

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASFALT KAPLAMALARDA POLİMER MODİFİKASYON TİRLERİNİN
VE MODİFİKASYON KOŞULLARININ İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sertaç POLAT

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ASFALT KAPLAMALARDA POLİMER MODİFİKASYON TÜRLERİNİN
VE MODİFİKASYON KOŞULLARININ İRDELENMESİ**

Sertaç POLAT

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 07 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Atakan AKSOY

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Asfalt Kaplamalarda Polimer Modifikasyon Türlerinin ve Modifikasyon Koşullarının İrdelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Yüksek Lisans tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Atakan AKSOY’a teşekkürü bir borç bilirim.

Her konuda arkamda olup beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Sertaç POLAT
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Asfalt Kaplamalarda Polimer Modifikasyon Türlerinin ve Modifikasyon Koşullarının İrdelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Atakan AKSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/10/2024

Sertaç POLAT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Asfalt Kaplamalarda Görülen Bozulmalar	2
1.2.1. Deformasyon	2
1.2.2. Çatlaklar	5
1.2.3. Ayrışmalar.....	10
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	13
2.1. Bitümlü Bağlayıcılar	13
2.1.1. Asfaltlar.....	14
2.1.2. Katranlar.....	15
2.2. Bitümlü Bağlayıcıların Özellikleri	15
2.2.1. Bitümün Yapısı	15
2.2.2. Bitümün Davranışı	18
2.2.3. Bitümlü Bağlayıcılarda Aranılan Özellikler	19
2.3. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler	21
2.4. Asfalt Kaplamaların Modifikasyonu	24
2.4.1. Asfalt Kaplamalardaki Katkı Maddeleri ve Modifiye Asfaltlarda Aranılan Özellikler	25
2.5. Asfalt Kaplamaların Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri	26
2.5.1. Filler	27
2.5.2. Gençleştiriciler	28
2.5.3. Kauçuklar ve Plastikler	28
2.5.4. Fiberler	28

2.5.5.	Oksidanlar ve Antioksidanlar.....	29
2.5.6.	Hidrokarbonlar	29
2.5.7.	Soyulma Önleyiciler	29
2.6.	Asfalt Kaplamaların Polimer Modifikasyonu	30
2.6.1.	Polimerler.....	30
2.7.	Polimer Modifikasyon Tipleri	32
2.7.1.	Stiren-Bütadien-Stiren (SBS).....	33
2.7.2.	Doğal Kauçuklar ve İşlenmiş Kauçuklar	40
2.7.3.	Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	42
2.8.	Polimer Modifikasyon Koşulları	46
2.8.1.	Bitüm Tipi ve Kimyasal İçeriği	47
2.8.2.	Polimer Tipi	47
2.8.3.	Polimerin Molekül Ağırlığı.....	47
2.8.4.	Polimer İçeriği.....	48
2.8.5.	Sıcaklık.....	48
2.8.6.	Karıştırma Hızı ve Süresi	49
3.	BULGULAR.....	52
3.1.	Polimer Katkıların Performans Etkileri.....	52
3.2.	Katkıların Tekerlek İzi Performansına Etkileri	53
3.3.	Katkıların Su Hasarı Performansına Etkisi	60
3.4.	Katkıların Diğer Performans Etkileri	62
3.5.	Polimerlerin Performans Problemleri ve Diğer Katkıları.....	73
4.	SONUÇLAR.....	77
5.	ÖNERİLER.....	79
6.	KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ASFALT KAPLAMALARDA POLİMER MODİFİKASYON TÜRLERİNİN VE MODİFİKASYON KOŞULLARININ İRDELENMESİ

Sertaç POLAT

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2024, 86 Sayfa

Bu araştırmanın konusu asfalt kaplamalarda polimer modifikasyon türleri ve modifikasyon koşullarının irdelenmesidir. Bu bağlamda modifikasyon işleminde yaygınca kullanılan polimer malzemeler elastomerler, plastomerler, fiberler ve işlenmiş kauçuklardır. SBS ve EVA polimerleri diğer polimerlerden daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Son yıllarda yapılan gelişmelerle ECR öne çıkmaktadır ve bitümlü bağlayıcıya ıslak yöntemle katılmaktadır. Polimerlerin modifikasyonundaki genel parametreler; katkı oranı %2-6, bitüm sınıfı 50/70, karıştırma sıcaklığı 180°C, karıştırma hızı 500-5000 devir/dakika, süresi 30-120 dakika şeklindedir. Özellikle günümüz koşullarında artan trafik yüklerinin varlığı ve rafineri teknolojilerinin gelişimiyle azalan performansı arttırmak için birden çok modifikasyon türünün bir arada kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu anlamda SBS ve gençleştiriciler, SBS ve sönmüş kireç gibi polimerlerle birlikte çalışan katkı birliktelikleri de yoğun olarak gündeme gelmeye başlamıştır, ileriki süreçte farklı türdeki katkıların bir arada kullanımının yaygınlaşacağı anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Asfalt kaplamalar, Asfalt katkı maddeleri, Polimer, Modifikasyon, SBS, EVA

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF POLYMER MODIFICATION TYPES AND MODIFICATION CONDITIONS IN ASPHALT PAVEMENTS

Sertaç POLAT

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2024, 86 Pages

The subject of this research is to examine the types of polymer modification and modification conditions in asphalt pavements. In this context, polymer materials commonly used in the modification process are elastomers, plastomers, fibers and engineered rubbers. SBS and EVA polymers are more widely used than other polymers. Recent developments have brought ECR to the forefront and it is added to the bituminous binder by the wet method. The general parameters for modification of polymers are as follows: additive rate 2-6%, bitumen class 50/70, mixing temperature 180°C, mixing speed 500-5000 rpm, duration 30-120 minutes. Especially in today's conditions, the use of multiple modification types together has become widespread in order to increase the performance that decreases with the presence of increasing traffic loads and the development of refinery technologies. In this sense, additive combinations that work together with polymers such as SBS and rejuvenators, SBS and hydrated lime have started to come to the agenda intensively, and it is understood that the use of different types of additives together will become widespread in the future.

Key Words: Asphalt pavements, Asphalt additives, Polymer, Modification, SBS, EVA

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Yapısal tekerlek izi	3
Şekil 2. Akma tekerlek izi.....	3
Şekil 3. Aşınma ve oturma tekerlek izi	4
Şekil 4. Ondulasyon problemleri kaplama.....	4
Şekil 5. Kaplamada çökme deformasyonu.....	5
Şekil 6. Yorulma çatlağı	6
Şekil 7. Timsah sırtlı çatlak	7
Şekil 8. Kenar çatlağı.....	7
Şekil 9. Stabilite çatlağı	8
Şekil 10. Yansıma çatlağı	8
Şekil 11. Derz çatlağı.....	9
Şekil 12. Yol yüzeyindeki kayma çatlaması	9
Şekil 13. Enine çatlağın oluşumu.....	10
Şekil 14. Soyulma problemi.....	11
Şekil 15. Asfalt kaplamasındaki sökülme	11
Şekil 16. Asfalt yüzeyindeki kuma problemi	12
Şekil 17. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması	13
Şekil 18. Bitüm içeriği	16
Şekil 19. Bitümün viskoelastik davranışı.....	19
Şekil 20. Bitümün akış davranışının karşılaştırması.....	19
Şekil 21. Polimer modifiyerlerin bitüm boşluklarını doldurması	32
Şekil 22. SBS polimerinin yapısı	34
Şekil 23. Lineer ve radyal yapıları SBS	34
Şekil 24. SBS polimeri.....	36
Şekil 25. SBS modifiye asfaltın penetrasyon derecesi ile sıcaklık ilişkisi	37
Şekil 26. SBS modifiye asfaltın penetrasyon indeksi ile modifiyer içeriği ilişkisi	37
Şekil 27. SBS modifiye asfaltın yumuşama noktası ile modifiyer içeriği ilişkisi	38
Şekil 28. SBS modifiye asfaltın viskozitesi ile modifiye edici içeriği ilişkisi.....	38
Şekil 29. Farklı SBS içerikli SBS modifiye asfaltın faz morfolojisi	39
Şekil 30. Asfaltın farklı kolloidal yapıları	39

Şekil 31.	Farklı depolama sürelerindeki 20/80 oranlı SBS modifiye asfaltın faz ayrışması.....	40
Şekil 32.	Öğütülmüş kauçuk boyut dağılımı.....	42
Şekil 33.	Monomer etilen ve vinil asetat ile üretilen EVA kopolimeri	44
Şekil 34.	EVA'nın moleküler yapıları	44
Şekil 35.	Düşük kesme hızlı karıştırıcı	50
Şekil 36.	Yüksek kesme hızlı karıştırıcı	50
Şekil 37.	Katkı tipine göre tercih dağılımı.....	70
Şekil 38.	SBS katkısı içeriğine göre tercih dağılımı	70
Şekil 39.	Bitüm penetrasyon derecesine göre tercih dağılımı.....	71
Şekil 40.	Karıştırma sıcaklığına göre tercih dağılımı	71
Şekil 41.	Karıştırma hızına göre tercih dağılımı.....	72
Şekil 42.	Karıştırma süresine göre tercih dağılımı.....	72

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Bitümün kimyasal içeriği.....	15
Tablo 2. Asfalt çimentosu 60/70 fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	16
Tablo 3. Ekstrakte bağlayıcıların kimyasal bileşeni	17
Tablo 4. Çeşitli petrol,kömür asfaltları ve bitümün elementel kütle fraksiyonları.....	18
Tablo 5. Modifikasyondaki katkı maddelerinin sınıflandırılması.....	26
Tablo 6. Polimer katkılı modifikasyonlar	32
Tablo 7. Farklı içerikli SBS modifiye asfaltın performansı.....	36
Tablo 8. ECR'nin özellikleri.....	42
Tablo 9. EVA ve SBS modifiye asfaltın yüksek sıcaklık performans karşılaştırmaları	44
Tablo 10. EVA modifiye asfaltın yorulma performans özeti.....	45
Tablo 11. Yaygın kullanılan polimerlerin özellikleri.....	52
Tablo 12. Çalışmalardaki modifikasyon parametreleri.....	67
Tablo 13. PMA'nın negatif özelliklerini azaltmak için kullanılan yöntemler	74

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BBR	: Kiriş eğilme reometresi deneyi
BSK	: Bitümlü sıcak karışım
DSR	: Dinamik kesme reometresi deneyi
ECR	: Geliştirilmiş öğütülmüş kauçuk
EMA	: Etilen-Metakrilat
EPDM	: Etilen-Propilen-Dien terpolimer
EVA	: Etilen-Vinil-Asetat
IIR	: Isobüten-Isopren kopolimer
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LAS	: Doğrusal genlik taraması
PAV	: Basınçlı yaşlandırma deneyi
PE	: Polietilen
PMA	: Polimer modifiye asfalt
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PVC	: Polivinil-Klorid
RAP	: Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama
RTFOT	: Dönmeli ince film etüvü deneyi
SBR	: Stiren-Bütadien-Rubber
SBS	: Stiren-Bütadien-Stiren
SIS	: Stiren-İzopren-Stiren
TFOT	: İnce film hâlinde ısıtma kaybı deneyi
Tg	: Camsı geçiş sıcaklığı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Zaman ilerledikçe nüfus artmakta, nüfusun artışı ile bireylerin ihtiyaçları da çoğalmaktadır. Artan ihtiyaçlar ve zorluklar insanlığı yeni çözüm yöntemleri bulma arayışları içine itmektedir. İnsan her daim gelişim gösteren bir canlı olduğundan bu ilerleyişe ayak uydurabilmek adına hem birey hem de toplumsal olarak yeni şeyler keşfetme arayışı içindedir. Böylece dinamik bir şekilde gelişen ve değişen teknoloji beraberinde ilerlemeyi getirmektedir. Bu ilerleme birçok alanda farklı yeniliklere ve yöntemlere ihtiyaç duymaktadır. İnşaat ve mühendislik dalları da bu ilerlemeden her yönüyle faydalanmaktadır.

Geçmişin ihtiyaçları ve imkânları doğrultusunda yapılmış olan binalar, yollar, köprüler ve diğer üst ve alt yapılar nüfusun artışı, araçlardaki değişimler birlikte yapıldıkları dönemde yeterli olmalarına rağmen gerek aktif kullanımı gerek yapılış yöntemi dolayısı ile çağın şartlarından geriye düşmekte ve istenilen performansı verememektedir. Bu noktada ise ortaya çeşitli bozulma problemleri çıkmaktadır. İnşaat mühendisliği yapıları içerisinde bu bozulma türleri karayolu asfalt kaplamalarında da görülmektedir. Asfalt bozulma problemleri ile birlikte; yol yüzeyinde bozulmalar, çökmeler, çatlamalar, sökülmeler, tekerlek izleri, su hasarı problemleri meydana gelmektedir. Bu problemler sürücü ve sürüş güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Can ve mal kaybının önlenmesi, bu problemlerin yaşanmadan çözülebilmesi adına asfalt kaplamaların düzenli bakımı yapılmalıdır. Bakım dışında öne çıkan bir diğer noktada asfalt kaplamaların çeşitli katkılarla modifiye edilerek bozulma problemlerinin önüne geçilmesi ve performanslarının iyileştirilmesidir. Özetlenecek olursa; trafik yüklerindeki artışlar ve rafineri teknolojisine bağlı olarak gelişen ham petrolün ileri arıtma ile bitümün azalan performansı katkı uygulamalarını beraberinde getirmektedir. Günümüz koşullarında, karışım türleri özelliklerine bağlı olarak da bir ya da birden çok katkı bir arada kullanılmaktadır. Günümüz şartlarında gerek agrega gerekse bağlayıcı asfalt yönünde katkılarla modifikasyon neredeyse bir zorunluluk halini almıştır.

Bu çalışmada da asfalt kaplamaların modifiye yöntemlerinde en yaygın kullanıma sahip olan polimer modifikasyon yöntemi ve koşulları üzerine durulmuştur.

1.2. Asfalt Kaplamalarda Görülen Bozulmalar

Asfalt kaplamalarda şartnameye uygunsuz malzeme seçimlerinden (kalitesiz agrega, mukavemeti düşük agrega vb.), kaplamanın karışımındaki yetersizlik veya sorunlardan (agrega dağılımı, kusurlu seçimler, matematiksel hatalar vb.) ve uygulama noktasında yapılan teknik hatalardan (gereğinden fazla sulama, sıkıştırma işleminin yetersiz oluşu, özensizlik, insana dayalı kusurlar vb.) dolayı çeşitli bozulmalar görülmektedir.

Bütün gerekliliklerin tam olarak yerine getirildiği durumlarda bile zaman içerisinde çevresel etkilerden ve kaplamanın ömrünü tamamlamaya yaklaşmasından dolayı kaplama performansında azalmalar görülmektedir. Bu performans kayıplarının daha büyük sorunlara yol açmasının önüne geçebilmek adına kaplamaların bakım ve onarımlarının gözden geçirilmesi oluşabilecek yüksek maliyetli problemlerin de önüne geçmektedir.

Bu durumların tespit edilip önlenmesi için bozulma sebeplerinin bilinmesi ve o doğrultuda yaklaşım gösterilmesi gerekmektedir (Tunç, 2007; Karakaş, 2014; Yılmaz 2016).

Bozulmalar üç ana başlık içerisinde incelenir. Bunlar; deformasyon (tekerlek izi oluşumu), çatlaklar, ayrışmalardır.

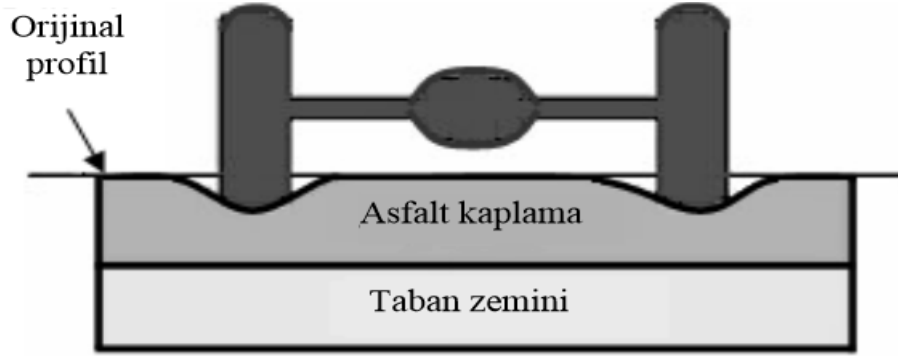
1.2.1. Deformasyon

Deformasyon kusurları asfalt kaplamalarda sıklıkla karşılaşılan problemlerin başında gelmektedir. Şekil değiştirmelerden kaynaklı ortaya çıkan deformasyonlar karışımın iyi hazırlanmamış olması, küçük boyutlu malzemelerin karışım içerisinde yoğun olarak bulunması, istenen tabaka kalınlığının doğru tasarım yöntemiyle elde edilememiş olması, çevresel etmenlerin (su ve hava gibi) kaplamaya etkisinin göz ardı edilmesi veya çevresel etmenlere karşı dayanımı yetersiz kaplamalar yapılmasıyla birlikte ortaya çıkmaktadır.

Deformasyonlar asfalt kaplamalarda tekerlek izi, ondülasyonlar ve çökmeler gibi farklı şekillerde oluşmaktadır (Tunç, 2004; Karakaş, 2014; Yılmaz 2016)

Tekerlek izi oluşumu, asfalt kaplamalarda sıcaklık etkisiyle birlikte hareket kabiliyetlerinde artış görülür ancak bu sıcaklık artışı ve yükleme uzun vadede gerçekleştiğinde (araç trafiğinin yolun belli bir kesiminden sürekli olarak geçmesi, bu geçişin oluşturduğu yükleme ve bu yüklemenin tekrarlı bir şekilde uygulanması) ortaya çıkabilmektedir.

Şekil 2. Akma tekerlek izi (Kutluhan & Ağar, 2009)



Şekil 3. Aşınma ve oturma tekerlek izi (Kutluhan & Ağar, 2009)

Ondülasyonlar, yol yüzeyinde dalgalı hareketler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Kavşakların yoğun olduğu bölgelerde, araç trafiğinin hızlanarak veya yavaşlayarak ilerlediği durumlarda, kaplama tabakaları arası ilişkisinin yetersiz kaldığı durumlarda ortaya çıkabilmektedir.

Penetrasyon içeriği yüksek, viskozite özelliği düşük kalan asfalt kullanımında, asfalt içeriğinin olması gerekenden fazla olduğu durumda, tabaka kalınlıklarının (aşınma ve binder) yetersiz olduğu durumda, eğim seviyesi yüksek yokuşlarda çıkış ve inişlerde, ağır yüklü taşıtların hareketi gibi durumlar ondülasyonlara sebebiyet vermektedir.

Kabarmalar, doğal zemin ve üst tabaka şişmesiyle oluşmaktadır. Zeminin karakteristik olarak bu duruma yatkınlığı ve suyun soğuk etkisiyle form değiştirip, donma çözünme davranışlarından ortaya çıkmaktadır (Umar & Ağar, 1991; Ilıcalı vd., 2001; Tunç, 2004; Karakaş, 2014). Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Ondülasyon problemlili kaplama (URL-1, 2023)

Çökmeler, agrega tane dağılımının yetersizliği, yüksek su içeriği, stabilizasyon kaybına uğrayarak oluşan parçalanmaların çokluğu, sıkıştırma işlemindeki kusurlar, su ikmal sistemindeki yetersizlikler gibi sebeplerle bölgesel olarak ortaya çıkmaktadır. Alt tabakalarda gerçekleşen bu durum, kaplamaya tesir etmekte ve yol yüzeyinde deformasyonlara yol açmaktadır. Sorunun çözülebilmesi adına şartnameye uygun şekilde rehabilitasyon çalışması yapılması gerekir (İlcalı vd., 2001; Karakaş, 2014; Alkan & Komut, 2023). Kaplamalarda görülen çökmeler Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Kaplamada çökme deformasyonu (URL-2, 2023)

1.2.2. Çatlaklar

Asfalt kaplamalardaki çatlaklar genel olarak kaplamayı etkileyen yüklerden ve araçların yüklerini tekrarlı olarak uygulaması sonucunda ortaya çıkan gerilme durumunun mevcut kaplamanın taşıyabileceğinden fazla olduğu durumda, bir başka deyişle kaplamanın dayanımının üzerindeki yükün oluşturduğu gerilimden aşağı kaldığı durumda oluşmaktadır.

Çatlak oluşumuna taşıtların ani ivmelenmeleri de sebep olacağı gibi çevresel etmenler de sebep olabilir. Sıcaklık değişimleri, tekrar eden taşıt yükleri, yetersiz kaplama tabakası, alt yapı yetersizlikleri, hâlihazırda bakımı aksatılmış ve kaplama yüzeyinde çeşitli deformasyonlara uğramış olması, drenaj sistemindeki yetersizlik, hava koşullarına

uyumsuzluk, uygulama işleminin baştan savma yapılması gibi durumlar da çatlak oluşumuna sebebiyet vermektedir.

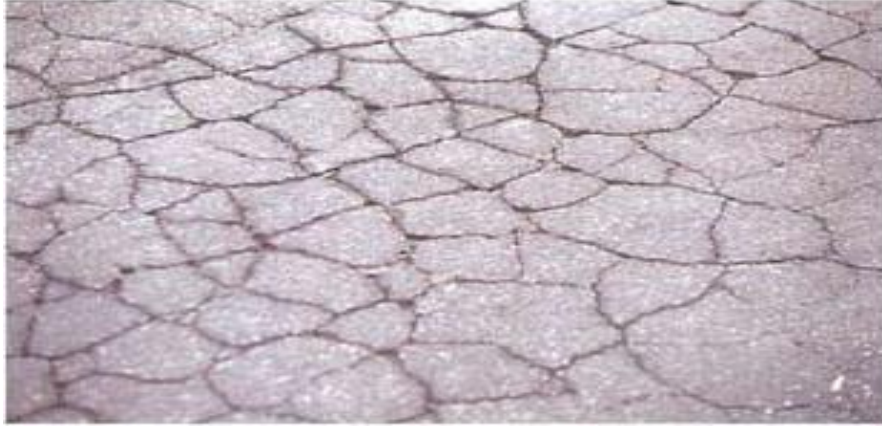
Çatlaklar kendi içlerinde çeşitli şekillerde görülebilir ve boyutsal farklılıklara sahiptirler. Çatlaklar; yorulma çatlakları, timsah sırtı çatlakları, kenar çatlakları, stabilite çatlakları, yansıma çatlakları, derz çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları, kayma çatlakları ve enine çatlaklar olarak farklı şekillerde görülmektedirler (Ilıcalı vd., 2001; Karakaş, 2014).

Yorulma çatlakları, taşıt trafik yüklerinin tekrarlı bir şekilde kaplamaya etkimesi ve kaplama dayanımının aşılması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Taşıta ve kaplama dayanımına bağlı olarak çatlağın derecesi değişkenlik göstermektedir. Bu sorunun önlenmesi için asfaltın boşluk oranı minimum düzeyde olmalı, sert yapılı bir asfalt kullanılmalı ve kaplamanın asfalt içeriği olması gerekenden bir miktar daha fazla olmalıdır. Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yorulma çatlağı (URL-3, 2023)

Timsah sırtı çatlaklar, görüntüsü itibariyle timsahın derisini andırmaktadır. Bu tür çatlakların oluşmasındaki başlıca problemler tabakalardaki hacimsel değişiklikler, ağır taşıt yükleri, tabaka kalınlıklarının yetersizliği, deformasyon, drene edilemeyen sular şeklinde sayılabilir. Yükleme etkisiyle birlikte çok ciddi şekil değişikliğine maruz kalabilen ve esnek zeminler üzerine yapılan esnek kaplamalarda görülmektedir. Yükün etkimesi sona erdiğinde eski hâline döner ancak uyumluluk düzeyi yetersiz kaldığında çatlaklar oluşur. Timsah sırtlı çatlaklar Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Timsah sırtlı çatlak (Ilıcalı vd., 2001)

Kenar çatlakları, banketlere doğru veya yol yüzeyi boyunca oluşabilmektedir. Don etkisi, malzemenin oturması, kaplama-banket arasındaki nem farkı, banket yanal desteğinin yetersizliği veya çevredeki bitkilerden kaynaklı olarak ortaya çıkabilmektedir. Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Kenar çatlağı (Karakaş, 2014)

Stabilite çatlakları, yapının alt tabakalarından kaplama yüzeyine doğru oluşurlar, dingil yüklerinin sebep olduğu gerilmelerin yeterli karşılık bulamadığı durumlarda gerçekleşir. Şekil 9’da blok şeklindeki stabilite çatlağı gösterilmiştir.



Şekil 9. Stabilite çatlağı (Karakaş, 2014)

Yansıma çatlakları, kaplamanın alt kısmında bulunan tabakalarda ortaya çıkan problemlerin kaplamaya yansımasıdır. Farklı şekillerde ortaya çıkabilir. Çatlakların ve yarıkların doldurulmasıyla ve su yollarının engellenmesiyle birlikte sorun oluşturmazlar. Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Yansıma çatlağı (Karakaş, 2014)

Derz çatlakları, uygulama kusurları sonucunda iki kaplama çizgisinin ortasında oluşur. Derzlerin üst üste binmesi ve asfalt kaplama tabakalarının birden fazla olması durumunda boyut ve derinlikleri artar. Yol yüzeyini çevresel etkilere karşı daha dayanıksız bir duruma getirir. Kötü drenaj sisteminin bir sonucu olarak da ortaya çıkmaktadır. Uygulamanın kontrollü ve düzgün yapılması bu kusurun önlenmesi noktasında yardımcıdır. Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Derz çatlağı (Ilıcalı vd., 2001)

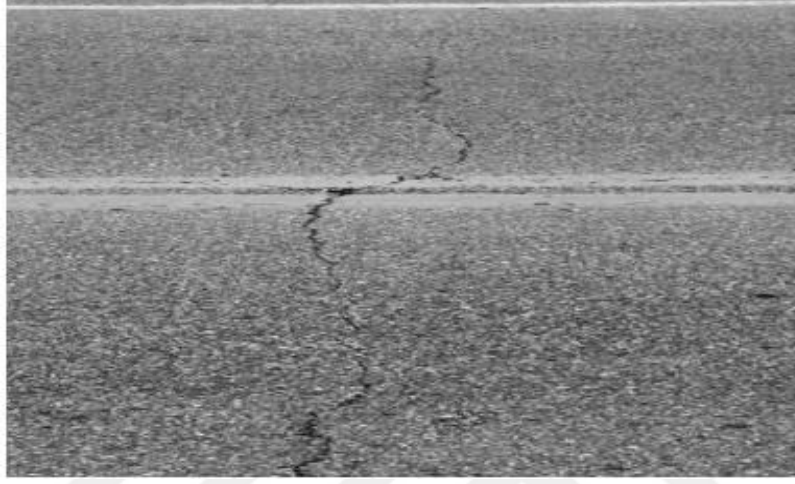
Düşük sıcaklık çatlakları, büzülme çatlakları şeklinde de adlandırılırlar. Timsah sırtı çatlaklardan farkı çatlakların daha dikey, daha keskin bir biçimde ve daha büyük boyutlarda gerçekleşmesidir. Karışım veya temel kaynaklı olarak oluşurlar. Penetrasyon düzeyi düşük, miktarı yüksek asfalt karışımların hacim değişiklikleriyle oluşur. Dingil yükü azlığı büzülme çatlaklarının oluşumunu olumsuz yönde etkiler.

