç Düzeyi ve Farkındalığını Artırma Önerileri. *Coğrafya Dergisi*, (40), 1-12.
- Katara, S. D., Modhiya, C. S., Raval, N. G., 2014. Influence of Modify Bituminous Mix with Fly Ash. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2(4), 184-186.
- Kavussi, A., Barghabany, P., 2016. Investigating Fatigue Behavior of Nanoclay and Nano Hydrated Lime Modified Bitumen Using LAS Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(3), 04015136.
- KGM, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi. ERTEM Basın Yayın Dağıtım Sanayi ve Tic. Ltd. Şti., 525, Ankara.
- Kııcı, G. Ö., Saltan, M., 2020. Pirinanın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımının Araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12(1), 1-9.
- Kim, Y. R., C. Castorena, N. F. Saleh, E. Braswell, M. Elwardany, F. Yousefi Rad., 2020. NCHRP 09-54 Extension: Long-term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction. Submitted to Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Kumar, T. A., Sandeep, I. J. S., Nivitha, M. R., Chowdary, V., Krishnan, J. M., 2019. Quantification of Aging Compounds in Evotherm-Modified Warm-Mix Asphalt Binder Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 8429-8437.
- Lapuerta, M., Rodríguez-Fernández, J., Agudelo, J. R., 2008. Diesel Particulate Emissions from Used Cooking Oil Biodiesel. *Bioresource Technology*, 99(4), 731-740.

- Lesueur, D., 2009. The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. *Advances in colloid and interface science*, 145(1-2), 42-82.
- Li, B., Liu, W., Nan, X., Yang, J., Tu, C., Zhou, L., 2023. Development of Rejuvenator Using Waste Vegetable Oil and Its Influence on Pavement Performance of Asphalt Binder under Ultraviolet Aging. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01964.
- Li, H., Dong, B., Wang, W., Zhao, G., Guo, P., Ma, Q., 2019. Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt. *Applied Sciences*, 9(9), 1767.
- Li, H., Feng, Z., Ahmed, A. T., Yombah, M., Cui, C., Zhao, G., Sheng, Y., 2022. Repurposing Waste Oils into Cleaner Aged Asphalt Pavement Materials: A Critical Review. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130230.
- Li, H., Zhang, F., Feng, Z., Li, W., Zou, X., 2021. Study on Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt and Application in Reclaimed Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 276, 122138.
- Li, H., Zhao, J., Huang, Y., Jiang, Z., Yang, X., Yang, Z., Chen, Q., 2016. Investigation on the Potential of Waste Cooking Oil as a Grinding Aid in Portland Cement. *Journal of Environmental Management*, 184, 545-551.
- Lin, J., Hong, J., Liu, J., Wu, S., 2016. Investigation on Physical and Chemical Parameters to Predict Long-Term Aging of Asphalt Binder. *Construction and Building Materials*, 122, 753-759.
- Liu, F., Liu, P., Zhang, X., Zhou, Z., Peng, Y., 2023. Effect of Re-aging on Chemical and Rheological Properties of Waste Engine Oil Rejuvenated Asphalt Binder. *Construction and Building Materials*, 408, 133798.
- Liu, Q., Hou, F., Ge, D., Lv, S., Ju, Z., 2025. Study on Performance and Aging Mechanism of Rubber-Modified Asphalt Under Variable-Intensity UV Aging. *Materials*, 18(13), 3186.
- Liu, S., Peng, A., Wu, J., Zhou, S. B., 2018. Waste Engine Oil Influences on Chemical and Rheological Properties of Different Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, 191, 1210-1220.
- Liu, S., Peng, A., Zhou, S., Wu, J., Xuan, W., Liu, W. 2019. Evaluation of the Ageing Behaviour of Waste Engine Oil-Modified Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, 223, 394-408.
- Loise, V., Caputo, P., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., Oliviero Rossi, C., 2019. A Review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, Materials, Methods and Perspectives. *Applied Sciences*, 9(20), 4316.

- Lopes, M., Miranda, S. M., Belo, I., 2020. Microbial Valorization of Waste Cooking Oils for Valuable Compounds Production—A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(24), 2583-2616.
- Lu, D. X., Enfrin, M., Masood, H., Giustozzi, F., 2024. Performance Evaluation of Post-Consumer and Post-Industrial Recycled Plastics as Binder Modifier in Asphalt Mixes. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-14.
- Lu, D., Jiang, X., Tan, Z., Yin, B., Leng, Z., Zhong, J., 2023. Enhancing Sustainability in Pavement Engineering: A-State-of-the-Art Review of Cement Asphalt Emulsion Mixtures. *Cleaner Materials*, 9, 100204.
- Lu, X., Isacsson, U., 2002. Effect of Ageing on Bitumen Chemistry and Rheology. *Construction and Building materials*, 16(1), 15-22.
- Luo, H., Huang, X., Tian, R., Huang, J., Zheng, B., Wang, D., Liu, B., 2021. Analysis of Relationship Between Component Changes and Performance Degradation of Waste-Oil-Rejuvenated Asphalt. *Construction and Building Materials*, 297, 123777.
- Majidifard, H., Tabatabaee, N., Buttlar, W., 2019. Investigating Short-Term and Long-Term Binder Performance of High-RAP Mixtures Containing Waste Cooking Oil. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(4), 396-406.
- Malinowski, S., Wozuk, A., Wróbel, M., Makowska, M., Franus, W., Zofka, A., 2023. Bitumen Binders Modified with Chemically-Crosslinked Chitosan. *Road Materials and Pavement Design*, 24(sup1), 3-18.
- Mamun, A. A., Al-Abdul Wahhab, H. I., 2018. Evaluation of Waste Engine Oil-Rejuvenated Asphalt Concrete Mixtures with High RAP Content. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- Ming, N. C., Jaya, R. P., Awang, H., Ing, N. L. S., Hasan, M. R. M., Al-Saffar, Z. H., 2022. Performance of Glass Powder as Bitumen Modifier in Hot Mix Asphalt. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103263.
- Miró, R., Martínez, A. H., Moreno-Navarro, F., del Carmen Rubio-Gámez, M., 2015. Effect of Ageing and Temperature on the Fatigue Behaviour of Bitumens. *Materials and Design*, 86, 129-137.
- Mishra, A., Mishra, N. S., 2025. Sustainable Utilization of Waste Motor Oil: A Hazardous Hydrocarbon Pollutant. In *Environmental Hydrocarbon Pollution and Zero Waste Approach Towards a Sustainable Waste Management*, 241-253. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Mohamed, A. A., Wong, S. Y., Leong, L. T., Farooqi, M. A., Jaya, R. P., Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., 2021. Durability Phenomena of Bitumen and Bituminous Pavement Materials. *Open Civ. Eng. J*, 15(1), 279-289.

- Motamedi, M., Shafabakhsh, G., Azadi, M., 2021. Rehabilitation of Asphalt Binder to Improve Rutting, Fatigue and Thermal Cracking Behavior Using Nano-Silica and Synthesized Polyurethane. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 9(1), 19-28.
- Nassar, I. M., Abdel-monem, R. M., Sayed, M. A., Ragab, A. A., 2021. Eco-friendly Green Alternative Binder for Asphalt from Waste Oil and Waste Polymer. *Polymer Bulletin*, 78(12), 6887-6909.
- Navaro, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., Colin, J., Dony, A., Cournet, J., 2012. Observation and Evaluation of the Degree of Blending of Reclaimed Asphalt Concretes Using Microscopy Image Analysis. *Construction and Building Materials*, 37, 135-143.
- Navarro, F. J., Partal, P., García-Morales, M., Martín-Alfonso, M. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., Diogo, A. C., 2009. Bitumen Modification with Reactive and Non-Reactive (Virgin and Recycled) Polymers: A Comparative Analysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15(4), 458-464.