Kayma çatlakları, tabakaların birbiri üzerindeki yanal hareketleriyle birlikte ortaya çıkar. Ağır taşıt yüklü araçların çukur veya kavşaklardaki yavaşlama hareketleri de bu sorunun ortaya çıkmasına neden olur. Yol yüzeyi ile alt tabakaların sıkı bir bağ oluşturamaması ve düşük çekme dayanımına sahip olmasıyla oluşur. Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Yol yüzeyindeki kayma çatlaması (Karakaş, 2014)

Enine çatlaklar, diğer çatlak türlerine göre daha az yaygındır. Yol yüzeyini dik kesecek şekilde oluşur. Uygulamada aksaklıklar, çevresel koşulların ve sıcaklığın sürekli değişmesi, su drene sisteminin yetersizliği gibi problemlerden kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 13'te gösterilmiştir. (Umar & Ağar, 1991; Ilıcalı vd., 2001; Tunç, 2004; Karakaş, 2014, Alkan & Komut, 2023).



Şekil 13. Enine çatlağın oluşumu (Karakaş, 2014)

1.2.3. Ayrışmalar

Asfalt kaplamasındaki ayrışmalar agregaların çevresel etkilerle ufalanıp parçalanmasıyla, trafik etkisiyle, karışımın iyi yapılmamış olması sebebiyle, düşük kaliteli malzeme kullanımıyla, yetersiz bitüm içeriğiyle, kullanılan malzemenin temizliğinin eksik yapılması sebebiyle, drenaj sisteminin kusurlu veya eksik olması sebebiyle, uygunsuz hava koşulları altında uygulama yapılmasıyla ve diğer uygulama hataları sebebiyle ortaya çıkabilmektedir. Bu durumların tekrarlı ve birlikte ortaya çıkmasıyla zaman içerisinde durumun ciddiyeti artabilmektedir.

Ayrışmalar; soyulma (su hasarı), sökölme, kuma ve cilalanma şeklinde dört farklı şekilde ortaya çıkabilmektedir (Ilıcalı vd., 2001)

Soyulma, sürtünme ve su etkisiyle bitümün agrega yüzeyinden ayrılması ve bunun sonucu olarak yüzeydeki agregaların ayrılmasıyla oluşur. Malzemenin temizliğine ve kuruluşuna önem gösterilmesiyle; viskozitesi ve bağlayıcılığı yüksek asfalt kullanımıyla soyulma problemlerinde azalma görülmektedir. Şekil 14'te kaplamanın soyulması gösterilmiştir.



Şekil 14. Soyulma problemi (Karakaş, 2014)

Sökülme, yol aşınma tabakasını oluşturan agregaların ayrılmasıyla birlikte yol yüzeylerinde kenardan içe veya yüzeyden alta doğru gerçekleşir. İlk olarak küçük boyutlu agregalar yüzeyden kopar, bunların kopmasıyla birlikte boşluklar zaman içerisinde artar ve büyük parçaların da kopmasıyla birlikte sökölmenin boyutu artar. Yüzeyin erozyonu şeklinde de tanımlanır. Sıkıştırımadaki özensizlik, hava şartlarının uygun olmadığı zaman yapılan imalatlar, temizliği kusurlu agregalar, asfalt içeriğinin yetersizliği, gereğinden fazla yapılan ısıtma işlemleri sökölmenin oluşmasına sebep olan problemlerdir. Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15. Asfalt kaplamasındaki sökölme (Yılmaz, 2016)

Kusma, karışımda kullanılan asfalt içeriğinin yol yüzeyine çıkmasıyla birlikte görünür hâle gelir. Yol yüzeyi güneş ışığının etkisindeyken parlama yapıyorsa kusma probleminin ortaya çıkacağını belirtir. Sıcak havalarda, asfalt miktarı gereğinden fazla olduğunda, astar tabakası doğru uygulanmadığında, bitüm yüzdesi fazlalığında, karışımlarda boşluğun az olduğu durumlarda, yük etkisiyle ortaya çıkabilmektedir. Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Asfalt yüzeyindeki kusma problemi (Ilıcalı vd., 2001)

Cırlanma, aşınmaya yatkın agregaların, trafik yükleri ve trafik etkisiyle birlikte aşınarak özelliklerini kaybetmesiyle birlikte oluşur. Yağış etkisi de ortaya çıktığında sürüş güvenliği için oldukça tehlikeli bir hâle bürünür. Bu durumun önlenmesi adına pürüzlü ve köşeli agrega kullanılmalıdır (Ilıcalı vd., 2001).

Asfalt kaplamalarda tekerlek izi, yorulma, su hasarı ve çatlamlar şeklinde ortaya çıkan problemlerin çözümü için dikkate alınması gereken birçok nokta vardır. Bakım ve onarımın eksiksiz ve doğru yapılması, uygulama noktasındaki kontrollerin aksatılmaması, uygulamanın doğruluğu, malzeme tercihleri, şartnameye uygunluk gibi çeşitli çözümler mevcuttur. Bu çözümlerin dışında kullanılan asfalt kaplamaların modifikasyonu da problemlerin oluşmasının önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında da asfalt kaplamalara uygulanan modifikasyon türlerinden ve koşullarından bahsedilecek olup, özellikle polimerlere odaklanılacaktır.

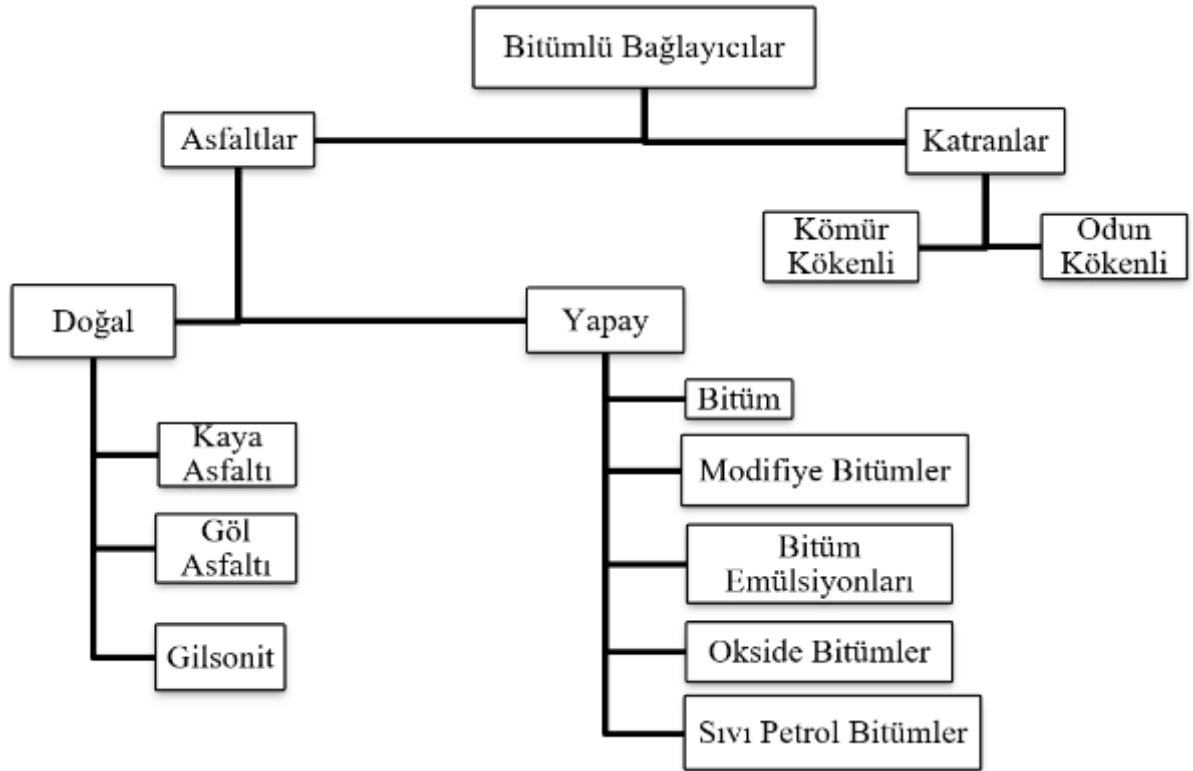
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, petrolden doğal olarak veya damıtma yoluyla elde edilen ve yol kaplaması için kullanılan katran benzeri bir hidrokarbon karışımıdır (Read & Whiteoak, 2003).

Termoplastisitesi, dayanıklılığı, güçlü adezyon özelliği ve yüksek geçirimsizliğine ek olarak modifiye edilebilir ve geri dönüştürülebilir olmasının yanında viskoelastik bir malzeme olması bitümü yol uygulamalarında bağlayıcı malzeme olarak ön plana çıkarmaktadır.

Bitümlü bağlayıcılar temel olarak asfaltlar ve katranlar olmak üzere iki bölümde incelenir. Sınıflandırma Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması (Komut vd., 2021)

2.1.1. Asfaltlar

Doğal ve yapay bitümler olmak üzere ikiye ayrılır.

Doğal bitümler, yeryüzüne çıkan ve uçucu bileşenlerinden doğal bir şekilde ayrılan ham petrolün zaman içerisinde saflaşması ile oluşur. Gilsonit, göl ve kaya asfaltı olarak üçe ayrılır.

Gilsonit, petrol bitümlerini sertleştirmek için kullanılır, içeriğe katıldığında yumuşama noktasını arttırırken penetrasyon değerini ise düşürmektedir. Agregat bitüm bağını sağlamlaştırarak soyulma direnci ve stabiliteyi olumlu etkiler, tekerlek izi sorunlarını azaltır.

Göl asfaltları çok sert olduklarından farklı penetrasyonlu bitümlerle karıştırılarak kullanıma uygun hale getirilir. Ülkemizdeki mastik asfalt uygulaması buna bir örnektir.

Kaya asfaltları bünyelerinde düşük oranda bitüm bulundurduklarından asfalt kaplamalarda nadiren kullanılırlar (Komut vd., 2021).

Yapay bitümler, ham petrolün petrol rafinelerinde damıtılması ile elde edilir. Bitüm, sıvı petrol bitümler, bitüm emülsiyonları, okside bitümler ve modifiye bitümler olarak beşe ayrılır.

Bitüm, ham petrolün damıtılması ile elde edilen hidrokarbonlu, yapışkan ve su geçirimsiz bir yapıya sahiptir.

Sıvı petrol bitümler, yumuşak bağlayıcılardır, ham petrol destile edilip uçucu bileşenlerinden ayrıldıktan sonra yüksek kaynama noktasına sahip bir bileşenle karıştırılarak elde edilir.

Bitüm emülsiyonları, yeterli pompalama, depolama süresinde artış ve karıştırma stabilitesi elde etmek için bitümün su içinde emülgatör aracılığı ile homojen olarak karıştırılması sonucu elde edilir.

Okside bitümler, diğer bitümlerin aksine kaplamalar yerine boya ve yalıtım gibi özel alanlarda kullanılır.

Modifiye bitümler, karşılaması gereken şartları karşılayamayan ve bozulma problemlerine yol açan bitümlere çeşitli katkıları eklenerek elde edilir (Komut vd., 2021).

2.1.2. Katranlar

Katran, istenilen kökene bağlı olarak (kömür-odun) seçilen malzemenin kuru bir şekilde damıtılma işlemine tabii tutulmasından elde edilen ham malzemeye denir, kullanılabilir hâle gelmesi için ek bir arıtma işlemi gereklidir. Yol kaplaması olarak kullanıldığında kömür kökenli katranlar ön plandadır (Komut vd., 2021).

2.2. Bitümlü Bağlayıcıların Özellikleri

2.2.1. Bitümün Yapısı

Organik temelli asfalt kimyasal olarak karmaşık bir yapıya sahiptir. Temel olarak hidrokarbon bileşiklerinden oluşurlar. Isıya bağlı olarak özellikleri değişkenlik gösterir. Bitümün kimyasal içeriği Tablo 1’de gösterilmiştir.

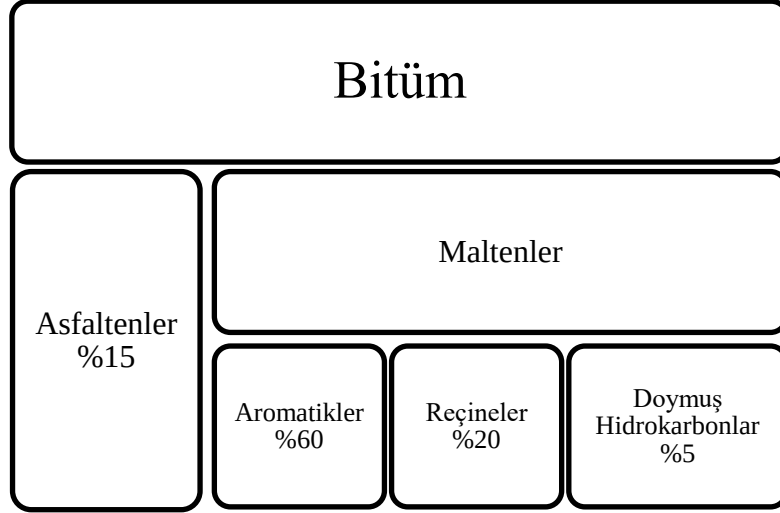
Tablo 1. Bitümün kimyasal içeriği (Ilıcalı vd., 2001)

Element	Kütle yoğunluk %’si
Karbon	82-88
Hidrojen	8-11
Sülfür	0-6
Oksijen	0-1,5
Nitrojen	0-1

Asfalt (bitüm) n-heptan’da çözünme durumuna göre asfalten ve malten olarak ikiye ayrılmaktadır (Ilıcalı vd., 2001).

Asfaltenler, n-heptanda çözünmeyen, yüksek molekül ağırlığına sahip, karmaşık yapıli aromatiklerdir. Bitüm içeriğinin %5’i ile %25’lik kısımlarını oluştururlar. Olması gerekenden daha yüksek bir değerde asfalten içeriği bulunduğunda yaşlanma aşamasında kusurlar daha çok ortaya çıkar. İçerikteki asfalten miktarı arttıkça rijitlik ve viskozite artar, penetrasyon değeri düşer ve yumuşama noktası değeri yükselir.

Maltenler, n-heptanda çözülürler ve kendi içlerinde reçineler, aromatikler ve doymuş hidrokarbonlar olarak üçe ayrılmaktadır. Bitüm içeriğinin dağılımı Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Bitüm içeriği (Read & Whiteoak, 2003)

Haggam vd. (2014) araştırmasında, Polimetil metakrilat bileşimini kullanarak seçtiği bağlayıcı asfalt çimentosu 60/70 için fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşenlerini Tablo 2’de verildiği gibi sunmaktadır.

Tablo 2. Asfalt çimentosu 60/70 fiziksel ve kimyasal özellikleri (Haggam vd., 2014)

Özellikler		Değerler
Fiziksel Özellikler	25°C'de penetrasyon 100 g, 5 saniye, 0,1 mm	60
	135°C'de kinematik viskozite	346
	60°C'de mutlak viskozite	2122
	Parlama noktası, (Cleveland açık kap)	250
	25°C'de süneklik, 5 cm/dak	+100
	Yumuşama noktası	52
	Trikloroetilen içinde çözünürlük	99,9
Kimyasal Bileşenler	Yağ fraksiyonları	26,2
	Reçine fraksiyonları	48,4
	Asfaltlen fraksiyonları	25,4

Bitümlü bağlayıcı olarak kullanılan asfalt çimentosu, sıcak karışım tekniğinde, plant sürecinde esas oksidasyona maruz kalmakta ve uygulamada da yavaş oksidasyon süreci gelişmektedir. Bu bakımdan geri kazanım asfalt kaplamaların bileşiminde bulunan asfalt çimentosunun bileşiminde reolojik değişimler oluşmaktadır. Daly vd. (2019) araştırmasında ekstrakte edilen bağlayıcıların kimyasal bileşimini Tablo 3'te olduğu gibi sunmaktadır.

Tablo 3. Ekstrakte bağlayıcıların kimyasal bileşeni (Daly vd., 2019)

Karışım Dizaynı	SARA Analizi, %					Çözülmüş Asfaltenerler, %	Yüksek Moleküler Ağırlık, %	Çözülmüş Maltenler, %	Kritik Gerinim Enerji Salmım Oranı, kJ/m ²
	Asfalt	Reçine	Aromatik	Doymuşlar	Toplam Reçine, Aromatik, Doymuşlar				
70CO	23,2	32,7	42,4	1,7	76,8	30,0	1,0	70,0	0,5
70PG5M	23,3	36,0	39,4	1,7	80,1	34,0	3,0	66,0	0,5
70PG5P	23,6	26,7	46,0	3,7	76,4	39,0	5,7	61,0	0,5
70PG5P5H G	27,6	30,0	39,3	3,0	72,3	41,0	8,5	59,0	0,3
70PG5P1 2CYCL	24,8	26,7	42,1	6,4	75,2	38,6	6,0	61,4	0,4
52PG5P	20,2	29,2	45,6	5,0	79,8	30,0	4,7	70,0	0,2
70PG5P2 0FLUX	25,6	22,8	44,2	7,5	74,5	35,3	6,0	64,8	0,3
70PG15R AP	22,1	30,7	45,3	1,9	77,9	41,8	8,3	58,2	0,6
70PG5P1 5RAP	23,5	30,3	43,5	2,7	76,5	46,4	5,5	53,7	0,5
70PG5PH G15RAP	29,8	28,4	36,9	5,0	70,3	44,7	5,1	55,4	0,4
52PG5P1 5RAP	22,9	29,8	44,1	3,2	77,1	33,2	4,0	66,8	0,3
70PG5P_ B	22,4	25,5	47,2	5,0	77,7	41,6	5,2	58,4	0,5
70PG5P_ B5SK	20,6	26,9	45,4	7,1	79,4	33,5	4,5	66,5	0,3
70PG5P_ B10SK	22,2	25,2	47,3	5,2	77,7	42,1	3,2	57,9	0,3
70PG5P_ B15SK	24,4	29,3	40,2	6,1	75,6	42,0	6,3	58,0	0,2

Badre vd. (2006) araştırmasında, kömür, ham petrol ve bitümden elde edilen asfaltın ve asfaltın çözünürlük fraksiyonlarının moleküler boyutu ve ağırlığı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada kullanılan farklı asfaltların ve Athabasca bitümünün element içerikleri Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Çeşitli petrol, kömür asfaltları ve bitümün elementel kütle fraksiyonları (Badre vd., 2006)

Asfaltın Örneği	Karbon (C)	Hidrojen (H)	Azot	Oksijen	Kükürt	C:H
UG8	81,07	7,11	1,02	1,6	8,94	1:1,045
Athabasca	77,03	8,01	1,27	3,00	8,18	1:1,239
Ven20	84,75	7,81	1,75	1,72	4,57	1:1,098
Denver City	72,63	6,58	0,75	3,19	5,32	1:1,1080
Iino	90,35	5,53	2,23	1,9	<0,23	1:0,729
Ill #8	80,98	6,52	1,33	8,80	0,39	1:0,960
BA	79,23	6,19	1,49	1,36	0,39	1:0,931
Athabasca Bitüm	83,72	1,39	<0,5	15,03	4,73	1:1,479

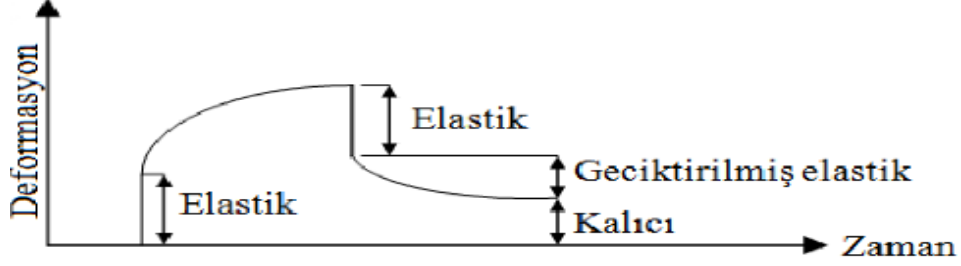
2.2.2. Bitümün Davranışı

Bitümlerin davranışları reoloji kavramı altında incelenir. Reoloji, bitümün çeşitli etkiler altında gösterdiği tepkilerin bütünüdür. Bu etkiler sıcaklık, yükleme ve yükün etki süresine bağlı olarak değişmektedir.

Bitüm, sıcaklık düştüğünde ve yükleme süresi kısaldığında elastik; sıcaklık düştüğünde ve yükleme süresi uzadığında yapışkan bir akışkan davranışı gösteren termoplastik ve viskoelastik yapıya sahip bir malzemedir.

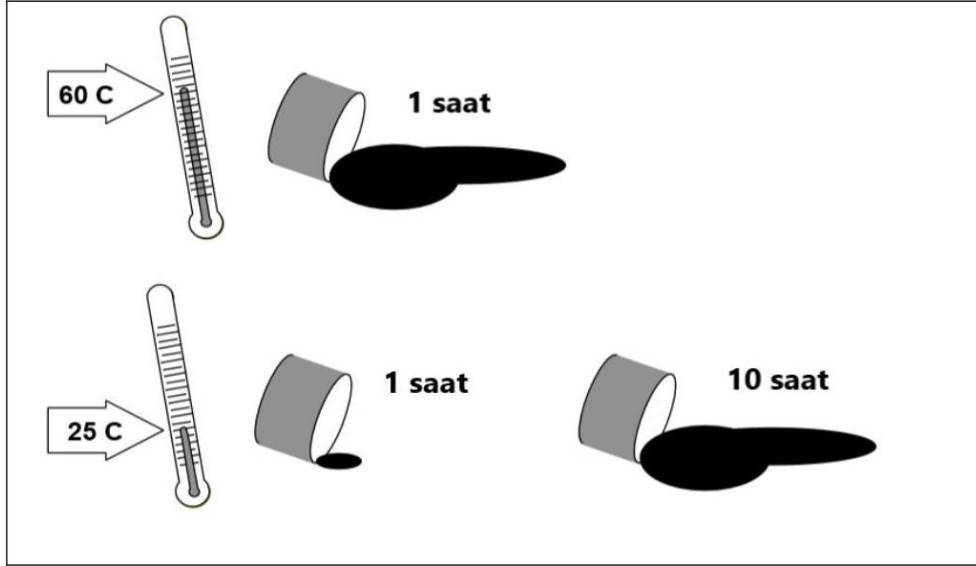
Bitümlü bağlayıcılar, şartlara bağlı olarak katı ya da sıvı şeklindedir. Yüke maruz bırakıldığında elastik bir davranış gösterip uygulanan yükü deforme olmadan geri döndürebileceği gibi deformasyona uğrayıp viskoelastik bir davranış göstererek uygulanan yükün bir kısmını geri döndüremeyebilir. Katı hâli için geçerli olan bu davranış biçimi, sıvı

hâli göz önüne alındığında yapışkan ve kalıcı deformasyon içerecek şekildedir (İlıcılı vd., 2001; Komut vd., 2021). Bitümün viskoelastik davranışı Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 19. Bitümün viskoelastik davranışı (Tunç, 2004)

Bitümün farklı zaman ve sıcaklık etkilerindeki davranışı benzer sonuçlar gösterebilir. Bu duruma bitümün süperpozisyonu da denir. Örneğin; bir saat ve 60°C’lik koşullar ile on saat ve 25°C’lik koşulların sonuçların aynı olabilir. Bu durum Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20. Bitümün akış davranışının karşılaştırması (Komut vd., 2021)

2.2.3. Bitümlü Bağlayıcılarda Aranılan Özellikler

Bitümlü bağlayıcılarda aranılan özellikler şu şekilde sıralanmaktadır.

- Stabilité
- Esneklik
- Rijitlik

- Dayanıklılık
- İşlenebilirlik
- Geçirimsizlik
- Kaymaya karşı direnç
- Yorulmaya karşı direnç

Stabilite, asfalt kaplamaların trafik yüklemesi sonucunda ortaya çıkabilecek deformasyonlara gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Yüksek stabiliteye sahip asfalt kaplamaları yeterli esneklikte olmadığından, düşük stabiliteye sahip asfalt kaplamaları da yeterli dayanıma ve rijitliğe sahip olmadığından tercih edilmemektedir.

Esneklik, yol üst yüzey tabakalarının zamanla etkiyen yükler sonucunda ortaya çıkan oturmalara karşı çatlamadan uyum sağlayarak eğilebilmesidir. Esnekliğin istenilen durumda olmaması hâlinde çatlamalar oluşur. İstenilen esnekliğe sahip bir asfalt kaplama sıcak havalarda bu durumu muhafaza ederken soğuk havalarda kırılmanlaşmaz.

Rijitlik, asfalt kaplamasında ısı ve yükleme etkileri doğrultusunda ortaya çıkabilecek deformasyon ve gerilme arasındaki ilişkiyi kapsar. Yükleme hızı, karışım yoğunluğu, penetrasyon derecesiyle doğru orantılı; süre ve ısı artışı ile ters orantılıdır. İndirekt çekme testi ile hesaplanır.

Dayanıklılık, asfalt kaplamalarda araçlardan ve çevre unsurlarından kaynaklı sebeplerle ortaya çıkan aşınma problemine gösterilen dirençtir. Penetrasyon düzeyi düşük, film tabakası kalın olan, içeriğinde yüksek derece asfalt bulunduran, sıkışması iyi, soyulma direnci yüksek ve agrega tane dağılım oranı yoğun olan durumlarda artış gösterir.