- Nizamuddin, S., Boom, Y. J., Giustozzi, F., 2021. Sustainable Polymers from Recycled Waste Plastics and Their Virgin Counterparts as Bitumen Modifiers: A Comprehensive Review. *Polymers*, 13(19), 3242.
- O'Hare, T. J., Trieu, H. H., Topp, B., Russell, D., Pun, S., Torrisi, C., Liu, D., 2019. Assessing Fatty Acid Profiles of Macadamia Nuts. *HortScience*, 54(4), 633-637.
- Orjuela, A., Clark, J., 2020. Green Chemicals from Used Cooking Oils: Trends, Challenges, and Opportunities. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 26, 100369.
- Öz Kıcı G., 2019. Pirinanın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, Isparta.
- Öztürk, M., 2018. Bitkisel ve hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimi, Çevre Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Paliukaitė, M., Vaitkus, A., Zofka, A., 2015. Influence of Bitumen Chemical Composition and Ageing on Pavement Performance. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10(1), 97-104.3.
- Panadare, D. C., 2015. Applications of Waste Cooking Oil other than Biodiesel: A Review. *Iranian Journal of Chemical Engineering (IJChE)*, 12(3), 55-76.
- Pavement Interactive, 2011. Dynamic Shear Rheometer. Erişim Tarihi: 27.02.2025. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/dynamic-shear-rheometer/>

- Pavement Interactive, 2025. Pressure Aging Vessel. Erişim tarihi: 01.03.2025. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/pressure-aging-vessel/>
- PETDER, 2023. Atık motor yağlarının yönetimi projesi faaliyet raporu. Erişim Tarihi: 25.02.2025. www.petder.org.tr
- Petersen, J. C., Glaser, R., 2011. Asphalt Oxidation Mechanisms and the Role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited. Road Materials and Pavement Design, 12(4), 795-819.
- Pipintakos, G., Soenen, H., Ching, H. V., Vande Velde, C., Van Doorslaer, S., Lemiere, F., Varveri, A., 2021. Exploring the Oxidative Mechanisms of Bitumen After Laboratory Short and Long-Term Ageing. Construction and Building Materials, 289, 123182.
- Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Oliviero Rossi, C. (2019). Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. Applied sciences, 9(4), 742.
- Poudyal, H., Kumar, S. A., Iyer, A., Waanders, J., Ward, L. C., Brown, L., 2013. Responses to Oleic, Linoleic and A-Linolenic Acids in High-Carbohydrate, High-Fat Diet-Induced Metabolic Syndrome in Rats. The Journal of Nutritional Biochemistry, 24(7), 1381-1392.
- Provatorova, G., Vikhrev, A., 2020. Modification of Bitumen for Road Construction. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 896, No. 1, p. 012088). IOP Publishing.
- Qurashi, I. A., Swamy, A. K., 2018. Viscoelastic Properties of Recycled Asphalt Binder Containing Waste Engine Oil. Journal of Cleaner Production, 182, 992-1000.
- Rahimi, B., Semnani, A., Ejhieh, A. N., Langeroodi, H. S., Davood, M. H., 2012. Application of ICP-OES in the Comparative Analysis of a Used and Fresh Gasoline Motor Oil. Global J. Front. Res, 12, 9-14.
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., Giustozzi, F., 2020. Possible Use of Cigarette Butt Fiber Modified Bitumen in Stone Mastic Asphalt. Construction and Building Materials, 263, 120134.
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., Giustozzi, F., 2020. Recycling of Waste Materials for Asphalt Concrete and Bitumen: A Review. Materials, 13(7), 1495.
- Rashid, S., Mudavath, R., Chandra, H., Shekhar, I., Kumar, P., Srivastava, M., Kumar, K., 2024. A Review on Virgin or Waste Polymers in Bitumen Modification for Ageing and Rejuvenation. Chemical Engineering and Technology, 47(4), 624-637.
- Read, J., Whiteoak, D., 2003. The shell bitumen handbook. Thomas Telford Publishing, 441p, London.