İşlenebilirlik, asfaltın yola serilme ve sıkıştırma işlemleri noktasında istenilen kıvam ve şekilde kolaylıkla uygulanmasıdır. Agrega tane dağılımının doğrudan etkisi olmakla birlikte, malzemenin çok miktarda kaba agrega ve ince filler içerdiği durumlarda boşluklar doldurulup stabilite arttırılırken işlenebilirlik azaltılmaktadır. Asfalt kaplama işlenebilirlik düzeyinin kolay olması adına yumuşak bir karışım hazırlandığında ise kaplamanın deformasyona zafiyeti ortaya çıkmaktadır. Bu iki durum göz önüne alınarak optimum şartların karşılandığı bir işlenebilirlik düzeyi belirlenmelidir.

Geçirimsizlik, kaplamalar içerisinde bulunan boşluklardan su veya hava gibi geçişlere maruz kalırlar. Su ve hava etkisinin kaplamadaki etkisi geçirimsizlik olarak nitelenir. Geçirimsizlikte artış söz konusu olduğunda asfalt geç yaşlanır, soyulma direnci azalır. Geçirimsizlikteki artış agrega dağılımı ve karışım yoğunluğu gibi etmenlere bağlı

olarak artış gösterir. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (KTŞ) uygun geçirimsizliğin elde edilebilmesi için karışımın boşluk oranının bitümlü temel tabakalarında yaklaşık %7, binder tabakalarında yaklaşık %5 ve aşınma tabakalarında yüzde 3 ile 5 aralığında olması uygun görülmektedir.

Kaymaya karşı direnç, araçların yoldaki sürüş güvenliğini arttıran, başta ıslak kaplama yüzeyinde kaymaya gösterilen mukavemettir. Sürtünme kuvveti ile doğrusal bir ilişki içerisindedir. Sürtünme kuvvetinin veya yüzeydeki araç lastik hareketine karşı koyan kuvvetin düşük olması durumlarında sürücülerin ve araçların güvenliğini sağlama noktasında problemler ortaya çıkmaktadır, zemine yağış düşmesi durumunda bu risk daha da artmaktadır. Bu gibi problemlerin önüne geçebilmek adına köşeli agregaların kullanımı daha uygundur. Asfaltın yüzdesinin makul düzeyde belirlenmesi, agreganın tane dağılımının iyi ayarlanması ve oluşacak sürtünme sonucu istenilen formunu kaybetmeye yatkın agrega kullanımından kaçınılması kaymaya karşı direnci arttırmaktadır.

Yorulmaya karşı direnç, araçlardan kaynaklı tekrarlı yük binmelerine karşı asfalt kaplamasının bu yüklerin çatlak oluşturmaya sebebiyet vermeyecek şekilde dayanmasıdır. Rijitlikte artış, kalın kaplama tabakası kullanımı, yüksek asfalt içeriği, agrega tane dağılımı ve yoğunluğunun artması, asfalt penetrasyon düzeyinin artışıyla orantılı olarak artmaktadır. Sıkıştırma işleminin yetersiz olması veya kaplamanın boşluk oranını doğru ayarlanmadığı durumlarda kaplamanın olması gerekenden daha erken sürede yaşlanma sorunu yaşamasına ve yorulma çatlaklarına ortam hazırlamasına sebep olmaktadır (KTŞ, 2013; Karakaş, 2014; Uncu, 2017; Araz, 2022; URL-4,2023; URL-5,2023).

2.3. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Bitümlü bağlayıcıların şartnameye göre karşılaması gereken bazı özellikler vardır. Bu özellikleri karşılayıp karşılamadığını belirlemek adına çeşitli deneyler uygulanmaktadır. Geleneksel deneylerden farklı olarak bağlayıcının performansını belirlemek, tekerlek izi, yorulma, çatlama gibi problemleri azaltmak için Superpave deneyleri de uygulanmaktadır. Yapılan deneyler şu şekilde listelenmektedir.

- Penetrasyon deneyi
- Yumuşama noktası deneyi
- Fraass kırılma noktası deneyi

- Dönmeli ince film etüvü deneyi (RTFOT)
- İnce film hâlinde ısıtma deneyi (TFOT)
- Çözünürlük tayini deneyi
- Parlama noktası deneyi
- Kuvvet ölçümlü duktilite deneyi
- Elastik geri dönme deneyi
- Basınçlı yaşlandırma deneyi (PAV)
- Depolama stabilitesi deneyi
- Dinamik kesme reometresi deneyi (DSR)
- Kiriş eğilme reometresi deneyi (BBR)

Penetrasyon deneyi, bitümlü bağlayıcının kıvamını ve rijitliğini belirlemek için yapılmaktadır. 100 gram ağırlığındaki standart iğnenin 25°C'lik sıcaklıkta, 5 saniyelik sürede bitüm numunesi içerisine dikey olarak batırılarak uygulanır ve batma mesafesi ölçülür. Üç farklı ölçümün ardından ölçüm ortalaması en yakın değere yuvarlanılarak elde edilir. Elde edilen sonuca göre bitümün 40/60, 50/70, 70/100, 100/150, 160/220 penetrasyon sınıflarından belirlenen aralığa düşmesi beklenmektedir. Penetrasyon değerinin yüksek olması bitümün yumuşamasına neden olmaktadır. Kıvamlılık artışı ise bitümün rijitliğini artırır.

Yumuşama noktası deneyi, bitümün ve bitümlü bağlayıcıların 28°C ile 150°C aralığındaki yumuşama noktasının belirlenmesi için yapılmaktadır. Farklı her bağlayıcının sıcaklık karşısındaki davranışı da farklı olmaktadır. Deney ile birlikte hangi sıcaklıklarda akmaya başladıkları belirlenmektedir. Yumuşama noktası, 80°C'nin altındaki numuneler için 0,2°C yaklaşım ile, 80°C'nin üzerindeki numuneler için elde edilen iki sıcaklığın ortalaması 0,5°C yaklaşım ile sonuç olarak verilmektedir.

Fraass kırılma noktası deneyi, bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki kırılma noktasını belirlemektedir. Bitümün rijitliğinin ve kırıldığı sıcaklığın düzeyi belirlenmektedir. Elde edilen verilerin ortalamasına bağlı olarak kırılma seviyesi belirlenir.

RTFOT ve TFOT, hava ve sıcaklığın bitümlü bağlayıcı üzerindeki etkilerini ölçmek için yapılır. Karışımın hazırlanması, serme ve sıkıştırma işlemleri, depolama ve taşıma sırasında oluşabilecek yaşlanma örneklenir. Yaşlanma ile birlikte oluşan kütle kaybının ve bitümün fiziksel özelliklerinin tayini için yapılır. Deney mekanizmasına 35 gram bitüm

içerikli 8 adet numune yerleştirilir ve 163°C’de 85 dakika süre ile deney gerçekleştirilir. Penetrasyon, yumuşama noktası veya dinamik viskozite gibi özelliklerindeki değişime göre yaşlanmanın etkileri belirlenir. Kütle artışı pozitif, kütle azalması negatif değerle belirtildikten sonra sonuçların ortalaması kütle değişimi olarak anlam kazanır.

Çözünürlük tayini deneyi, az miktarda mineral madde içeren veya içermeyen bitümlü bağlayıcı ile bitüm karışımının belirli bir çözücü içerisinde çözünmesi ile belirlenir ve bitümün trikloretilende minimum %99 oranında çözülmesi beklenir.

Parlama noktası deneyi, Cleveland Açık Kabı kullanılarak parlama noktası 79°C ile 400°C arasında olan bitüm ve bitümlü bağlayıcıların parlama ve yanma noktaları belirlenir. Geçici olarak parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık belirlenir ve bu sıcaklık bitümlü bağlayıcının uygulamada alev alma riskini önlenmesinde önemlidir.

Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi, bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıkta kohezyondan oluşan dayanımını belirlemek adına yapılır. Belirli sıcaklıktaki su banyosu içinde 50 milimetre/dakika hız ile bitüm çekilir ve kopma anındaki uzama miktarı santimetre cinsinden bulunur, yük uzama eğrisinde deformasyon enerjisi hesaplanır.

Elastik geri dönme deneyi, düktilite aleti ile birlikte 25°C sıcaklıkta bitümün geri dönen elastik deformasyonu belirlenir. Elastomerik modifiye bitümlere uygulanır ve şartname koşullarına göre minimum %60 oranında elastik geri dönme olması beklenir.

PAV, bitümde uzun sürelerde, yüksek sıcaklıklarda ve basınçlı koşullar altında yaşlandırılması ile oluşabilecek özellik değişikliklerini belirlemek ve kaplamanın hizmet sırasında karşılaşıacağı yaşlanma etkilerini yansıtmak için yapılır. RTFOT deneyinden alınan numunelerin 50 gramlık 10 adet kap şeklinde 2070 kPa basınçta 90°C -100°C veya 110°C sıcaklıkta 20 saat süre ile yaşlandırılması ile uygulanmaktadır.

Depolama stabilitesi deneyi, modifiye bitümlerin 180°C gibi yüksek sıcaklıklardaki depolama stabilitesini ölçmek için yapılır. Polimer ile bitümün ayrışma durumları incelenir. 180°C sıcaklıkta mezür içerisinde 3 gün bekletildikten sonra numunenin iki farklı bölgesinden örnek alınır, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ile kıyaslama yapılır.

DSR, bitümlü bağlayıcıların zamana bağlı olarak orta ve yüksek sıcaklıklarda kompleks kesme modülü, faz açısını belirlemek ve bitümün viskoelastik davranışını belirlemek için yapılır. Kompleks kesme modülü ve faz açısı deney sıcaklığı ve yükleme frekansına bağlı olarak bulunur. Kompleks kesme modülü malzemenin kesme gerilmesi altında şekil değiştirmeye karşı dayanımıdır. Faz açısı ise geri dönüştürülebilen veya

dönüştürülemeyen şekil değiştirme miktarıdır. Numune sağa sola salınım yapan iki disk arasında kesme kuvvetine maruz bırakılır ve reolojik özellikleri tespit edilir. Numuneye uygulanan kesme kuvveti yaklaşık olarak 90 kilometre/saat hızdaki trafik kaynaklı deformasyona denktir.

BBR, bitümün düşük sıcaklıklardaki davranışının, rijitlik ve sünme özelliklerinin belirlenmesinde uygulanır. Bitümün düşük sıcaklık çatlamlarına karşı davranışını belirlemeye yardımcı olur. Numune 4 dakika boyunca yüke maruz bırakılır ve bu yük kaynaklı zamana bağlı oluşan şekil değiştirme ve sünme rijitliği grafikleri belirlenir. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen 60 saniyelik işlemten sonra sünme rijitliğinin maksimum 300 MPa, eğimin ise minimum 0,3 olması beklenir (İlıcılı vd., 2001; Orhan, 2012; Komut vd. 2021).

2.4. Asfalt Kaplamaların Modifikasyonu

Asfalt kaplama karışımların performanslarını iyileştirmek, kaplamada ve uygulamada oluşabilecek sorunları en aza indirmek adına çeşitli katkı maddelerinin uygun görülen koşullar altında, uygun miktarda karışım içerisinde dâhil edilmesi işlemi modifikasyon olarak adlandırılır (Orhan, 2012)

Modifikasyon işlemi ham petrolün elde edilmesi ve işlenmesi konusundaki zorluklarla birlikte önem kazanmıştır. Asfalt kaplamalarda kullanılan malzemenin yoğun trafik yükleri altında kalması ve bu yüklerin tekrarlı olarak etkimesiyle performans kayıpları yaşaması deformasyon, çatlama ve ayrışma gibi bozulmalara uğrayarak zamanın ihtiyaçlarına karşılık verememiştir. Bu durum teknolojinin gelişimiyle birlikte insanlığı yeni çözümler aramaya mecbur bırakmıştır. Modifiye bitümler Avrupa’da ve Amerika’da 1960-1970 yılları arasında geliştirilerek uygulanmaya başlanmıştır (İlıcılı vd., 2001; Komut vd., 2021).

Ekonomik olarak ham petrol ve bitüm fiyatlarının maliyet artışı, maliyetten kaçınmak istenildiğinde düşük kaliteli ürün sorununu ortaya çıkarmıştır. Nüfusun artışıyla birlikte artan trafik yoğunluğu, onarım için gereken malzeme eksikliğiyle birlikte bakımsızlık kusurları, kaynakların tükenmeye başlamasıyla birlikte ortaya çıkan geri dönüşüm bilinci, iş ekipmanlarındaki gelişmeyle birlikte yaygınlaşan modifiye işlemi günümüz dünyasında popülerliğini arttırmaktadır.

Modifikasyon işlemi katkı maddesi asfalta katılarak yapıldığında “modifiye asfalt”, direkt olarak karışıma katılarak yapıldığında ise “modifiye karışım” şeklinde olur. Direkt olarak asfalta eklenerek gerçekleştirilen modifikasyonda elde edilen malzemenin depolanması ve taşınması gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Karışımın modifikasyonunda ise bu gibi sorunlar olmasa bile elde edilen karışımın özelliklerinin değerlendirmesi zorlaşmaktadır (İlıcılı vd., 2001).

Bütün bu durumlar göz önüne alındığında asfalt kaplamaların modifikasyonu ile elde edilmek istenenler şu şekilde listelenir (Roberts vd., 1996; Yılmaz, 2016; Komut vd., 2021).

- Kaplamanın uzun ömürlü olmasını sağlayarak maliyeti düşürmek, dolaylı olarak bakım masraflarını azaltarak ekonomik fayda sağlamak
- Sıkıştırma işlemini kolaylaştırmak
- Geri dönüştürülebilir malzemeleri işleyişe dâhil ederek atık içeriğini azaltmak
- Çatlak oluşumunu önlemek
- Yaşlanma direncini arttırmak, kuma ve cilalanmayı azaltmak
- Karışımın dayanımını arttırmak
- Agrega-bitüm oksidasyonuna karşı direnç sağlamak
- Sıcaklığa bağlı bozulmalara karşı kaplamaya dayanım sağlamak, yüksek sıcaklıklar için tekerlek izine, düşük sıcaklıklar için termal çatlaklara dayanımı arttırmak ve esnekliği muhafaza etmek
- Genel olarak kaplamanın performansını artırarak, bozulma sorunlarına ve çevresel sorunlara karşı dayanımını arttırmak şeklinde sıralanabilir.

2.4.1. Asfalt Kaplamalardaki Katkı Maddeleri ve Modifiye Asfaltlarda Aranan Özellikler

Modifikasyon işlemlerinde kullanılacak malzemelerin uygulamaya yatkınlığı, ekonomik olarak uygunluğu ve sorunlara çözüm üretebilecek uygunlukta olması adına bazı özellikleri karşılaması gerekmektedir. Bu özellikler katkı maddeleri ve modifiye asfaltlar için farklı gereksinimler içermektedir.

Katkı maddeleri, karışım sıcaklığında özelliklerini yitirmemelidir, elde etmesi kolay ve ekonomik olmalıdır, asfalt ile karışımları homojen olmalıdır, serim sıcaklığında çok

akışkan hâle gelmemelidir, yüksek sıcaklıklarda akışkanlığa karşı direnci arttırırken düşük sıcaklıklarda asfaltın kırılma olmasını sağlamalıdır.

Modifiye asfaltlar, depolama-uygulama-hizmet aşamalarında özelliklerini muhafaza ederken, stabilitelerini de korumalıdır. Püskürtme ve agregayla bütünleşme aşamalarında probleme sebep olmamalıdır. İş ekipmanlarıyla uyumlu olmalıdır (Roberts vd., 1996; Ilıcalı vd., 2001).

2.5. Asfalt Kaplamaların Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri

Asfalt kaplamaların modifikasyonunda farklı türde birçok katkı maddesi kullanılmaktadır. Bu katkı maddelerinin sınıflandırılması Tablo 5’te gösterilmiştir.

Asfalt kaplamaların modifikasyonunda kullanılan bu katkıların genel kullanım amaçları kendi içlerinde farklılık göstermektedir (Roberts vd., 1996; Ilıcalı vd., 2001; İskender, 2008).

Tablo 5. Modifikasyondaki katkı maddelerinin sınıflandırılması (Ilıcalı vd., 2001)

Tip	Örnek Katkılar	Kaplamaya Etkisi
1. Filler	- Mineral filler (Portland çimentosu, kireç, taş tozu, uçucu kül) - Karbon siyahı - Sülfür	Sertleştirme
2. Gençleştiriciler (Ekstender)	- Sülfür - Lignin (Odun özütü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal lateks b. Yapay lateks c. Blok kopolimer d. İşlenmiş kauçuk	- Doğal kauçuk - Dönüştürülmüş kauçuk - Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) - Stiren-Bütadien-Rubber (SBR)	-
4. Plastik	- Polietilen (PE) - Polipropilen (PP) - Polivinil-klorid (PVC) - Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	Sertleştirme

Tablo 5'in devamı

5. Bileşim		3 ve 4'teki polimerlerin karışımı	-
6. Fiber		- Doğal (Asbest, taş yünü) - Yapay (Polipropilen, Polyester, Fiberglas)	Sertleştirme
7. Oksidan		Manganez tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan		- Kurşun karışımları - Karbon - Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon		- Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları - Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşatma veya sertleştirme
10. Soyulma önleyici		- Aminler - Kireç	Yumuşatma

2.5.1. Filler

Kaplamadaki boşlukları doldurarak optimum asfalt içeriğini azaltır, agrega gradasyonu için istenen şartnameleri karşılar, stabiliteyi artırır, asfalt-agrega uyumunu iyileştirir. Yumuşama noktası, rijitlik, yoğunluk, maliyet, mekanik sağlamlık, viskozite özelliklerine katkı sağlar. Listede belirtilen örneklerin tamamı tekerlek izine karşı etkili olmakla birlikte karbon siyahı ve sönmüş kireç oksidatif yaşlanma noktasında da etkili olmaktadır.

Karbon siyahı 0,15 ile 3,5 mikron boyutlarında siyah renkli bir malzemedir ve atık araç lastiklerinin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp farklı fazlarda rünlere dönüştürülmesi ile elde edilmektedir (Geçkil vd., 2021). Filler veya antioksidan katkı olarak modifikasyon işleminde kullanılabilir. Tekerlek izi ve yaşlanma bozulmalarını önleyici etkileri vardır.

Sönmüş kireç, sönmemiş kirece su katılması ile elde edilen kalsiyum hidroksit formüllü kimyasal bir bileşiktir. Gündelik hayatta farklı kullanım yönleri olmak ile birlikte asfalt modifikasyonunda filler veya soyulma önleyici katkı olarak kullanılmaktadır. Karışıma dâhil edildiklerinde tekerlek izi, su hasarı ve yaşlanma gibi bozulma problemlerine karşı efektif olmaktadır.

2.5.2. Gençleştiriciler

Gençleştiriciler, gerekli asfalt çimentosu miktarını azaltmak için asfalt çimentosunun bir kısmının (tipik olarak toplam asfalt bağlayıcının ağırlıkça %20-35'i arasında) yerine kullanılır. Sülfür katkısı tekerlek izi, yorulma çatlağı, düşük sıcaklık çatlaması problemlerine karşı etki gösterir. Lignin katkısı ise su hasarına karşı etkilidir.

Lignin, odun içerisinde %20 ile %40 oranlarında bulunan yapısal olarak üç boyutlu, aromatik amorf bir polimerdir ve su lignin üzerinde yayılmak yerine damlacık olarak kalmaktadır. Yapısında metoksi, hidroksil, para-kumaril alkol, koniferilalkol ve sinapil alkol gibi farklı fenil propanlar bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır (Korkut & Kocaefe, 2009). Asfalt kaplamaların modifikasyonuna gençleştirici katkı olarak dâhil edilebilir ve su hasarına karşı etkili olmaktadır.

2.5.3. Kauçuklar ve Plastikler

Kauçuklar, yüksek servis sıcaklıklarında bitümlü sıcak karışımların (BSK) rijitliğini artırır, yorulma çatlamasına direnmek için orta servis sıcaklıklarında BSK elastikiyetini artırır, termal çatlamaya direnmek için düşük sıcaklıklarda BSK rijitliğini azaltır. Genel olarak tekerlek izi deformasyonuna karşı etkilidirler. SBS yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlamalarına karşı etkiliyken SBR düşük sıcaklık çatlamasına karşı etkilidir.

Plastikler, EVA ve polipropilen bağlayıcının rijitliğine, penetrasyon değerine, yumuşama noktası değerine ve fraas kırılma noktasına katkı sağlar.

2.5.4. Fiberler

Fiberler, çatlak direnci, tiksotropik ve viskozite üzerinde etkilidir. Tiksotropik zamanla ilişkili olarak viskozite ve kayma gerilmesinde azalma gösteren akışkanları tanımlar.

Fiber katkılardan olan elyaflar bitüm içeriği yüksek olan bağlayıcılara drenaj önleyici katkı maddesi olarak katılmaktadır. Bitümün karışımda süzülmesini önlemektedir. Viatop selülozik elyafı üç boyutlu fiber yapısı ve bitümle kaplanmış olması nedeniyle dâhil olduğu karışımın akışkanlığının azaltılmasına katkı sağlar (Şanlıer, 2018). Viatop katkı bitümün su hasarına karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Şartnameye göre elyafın selüloz, mineral veya stabilizör olması gerekmektedir. Bitüm stabilizatörleri bitüm ile SBS

arasındaki bağı güçlendirerek depolama stabilitesinde artış ve ayrışma noktasında azalma olarak katkı vermektedir.

2.5.5. Oksidanlar ve Antioksidanlar

Oksidanlar, BSK yerleştirildikten sonra BSK rijitliğini artırır. Tekerlek izi sorunu üzerinde etkilidir.

Antioksidanlar, oksidasyon olayının gerçekleşmesi ile bağlayıcı gevrek yapıya ulaşana dek sertleşerek kırılma noktasına gelmektedir. Bu durumun engellenmesi için karışıma antioksidan katkılar katılmaktadır. Antioksidanlar, oksidasyonları geciktirerek BSK karışımlarının dayanıklılığını artırır. Genel olarak yaşlanma karşısında etkili olmakla birlikte kurşun ve çinko düşük sıcaklık çatlamlarına karşı, siyah karbon tekerlek izine karşı ve aminler su hasarına karşı etkili olan bazı antioksidanlardır.

2.5.6. Hidrokarbonlar

Hidrokarbonlar, eskimiş asfalt çimentolarını mevcut standartlara uygun hale getirir, genel olarak BSK rijitliğini artırır. Kullanılan sınıfına göre tekerlek izi, su hasarı, düşük sıcaklık çatlama, yorulma çatlama, oksidatif yaşlanma gibi bozulmalara etki etmektedir.

En çok tercih edilen doğal asfaltlardan Gilsonit, karışıma dâhil edilen miktarı arttıkça bağlayıcının viskozitesini, yumuşama noktasını ve kompleks kayma modülünü artırırken faz açısı ve penetrasyonu azalttığı belirtilmiştir. Modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performanslarını olumlu etkilese de düşük sıcaklıklardaki performansı olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Araştırmalarda Gilsonit katkısının maliyet azaltmada kullanılabilecek alternatif bir katkı olması önerilmektedir (Erkuş vd., 2021). Bunlara ek olarak Gilsonit katkısı modifiyer olarak kullanıldığında tekerlek izi ve su hasarına karşı etkili olmaktadır.

2.5.7. Soyulma Önleyiciler

Soyulma önleyiciler, asfalt kaplamaların agregadan soyulmasını en aza indirir. Su hasarının önlenmesine katkı sağlar.

Bitüm ile agrega arasına su sızması ile aralarındaki adezyon bozulabilmekte ve su hasarı problemi oluşmaktadır. Soyulma önleyici katkılar da karışıma dâhil edildiklerinde adezyon artırıcı etkide bulunmaktadır. Filler olarak da kullanılabilen sönmüş kirecin

adezyonu arttırdığı ve soyulma önleyici olarak da karışıma dâhil edilmesinin olumlu katkı sağladığı bilinmektedir.

Bir veya birden fazla karbon atomuna bağlı üç değerlikli azot atomu içeren organik bir bileşik olan aminler de karışıma dâhil edildiklerinde karışımın su hasarına karşı dayanımını arttırmaktadır.

2.6. Asfalt Kaplamaların Polimer Modifikasyonu

Doğal ve sentetik polimer içerikli asfalt modifiye işlemleri konusu 19.yy ortalarında gündeme gelmiştir. Bu girişim ilerleyen yüzyılda karşılık bulurken maliyet konusunda sağlanan kolaylıklar sayesinde Avrupa modifiye asfalt kullanımında Amerika Birleşik Devletleri'ni (ABD) geride bıraktı. Bu gelişmeler süreç boyunca hızlanarak artmaya devam etti. Tekrarlı yapılı küçük molekül zincirleri olan polimerlerin asfalt ile karışımının performansı arttırdığı görüldü. Polimer modifikasyonu ile elde edilen asfalt kaplamaların sıcaklığa bağlı çatlamalara ve tekerlek izi problemlerine karşı daha yüksek dayanım gösterdiği ve aynı kaplamaların yorulma hasarı, soyulma ve sıcaklığa duyarlılığının azaldığı görüldü. Bu sonuçlarla birlikte polimer modifiye kaplamalar yoğun taşıt yüküne maruz kalan kavşaklarda, havaalanlarında, dingil yükü tartım noktalarında ve yarış pistleri gibi önemli noktalarda kullanılır oldu.

Polimer modifiye asfalt kaplama elde edilirken SBS, SBR, EVA, kauçuk, polietilen gibi polimerler kullanılmaktadır. Polimer malzemelerden elastik geri kazanım, yüksek yumuşama noktası, yüksek viskozite, kohezif dayanım ve süneklik gibi özellikler beklenmektedir (Yildirim, 2007).

2.6.1. Polimerler

Polimerler, basit yapılı monomerlerin bir araya gelip daha karmaşık yapılı ve daha büyük boyutlu makromolekül oluşturmasıyla meydana gelir (Vahapoğlu, 2013).

Çok farklı alanlarda kullanılan ve kullanımı yaygınlaşmaya devam eden polimerler, inşaat mühendisliği söz konusu olduğunda modifikasyon işleminde ön plana çıkmaktadır. Sınıflandırıldığında birçok farklı dala ayrılan polimerler, genel anlamda bakıldığında elastomerler ve plastomerler olarak ikiye ayrılabilir. Kullanım alanları değişkenlik göstermekle birlikte geçirimli asfaltlar, ince ya da çok ince aşınma tabakaları, soğuk

karışımlar, su yalıtım sistemleri ve yoğun gradasyonlu aşınma tabakaları şeklinde yoğunlaşmaktadır.

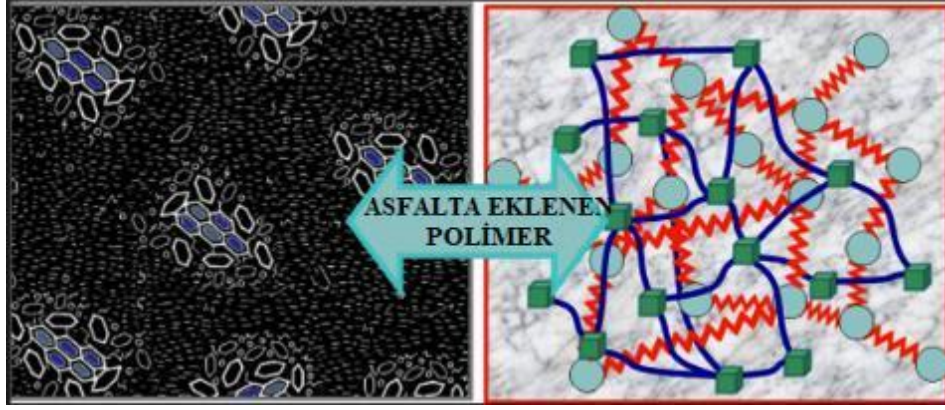
Elastomerler, termoplastik kauçuk şeklinde isimlendirilen stirenik blok kopolimerler, SBS veya Stiren-izopren-stiren (SIS) ardışık polimerizasyon işlemleriyle üretilir. Bir başka yöntem olarak stiren ve orta blok monomerin ardışık polimerizasyonu ve buna dâhil olan bağlayıcı kimyasal madde ile bir çift blok öncü oluşturulabilir. Kopolimerler lineer, radyal, yıldız şekilli veya dallanmış şekillerde olabilirler.

Elastiklerini ve dayanımlarını yapısal bağlanma şekillerinden elde eden elastomerlerde dayanımı kazandıran ve orta blokta esneklik sağlayan bileşen polistren uç bloklarıdır. Elastomer dağılımına etkiyen en önemli faktör kesme hızıdır. Bitümün polimer içerisinde yayılımıyla birlikte şişmeler ve çözünmeler gerçekleşmektedir. Bu noktada uygulanan kesme hızı ve kuvvetinin doğru belirlenmesi uygun bir dağılım için gereklidir. Orta ve yüksek kesme hızlı karıştırıcılar bu işlem için uygundur.

Plastomerler, bitüm karışımlarına oda sıcaklığında dâhil edildiklerinde karışımın viskozitesini arttırırken elastikliğinde aynı artışı göstermemektedirler. EVA polimeri plastomerlere örnek olarak verilebilir. EVA polimeri bitüme rahatlıkla yayılan ve uyum sağlayan bir yapıya sahiptir. Bekledikçe ortaya çıkabilecek form değişiklikleri kullanım öncesi yapılan karıştırma işlemleriyle giderilebilir (Işıkyakar, 2009).

Endüstride polimerler sıcaklık etkisine bağlı olarak termoplastik ve termoset olarak iki sınıfta gruplandırılır. Termoplastikler lineer yapılı olmakla birlikte sıcaklık etkisine bağlı olarak yumuşayıp sertleşir. Termosetler ise ısıtılıp sertleştikten sonra tekrar ısıtma aşamasında yumuşamazlar (Vahapoğlu, 2013).

Elastomerler elastisite özelliğine sahip polimerler olarak tanımlanır ve esneklik ihtiyacı olan durumlarda kullanımı daha yaygındır, plastomerler ise hem plastik yapılı hem elastik yapıdadırlar ancak elastisite özellikleri elastomerler kadar iyi düzeyde değildir. İki durumun da ihtiyaç olarak görüldüğü koşullarda kullanımları yaygındır.



Şekil 21. Polimer modifiyerlerin bitüm boşluklarını doldurması (Fricke, 2024)

2.7. Polimer Modifikasyon Tipleri

Çalışmanın bir önceki bölümlerinde polimerler ve modifikasyon hakkında genel bilgiler verildi. Bu bölümde polimerlerin modifikasyonu üzerine odaklanılacaktır.

Modifikasyon işlemlerinde kullanılan katkı maddeleri göz önüne alındığında polimerler kaplamanın ekstrem sıcaklıklardaki performansına ve kaplamanın özelliklerine pozitif katkısıyla öne çıkmaktadır. Polimer modifikasyon tipleri Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6. Polimer katkılı modifikasyonlar (Ilıcalı vd., 2001; Porto vd., 2019)

Polimer Modifikasyon Tipleri		Örnekler
Plastomerler	Termoplastikler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil-Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen-Vinil-Asetat (EVA)
	Termosetler	Epoksi reçineler, Poliüretan reçine, Akrilik reçine, Fenolik reçine
Elastomerler	Doğal kauçuklar	
	Yapay elastomerler	Stiren-Bütadien-Stiren (SBS), Etilen-Propilen-Dien termopolimer (EPDM), Isobüten-Izopren kopolimer (IIR), Stiren-Bütadien-Rubber (SBR), Stiren-Izopren-Stiren (SIS)
İşlenmiş kauçuklar		
Fiberler		Fiberler, polyesterler, Polipropen fiberler

Genel anlamda bu dört kategori altında incelenen polimer katkıları, asfalt modifiye işlemlerinde en yaygın kullanıma sahip modifiyerlerdir. Bu polimerler arasından da “yapay elastomerler” (termoplastik elastomer) ve “termoplastikler” ön plana çıkarken yapay elastomerler en sık kullanılan modifiye edici malzeme türüdür. SBS ve EVA katkıları örnek polimerler arasından en yaygın olanlarıdır (Gökalp vd., 2019).

Bu çalışma kapsamında elastomerik ve plastomerik polimerlere odaklanılacak olup bu polimerlerin modifikasyon parametrelerine sonraki bölümlerde değinilecektir.

2.7.1. Stiren-Bütadien-Stiren (SBS)

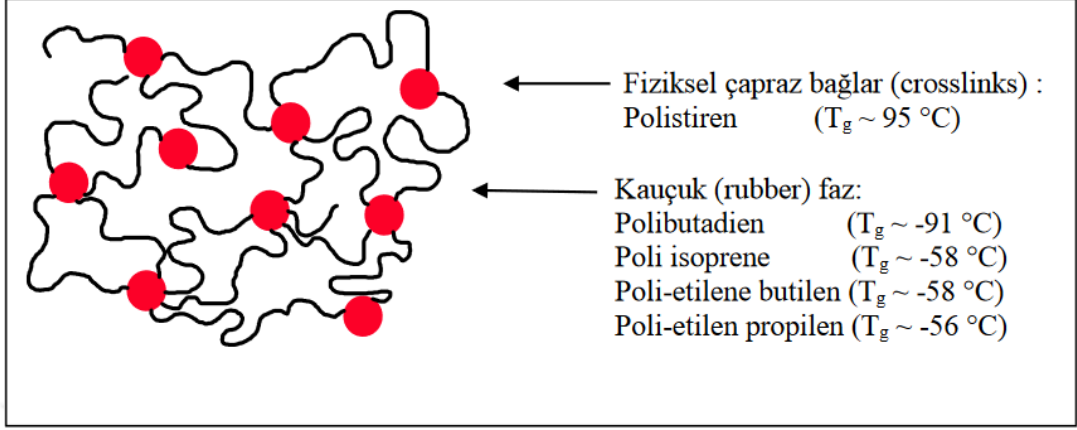
Asfalt kaplamalarda oluşan performans kayıplarını azaltmak, kullanım süresince oluşan sorunların önüne geçmek ve kullanım yılını arttırarak maliyette kâr sağlamak amacıyla uzun yıllardır modifiye edici katkıları kullanılmaktadır.

Bu katkı maddeleri çoğunlukla polimer içerikli malzemeler şeklinde karşılık bulmaktadır. Polimerler içerisinde en yaygın kullanılanı ise Stiren-Bütadien-Stiren uzun ismiyle bilen SBS olarak kısaltılan blok kopolimerlerdir. Araştırmalardan elde edilen veriler ve kullanımın yaygınlaşmasıyla ortaya çıkan olumlu kazanımlar da bu yönde destekleyicidir. SBS karışıma dâhil edildiğinde kaplamanın ve bitümlü karışımların performans sorunlarını engelleyici olmaktadır (İskender vd., 2012; Karakaş, 2014; URL-6, 2024).

SBS yalıtım işlemlerinde, ayakkabı parçası olarak, yapıştırıcı işlevinde ve polimer modifikasyon işlemlerinde olmak üzere birçok farklı amaçlarla kullanılmaktadır. İlk kullanım süreci günümüzden yaklaşık altmış yıl öncesine dayanan ve Shell firmasının imalatı olan SBS, 1985 yılından itibaren kaplamalarda da kullanılmaya başlanmıştır. Geçmişten günümüze geçen sürede SBS kullanımının giderek arttığı görülmektedir (Karakaş, 2014).

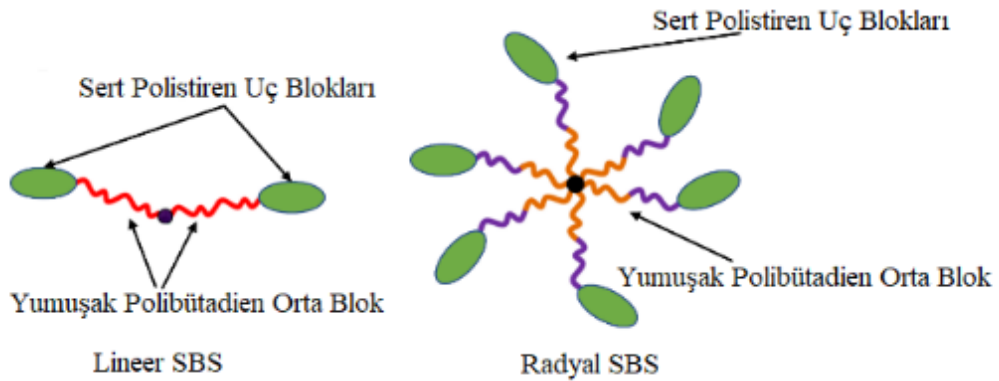
SBS'nin yapısı sert polistiren uç blokları ve esnek polibütadien köprülerinden oluşmaktadır. Polistiren uçlar SBS'ye oluşturduğu çapraz bağlarla sağlam bir yapı sağlarken polibütadienler ise elastomer yapısını oluşturur. SBS'de işlem sıcaklığına bağlı olarak form değişikliği meydana gelmektedir. SBS'nin termoplastik bir elastomer oluşu sıcaklığa bağlı form değişimlerinden sonra gerçekleşen soğuma işlemiyle birlikte özellik kaybına uğramaksızın eski hâle dönmesine olanak sağlamaktadır. SBS -40°C ile 80°C

aralığında özelliğini korur (Karakaş, 2014; Porto vd., 2019). Şekil 22’de SBS’nin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 22. SBS polimerinin yapısı (Karakaş, 2014)

SBS polimerler bağ şekillerine göre lineer, radyal, yıldız ve dallanmış olarak adlandırılırlar. Lineer yapı genel olarak zayıf zincirli bağlantılardan oluşmaktadır. Radyal yapı ise daha yaygın bir kullanıma sahiptir. Şekil 23’te görüldüğü üzere lineer yapı SBS iki polibütadien bloğa bağlanan iki polistiren blok şeklinde gösterilirken, radyal yapı SBS ise polibütadien blokların polistiren bloklar tarafından dairesel dizilimde sarılmasıyla oluşmaktadır. SBS’nin bağ şekline göre karışımın performansı değişkenlik göstermektedir. Radyal yapı SBS’nin stabilitesi daha yüksektir ve bitümün elastik ve viskoz bileşenlerinin daha iyi dağılmasını sağlar (Porto vd., 2019).



Şekil 23. Lineer ve radyal yapı SBS (Porto vd., 2019)

SBS bitüm ile çözünerek etkileşime girer. Bu etkileşim ile birlikte şişerek hacminde büyük bir artış ortaya çıkarır. Karışıma %4-6 oranlarında dâhil edilen bir SBS polimeri çözünme ve şişme adımlarından sonra karışım içerisinde %40-60 oranlarına kadar çıkabilen polimer içeriği elde edilmiş olur (Karakaş, 2014).

SBS'nin karışıma eklenecek olan miktarı çevre koşullarına, bitüm malzemesinin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. SBS'nin bitüm ile homojen bir dağılım yaptığı görülüyorsa veya çözünmemiş partiküllerin varlığı söz konusu değilse karışım işleminin ideal olduğu anlaşılr. Yumuşama noktası ve viskozite değerleri kontrol edilerek homojenlik durumu daha net bir biçimde anlaşılabilir (Karakaş, 2014).

SBS'nin bitüm ile çözünmesi noktasında sahip olduğu yüzey alanının, bitümün içeriğinin, polimerin tipinin, işlemin gerçekleştiği sıcaklığın ve düşük kesme hızlı karıştırıcılar için geçerli olan sürtünme gücünün etkileri vardır. İşlemler tamamlandıktan sonra elde edilen polimer modifiyeli bitüm agrega ile karıştırılıp serme-sıkıştırma aşamasına geçildiğinde homojenlik özelliğinin kaybolmaması adına SBS yüzdesine bağlı olarak sıcaklık kademeli olarak arttırılır ve soğumanın önüne geçilir. Kısa süreli depolamalarda düşük hızlı karıştırıcılarla sürekli karıştırılıp formunun korunması sağlanmalıdır, uzun süreli depolamalarda ise soğutularak saklanması gerekmektedir (Karakaş, 2014).

SBS'nin karışım içerisindeki yüzdesi karışımın faz dönüşümünü etkilediğinden karışımın reolojik özelliklerine etkide bulunmaktadır. Bu etki yüzde düşük kaldığında mühendislik özelliklerinde eksiklikler olarak ortaya çıkabildiği gibi yüzdesi yüksek olduğunda da depolama noktasında problemlere yol açabilmektedir (Behnood & Gharehveran, 2019).

SBS polimeri dünyada çeşitli firmalar tarafından üretimi yapılan bir malzemedir. Kraton, LCY Chemical, China NPC, Dynasol, LG Chem, Versalis, Sinopec gibi çeşitli firmalar tarafından üretilmektedir ve 2021 yılındaki gelir payının %31'lik kısmı Asya pazarına aittir. Ayakkabı, asfalt modifikasyonu, polimer modifikasyonu, yapıştırıcılar ve çeşitli uygulama alanları olmak üzere farklı kullanım alanları mevcuttur. 2021 yılındaki toplam SBS market değerinin yaklaşık olarak 5 milyar dolar olduğu belirlenmiştir. Kullanım alanındaki çeşitlilikle birlikte yaygınlığı gittikçe artmaktadır. (URL-7, 2023).



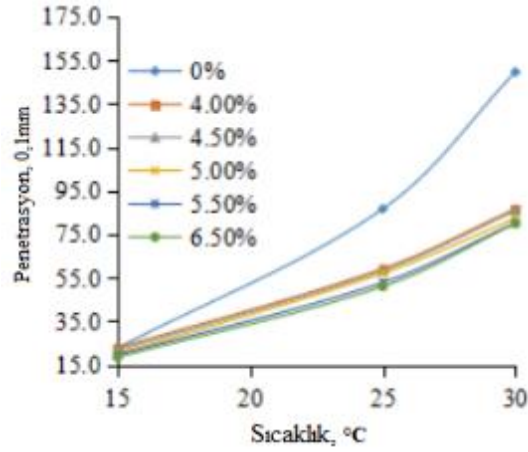
Şekil 24. SBS polimeri (URL-6, 2023)

Zhuang vd. (2017), SBS içeriğinin modifiye asfaltın performans etkileri üzerine yaptıkları çalışmada, SBS içeriğindeki farklılığın penetrasyon derecesi, yumuşama noktası, kinematik viskozite ve düktilite parametrelerine olan etkilerini Çin Asfalt Kaplama Yapım Şartnamesi'nin (JTG F40-2004) teknik gereksinimlerini karşılayan sonuçlar dâhilinde Tablo 7'de sunmaktadır.

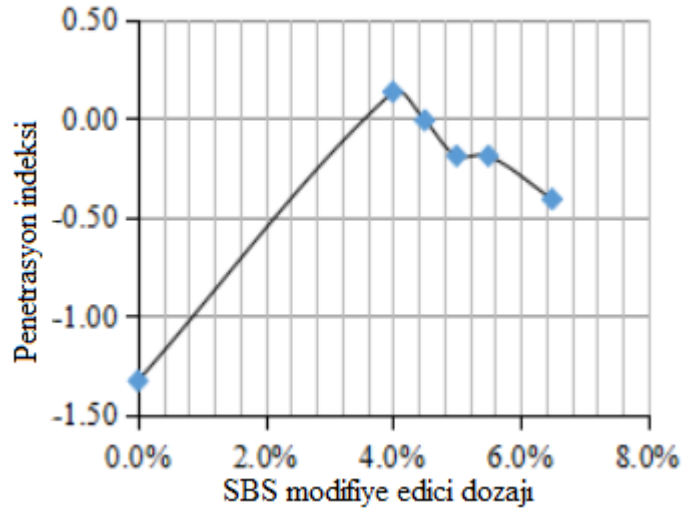
Tablo 7. Farklı içerikli SBS modifiye asfaltın performansı (Zhuang vd., 2017)

İçerik	Penetrasyon, 0,1mm			PI	Yumuşama Noktası, °C	Kinematik Viskozite, 135°C	Düktilite, 5°C, 5cm/dk	Yaşlandırma Sonrası Düktilite
	15°C	25°C	30°C					
%0,0	22,6	86,6	118,4	-1,36	45,1	0,32	0	0
%4,0	22,7	59,1	86,6	0,14	52,1	0,82	25	15
%4,5	21,7	58,3	85,6	-0,03	57,6	0,86	35	14
%5,0	20,2	57,0	82,2	-0,21	59,6	1,06	41	25
%5,5	19,5	52,7	80,2	-0,21	63,5	1,22	46	26
%6,5	18,4	50,9	79,7	-0,43	78,6	1,52	47	28

SBS malzemesi ve asfalt etkileştiğinde farklı özelliklerinin bir getirisi olarak yapısal değişikliklere maruz kalmaktadırlar. Sıcaklık hassasiyeti de bu noktada asfaltın performansı noktasında önemli bir etkindir. Zhuang vd. (2017) çalışmasında sıcaklık hassasiyetinin modifiye asfaltın penetrasyon derecesi ve sıcaklık ilişkisi ile modifiye edici içeriğine bağlı olarak değişen penetrasyon indeksine etkilerini Şekil 25 ve Şekil 26'da sunmaktadır.

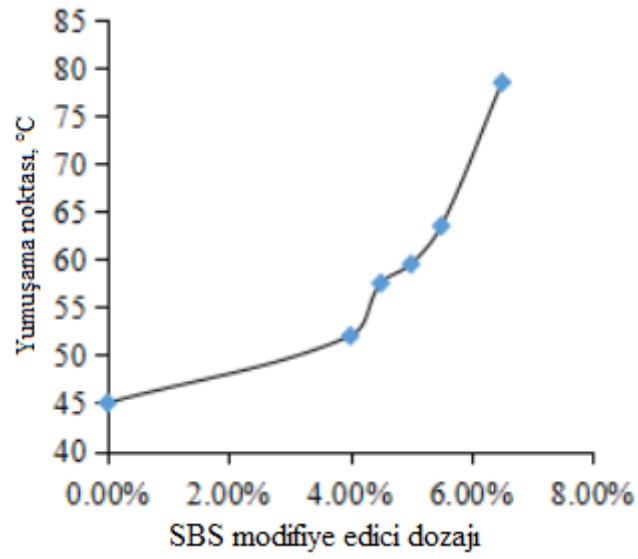


Şekil 25. SBS modifiye asfaltın penetrasyon derecesi ile sıcaklık ilişkisi (Zhuang vd., 2017)

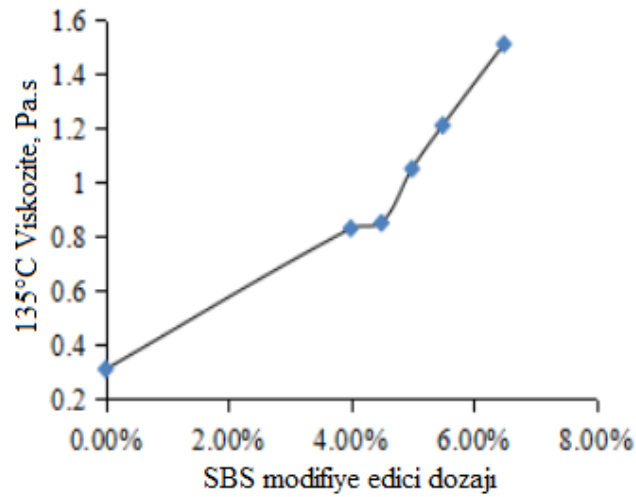


Şekil 26. SBS modifiye asfaltın penetrasyon indeksi ile modifiyer içeriği ilişkisi (Zhuang vd., 2017)

Yol kaplamasının performansının değerlendirilmesi noktasında yüksek sıcaklık performansı önem arz etmektedir. Yüksek sıcaklıklar asfalt üzerinde tekerlek izi gibi kalıcı deformasyon sorunlarına neden olmaktadır. Modifiye ediciler yumuşama noktası ve viskozite değerleri üzerinde etkilidir. Zhuang vd. (2017) çalışmasında SBS modifiye edici dozajının bu parametrelere olan etkisini Şekil 27 ve Şekil 28’de sunmaktadır.

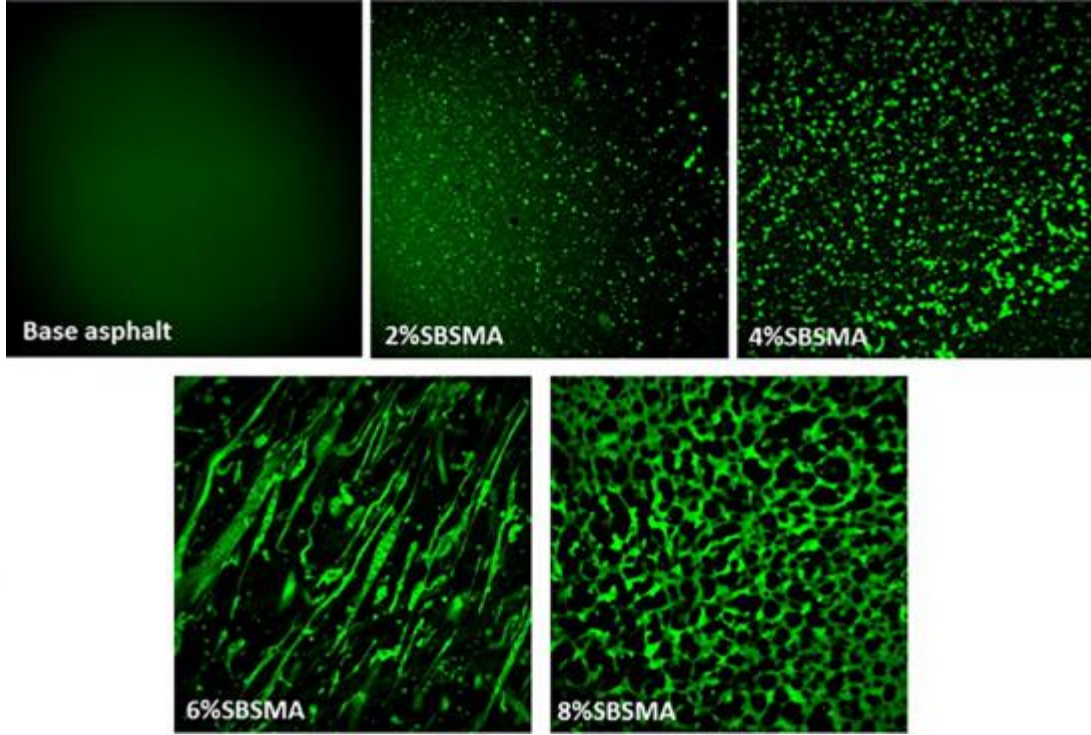


Şekil 27. SBS modifiye asfaltın yumuşama noktası ile modifiyer içeriği ilişkisi (Zhuang vd., 2017)



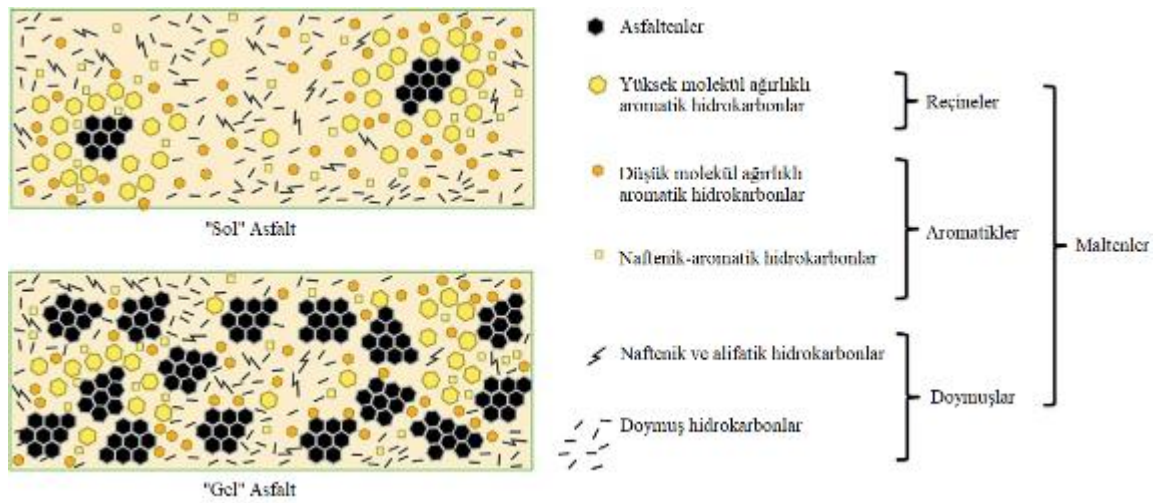
Şekil 28. SBS modifiye asfaltın viskozitesi ile modifiye edici içeriği ilişkisi (Zhuang vd., 2017)

SBS polimeri, baz asfalta kıyasla floresan mikroskobu altında reaksiyon göstermektedir. SBS katkısının oranına bağlı olarak da asfalt fazındaki dağılımı şekillenmektedir. Chen vd. (2020) çalışmasında farklı SBS içeriklerine sahip modifiye asfaltların faz morjolojilerini Şekil 29’da sunmaktadır. %2 ve %4 oranlarında dağılmış, %6’da geçiş ve %8 oranında da sürekli bir polimer fazı görülmektedir.