- Ren, S., Liu, X., Fan, W., Qian, C., Nan, G., Erkens, S., 2021. Investigating the Effects of Waste Oil and Styrene-Butadiene Rubber on Restoring and Improving The Viscoelastic, Compatibility, and Aging Properties of Aged Asphalt. *Construction and Building Materials*, 269, 121338.
- Resmi Gazete, 21 Aralık 2019. Resmî Gazete. Sayı 30985. Atık Yağların Yönetimi Yönetmeliği.
- Resmi Gazete, 23 Aralık 2020. Resmî Gazete. Sayı 31343. Atık Yağların Yönetimi Yönetmeliği- Ekler.
- Romero, P., 2019. Prevention of Low Temperature Cracking of Asphalt Pavements Using the Bending Beam Rheometer (No. MPC-19-405). Mountain-Plains Consortium.
- Rondón-Quintana, H. A., Ruge-Cárdenas, J. C., Zafra-Mejía, C. A., 2023. Natural Asphalts in Pavements. *Sustainability*, 15(3), 2098.
- Saboo, N., Sukhija, M., & Singh, G., 2021. Effect of Nanoclay on Physical and Rheological Properties of Waste Cooking Oil–Modified Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(3), 04020490.
- Sağlık, A., 2009. Türkiye’de Üretilen Rafineri Bitümlerinin Karayolu Üstyapılarında Kullanımı İçin Performans Sınıflarının Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 188s, Ankara.
- Saha, R., Melaku, R. S., Karki, B., Berg, A., Gedafa, D. S., 2020. Effect of Bio-Oils on Binder and Mix Properties with High RAP Binder Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(3), 04020007.
- Sakib, N., 2018. Towards a Better Understanding of Bitumen Chemistry, Microstructure, and Rheology (Doctoral dissertation).
- Saltan, M., Terzi, S., Karahancer, S., 2017. Examination of Hot Mix Asphalt and Binder Performance Modified with Nano Silica. *Construction and Building Materials*, 156, 976-984.
- Santos, J., Flintsch, G., Ferreira, A., 2017. Environmental and Economic Assessment of Pavement Construction and Management Practices for Enhancing Pavement Sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 15-31.
- Sheikh, M. A. 2010. Energy and Renewable Energy Scenario of Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 354-363.
- Singh, H., Bhardwaj, N., Arya, S. K., Khatri, M., 2020. Environmental Impacts of Oil Spills and Their Remediation by Magnetic Nanomaterials. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 14, 100305.
- Sobrinho, E., Tarquis, A. M., Díaz, M. C., 2003. Modeling the Oleic Acid Content in Sunflower Oil. *Agronomy Journal*, 95(2), 329-334.

- Soliman, H., Osei, P., Shalaby, A., 2023. Performance of Bituminous Binder Modified with Recycled Plastic Pellets. *Materials*, 16(20), 6730.
- Speight, J. G., 2015. *Handbook of Petroleum Product Analysis*. John Wiley & Sons Publishing, Laramie, WY, USA.
- Stutzman, P. E., Feng, P., Bullard, J. W., 2016. Phase Analysis of Portland Cement by Combined Quantitative X-Ray Powder Diffraction and Scanning Electron Microscopy. *Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology*, 121, 47.
- Suo, Z., Yan, Q., Ji, J., Liu, X., Chen, H., Zhang, A., 2021. The Aging Behavior of Reclaimed Asphalt Mixture with Vegetable Oil Rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 299, 123811.
- Sutanto, M., Bala, N., Al Zaro, K., Sunarjono, S., 2018. Properties of Crumb Rubber and Latex Modified Asphalt Binders Using Superpave Tests. In *MATEC web of conferences* (Vol. 203, p. 05007). EDP Sciences.
- Şahan, N., Kumandaş, A., Kabadayı, E., Çavdar, E., & Oruç, Ş., 2023. The Use of Wax-Based Additives in Bitumen Modification: A Systematic Quantitative Literature Review. *Construction and Building Materials*, 407, 133423.