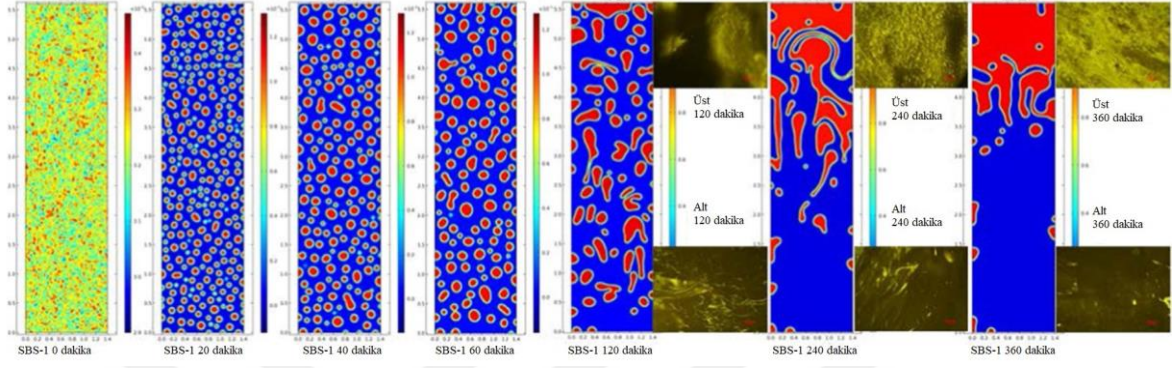
Şekil 29. Farklı SBS içerikli SBS modifiye asfaltın faz morfolojisi (Chen vd., 2020)

Asfaltın kolloidal yapısı Sol ve Jel olarak iki grupta incelenmektedir. Sol tipi asfalt yüksek sıcaklık dayanıklılığı, gelişmiş duktilite ile ön plana çıkarken Jel tipi asfalt düşük sıcaklık hassasiyeti ve düşük duktiliteye sahiptir. Asfaltın kolloidal yapısı ve içerik dağılımı Şekil 30'da gösterilmektedir.



Şekil 30. Asfaltın farklı kolloidal yapıları (Zhu & Kringos, 2015)

SBS modifiye asfalt depolama esnasında faz ayrışmasına maruz kalmaktadır. Bu ayrışma SBS modifiyerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Liang vd. (2019) çalışmasında depolama esnasında farklı zamanlarda gözlenen faz ayrışmasını uyguladığı simülasyonlar ve deneyler sonucunda Şekil 31’de sunmaktadır.



Şekil 31. Farklı depolama sürelerindeki 20/80 oranlı SBS modifiye asfaltın faz ayrışması (Liang vd, 2019)

2.7.2. Doğal Kauçuklar ve İşlenmiş Kauçuklar

Doğal kauçuk bazı bitkilerin özsuyunda bulunan lateksten elde edilen bir elastomerdir. Saf hâli kimyasal poliizopren olan doğal kauçuk erişimi kolay olan polimerlerdendir. Termal ve bağlayıcı özellikleriyle esnek kaplamaların kullanım süresini uzatmak ve kaplamaları iyileştirmek için modifikasyonda kullanılmaktadır. Asfalt kaplama modifikasyonu dışında gündelik kullanım içerisinde de kendisine birçok farklı alanda yer edinmiştir. Doğal kauçuk latekslerin kullanımı yaklaşık 35 yıl öncesine, bitüm performansı artırma arayışlarında asfalt kaplamada kullanılmasına dayanmaktadır. Lateksin yapısı sayesinde bitüm ile kolay etkileşime girebilmesi makul bir yöntem olarak görülmesini sağlamıştır. Elastik bant özelliği sayesinde düşük sıcaklıklarda bitümün rijitliğini koruyup çatlak oluşumunu önlemeye yardımcı olmasının yanında sıcaklık artışı söz konusu olduğunda da kayma direncini arttıran film gibi davranarak bitümün akmasının önüne geçer. Genel anlamda doğal kauçuk lateksler kaplama performansına olumlu şekilde etkilemektedir (Al-Sabaei vd., 2019).

Bitümlü bağlayıcıların modifikasyonundaki olumlu etkilerine rağmen doğal kauçuğun daha geniş bir ölçekte kullanımına engel olan bazı problemler bulunmaktadır.

Doğal kauçuğun diğer doğal kaynaklı polimerlere kıyasla daha değerli oluşu ve arz talep dengesizliği nedeniyle işlenmiş (sentetik) kauçuk kullanımına yönelinmektedir. Çeşitli çalışmalar doğal kauçukların olumlu etkilerini ortaya koymasına rağmen performans sıcaklık aralığı ve mekanik özellikleri konusunda hâlâ bazı şüpheler vardır (Porto vd., 2019).

İşlenmiş kauçuklar petrol gibi maddelerin senteziyle elde edilen yapay kauçuklardır. Stres altında elastik esneme kabiliyetine sahiptir. Deformasyona uğrar ancak kalıcı deformasyon olmadan eski hâline dönebilir. SBR, polikloropen ve lastik kauçuk yaygın kullanılan sentetik kauçuklardandır. Asfaltlama işlemlerinde kauçuklaştırılmış bitümlü bağlayıcıların üretiminde de kullanılır. Performans parametreleri olarak kauçuk boyutu ve içeriği, kimyasal yapısı, parçacıkların yüzey özellikleri, karışım üretim yöntemi, sıcaklık gibi çeşitli parametreler örneklenebilir. Bu parametrelerin doğru belirlenmesi nihai ürünün performansını da etkilemektedir. Farklı miktarlarda kauçuk içeriğine sahip karışım performansları üzerine araştırmalar yapılmasına rağmen optimum kauçuk içeriğinin ve istenilen performansın elde edilmesi genellikle uygulama yöntemine (kuru veya ıslak), asfalt karışımlarında ne zaman kullanıldığına ve bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Yapılan birçok çalışmada %4 gibi düşük ve %20'den yüksek kauçuk içeriklerinin bağlayıcı performansına belirgin bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (Porto vd., 2019).

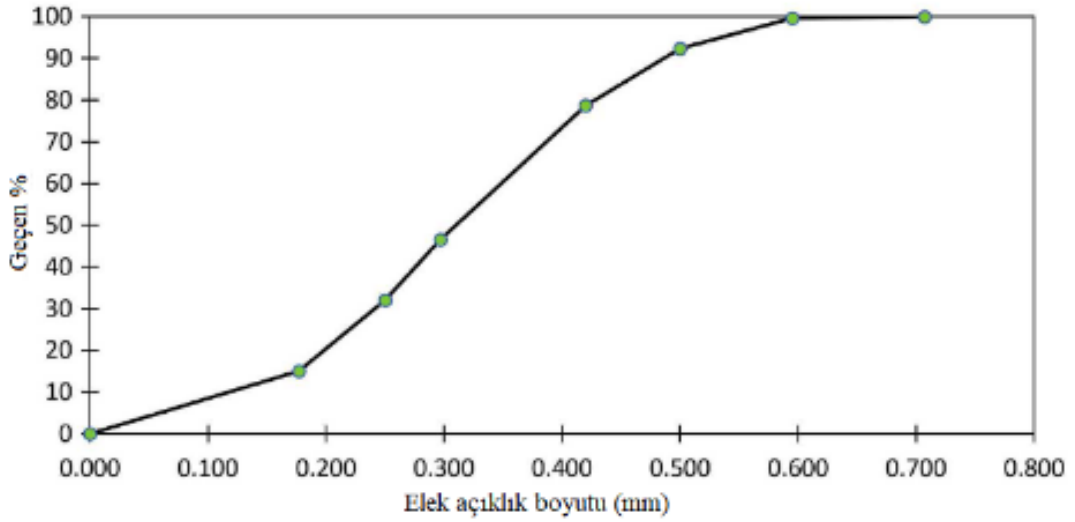
Stiren-Bütadien-Rubber veya diğer bir adıyla Stiren-Bütadien-Kauçuk II. Dünya Savaşı öncesinde Almanya'da geliştirilmesine karşın savaş sırasında ABD tarafından doğal kauçuk kaynaklar yerine yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Yüksek miktardaki karbon içeriğiyle birlikte yüksek sıcaklıklarda modifiye asfaltın performansını artırır ancak yüksek ve düşük sıcaklıklarda asfaltın özelliklerini iyileştirme noktasında SBS kadar etkin olamamaktadır. Çeşitli araştırmalarda SBR'nin yüksek sıcaklıktaki etkinliğini arttırabilmek adına doğal bitüm eklenmesi yumuşama noktası ve tekerlek izi direnci gibi konularda SBR ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının dayanımını arttırdığı gözlenmiştir (Behnood & Gharehveran, 2019).

Gelişen bir teknoloji olarak ECR geliştirilmiş öğütülmüş kauçuk uygulaması yenilikçi bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Asfaltın kauçuk ile modifiyesi ıslak ve kuru olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Islak yöntem karışımın sürekli karıştırılmasını gerektirdiğinden, kuru yöntem de kalitedeki tutarsızlıklar nedeniyle çeşitli olumsuzluklar barındırmaktadır. Rath vd. (2022) geliştirilmiş öğütülmüş kauçuğun polimer ile modifiye edilmiş ve edilmemiş asfalt karışımlara kıyasla performans etkilerini

incelemiştir. Çalışmada kullanılan ECR'nin özellikleri Tablo 8'de, gradasyonu Şekil 32'de olduğu gibi sunulmaktadır.

Tablo 8. ECR'nin özellikleri (Rath vd., 2022)

Özellik	Ölçülen Sonuç
Birincil bileşen	ASTM-30 geri dönüştürülmüş öğütülmüş kauçuk
Görünüm	Siyah, ince taneli öğütülmüş malzeme
Özgül ağırlık	1,15 +/- 0,04
Parlama noktası	246°C
Tutuşma sıcaklığı	371°C
Suda çözünürlük	% 0,1 – 1,0



Şekil 32. Öğütülmüş kauçuk boyut dağılımı (Rath vd., 2022)

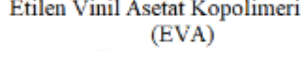
2.7.3. Etilen-Vinil-Asetat (EVA)

Termoplastikler olarak da bilinen poliolefinik plastomerler PE, PP, EVA, PVC vb. şeklindedir. Polietilenler (PE) yoğunluklarına göre düşük, yüksek ve doğrusal düşük yoğunluklu şeklinde sınıflandırılır ve en yaygın plastomerlerdir. Plastomerlerin polimer modifikasyon işlemlerinde kullanılmaları stirenik içerikli polimerlerin yüksek maliyetleri ve doymamışlıklarından dolayı ortaya çıkan bozulma olayları nedeniyle gündeme gelmiştir. Ayrıca termoplastikler bulması kolay, maliyeti düşük ve stireniklere göre daha

yüksek stabilite sunabilmelerinden dolayı da ön plana çıkmaktadırlar. Termoplastiklerin bitümle modifiyesi bitümün rijitliğini ve tekerlek izi direncini arttırmaktadır. PE ve PP'nin polar olmayan yapıları, bitümle olan uyum problemleri ve bitümün elastikiyetini arttırma konusundaki yetersizliği farklı türdeki termoplastiklere yönelimi arttırmaktadır (Porto vd., 2019).

Polar gruplar eklenerek modifiye edilen etilen, diğer etilen temelli kopolimerlere göre asfalt bağlayıcılarla daha iyi uyum içerisindedir. Bu uyumun getirisi olarak da asfalt modifikasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür kopolimerlere Etilen-Vinil-Asetat bileşiminden oluşan EVA örnek olarak verilebilir. EVA, asfaltın uygulama aşamasındaki işlenebilirliğini kolaylaştırmak ve hizmet süresince deformasyon direncini arttırmak amacıyla yıllardır kullanılmaktadır. Yumuşaklığı ve esnekliğiyle elastomerlere benzeyen ancak termoplastik yapılı bir malzemedir. İçeriğindeki vinil asetat miktarı arttıkça kristallenme azalır ve polaritesi artar, bu durum asfalt ile daha uyumlu olmasına katkı sağlamaktadır.

EVA ile %9 gibi yüksek modifiye edici ile modifiye edilmiş asfalt SBS ile modifiye edilmiş olana göre daha az sıcaklık duyarlılığı göstermektedir. Elastik geri kazanım ve su hasarına direnç yönünden EVA'nın SBS'ye göre daha az etkili olduğu görülmektedir. Genel olarak, asfalt modifikasyonunda kullanılan EVA kopolimerleri asfaltın reolojik özelliklerini SBS kadar etkili bir şekilde değişikliğe uğratamamaktadır. Depolama aşamasında bitüm ile ayrışma meydana gelme durumu olmasına rağmen EVA kopolimeri asfalt bağlayıcı içerisinde kolay bir şekilde dağılım gösterir ve nispeten iyi bir uyumluluğa sahiptir. İçeriğindeki vinil asetat içeriğinin azaltılması ve erime indeksinin yükseltilmesi depolama konusunda daha iyi bir performans elde edilmesine katkıda bulunabilmektedir. Bunun birlikte çok düşük vinil asetat içeriğine veya çok yüksek kristallığe sahip EVA kopolimerleri asfalt bileşenleri tarafından şişmeye eğilimli olmayan kısa ve orta derece esnek zincirlerle birbirine bağlanan büyük sert bölgeler oluşturmaya eğilimli olabilmektedir (Behnood & Gharehveran, 2019).



1982)



bulguları Tablo 9’da sunmaktadır.

vd., 2023)

Kaynak	Sonuç
Alataş & Yılmaz (2013)	EVA ve SBS modifiye asfalt aynı yüksek sıcaklık performans derecesine sahipken, düşük sıcaklık performans derecesi farklılık göstermektedir.
Lu & Isacsson (2000)	EVA, özellikle yüksek sıcaklıkta asfalt reolojisini iyileştirmektedir. SBS ise etkisini geniş bir sıcaklık aralığında göstermektedir.
Vamegh & Ameri (2021)	EVA modifiye asfaltın yüksek sıcaklık özelliği MSCR testinde SBS modifiye asfalttan daha iyi çıkarken, DSR testinde tam tersi bir sonuç elde edilmiştir.

Tablo 9'un devamı

Saboo vd. (2018)	EVA modifiye asfalt, tüm test koşullarında SBS modifiye asfalta göre daha düşük Jnr (telafi edilemeyen sünme) değerine sahiptir. EVA modifiye asfalt 10 kPa gerilme seviyesinin altında daha yüksek kurtarma yüzdesi değerine sahipken, 10 kPa gerilme seviyesi için 50 ve 60°C'de tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. EVA modifiye asfalt, daha düşük kopolimer konsantrasyonunda bile SBS'den daha iyi tekerlek izi önleme performansına sahiptir.
Singh vd. (2016)	EVA ile hazırlanan numuneler, SBS ile hazırlananlara kıyasla deformasyona karşı daha dayanıklıdır.
Diab vd. (2020)	EVA polimeri, SBS'ye kıyasla büyük gerilmelere karşı daha yüksek direnç göstermektedir. EVA modifiye asfalt, SBS modifiye asfalta kıyasla tekerlek izine karşı daha yüksek bir direnç kabiliyetine sahiptir.
Santagata vd. (2013)	SBS polimeri, özellikle daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun yükleme sürelerinde yüksek sıcaklık performansında EVA polimerinden daha iyi bir gelişme gösterirken, EVA modifiye asfalt, yüksek polimer konsantrasyonu ve düşük sıcaklıkta kalıcı deformasyona karşı kabul edilebilir bir dirence sahiptir.

EVA modifiye asfalt SBS ile kıyaslandığında yorulma performansı açısından daha düşük seviyede kalmaktadır. He vd. (2023) çalışmasında yorulma performansı karşılaştırmasına yönelik bulguları Tablo 10'da sunmaktadır.

Tablo 10. EVA modifiye asfaltın yorulma performans özeti (He vd., 2023)

Kaynak	Sonuç
Saboo vd. (2018)	DSR test sonucu EVA modifiye asfaltın SBS modifiye asfalta göre daha iyi yorulma performansına sahip olduğunu göstermektedir. LAS test sonuçları farklı sonuçlar göstermektedir. Gerinim genliği arttıkça EVA modifiye asfaltın yorulma ömründe dik bir azalma gözlenmiş ve daha yüksek gerinim genliklerinde (yaklaşık %10'dan büyük), EVA modifiye asfaltın yorulma ömrünün modifiye edilmemiş asfalttan daha düşük olduğu bulunmuştur. EVA modifiye asfaltın yorulma performansı, hangi sıcaklık ve gerilme genliği olursa olsun SBS modifiye asfalttan daha düşüktür.
Diab vd. (2020)	EVA modifiye asfaltın yorulma ömrü, %2,5 ve %5 gerilme genliklerinde LAS testinden elde edilen SBS modifiye asfalt ve baz asfalt arasındadır. EVA ve SBS yorulma performansı test sonuçları arasındaki fark, büyük gerinim genliklerinde ve büyük polimer konsantrasyonlarında daha belirgindir.

Tablo 10'un devamı

Diab vd. (2022)	EVA modifiye asfaltın yorulma faktör değeri baz asfalta göre daha yüksektir, bu da EVA kopolimeri eklendikten sonra yorulma çatlamasının olumsuz etkilendiğini göstermektedir. Yorulma faktör değeri artan EVA içeriği ile azalmaktadır.
Yan vd. (2022)	LAS testinin %5 gerilme seviyesinde, EVA modifiye asfaltın yorulma ömrü SBS'den biraz daha düşüktür. LAS testinin %10 gerilme seviyesinde, EVA modifiye asfalt 10.000 döngü içinde hızla başarısız olurken, SBS modifiye asfalt 36.000 döngüden sonra bile hâlâ normaldir.
Sengoz vd. (2017)	EVA ilavesi, numunelerin yorulma çatlaması özellikleri üzerinde önemli bir etki yaratmamaktadır.

2.8. Polimer Modifikasyon Koşulları

Polimerlerin asfalt kaplamalar ile uyumlu bir şekilde birleştirilerek istenilen şartları karşılayacak bir nihai malzeme elde edilmesi sürecinde dikkate alınan çeşitli parametreler vardır. Bu parametrelerin doğru analiz edilip, beklenen performans sonuçlarını karşılayacak şekilde seçilmeleri elde edilecek polimer modifiyeli asfalt kaplama malzemesinin zaman içerisinde ortaya çıkabilecek olan problemlere dayanımı noktasında büyük etkileri olacaktır.

Modifikasyon işleminde dikkate alınan parametreler şu şekildedir.

- Bitüm tipi ve kimyasal içeriği
- Polimer tipi
- Polimerin molekül ağırlığı
- Polimer içeriği
- Sıcaklık
- Karıştırma hızı ve süresi şeklinde listelenir (Gökalp vd., 2019).

Bu parametreler polimerin dağılımı, faz ayrımı ve bitümün yaşlanması noktasında etkin rol oynamaktadır. Polimerin uzun sürelerce ve yüksek kesme hızlarında karıştırılması oksijen-bitüm ilişkisine direkt etkide bulunmaktadır ve bu etki bitüm oksidasyonuna sebep olabilmektedir (Özdemir vd., 2020).

2.8.1. Bitüm Tipi ve Kimyasal İçeriği

Bitüm içeriksel olarak farklı moleküler ağırlıktaki hidrokarbonlardan oluşmaktadır. Asfaltlenler ve maltenler olarak ikiye ayrılmasına ek olarak aromatikler, reçineler ve doyunlar şeklinde üç bileşene sahiptirler. Bitümün hammaddesine, üretim aşamalarına, bileşenlerinin kullanım oranlarına bağlı olarak özellikleri değişim göstermektedir. Bu değişimin polimerle uyumlu olabilmesi istenen sonucu elde edilebilmesi için kritik bir öneme sahiptir (Gökalp vd., 2019). Bu sebeple yalnızca bitümün özellikleri değil kullanılan polimerin bitüm ile uyumu da göz önüne alınmalıdır.

2.8.2. Polimer Tipi

Polimerler türlerine göre farklı özellikler ortaya koymaktadır. Bu özelliklere bağlı olarak da uygulamada pozitif veya negatif sonuçlar ortaya çıkarmaktadırlar. Bu sonuçlar göz önüne alınarak çözülmek istenen problemin çözülebilmesi için o yönde pozitif etkisi olan polimerlerin seçilmesi önemlidir. Polimerlerin olumlu ve olumsuz yönleri göz önüne alınarak iyi bir modifikasyon işlemi elde edebilmek için problem net olarak belirlenmeli ve bu problemin çözümüne en uygun polimerin seçilmelidir.

2.8.3. Polimerin Molekül Ağırlığı

Molekül ağırlığına bağlı olarak polimerlerin diğer özellikleri şekillenmektedir. Polimerlerin özelliklerindeki değişimler ise dayanım gibi farklı diğer özelliklere etkide bulunmaktadır. Modifikasyondaki polimerlerin hammaddesine göre molekül ağırlıkları da değişkenlik gösterir. Homojen bir karışım elde edebilmek adına bitüm ve beraberindeki polimerin uyumlu olmaları gerekmektedir. Bu durumun sağlanamaması hâlinde bitümün ayrışması gibi durumlar ortaya çıkabilmektedir. Karışımdaki bitümün molekül ağırlığının polimerin molekül ağırlığından fazlaca düşük olduğu durumlarda ağır molekül ağırlıklı polimerler depolama safhasında çökelmekte ve hafif kalan bitümler yüzeye çıkmaktadır. Tam tersi bir durumda ise bitüm çökerken polimerin yüzeye çıkması söz konusudur (Gökalp vd., 2019).

2.8.4. Polimer İçeriği

Modifikasyon işleminde ideal polimer içeriğine polimerin özellikleri incelenerek ulaşılmaktadır. Polimerin ideal oranda karışıma dâhil edilmemesi modifikasyon işleminin başarısız olmasıyla sonuçlanacaktır. Bu noktada ideal polimer içeriğinin belirlenmesi polimer modifikasyon işlemlerinin ana unsurlarındandır.

Modifikasyona gereğinden az polimer katılması performans sorunlarına ve dolaylı olarak istenen verimin alınmamasına neden olurken gereğinden çok polimer katılması ise bitüm-polimer uyumunun istenen seviyede olmamasına neden olmaktadır. Anlaşılacağı üzere polimerin modifikasyon işlemindeki içeriği ne az ne de çok olmalıdır, ideal değer belirlenmeli ve o değerin sağlandığı onaylanmalıdır.

Karışımın polimer içeriği bitüme göre ağırlıkça minimum %2 ve %10 oranları arasında değişkenlik göstermektedir. Sadece polimer içerikli modifikasyon çalışmalarında ise bu oran genellikle %5 ve %6 aralığında seçilmektedir. Polimerin yanına başka bir katkı maddesi daha eklendiğinde ise polimer katkı oranı daha düşük değerlere kadar indirgenmektedir (Gökalp vd., 2019).

2.8.5. Sıcaklık

Polimer modifikasyonunda sıcaklığın etkisi karışımdaki malzemelerin işlenebilirliği ve birleşim kolaylığı noktasında ön plana çıkmaktadır. Polimerler de bitümler gibi farklı sıcaklıklarda farklı tepkiler vermektedir. Saf bitümler ortalama 145°C’de akıcı bir forma ulaşırken polimerler için bu sıcaklık yetersiz kalmaktadır. Malzemelerin yapı ve içeriklerini bozunuma uğratmadan uygun bir sıcaklık seçimi bu noktada elzemdir. Yapısal zelliklerinin yanı sıra karışımın uygulanacağı ortamın ve mekanizmanın koşullarının da bu sıcaklıklara uygunluğu önemlidir. Bu bilgiler ışığında polimerlerin bitümlerle karışım sıcaklığının 160 ile 180 derece arasında seçilmesi araştırmalar doğrultusunda uygun görülmektedir. Bu optimum sıcaklık değerlerinden farklı seçilen sıcaklıklarda hem bitüm hem de polimer adına özellik kayıpları, saf hâllerinde bozulmalar, istenmeyen tepkimeler ve dağılmalar gibi problemler ortaya çıkabilmektedir (Gökalp vd., 2019).

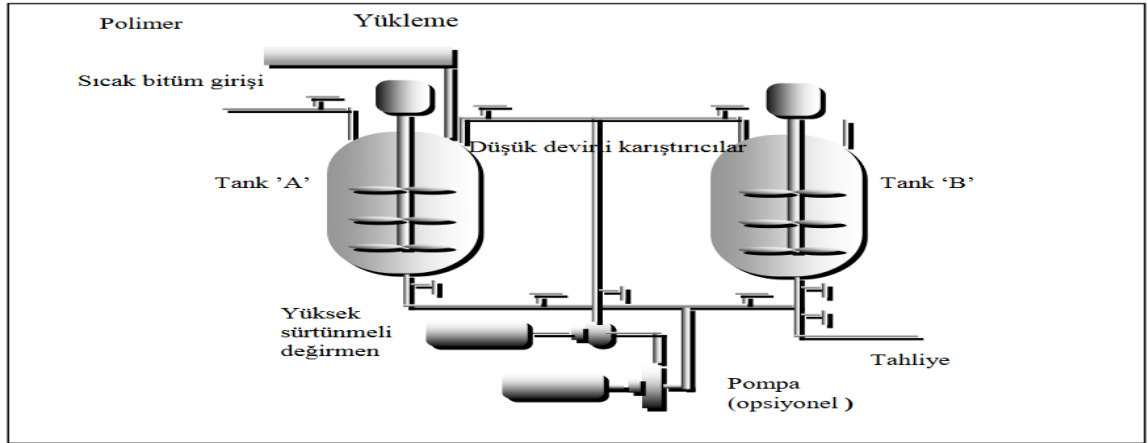
Bu problemlerin oluşmaması ve istenilen karışımın elde edilebilmesi adına seçilen polimer ve bitümün uygulama sıcaklığıyla uyumu net olarak anlaşılmalıdır.

2.8.6. Karıştırma Hızı ve Süresi

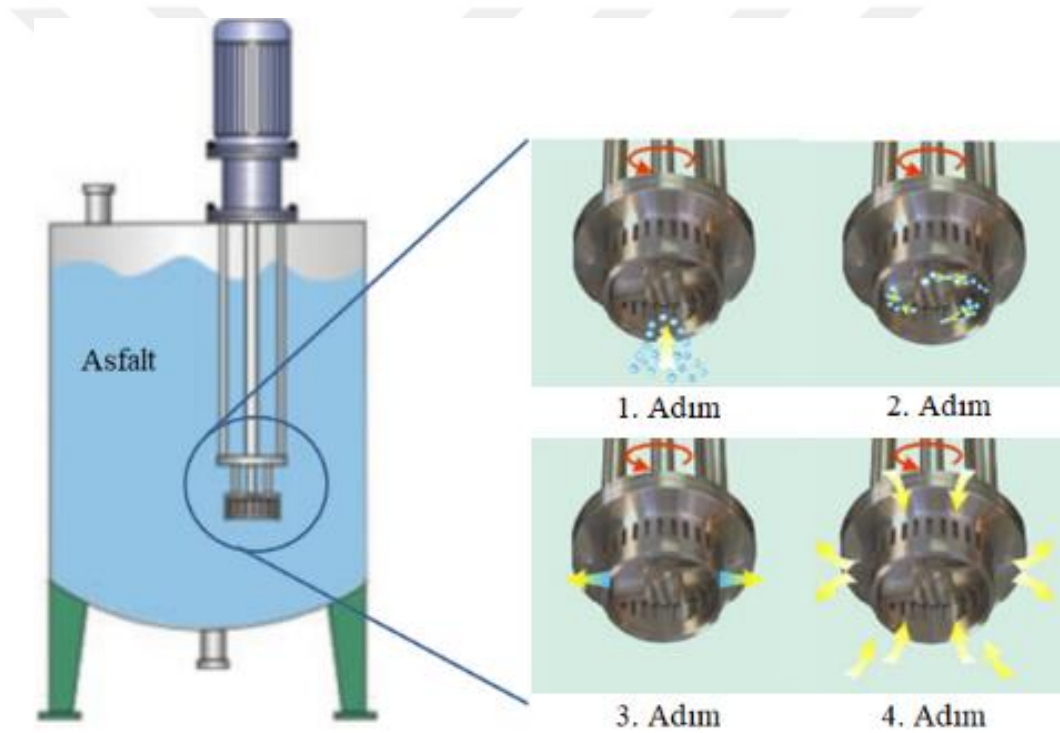
Modifikasyona etki eden diğer koşullar malzemenin kimyasal özelliklerinin uyumuna yoğunlaşırken karıştırma hızının ve süresinin doğru seçimi bitüm ve polimerin homojen bir dağılım elde etmesi noktasında ön plana çıkmaktadır. Yüksek hızlı karıştırıcıların ön planda olduğu bu aşamada karıştırma hızları dakikada 5000 devir ve 4 saatlik bir karıştırma süresi şeklinde olabileceği gibi 600 devir ve 2 dakikalık bir karıştırma süresi şeklinde de gerçekleşmektedir. Devir sayısı ve karışım süresi kullanılan polimer ve bitüme göre değişkenlik gösterir (Gökalp vd., 2019).

Polimerler sıcak bitümlerle etkileşime girdiklerinde bitüm hızla yayılır ve polimerle etkileşimi doğrultusunda stiren bloklarının çözülüp şişmelerine sebep olur. Bu durum ile birlikte uygun bir yayılım elde edilmek istendiği için orta ve yüksek kesme hızlı karıştırıcılar tercih edilmektedir (Read & Whiteoak, 2003).

Polimerin yapısında sıcaklığa bağlı oluşabilecek olumsuzluklardan kaçınmak için yüksek karıştırma sıcaklıklarından kaçınılması gerekir. İstenilen karışımın en ideal şartlarda elde edilebilmesi polimer parçacıklarının asfalt bağlayıcı ile tamamen etkileşime girmesini gerektirir. Bu etkileşimin mümkün oldukça en düşük karıştırma sıcaklığında ve en kısa karıştırma süresinde yapılması daha uygundur. Yüksek sıcaklıklar söz konusu olduğunda birbirinden farklı viskoziteye sahip bu iki malzemenin (asfalt ve polimer) karışımı zor olmaktadır. Karışımındaki polimer parçacıklarını küçültmek için kesme işlemi yapılır. Yüksek veya düşük kesme hızlı şeklinde iki farklı kesme biçimi vardır. Yüksek kesme hızlı karıştırıcılar polimerleri küçültmek için mekanik ve hidrodinamik kesme uygularken, düşük kesme hızlı karıştırıcılar toz veya sıvı modifiyerler için daha uygundur (Behnood & Gharehveran, 2019). Yüksek ve düşük kesme hızlı karıştırıcılar Şekil 35 ve Şekil 36'da gösterilmiştir.



Şekil 35. Düşük kesme hızlı karıştırıcı (Karakaş, 2014)



Şekil 36. Yüksek kesme hızlı karıştırıcı (Tan vd., 2013)

Polimer modifikasyon işlemine etki eden bütün bu parametrelerin uygulama aşamasında ve öncesinde dikkate alınmaması durumunda elde edilen asfalt kaplama istenilen performansı veremeyecek hatta çeşitli problemlere yol açacaktır. Bu problemler doğrultusunda nihai malzemenin modifiye edilmeden önceki hâline göre daha kusurlu olma ihtimali de mevcuttur. Bu doğrultuda malzeme seçimlerinin doğru yapılması, şartname koşullarının karşılanması, modifikasyon koşullarının dikkate alınıp kontrollerinin

yapılması kritik bir öneme sahiptir. İyi bir kontrolden geçen ve şartları eksiksiz yerine getirilmiş bir polimer modifiye asfalt kaplama uzun ömürlü bir hizmet verebilecek ve oluşması muhtemel bazı problemlere önceden tedbir alındığı için maddi açıdan konfor sağlayacaktır. Bu şartların karşılanmadığı aksi durumlarda ise kaplamada yaşanan olumsuzluklar kullanıcıları da direkt olarak etkilemektedir ve çeşitli maddi veya manevi kayıplara neden olmaktadır.



3. BULGULAR

Asfalt kaplamaların polimer katkıları ile modifikasyonunda tercih edilen katkı türüne göre performans kazanımları değişkenlik göstermektedir. Çalışmanın önceki bölümlerinde modifikasyon, polimerler ve bozulma problemleri üzerinde durulmuştur. Bu bölümde ise kullanılan katkıların performans etkileri, kaplamada ortaya çıkan problemlere dair yapılan çalışmaların karıştırma koşulları da göz önüne alınarak irdelenecektir.

3.1. Polimer Katkıların Performans Etkileri

Asfalt kaplama karışımlara kullanım yerine ve beklenen özelliğe göre farklı tipte polimerler katkı olarak eklenmektedir. Bu polimerlerin katkı olarak kullanıldıkları olumlu ve olumsuz özellikleri Tablo 11’de gösterilmiştir.

Tablo 11. Yaygın kullanılan polimerlerin özellikleri (Gököl vd., 2019)

Polimer	Olumlu Yönleri	Olumsuz Yönleri	Kullanımı
SBS ve SIS	- Düşük sıcaklıkta akıcılık ve esneklik - Yüksek sıcaklıkta akma ve deformasyon direnci - Tekerlek izine karşı direnç - Yaşlanma direnci - Asfalt-agrega adezyonu - Düşük miktarda kullanıldığında daha iyi stabilite	- Yüksek maliyet - Düşük penetrasyon direnci ve belirli sıcaklıklar düşük viskozite - Daha az ısı ve oksidasyon direnci - Yüksek sıcaklıklardaki depolamalarda stabilite sorunu - Az asfaltlı yüksek aromatikli bitümlerle daha uyumlu	- Çatı yalıtım işleri - Üstyapı uygulamaları
EVA ve Etilen-Metakrilat (EMA)	- Düşük maliyet - Bitüm ile uyumlu - Eşdeğerlerine göre viskoziteye etkisi az - Normal sıcaklıklarda termal stabilite - Adezyonu artırır	- Yüksek sıcaklıklarda stabilite sorunu - Normalden fazla kullanımda bitümü jelleştirir - Elastik geri dönmeyi iyileştirmez	- Üstyapı uygulamaları - Çatı yalıtım işleri

Tablo 11'in devamı

PP	• Viskoziteye düşük etki • Yüksek yumuşama noktası • Bitümün plastik özelliklerine olumlu etki • Tekerlek izi direncinde artış • Düşük penetrasyon	• Bitüm içerisinde ayrışır • Elastik ve mekanik özelliklere iyileştirme sunmaz • Düşük sıcaklık çatlamalarına düşük direnç	• Ataktik ve İzotaktik PP çatı kaplamaları • Ticari amaçlarda kullanılmazlar
PE	• Düşük maliyet • Yüksek sıcaklık direnci • Yüksek stabilite • Yaşlanma direnci	• Bitüme zor yayılır • Daha iyi performans için çok miktarda polimer gerektirir • Depolama stabilite problemleri	• Endüstriyel amaçlı • Bazı üstyapı uygulamaları
Doğal veya atık lastikler, kauçuklar	• Düşük maliyet • Daha iyi uzama ve elastiklik • Tekrarlı yüklere dayanıklı • Yansıma çatlaklarını azaltır • Yorulma direncini artırır • Tekerlek izine karşı dirençli	• Belli başlı ürün kullanımı gereksinimi • Homojen olması için uzun bir karıştırma süreci gerekir • Molekül ağırlığından dolayı bitümle uyumu düşük • Ayrışma ve oksitlenmeye karşı açıktır • Kaplama dolgusu olduğunda düşük dirençlidir	• Üstyapı kaplamaları

3.2. Katkıların Tekerlek İzi Performansına Etkileri

Asfalt kaplamaların bozulma problemlerinden biri olan tekerlek izi, yol yüzeyine taşıt trafiğinin sürekli yük bindirmesi ile oluşmaktadır. Bu problemin önlenmesi ve kaplama performansının geliştirilmesi için çeşitli katkılar kullanılmaktadır. Araştırmacıların kullandıkları katkılar ve katkıları kullanma biçimleri ile elde ettikleri sonuçlar bu bölümde aktarılmıştır.

Tayfur vd. (2007), polimer modifiye asfalt karışımların performansı üzerine inceleme yapmışlardır. Modifikasyon işlemlerinde bitüme göre %6 oranda, 16-22 penetrasyon değerinde, yumuşama noktası 98-110°C ve viskozitesi 5000-12000 MPa olan amorf polialfaolefin, karışım ağırlığının %0,6 oranında bitüm ile karıştırılmış selüloz elyaf, mineral agrega ağırlığının %0,4'ü kadar selüloz elyaf, toplam agrega ağırlığının %0,6'sı kadar poliolefin ve bitüm ağırlığının %5'i kadar SBS kullanmışlardır. Malzemeleri plentte karışıma dâhil etmişlerdir. Modifiye karışımların daha iyi dolaylı çekme mukavemeti gösterdiği, stabilite bakımından amorf polialfaolefin haricindekilerin kontrol karışımdan daha yüksek değer verdiği, dolaylı çekme deneyinde 5°C'de kontrol karışımının modifiye karışımlara göre daha iyi bir rijitlik sunduğu ancak sıcaklık arttıkça değerlerin birbirine yaklaştığı belirtilmiştir. Fransız tekerlek izi deneyinde katkı numunelerini 1000 ile 50000 döngü için test etmişlerdir ve 1,64 ile 2,96 değerleri ile SBS karışımların tekerlek izine karşı en iyi sonucu verdiği ve modifiye edicilerin adezyon kabiliyetine katkı sağladığı sonuçlarına ulaşmışlardır.

Özen vd. (2008), elastomer ile modifiye edilmiş asfalt karışımların laboratuvar performanslarını karşılaştırmışlardır. OL kohezif polimeri asfalt çimentosuna 170°C'de bitüm içeriğinin %5'i oranında katılmıştır. EL elastomerik terpolimeri asfalt çimentosuna bitüm ağırlığınca %1,5 oranında katılmıştır, 5 g/sn hızında ve 180°C'de bağlayıcı ile Marshall karıştırıcısında 6 saatlik sürede ve dakikada 80 devir hızıyla karıştırılmıştır. SBS katkısı ise 60-70 penetrasyonlu asfalt çimentosuna bitüm ağırlığının %5'i kadar katılmış ve yüksek kesme hızlı karıştırıcılar ile karıştırılmıştır. Tekrarlı sünme testleri ve fransız tekerlek izi deneyleri sonucunda modifiyer ilave edilmesinin 25°C'lik orta sıcaklıkta tekerlek izi direncini arttırdığını, 5°C'lik düşük ve 40°C'lik yüksek sıcaklıklarda ise farklı sonuçlar verdiğini ve 40°C'lik sıcaklıktaki ile 60°C'lik sıcaklıktaki tekerlek izi direnci deney sonuçlarının iyi bir korelasyon göstermediği sonuçlarına ulaşmışlardır.

Aksoy & İskender (2008), geleneksel ve modifiye asfaltlar karışımlarda sünme üzerine araştırma yapmışlardır. Penetrasyon derecesi 60-70 olan bağlayıcı bitüme %5'lik SBS eklenmeden önce 180°C'ye kadar ısıtmışlardır. Yaptıkları çalışmada SBS polimer katkısının 40°C'lik yüksek sıcaklıkta sünme deneylerindeki etkinliğini net olarak gözlemlemişlerdir. Önceden modifiye edilmiş karışımların laboratuvarında modifiye edilenlere kıyasla tekerlek izinde daha başarılı sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. Tekerlek izi direncinin 40°C'lik yüksek sıcaklıklarda belirlenmesinde statik sünme testinin ideal bir yöntem olduğunu, tekerlek izinin belirlenmesi noktasında da tekrarlı sünme testinin ideal

bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Modifiye edilmiş karışımların yüksek sıcaklıklarda diğer karışımların aksine bütünlüğünü koruduğunu belirtmişlerdir. SBS katkılı modifikasyonun tekerlek izinde başarılı sonuçlar verdiğini ve yüksek sıcaklıklarda geleneksel olana kıyasla 6-10 faktör daha yüksek direnç gösterdiği sonuçlarına varmışlardır.

Bostancıoğlu (2012), bitkisel atıklardan elde edilen ürünleri bitümlü sıcak karışımların özelliklerini geliştirme noktasında kullanmıştır. Atık madde olarak fındık kabuğundan elde edilen aktif karbon ve bitkisel atıklardan elde edilen furan reçinesini kullanmıştır. Aktif karbonu karışıma %10 ve üzeri, furan reçinesini %4 oranında dâhil etmiştir. Karışımın karıştırma sıcaklığını 150°C olarak belirlerken optimum karıştırma süresini de 45 dakika olarak seçmiştir. Modifiye edicilere penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uyguladıktan sonra modifiyerlerin orijinal bağlayıcının kıvamını ve rijitliğini arttırdığını belirtmiştir. DSR deneyine göre modifiyer içeriğindeki artışın yüksek sıcaklık performansını arttırdığını belirtmiştir. %5 Furan reçinesi katkısının karışımın tekerlek izi dayanımını %24,5 arttırdığını belirtmiştir. Modifiye Lottman su hasarı deneyinde furan reçinesinin Superpave şartname limitini (%80) sağladığını ancak aktif karbonun %70 düzeyinde kaldığını belirtmiştir. Uyguladığı deneyler sonucunda iki atık modifiye edicinin de bitüm modifikasyonunda pozitif sonuçlar gösterdiğine ulaşmıştır.

İskender vd. (2013), SBS katkılı taş mastik asfalt kaplamaların performanslarını çeşitli deneyler uygulayarak araştırmışlardır. SBS dâhil edilen karışımın daha iyi stabilize değerine sahip olduğu, yükü daha iyi yayabilmesinden dolayı daha yüksek tekerlek izi direnci sunduğu, nem hasarına karşı daha dayanıklı olduğu sonuçlarına varmışlardır. SBS ile modifiye edilen taş mastik asfalt karışımların fransız tekerlek izi deneyinde kontrol karışıma göre 50000 döngü için en az iki kat daha çok başarılı olduğu ve SBS'nin üstün bir katkı olduğunu belirtmişlerdir. Tekerlekler için yük atım sayısına bakıldığında ise yük atım sayısı arttıkça tekerlek izi oranının ortalama olarak kontrol karışımlara %4 ile %8 aralığında, SBS katkılı karışımda ise %2 ile %4 aralığında olduğu deney sonuçlarında görülmüştür. SBS katkılı karışımların orta sıcaklık olan 25°C'de en yüksek performanslarını verdiği ve yorulma performansını arttırdığını belirtmişlerdir.

Karakaş (2014), SBS katkısıyla modifiye edilmiş BSK'ların özelliklerini araştırmıştır. Farklı örnekleri %5 SBS katkılı karışımla kıyaslamıştır. Tekerlek izi ölçümlerinde SBS katkılı BSK'nın katkısızla göre ortalama %50 daha iyi olduğunu ölçmüştür. Genel olarak bakıldığında ise SBS katkılı BSK, katkısız olana göre performans

açısından (tekerlek izi, Marshall stabilitesi, indirekt çekme dayanımları, yorulma dayanımı, çevresel etkiler vb.) çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Alqudah (2016), antioksidan katkıların bitümlü bağlayıcılar üzerindeki etkisini incelemiştir. Furfural ve çinko asiti %1-1,5 ve %2, thiourea %4-6 ve %8 oranlarında bitüme katmıştır ve 170-175°C'de önce 15 dakika boyunca dakikada 400 devir hızla sonra 45 dakika boyunca dakikada 1500 devir hızla olmak üzere 1 saat karıştırmıştır. Thiourea, furfural ve çinko oksit antioksidan katkılarının bitümlü bağlayıcıya eklenmesiyle bağlayıcı rijitliği ve viskoelastik davranışını arttırdığına ulaşmıştır. Bitüm tipine göre doğru antioksidan katkı maddesi ve katkı miktarının seçilmesinin önemli olduğunu ve antioksidan katkıların yaşlanma direncine olumlu etkide bulunduğu sonuçlarına varmıştır. DSR deneyleri sonucunda tekerlek izi problemine karşı %4 thiourea içeren B 50/70 karışımının ve ağırlıkça %1 çinko oksit içeren B 160/220 karışımlarının en iyi sonuç verdiğini belirlemiştir.

Singh & Sawant (2016), SBS modifiyeli asfalt kaplama ile geri dönüştürülmüş asfalt kaplamayı (RAP) belli oranlarda bir araya getirerek elde edilen ürünün özelliklerini incelemiştir. %3,5 SBS içerikli kaplamaya %15-25-40 oranlarında RAP ilave etmişlerdir ve yüksek kesme hızlı karıştırıcıda dakikada 500 devir hızda 30 dakika boyunca 150°C'de karıştırmışlardır. RAP ilave edilen karışım daha sert hale gelmiştir ancak yüksek sıcaklıktaki viskozitesinde önemli bir değişim görülmemiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı önemli ölçüde değişkenlik göstermezken bağlayıcının sıcaklığa hassasiyeti artmıştır. Yaşlandırılmış bağlayıcının bir başka etkisi olarak doğrusal viskoelastikliği RAP ilavesiyle büyük oranda azalmıştır. Yüksek sıcaklıktaki sürekli performans derecesi çok fazla bir değişim göstermemiştir. Tekerlek izi performansının düştüğü, hasar oranının RAP ile birlikte arttığı, sertleşme etkisi ve polimer katkısının azaldığı şeklinde sonuçlara ulaşmışlardır.

Uncu (2017), polimer modifiyeli bitümlere nanomalzemeler dâhil ederek performans artışı elde etmeyi amaçlamıştır. Penetrasyon değeri 50/70 olan bitüme %3 ve %5 oranlarında Kraton D1101 SBS polimerinin yanı sıra %2 ve %4 oranlarında haloysit ve sepiyolit nanokillerini 180°C'de dakikada 4000 devir hızında toplamda 60 dakika karıştırarak dâhil etmiştir. Farklı karıştırma yöntemleri ve koşullardan elde ettiği verilerle nano katkı ve SBS birlikteliğinin polimer kaynaklı meydana gelen olumsuzlukları nispeten azalttığını ve fiziksel yönden pozitif katkılar sunduğunu ortaya çıkarmıştır. Olumlu özelliklerin yanı sıra SBS içeriğinin doğru ayarlanmaması durumunda nanokilleri

baskıladığını ve etkilerini gölgelediğini belirtmiştir. Nanokil katkısının %2 olduğu durumun sadece polimer ile modifiye edilen karışıma göre tekerlek izinde daha yüksek sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Sonuç olarak SBS ve nanokil katkılı karışımlar hazırlanırken iki maddenin de optimum içeriklerinin belirlenmelerinin mutlak surette önemli olduğu ve bu doğrultuda elde edilecek karışımdan çeşitli katkılar elde edilebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Uğurlu (2019), geri dönüştürülebilir bir malzeme olan magnezyum lignosülfatı asfalt kaplamalarda katkı malzemesi olarak kullanmıştır. B 50/70 penetrasyonlu asfalta, ağırlığının %2-4-6 ve %8 oranlarında magnezyum lignosülfatı 155°C'de dakikada 1000 devir hızında 20 dakika karıştırma süresi ile dâhil etmiştir. Karışımın tekerlek izi direnci, stabilitesi ve yaşlanma direncinde artış elde ederken sıcaklık hassasiyetinde azalma tespit etmiştir. Penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine göre katkının rijitliği ve kıvamı arttırdığı, sıcaklık hassasiyetini azalttığı, DSR deneyi ile katkının asfaltın elastik özelliklerini iyileştirerek tekerlek izi direncini arttırdığını belirtmiştir. Söz konusu katkı maddesinin %6 oranında karışıma dâhil edildiği deney sonuçlarında en ideal sonuçları elde etmiştir.

Sarışın vd. (2020), 50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcıyı hibrit polimerler ile (elastomerik SBS ve plastomerik katkı malzemesi) modifiye etmiş ve karışımın özelliklerini incelemişlerdir. Kraton şirketine ait Kraton D1101 SBS'yi %3,5-4,5 aralığında ve Titan şirketine ait Titan 7686 plastomeri %0,5-3 aralığında çeşitli kombinasyonlarla kullanmışlardır. Karışımı 170°C'de yüksek hızlı karıştırıcı ile dakikada 5000 devir hızda 2 saat boyunca karıştırarak elde etmişlerdir. DSR deneyleri ile birlikte elastomer ve plastomer katkının yüksek sıcaklık performans seviyesini arttırdığı ve tekerlek izi direncine katkı sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde rijitlik ve elastik davranış konusunda daha iyi sonuçlar alma noktasında polimer katkıların birlikte kullanımlarının ihtimal dâhilinde olduğu, atık polimerlerin de hibrit karışıma dâhil edilerek hem ekonomik hem de geri dönüşümsel fayda sağlanabileceği fikrine ulaşmışlardır.

Wu vd. (2021), farklı polimer katkıları ile SBS modifiye asfalt bağlayıcının yaşlanmasını değerlendirmişlerdir. Yüksek modül değiştirici, tekerlek izi karşıtı katkı ve yüksek viskozite değiştirici olmak üzere üç farklı polimer modifiyeri eklemişlerdir. Karışımı 185°C sıcaklıkta dakikada 1500 devir hızında 60 dakika karıştırarak elde etmişlerdir. İnce film hâlinde ısıtma ve basınçlı yaşlandırma kabı deneyleriyle test

işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. SBS asfalt bağlayıcıya polimer katkı maddeleri eklendiğinde depolama modülü, kompleks modülü, kayıp modülü ve tekerlek izi faktöründe artış belirlemişlerdir. Yaşlandırma işleminden sonra bu değerlerin daha da yükseldiğini belirtmişlerdir.

İskender & Aksoy (2021), SBS ve EVA'nın nanokiller ile birlikte bitüme dâhil edilmeleriyle elde edilecek asfalt karışımların performans etkileri üzerine araştırma yapmışlardır. Bitüme %5 oranlarında SBS ve EVA, %3 oranında nanokil ve agregaya %3 oranında süzülme önleyici katkı olarak selülozik elyaf katmışlardır. Modifikasyon işlemi yüksek kesme hızlı karıştırıcıda 155°C sıcaklıkta, dakikada 5000 devir hızında katkı maddeleri için ayrı ayrı 20'şer dakika karıştırılarak yapmışlardır. Hem polimer hem de nanokil katılmış karışımın saf karışıma ve sadece nanokil ile modifiye edilmiş karışıma göre tekerlek izi direnci, su hasarı ve termal çatlama direnci bakımından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda ise koşullandırma yapılmayan karışımlarda benzer sonuçlar elde edilse de koşullandırma yapıldığı durumlarda nanokil katkılı modifiye bitümler daha iyi direnç göstermektedir. Polimer katkılardan SBS'nin karışıma eklenme sırası önemli bir değişikliğe neden olmazken EVA'nın eklenme sırasına göre performansı etkilediği görülmüştür. Genel anlamda bakıldığında nanokil katkılı asfalt karışımlardaki SBS katkısının EVA'ya göre daha başarılı sonuçlar verdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Ghani vd. (2022), yüksek ve düşük yoğunluktaki atık polietilenle modifiye edilen asfalt bağlayıcıların asfalt kaplamalardaki performansı üzerine çalışma yapmışlardır. Yüksek ve düşük yoğunluklu atık polietilenler ayrı ayrı 1 saat 163°C'de ısıtıldıktan sonra %2, %4 ve %6 oranlarında bitüme katılarak dakikada 3000 devir hızında karıştırılmıştır. Yüksek ve düşük yoğunluklu polietilenlerin kullanımının faz açısını azalttığı, tekerlek izine direnci ve yüksek sıcaklıktaki viskoziteyi artırdığını belirtmişlerdir. Yüksek yoğunluklu polietilen için %2, düşük yoğunluklu için %4 oranları için bu artışın daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir. Bu oranlardaki kullanım ile birlikte tekerlek izi direncinde sırasıyla %13,8 ve %42,3'lük iyileşme görmüşlerdir.

Zhao vd. (2022), aktif kırıntı kauçuk tozu/SBS içerikli kompozit modifiye asfaltın yüksek sıcaklık reolojik ve yaşlanma direnci özelliklerinin incelemişlerdir. Bitümü 140°C'den 170°C'ye ısıtırken ağırlığının %1, %2, %3 ve %3,5 oranlarında SBS ekleyerek 300 devir/dakika hızında 20 dakika karıştırmışlardır. Karışımı 175°C'lik fırında 30 dakika beklettikten sonra yüksek kesme hızlı karıştırıcı ile 4500 devir/dakika hızında 170-180°C aralığında 1 saat boyunca karıştırmışlardır. Elde edilen karışıma bitümün ağırlığının %25'i

oranında aktif kırıntı kauçuğu ekleyip 300 devir/dakika hızında 175°C'de 30 dakika karıştırdıktan sonra yeniden yüksek kesme hızlı karıştırıcıda 185°C'de 4500 devir/dakika hızda 1 saat süresince karıştırarak kompozit modifiye asfaltı üretmişlerdir. Kompozit asfalta SBS eklendikten sonra yumuşama noktasında, sünekliğinde ve elastik geri kazanımında pozitif etki görülürken viskozite ve yumuşama noktası farkının arttığını belirtmişlerdir. SBS'nin kompozit karışıma eklenmesinin yüksek sıcaklık performansını geliştirdiğini karmaşık kayma modülü ve tekerlek izi direncinin iyileşmesi, faz açısının azalmasıyla açıklamışlardır. Kompozit karışımın iyi stabilite ve yaşlanma direnci sayesinde yaşlanma sıcaklığına karşı hassas olmadığını belirtmişlerdir. Karışıma eklenen kauçuk tozu ve SBS sayesinde kısa süreli yaşlanma süreci içerisinde karışımın polifaz yapısını koruyabildiğini, eklenen katkıların yaşlanma direncini desteklediği sonucuna varmışlardır.