- Şenköylü, N., 2001. *Yemlik yağlar*. Trakya Üniversitesi, Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Tabatabaei, S. M. R., Arabani, M., Hamed, G. H., 2024. Performance of Asphalt Mixtures Containing High Reclaimed Asphalt Pavement and Waste Steel Rolling Oil. *Construction and Building Materials*, 441, 137570.
- Tadele, B., Quezon, E. T., 2021. Evaluation of Waste Engine Oil Rejuvenation for Highly Short Term Aged Asphalt Binder. *Australian Journal of Civil Engineering*, 1-11.
- Taherkhani, H., Noorian, F., 2020. Comparing the Effects of Waste Engine and Cooking Oil on The Properties of Asphalt Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, 21(5), 1238-1257.
- Taherkhani, H., Noorian, F., 2020. Investigating the Marshall and Volumetric Properties of Asphalt Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Waste Oils Using Response Surface Methodology. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 53(2), 241-258.
- Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Rubio-Gámez, M. C., 2018. Understanding the Bitumen Ageing Phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 593-609.
- Tejeshwini, S., Mamatha, K. H., Dinesh, S. V., 2025. Performance Characterization of Long-Term Aged Bitumen: Field and Laboratory Investigation. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 17, 175-191.

- Thushari, I., & Babel, S., 2022. Comparative Study of the Environmental Impacts of Used Cooking Oil Valorization Options in Thailand. *Journal of Environmental Management*, 310, 114810.
- Toro-Vazquez, J. F., Charó-Alonso, M. A., Pérez- Briceño, F., 1999. Fatty Acid Composition and its Relationship with Physicochemical Properties of Pecan (*Carya illinoensis*) Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(8), 957-965.
- Tran, N., Yin, F., Leiva, F., Rodezno, C., Huber, G., Pine, W., 2019. Adjustments to the Superpave Volumetric Mixture Design Procedure for Selecting Optimum Asphalt Content. *Project NCHRP*, 20-07.
- TS EN 1097-1, 2002. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler – Bölüm 1: Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (mikro-deval). TSE, Bakanlıklar/Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler – Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini. TSE, Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar/Ankara.
- TS EN 13589, 2009. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – İşlem Görmüş Bitümlerin Çekme Özelliklerinin Duktometre Metoduyla Tayini. TSE, Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar/Ankara.
- TS EN 1426, 2015. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini. TSE, Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar/Ankara.
- TS EN 1427, 2015. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – Yumuşama Noktası Tayini – Halka ve Bilye Yöntemi. TSE, Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar/Ankara.
- TS EN 14770, 2012. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – Karmaşık Kesme Modülü ve Faz Açısının Tayini – Dinamik Kesme Rheometresi (DSR). TSE, Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar/Ankara.
- TS EN 15326 + A1, 2010. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – Yoğunluk ve Özgül Kütle Tayini – Kapiler Kapaklı Piknometre Deneyi. TSE, Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar/Ankara.
- Tunç A., 2007. *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları* (2. Basım). Nobel Yayın, Ankara.
- United Nations Environment Programme (UNEP)., 2015. *Guidelines for Environmentally Sound Management of Used Oils in the Mediterranean*. Erişim Tarihi: 26.01.2025. <https://www.unep.org/resources/report/guidelines-environmentally-sound-management-used-oils-mediterranean>
- Vargas, C., El Hanandeh, A., 2021. Systematic Literature Review, Meta-Analysis and Artificial Neural Network Modelling of Plastic Waste Addition to Bitumen. *Journal of Clean Science and Pollution Research*, 31(36), 48839-48863.

- Wagh, V. P., Sukhija, M., Gupta, A., 2023. Exploring the Consequences of Reduced Aging on the Performance of Warm Mix Asphalt Binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2), 2270768.
- Wallis, J. G., Watts, J. L., 2002. Polyunsaturated Fatty Acid Synthesis: What Will They Think of Next?. *Trends in Biochemical Sciences*, 27(9), 467-473.