Han vd. (2023), yüksek lineer SBS içeren polimer modifiyeli asfaltın yaşlanma direncinin artırılması üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Yüksek lineer SBS içerikli polimer asfalta nano çinko oksit, nano titanium dioksit, nano silikon dioksit ve poliftalamid katkıları ekleyerek yaşlanma performansını incelemişlerdir. Bağlayıcı ağırlığının %3'ü oranında çözücü kauçuk yağı, stabilizatör olarak %0,1 sülfür, %6,5 oranında SBS ve toplam yaşlandırma karışıtı katkıları saf bitüm içeriğinin %2'si oranında eklemişlerdir. SBS ve kauçuk yağının saf bitüme karıştırma işlemini yüksek kesme hızlı karıştırıcıda 185°C'de 5000 devir/dakika hızında 35 dakika olarak, nano çinko oksit ve diğer inorganik partiküllerin karıştırma süresini 30 dakika olarak belirlemişlerdir. Son ürünlerin elde edilmesi aşamasında da sülfürü karışıma dâhil ederek 2000 devir/dakika hızında 120 dakika karıştırmışlardır. Yüksek sıcaklıklarda nano partiküllerinin belirgin bir etkisi olmadığını ancak poliftalamidin yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi direncini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Nanopartiküllerin karışım ile sadece fiziksel olarak karışmasından ve SBS moleküllerinin güçlü bağ yapıları tarafından engellenmelerinden dolayı yaşlanma karışıtı bir performans sunmadıklarını belirtmişlerdir. Poliftalamidin ise SBS'nin çapraz bağ yapısını güçlendirecek reaksiyonlara (asfaltan ile reaksiyona girerek) dâhil olabildiğinden olağanüstü yaşlanma karışıtı performansına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

3.3. Katkıların Su Hasarı Performansına Etkisi

Asfalt kaplamaların başlıca problemlerinden bir diğeri olan su hasarı agrega bitüm arasındaki adezyonun yetersizliği gibi nedenlerle ortaya çıkmaktadır. Araştırmacılar çeşitli soyulma önleyici katkıları kullanarak problemin önüne geçmeye çalışmaktadır.

İskender vd. (2012), SBS ile su hasarı önleyici katkıları birlikte kullanarak asfalt kaplamaların performans değişimlerini incelemiştir. Asfalt çimentosu ağırlığının %5'i kadar SBS katkısını bitüme 180°C'de 2 saat boyunca yavaşça eklemiştir. Amin katkısını ise bitüm ağırlığının %0,4'ü oranında bitümlü bağlayıcıya eklemiştir. Koşullu ve koşulsuz durumlar için SBS ve soyulma önleyici katkıların karışımında birlikte kullanımlarının su hasarı direncini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Buna ek olarak SBS katkısı veya amin içerikli soyulma önleyici katkısı fark etmeksizin su hasarı direncine bağlı olarak çatlama direncinin arttığına da ulaşmışlardır. Soyulma önleyiciler için çeşitli yüksek koşullama değerlerinde depolama stabilitesi gibi yönlerden problemler olduğu ancak SBS katkısının artan koşullara uyum sağlayarak etkisini koruduğu sonucuna ulaşmışlardır. Şartlar zorlaştırılıp yükleme süreleri değişkenlik gösterdiğinde SBS katkısının daha ön plana çıktığı görülmektedir.

Çavdar (2019), %1 ile %9 oranları arasındaki bitkisel atık yağ katkısını %5 SBS içerikli karışıma 150°C'de dakikada 1000 devir hız ile 30 dakikalık karıştırma işlemiyle dâhil etmiş ve karışımın özelliklerini uyguladığı deneyler ile incelemiştir. Katkı oranına bağlı olarak kıvam ve sıcaklık değişimindeki hassasiyette ve buna bağlı olarak da penetrasyon değerinde artış ve yumuşama noktası değerinde azalma belirlemiştir. Nicholson soyulma deneyi ile birlikte %9 bitkisel atık yağ katkısının soyulma direncini %10,58 oranında arttırdığı, DSR deneyi ile de yağ katkısının yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direncini azalttığını belirtmiştir. Yaptığı çalışmanın deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde ise karışıma eklediği bitkisel atık yağ katkısının bitümün işlenebilirliğini arttırdığını ve soyulma direncinde de artış sağladığı sonuçlarına ulaşmıştır.

Ayyıldız vd. (2021), nanokil-SBS karışımının taş mastik asfalt üzerindeki etkilerini incelemiştir. 50/70 Penetrasyonlu bitüme %2 ile %3 oranlarında nanokil ve %1'den %5'e kadar değişen oranlarda SBS katkısı eklemiştir ve 170°C'de dakikada 4500 devir hızıyla SBS'yi karışıma ekleyip 30 dakika yüksek kesme hızlı karıştırıcıda karıştırdıktan sonra nanokil ilave edip 30 dakika daha karıştırmışlardır. Karışıma süzülme önleyici katkı olarak %3 oranında viatop eklemiştir. Modifiye Lottman ve Marshall deneylerini

karışıma uygulamışlardır. %2 oranındaki nanokil katkısının %3'ten daha uygun olduğunu ve nanokilin düşük orandaki dağılımını daha başarılı bulmuşlardır. SBS'ye nanokil katkısının dâhil edilmesinin, yalnızca SBS kullanılan hâline kıyasla modifikasyonda çatlama, su hasarı ve tekerlek izi problemlerinde daha iyi sonuçlar verdiğine ulaşmışlardır. Deneyler sonucunda SBS/nanokil karışımında %5 SBS içeriğinden daha azının mümkün olduğu, maliyeti azaltmada, su hasarı ve tekerlek izi problemlerinde SBS ile nanokilin iyi sonuçlar verdiğini ve %3 SBS ile %2 nanokilin en uygun formülasyon olduğunu belirlemişlerdir.

Alnadish vd. (2023), sentetik, doğal ve atık fiberlerin asfalt karışımlardaki uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar ile ilgili araştırma yapmışlardır. Doğal ve atık fiberlerle yapılan modifikasyona ilginin arttığını ve karbon, polipropilen, karbon, polyester, selüloz vb. maddelerle bitümün modifiyesinin olumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Fiberlerin bitüme içeriğince %5 oranında katıldıklarını, düşük ve yüksek sıcaklıklardaki performansını kayda değer biçimde arttırdıklarını aktarmışlardır. Karbon ve çelik içerikli fiberlerin asfaltın iletkenliğini arttırdığını, taş mastik asfaltlara doğal elyaf katılmasının drenaja ve mekanik özelliklere olumlu etkiye bulunduğunu ve geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) içerikli karışımlara elyaf eklenmesinin performansı arttırdığını belirtmişlerdir.

Korzay vd. (2023), sönmüş kireç, diatomit ve SBS katkıların RAP üzerindeki performans etkilerini analiz etmişlerdir. Odak noktasının %50 RAP içeriğinde yaşlanmayı önleyici çözümler olan bu çalışmada SBS'yi %5 oranında, sönmüş kireci kuru karışımın %0,5 oranında ve diatomiti %5-%10 oranlarında kullanmışlardır. B50/70 penetrasyonlu bitüme %5 SBS ekledikten sonra yüksek kesme hızlı karıştırıcıda 180°C'de 3000 devir/dakika hızında 4 saatlik bir karıştırma işlemi uygulamışlardır. Sönmüş kireç ve diatomitin birlikte kullanıldığı durumda su hasarı direncinde artış gözlemlenmiştir ancak sönmüş kireç ile SBS birleşimi kadar etkili olmamaktadır. SBS katkısı her iki katkı maddesiyle de uyumlu olup iyi sonuçlar vermektedir. Sönmüş kireç ve diatomitin düşük oranda kullanılıp SBS'nin %5 oranında kullanıldığı durumda ise %50 RAP içerikli karışım su hasarı yönünden çok iyi sonuçlar vermiştir. Karışıma sönmüş kireç veya diatomit katılmasından bağımsız olarak SBS dâhil edildiğinde indirekt çekme mukavemetinin yaklaşık %15 değerinde arttığını, %10 diatomit içeriğinde su hasarı direncinin arttığını ve sönmüş kireç ve diatomitin birlikte su hasarına olumlu katkıda bulunduğunu

belirtmişlerdir. Sonuç olarak %50 RAP içerikli modifiye karışımın tekerlek izi ve su hasarında etkili performans vermesi karışımın kullanılabilirliğini kanıtlamışlardır.

3.4. Katkıların Diğer Performans Etkileri

Asfalt kaplamalara eklenen katkıları tekerlek izi ve su hasarı dışında yaşlanma karşıtı, mekanik ve reolojik özellikleri iyileştirme şeklinde farklı amaçlarla da kullanılmaktadır.

Kök vd. (2011), yaptıkları çalışmada bitümlü sıcak karışımlara asfaltit ve SBS ekleyerek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. SBS oranını %5 olarak belirleyip, bitüme eklemişlerdir. Dakikada 1100 devir hızında, 185°C sıcaklıkta 2 saat süre karıştırarak karışımı hazırlamışlardır. Karışıma %5 SBS ve filler oranının %50'si kadar asfaltit dâhil ederek karışımın rijitlik modülünde %69 artış, indirekt çekme mukavemetinde %54 artış, çekme mukavemetinde artış ve yorulma dayanımında asfaltit ve SBS'nin birlikte kullanıldığı karışımda yaklaşık 6 kat artış elde etmiştir. Sonuç olarak asfaltit ve SBS'nin birlikte uyumlu çalıştığını ve karışımın performansında olumlu sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Zhu vd. (2014), hazırladıkları makalede polimer bitüm modifikasyonundaki gelişmeleri ve karşılaşılan sorunlar üzerine çalışmışlardır. Polimer modifikasyonunun bitümün özelliklerini belli düzeye kadar iyileştirdiğini ancak uygulamada hâlâ daha bazı dezavantajlar içerdiğini belirtmişlerdir. Dezavantajları gidermek için bulunan çözüm yöntemlerinin (polimerlere katılan ek katkıları veya işlemler) yeterli kalıcılığa sahip olmadığını ve çeşitli başka sorunlara yol açtığını belirtmişlerdir. Alternatif çözüm yöntemi olarak yüksek maliyete sebep olacak sorunları geliştirip, düşük maliyetli problemlere yol açabilecek zayıf özellikli sorunları nispeten daha az dikkate alınacak kombinasyonları (işlevselleştirme gibi) denemeyi önermişlerdir.

Behnood & Gharehveran (2019), polimer modifiye asfalt kaplamaların özellikleri üzerine araştırma yapmışlardır. Modifikasyon amacının belirlenerek uygun polimer seçimlerinin yapılmasının önemini vurgulamışlardır. Karışım hazırlanmasında genel olarak 150°C ile 180°C sıcaklığın, dakikada 1500 devir ile 4500 devir hızı arasında bir hızın ve 45-180 dakika arasında karıştırma sürelerinin seçildiğini belirtmişlerdir. Polimerin iç yapısından faz uyumuna kadar birçok farklı özelliğin karışımı etkidiğini belirtirken elastomerlerin plastomerlere kıyasla daha yaygın kullanıma sahip olduklarını aktarmışlardır. Faz ayrışmasının polimer modifikasyonunda dikkate alınması gereken bir

dezavantaj olduğunu ve bu sorunun çözülmesi noktasında uygulanan diğer çözüm yöntemlerinin de başka sorunlara neden olabileceğinin göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Al-Sabaei vd. (2019), yol yapımında kullanılan asfalt kaplama karışımların modifikasyonunda doğal kauçuğun kullanılmasının etkilerini araştırmışlardır. Asfalt karışımlarında optimum lateks içeriğinin %4 olduğunu belirtmişlerdir. Doğal kauçuğun yerel üretim olması, çevre dostu özelliği ve maliyetindeki kolaylıkları sayesinde sürdürülebilir bir modifikasyon malzemesi olarak nitelemişlerdir. Yapısal olarak da tekerlek izine ve yorulmaya dayanıklı olan ve uzun ömürlü bir modifiye yol kaplaması geliştirilmesinin yıllık bakım ve genel harcama konusunda önemli bir azalma sağlayacağını öne sürmüşlerdir.

Porto vd. (2019), bitüm modifikasyonları üzerine kapsamlı bir inceleme çalışması yapmışlardır. Plastomerler ile modifiye edilmiş bitümlerin tekerlek izine karşı etkili olmalarına rağmen düşük sıcaklık performansları tatmin edici düzeyde olmadığı, polietilen ve polipropilenin yaygın kullanımlarına karşın polar olmayan yapılarının uyumluluk sorununa sebep olduğu, plastomer içerikli polimer karışımlardaki asıl problemin depolama stabilitesi ve polimerin bitüm ile homojen dağılım sergilememesi olduğu, termoplastik elastomer polimerlerin elastik özellikleri sayesinde daha başarılı olduğu ve karışımda %3 ile %7 oranlarında kullanılabileceği, SBS'nin en yaygın kullanılan elastomer olmasıyla birlikte sıcaklığa, yumuşama noktasına pozitif katkı sağladığına ve kısmi olarak oksidasyon kaynaklı rijitlik artışını azaltabildiği, termoset polimerlerin olumlu yanları olsa bile asfaltlama için uygun olmayışları ve maliyet problemleri olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır. Doğal kauçuk lateks için yaptıkları incelemelerde genel performansı ve mekanik özellikleri ile ilgili bazı sorunlar dikkat çekiyor olsa bile sıcaklığa, stabiliteye, esnekliğe, soyulma direncine, tekerlek izine ve yorulma direncine katkıları olduğunu belirtmişlerdir. Sentetik kauçuk için yaptıkları incelemelerde %4 oranını düşük bulurken, %20 oranını da uygunsuz olarak belirlemişlerdir.

Özdemir vd. (2020), polimer modifiye bitüm üretiminde karışım koşullarının önemini vurgulamak adına bir çalışma yürütmüşlerdir. Polimer modifiye bitümlerin numune hazırlama ve üretim aşamasında planlamanın doğru yapılması gerektiği, modifikasyonda kullanılacak polimerlerin ve bitümün uyumunun iyi anlaşılmasına, karıştırma süresinin doğru belirlenememesi durumunda yaşlanma olumsuzluğu olabileceğine, homojenliğin karışımdaki önemine, kesme hızı oranının bitümü oksidasyona

uğratacak kadar hızlı veya emilimi olumsuz etkileyecek kadar yavaş olmaması gerektiğine, karıştırma sıcaklığı belirlenirken malzemelerin ayrı ayrı dikkate alınmaları gerektiğine, yüksek sıcaklıkların çeşitli risklere sahip olduğu ve doğru seçilerek malzemelerin okside olmadan erimelerini sağlaması gerektiği gibi sonuçlara ulaşmışlardır.

Xu vd. (2021), SBS ile sülfürden arındırılmış kırıntı kauçuk (crumb rubber) ile modifiye edilmiş bitümün reolojik ve yaşlanma özelliklerini incelemişlerdir. Karışıma bitümün ağırlığına göre %4 oranında SBS ve %20 oranında kırıntı kauçuk 180°C sıcaklıkta yüksek kesme hızlı karıştırıcı ile önce dakikada 6000 devirde 1.5 saat kesme işlemine tabii tutulmuş sonra da dakikada 1500 devirde 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Eklenen kırıntı kauçuğun termal oksijen yaşlanma karşıtı kabiliyetini geliştirdiğini, asfaltın elastik özelliklerini iyileştirdiğini, asfaltın viskoz kısımlarını azaltabildiğini ve yorulma çatlaması direncini arttırdığını görmüşlerdir. Buna ek olarak kırıntı kauçuk eklenen karışımın eklenmeyen karışıma göre sıcaklık hassasiyeti ve yaşlanma karşıtı özelliklerinde daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Yuan vd. (2022), yüksek SBS içerikli modifiye asfaltın viskoelastik davranışını ve faz yapısını incelemişlerdir. Çalışmada modifiye edici SBS yüzdesini %3 ile %12 arasında değişken şekilde kullanmışlardır. Bitüme eklenen SBS'yi 170°C'de dakikada 1000 devir hızında 30 dakika boyunca kanatlı karıştırıcı ile karıştırmışlardır. Karıştırma işleminden sonra kesme emülsifiye makinesi ile 170°C'de dakikada 3000 devirde 10 dakika boyunca kesme işlemi uygulamışlardır ve stabilizör eklenerek 170°C'de dakikada 5000 devirde bir saat kesme işlemi yapmışlardır. Son aşamada karışımdaki hava içeriğini azaltmak için 170°C'de 90 dakika ısıtmışlardır. SBS içeriği arttıkça sünmenin geri kazanım oranının arttığını ve %4,5'lik SBS içeriğinden daha küçük içeriklerde ve daha yüksek içeriklerde belirgin bir değişim eğimi farkı olduğunu belirtmişlerdir. Yorulma direncinin SBS içeriğine bağlı olarak arttığını ve en iyi değeri %4,5'ten %6'ya çıkarken bulmuşlardır. SBS içeriğinin asfaltın düşük sıcaklıktaki esneme modülünü azalttığını belirtmişlerdir. SBS katkılı asfaltın faz yapısını incelediklerinde de artan içeriğe bağlı olarak %6'dan az olduğunda dağınık fazda, fazla olduğunda ise sürekli fazda olduklarını belirtmişlerdir.

Dumanlı (2022), 50/70 penetrasyonlu bitüm ile SBS'yi karıştırarak polimer modifiyeli bitüm elde etmiştir. %5 SBS içeriğini dakikada 1500-2500 devir hızlarında, 5°C sapma payıyla 170-185°C aralığında, 60 ve 120 dakika süresince karıştırmıştır. Elde ettiği ilk karışımın saf bitüme göre daha düşük bir penetrasyon değerine sahip olmasına SBS bitümün kıvamındaki değişiklik yaparak müdahale etmiştir. Hazırladığı on iki farklı

numuneye yaptığı deneyler sonucunda en yüksek penetrasyon deneyini karıştırma koşullarını $175\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında, dakikada 2000 devir karıştırma hızında ve 60 dakikalık karıştırma süresinde elde etmiştir. En düşük penetrasyon değerine ise $185\pm5^{\circ}\text{C}$, 1500 devir hızı ve 120 dakikalık karıştırma süresinde elde etmiştir. Elde ettiği verilerden penetrasyon indeksleri incelendiğinde saf bitümün modifiye olana göre daha düşük değerlere sahip olduğunu ve bunun da polimer modifiyeli bitümlerin sıcaklık duyarlılığının düşük oluşuyla ortaya çıktığını açıklamıştır. Yumuşama noktası, akmaya karşı direnç, viskozite değerleri kıyaslandığında da SBS katkısının pozitif etkisi olduğu sonucuna ulaşmıştır. Son olarak $175\pm5^{\circ}\text{C}$ karıştırma sıcaklığı, 60 dakika karıştırma süresi ve dakikada 2000 devir karıştırma hızının en ideal karıştırma parametreleri olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Wang vd. (2022), yüksek kauçuk içerikli asfaltların agrega ile arasındaki adezyona dair araştırmalar yapmışlardır. Kırıntı kauçuk asfaltın %15-20 ve %25 oranlarında karışıma eklenmiştir. Karışım 180°C 'de dakikada 4000 devir hızında 60 dakika boyunca kesilmiş ve kesme işleminden sonra 30 dakika boyunca düşük hızda (dakikada 800 devir) karıştırılmıştır. Kırıntı kauçuk ilavesi asfaltın kompleks kayma modülünü ve rijitliğini artırırken faz açısını azalttığını ve böylece yüksek sıcaklıklardaki elastikliğini geliştirdiğini belirtmektedirler. Bitüme uyguladıkları testlere göre kırıntı kauçuğun adezyon performansının etkisiz olmasından dolayı çekme mukavemetine olumsuz etkide bulunduğunu dile getirmişlerdir. Pürüzlülük değerinin dozajdaki artışla birlikte arttığını ve düşük kauçuk tozu içeriğinde önemli bir değişim olmadığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak kırıntı kauçuk miktarındaki artışın adezyonu bozduğunu belirtmektedirler.

Chen vd. (2022), ortogonal testlere dayalı olarak SBS içeriğinin, kükürt ve kauçuk işleme yağının SBS ile modifiye edilen asfaltın düşük sıcaklık performansına etkileri üzerine araştırma yapmışlardır. Karışıma %2 ile %6 aralığında SBS, stabilizatör olarak %0, %0,15 ve %0,3 oranlarında kükürt ve %0 ile %4 aralığında kauçuk işleme yağı eklemişlerdir. Farklı oranlardaki karışımları hazırlarken bitüme 175°C 'de SBS ilave ederek dakikada 1000 devir hızında 15 dakika karıştırmışlardır. Daha sonra kauçuk işleme yağı eklenerek mekanik karıştırıcıda 175°C 'de 6000 devir/dakika dönüş hızında 90 dakika süresince kesme işlemi uygulamışlardır. Sülfür eklenerek 3000 devir/dakika hızında 30 dakika karıştırmışlardır ve son adımda karışımın homojen olması için 500 devir/dakika hızında 30 dakika karıştırmışlardır. Test sonuçlarına göre kauçuk işleme yağının malten kaybını telafi edebileceği ve düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirebileceği ancak yüksek miktarda kullanılmaları durumunda SBS asfaltın adezyonuna zarar vereceğini

belirtmişlerdir. Kiriş eğme reometresi deneyine göre SBS modifiye asfalta kükürt ve kauçuk işleme yağı katılmasının asfaltın rijitliğini arttırdığını ve sünme rijitlik oranını dengelediğini gözlemlemişlerdir. Uyguladıkları testlerden elde ettikleri verilere göre SBS modifiye asfaltın düşük sıcaklık performansına katkılarının etki derecesini büyükten küçüğe doğru SBS, kauçuk işleme yağı, kükürt şeklinde sıralamışlardır.

Li vd. (2022), SBS ve geri dönüştürülmüş motor yağı tabanını modifiyeli gençleştirilmiş asfalt hazırlanmasında kullanmışlardır ve özellikleri üzerine araştırma yapmışlardır. Geri dönüştürülmüş motor yağı tabanını karışıma 150°C'de 2500 devir/dakika hızında 20 dakika karıştırma süresinde eklemişlerdir. 190°C'de 3000 devir/dakika karıştırma hızında 5 dakikalık sürede de SBS karışıma dâhil edilmiştir. %6'lık stabilizör de karışıma dâhil edildikten sonra düşük hızda 1000 devir/dakika ve 10 dakika karıştırılarak karışımı hazırlamışlardır. Gri korelasyon analizi ile birlikte performans parametrelerini geri dönüştürülmüş motor yağı içeriği, SBS içeriği, karıştırma süresi ve karıştırma hızı şeklinde sıralamışlardır. Parametreler için önerdikleri kritik değerler ise %9 motor yağı, %4,5 SBS, dakikada 4500 devir/dakikalık hızla 50-60 dakikalık kesme karıştırma işlemi şeklindedir. Söz konusu katkılarla modifiye edilmiş karışımın daha iyi yüksek sıcaklık direncine, elastik geri kazanımına ve daha düşük gerilme hassasiyetine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Lin vd. (2023), bitüm kalınlığının yüksek polimer içerikli modifiye asfalt karışımların yaşlanma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bitüm film kalınlığının yetersiz seçilmesi durumunda agregalarla iyi bağ kuramadığını, gereğinden yüksek seçilmesi durumunda ise karışım rijitliği, çatlama direnci ve yorulma performansını olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Uyguladıkları deneyler ile birlikte ideal film kalınlığını 12,9 mikrometre ile 14,9 mikrometre arasında değişkenlik gösterdiğini belirlemişlerdir. Film kalınlığı arttıkça yaşlanma direncinin arttığını ancak çok yüksek değerlerdeki film kalınlığının yaşlanma direncini olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Altuntaş (2023), B50/70 bitüme SBS ve nanokil katkısı eklemiştir. SBS ve nanokil içerikli polimer modifiye asfaltları 160-170-180°C karıştırma sıcaklıklarında, 60-90-120 dakikalık karıştırma sürelerince, dakikada 3000-4000-5000 devir hızıyla karıştırarak geleneksel ve Superpave deneylerine tabii tutmuştur. Karışıma %5 oranında SBS, %3 oranında nanokil ilavesi yapmıştır. Uyguladığı deneyler sonucunda 170°C, 5000 devir/dakika ve 60 dakikalık karıştırma süresinde en iyi performans sonuçları elde etmiştir.

170°C'de elde ettiği polimer modifiye asfaltı kontrol karışım ile kıyasladığında; penetrasyon değerinde %30 azalma, yumuşama noktasında %47 artış, düktilite değerinde 5 ile 13 kat arası artış ve 2,7cm ile en yüksek düktilite, elastik geri dönmede 1,7 kat artış ve DSR deneyinde 80°C üzerinde sonuçlar elde etmiştir. 180°C 3000 devir/dakika ve 60 dakikalık karıştırma süresinde de en iyi depolama stabilitesi sonuçlarını elde etmiştir ve 170°C, 5000 devir/dakika ve 60 dakikalık karıştırma süresi ile 180°C 3000 devir/dakika ve 60 dakikalık karıştırma süresini en uygun değerler olarak belirlemiştir.

İskender (2023), polimer modifiye asfalt nanokompozitler için karıştırma koşullarını incelemiş ve performans yönünden en ideal koşulları belirlemeye çalışmıştır. Çalışmasında %5 SBS içeriği için %3 nanokil kullanırken, EVA karışımı için de %3 nanokil katkı kullanmıştır. Modifikasyon parametrelerini 160-170-180°C karışım sıcaklığı, 60-90-120 dakika karıştırma süresi ve dakikada 3000-4000-5000 devir hızı şeklinde belirleyerek yüksek kesme hızlı karıştırıcılar ile karıştırma işlemlerini gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçlarla SBS katkılı modifiye asfalt için 170°C'lik 4000 devir/dakika hızda 90 dakikalık karıştırma süresini uyguladığı karışımın en başarılı sonuçlar verdiğini belirtirken daha yüksek sıcaklıklardaki daha düşük karıştırma sürelerinin de mümkün olabileceğini, karışım hızının karışımın sıcaklığı ve süresi kadar etkili olmadığını belirtmiştir. EVA içerikli karışımda ise en uygun koşulları 180°C'de 3000 devir/dakika hızda ve 120 dakikalık karıştırma süresi şeklinde belirlemiş ve karıştırma süresinin EVA içerikli karışımda önemini vurgulamıştır. Sonuç olarak modifikasyon parametrelerinin iyi ve doğru belirlenmesinin nihai karışıma önemli düzeyde etki ettiği son derece önemli olduğu ve nanokil ek katkısının polimer modifikasyonuna faydalı olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Yapılan çalışmalarda modifikasyon işlemine etki eden parametreler (kullanılan katkı maddesi, katkı oranı, bitüm sınıfı, karıştırma sıcaklığı, karıştırma hızı ve süresi) Tablo 12'de sunulmaktadır.