- Walubita, L. F., Fuentes, L., Prakoso, A., Pianeta, L. M. R., Komba, J. J., Naik, B., 2020. Correlating the HWTT Laboratory Test Data to Field Rutting Performance of in-Service Highway Sections. *Construction and Building Materials*, 236, 117552.
- Wang, J., Li, Q., Lu, Y., Luo, S., 2022. Effect of Waste-Oil Regenerant on Diffusion and Fusion Behaviors of Asphalt Recycling Using Molecular Dynamics Simulation. *Construction and Building Materials*, 343, 128043.
- Wang, W. Q., Mo, Y. K., He, H. Y., Zeng, H. Y., 2011. Aging Effects on Pavement Performance of Asphalt Mortar. *Advanced Materials Research*, 150, 247-251.
- Wu, W., Cavalli, M. C., Jiang, W., Kringos, N., 2024. Differing Perspectives on the Use of High-Content SBS Polymer-Modified Bitumen. *Construction and Building Materials*, 411, 134433.
- Xiao, K., Xu, Y., Cao, X., Xu, H., Li, Y., 2022. Advanced Characterization of Membrane Surface Fouling. In *60 Years of the Loeb-Sourirajan Membrane* (pp. 499-532). Elsevier.
- Xinxin, C., Xuejuan, C., Boming, T., Yuanyuan, W., Xiaolong, L., 2018. Investigation on Possibility of Waste Vegetable Oil Rejuvenating Aged Asphalt. *Applied Sciences*, 8(5), 765.
- Xue, X., Gao, J., Wang, J., Chen, Y., 2021. Evaluation of High-Temperature and Low-Temperature Performances of Lignin–Waste Engine Oil Modified Asphalt Binder and Its Mixture. *Materials*, 15(1), 52.
- Yan, C., Huang, W., & Tang, N., 2017. Evaluation of the Temperature Effect on Rolling Thin Film Oven Aging for Polymer Modified Asphalt. *Construction and Building Materials*, 137, 485-493.
- Ye, W., Jiang, W., Li, P., Yuan, D., Shan, J., Xiao, J., 2019. Analysis of Mechanism and Time-Temperature Equivalent Effects of Asphalt Binder in Short-Term Aging. *Construction And Building Materials*, 215, 823-838.
- Yildirim, Y., 2007. Polymer Modified Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66-72.
- Yin, F., Arambula, E., Lytton, R., Martin, A. E., Cucalon, L. G., 2014. Novel Method for Moisture Susceptibility and Rutting Evaluation Using Hamburg Wheel Tracking Test. *Transportation Research Record*, 2446(1), 1-7.

- Zaniewski, J. P., Pumphrey, M. E., 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt technology program, 107.
- Zargar, M., Ahmadinia, E., Asli, H., Karim, M. R., 2012. Investigation of the Possibility of Using Waste Cooking Oil as a Rejuvenating Agent for Aged Bitumen. *Journal of Hazardous Materials*, 233, 254-258.
- Zhang, H., Yu, J., Wu, S., 2012. Effect of Montmorillonite Organic Modification on Ultraviolet Aging Properties of SBS Modified Bitumen. *Construction and Building Materials*, 27(1), 553-559.
- Zhang, H., Zheng, F., Zhang, J., Hu, D., Minelli, M., Pei, J., Sangiorgi, C., 2024. Contributions of Fourier-Transform Infrared Spectroscopy Technologies to the Research of Asphalt Materials: A Comprehensive Review. *Fuel*, 371, 132078.
- Zhang, X., Zhang, K., Wu, C., Liu, K., Jiang, K., 2020. Preparation of Bio-Oil and its Application in Asphalt Modification and Rejuvenation: A Review of the Properties, Practical Application and Life Cycle Assessment. *Construction and Building Materials*, 262, 120528.
- Zhao, Y., Goulias, D., Peterson, D., 2021. Recycled Asphalt Pavement Materials in Transport Pavement Infrastructure: Sustainability Analysis and Metrics. *Sustainability* 2021, 13, 8071.