Tablo 12. Çalışmalardaki modifikasyon parametreleri

Kaynak	Katkı	Katkı Oranı	Bitüm Sınıfı	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Hızı (devir)	Karıştırma Süresi (dakika)
Özen vd. (2008)	OL, EL, SBS	%5, %1,5, %5	60/70	180	80	360

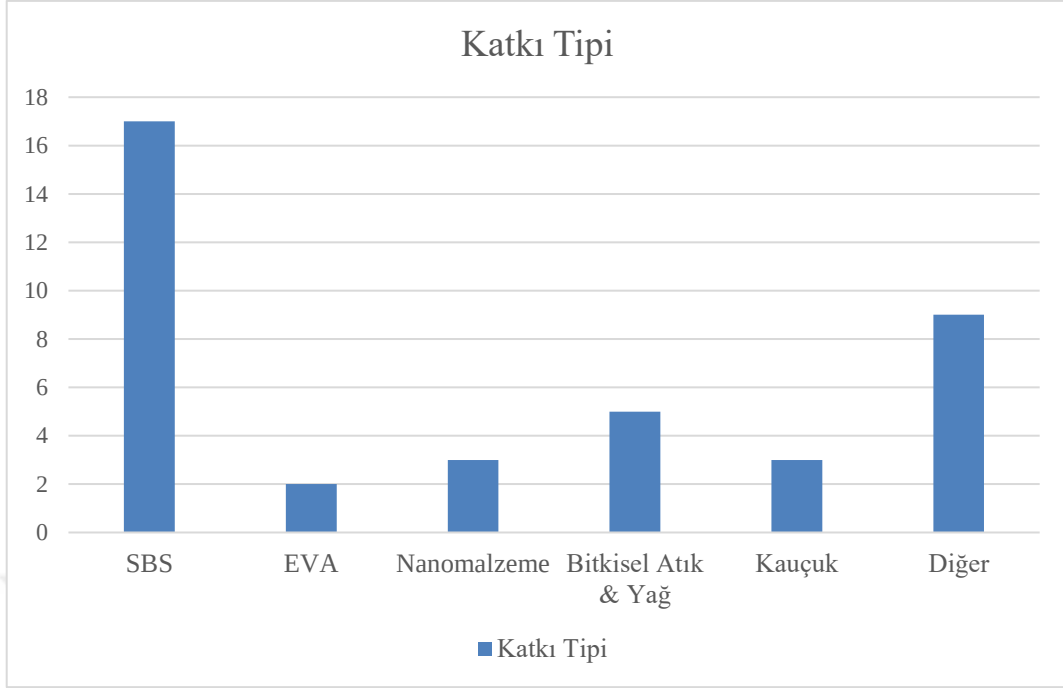
Tablo 12'nin devamı

Kök vd. (2011)	SBS, asfaltit	%5, filler oranının %50'si kadar asfaltit	160/220	185	1100	120
İskender vd. (2012)	SBS, amin	%5, %0,4	60/70	180	-	120
Alqudah (2016)	Furfural, çinko asit, thiourea	%1-1,5, %2 %4-6-8	160/220	170-175	400+1500	15+45
Singh & Sawant (2016)	SBS, RAP	%3,5, %15-25- 40	50/60	150	500	30
Uncu (2017)	SBS, halloysit, sepiyolit	%3-5, %2, %4	50/70	180	4000	60
Uğurlu (2019)	Magnezyum lignosülfat	%2-4-6-8	50/70	155	1000	20
Çavdar (2019)	SBS, bitkisel atık yağ	%5, %1-9	76/16	150	1000	30
Sarışın vd. (2020)	SBS, plastomerik katkı	%3,5-4,5, %0,5-3	50/70	170	5000	120
Xu vd. (2021)	SBS, sülfürden arındırılmış kırıntı kauçuk	%4, %20	60/70	180	6000+1500	90+60
Ayyıldız vd. (2021)	SBS, nanokil, viatop	%1-5, %2-3, %3	50/70	170	4500	30+30
İskender & Aksoy (2021)	SBS, EVA, nanokil, selülozik elyaf	%5, %5, %3, %3	50/70	155	5000	20 (her katkı için ayrı)
Dumanlı vd. (2022)	SBS	%5	50/70	170-185	1500-2500	60-120

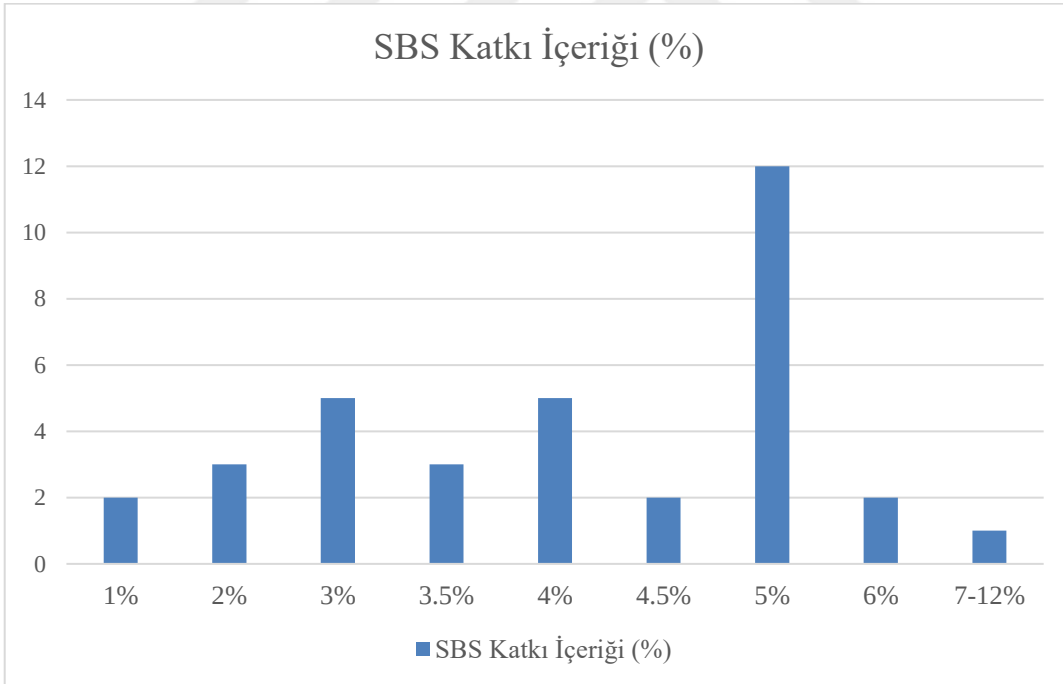
Tablo 12'nin devamı

Wang vd. (2022)	Kırıntı kauçuk	%15-20-25	60/70	180	4000+800	60+30
Zhao vd. (2022)	SBS, aktif kırıntı kauçuk	%1-2-3-3,5, %25	60/70	170-180 + 185	4500+4500	60+60
Yuan vd. (2022)	SBS	%3-12 (4,5-6)	60/70	170	1000+5000	30+60
Li vd. (2022)	SBS, geri dönüştürülmüş motor yağı	%4,5, %9	60/70	190	4500	50-60
Ghani vd. (2022)	Yüksek ve düşük yoğunluklu atık polietilen	%2-4-6	60/70	163	3000	60
Chen vd. (2022)	SBS, kükürt, kauçuk işleme yağı	%2-6, %0-0,15-0,3, %0-4	60/70	175	1000+6000+3000	15+90+30
Altuntaş (2023)	SBS, nanokil	%5, %3	50/70	160-170-180	3000-4000-5000	60-90-120
İskender (2023)	SBS, EVA, nanokil	%5, %1+0,8, %3	50/70	160-170-180	3000-4000-5000	60-90-120
Korzay vd. (2023)	SBS, sönmüş kireç, diatomit	%5, %0,5, %5-10	50/70	180	3000	240

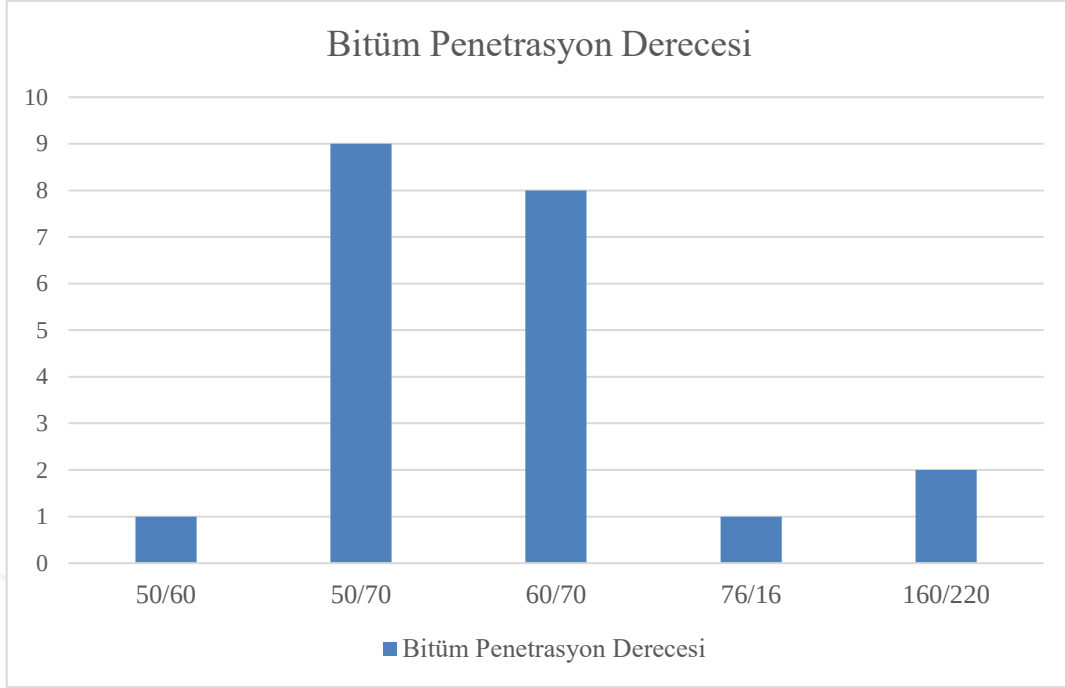
Tablo 12'de yer alan veriler göz önünde bulundurularak modifikasyon parametrelerine yönelik tercih dağılımını daha iyi görebilmek adına elde edilen sonuçlar Şekil 37,38,39,40,41 ve 42'de gösterilmektedir.



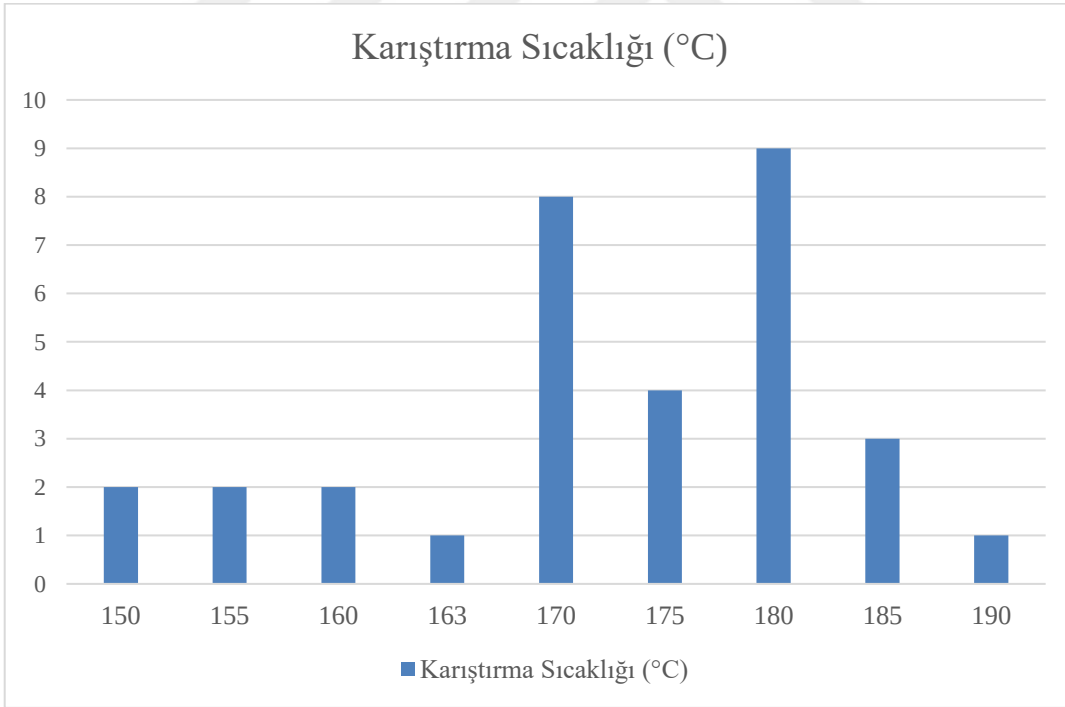
Şekil 37. Katkı tipine göre tercih dağılımı



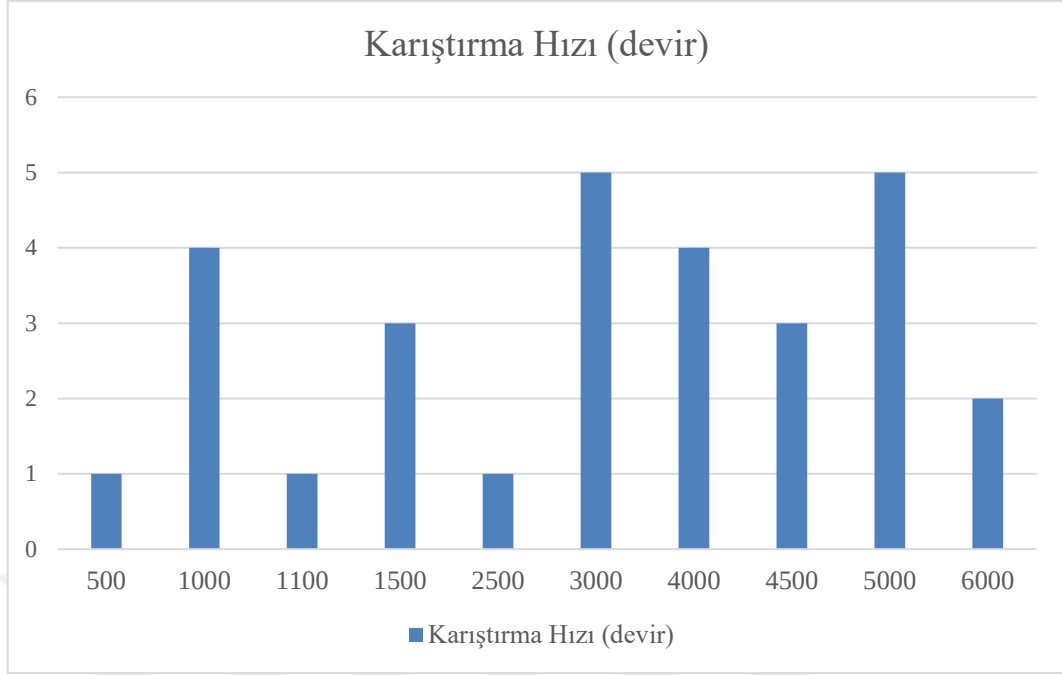
Şekil 38. SBS katkısı içeriğine göre tercih dağılımı



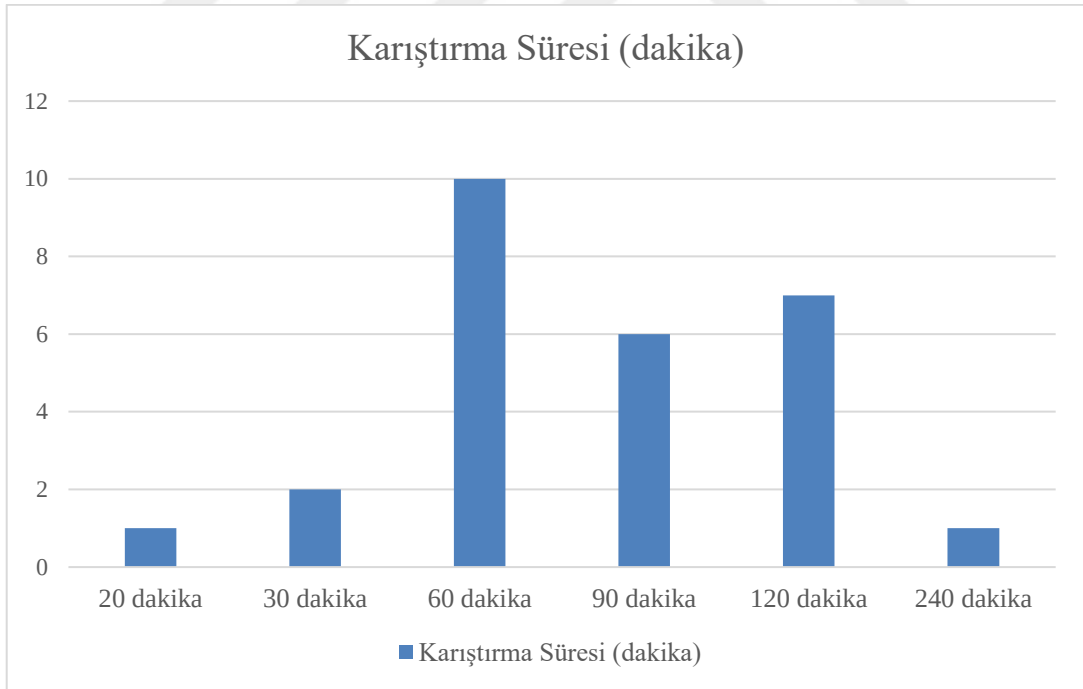
Şekil 39. Bitüm penetrasyon derecesine göre tercih dağılımı



Şekil 40. Karıştırma sıcaklığına göre tercih dağılımı



Şekil 41. Karıştırma hızına göre tercih dağılımı



Şekil 42. Karıştırma süresine göre tercih dağılımı

3.5. Polimerlerin Performans Problemleri ve Diğer Katkılar

Asfalt kaplamaların hizmet ömrünü ve hizmet süresince performansını arttırmak için polimer katkıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerler dâhil edildikleri karışımın fiziksel ve reolojik özelliklerini güçlendirmektedirler. Polimer katkılarıyla birlikte asfalt kaplamaların tekerlek izi, yorulma çatlaması, düşük sıcaklık çatlaması ve nem hasarı gibi bozulma problemlerine karşı direnci artmaktadır. SBS ve EVA gibi elastomerik ve plastomerik polimerler diğer polimerlere göre ön plana çıkmaktadır. Polimerlerin olumlu katkılarına rağmen bitüm ile aralarındaki uyumsuzluk kaynaklı depolama stabilitesi gibi problemler sebebiyle aranılan kusursuz performansa erişmede zorluklar çıkardığı araştırmalarla birlikte sunulmaktadır (Behnood & Gharehveran, 2019; Porto vd., 2019; İskender & Aksoy, 2021).

SBS ve EVA gibi polimerler karışımlarda yaygın bir kullanıma sahip olmalarına ve performans açısından olumlu sonuçlar vermelerine rağmen SBS polimeri mükemmeliyetten uzakta kalmaktadır. Bitüm ile uyumlarının o kadar da iyi olmayışı, depolama stabilitesi problemleri, hafif bileşenlerin yetersizliği durumunda ortaya çıkabilecek faz ayrışması, yüksek aromatik içeriği nedeniyle polistiren bloklarının şişerek yapıyı bozması ve yüksek maliyeti gibi problemlerin yanı sıra ısıya, oksidasyona ve ultraviyole ışınlara hassas hâle gelmesine sebep olacak kimyasal reaksiyonların meydana gelebilmesi SBS modifikasyonu için geçerli bazı olumsuz özellikler olarak ön plana çıkmaktadır (Zhu vd., 2014).

EVA ile modifikasyon işlemi bitümün bazı özelliklerini geliştirse bile plastomer yapısı nedeniyle bitümün elastik geri kazanımını yeterince geliştirememesi modifikasyonda sınırlayıcı etki yapmaktadır. Ayrıca EVA'nın vinil asetat içeriğine bağlı olan camsı geçiş sıcaklığı (T_g) bitümün düşük sıcaklık özelliklerini yeterince iyileştirmeye yetmemektedir. Sonuç olarak, EVA'nın bitümün düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirme kabiliyeti, özellikle yüksek EVA konsantrasyonlarında oldukça sınırlı kalmaktadır (Zhu vd., 2014).

Bitümün modifikasyonundaki bu problemlerden kaynaklı olarak polimerlerin yanında ikincil malzemelerin kullanımı fikri ortaya çıkmıştır. Polimer modifiyeli asfalt kaplamaların (PMA) negatif özelliklerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan malzemeler Tablo 13'te gösterilmiştir.

Tablo 13. PMA'nın negatif özelliklerini azaltmak için kullanılan yöntemler (Behnood & Gharehveran, 2019)

Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
İşlevselleştirme	Geliştirilmiş uyumluluk	- Yüksek maliyet - Bazı durumlarda sayılamazlık
Reaktif polimerler	- Uyumluluk - Geliştirilmiş yüksek sıcaklık özellikleri	- Jelleşme sorunları - Düşük sıcaklık özelliklerine etkisiz
Doygunluk	Isıya, oksidasyona ve ultraviyole ışınlar direnç	- Faz ayrıştırma sorunları - Yüksek maliyet
Sülfür volkanizasyonu	- Depolama stabilitesi - Yüksek sıcaklık özellikleri	- Sadece SBS gibi doymamış polimerler için - Oksidatif yaşlanmaya karşı hassas - Zayıf geri dönüşüm - Hidrojen sülfür salınımı - İnsan sağlığına ve çevreye olumsuz etki
Antioksidanlar	Oksidasyona direnç	Yüksek maliyet
Nanomalzemeler	- Yüksek sıcaklık özellikleri - Yorulma özellikleri - Bazı türleri için düşük sıcaklık performansında artış - Uyumluluk, yapıştırıcılık - Nem hasarında azalma - Mikro çatlaklarda azalma - Yaşlanma direnci	- Yüksek maliyet - Bazı türleri için düşük sıcaklık performansında azalma - Kolay toplanabilir ve nokta ayrışmasına neden olabilir
Kil mineralleri	- Depolama stabilitesi - Yaşlanma direnci - Yüksek sıcaklık özellikleri - Yorulma direnci - Nem hasarına direnç	- Düşük sıcaklık özellikleri için etkisiz - İdeal şekilde pul pul dökülmesi zor - Artan penetrasyon ve azalan yumuşama noktası sıcaklıkları
Biyo-yağlar ve biyo-polimerler	- Düşük maliyet, çevre dostu - Düşük sıcaklık özellikleri, düşük Tg, yaşlanma direnci - Yorulma ve termal çatlama direnci - Azaltılmış karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	Yüksek sıcaklık özellikleri, artan penetrasyon derecesi ve azalan yumuşama noktası üzerinde potansiyel olumsuz etkiler

İşlevselleştirme, PMA'daki asfalt ve polimer fazın uyumunu arttırmak için polimerlere bazı fonksiyonel grupların eklenmesiyle yapılmaktadır. Karışımda kullanılan polimerin mevcut sorunlarını azaltmak veya çözmek amacıyla yapılır. Bu işlem sayesinde reaktif polimerler gibi yeni polimer modifiye edicilerin elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Reaktif polimerler fonksiyonel grupları aracılığıyla asfalt ile bağ kurmaktadır. Polimer modifiye ediciler, asfalt modifiye ediciler ve asfalt ile geleneksel polimerler arasında uyumlaştırıcı olarak da kullanabilen reaktif polimerler karışımın mekanik davranışını, sıcaklık duyarlılığını ve depolama stabilitesine olumlu etkilerde bulunmaktadır. Etilen ile etkileşime sokularak elde edilen reaktif etilen terpolimerlerin PMA'da meydana gelebilecek faz ayrışma karşı etkili olabilmesi için az miktarda, yüksek polar yapılı olarak ve polimer asfalt arasında bağ oluşturarak kullanılması gerekir. Reaktif polimer ile asfalt modifikasyonu genellikle düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden bağlayıcı oksidasyonunu azaltıcı etkisi olabilmektedir.

Nanomalzemeler en az bir boyutu 1-100 nanometre arasında olan malzemelerdir. Asfalt bağlayıcılarda modifiye edici veya PMA'ya ek bileşen olarak katılması faz açısını azaltmak, asfalt bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklıklardaki reolojik özelliklerini geliştirmek ve kompleks kesme modülü arttırmak adına faydalı olduğu öne sürülmektedir. Ayrıca polimerlerin asfalt bağlayıcısındaki dağılımının homojen olmasına da etkide bulunabilen nanomalzemeler, kendilerinden istenen performansı sunabilmeleri için ihtiyaç doğrultusunda seçilerek uygulanmalıdır. Nanomalzemenin tipine, içeriğine, boyutuna, üretim sürecine ve birçok farklı faktöre bağlı olarak elde edilen sonuç değişkenlik göstermektedir. Çeşitli türleri düşük sıcaklıktaki çatlama direncini ve yüksek sıcaklıktaki performansı artırırken bazı türleri ise ultraviyole yaşlanması ve nem hasarının önlenmesi noktasında etkili olmaktadır. Karışımlarda solvent veya kuru karışım şeklinde uygulanmaktadırlar. Solvent yönteminde orta-yüksek sıcaklıkta düşük kesme hızlı karıştırıcı ile işlem gerçekleştirilirken kuru karışımda ise yüksek kesme kuvvetiyle birlikte katı polimer ve eritilmiş asfalt bağlayıcı yüksek sıcaklıklarda karıştırılmaktadır.

Kil mineralleri asfalt bağlayıcılara saf olarak katılabilecekleri gibi polimer ile modifiye edilmiş asfalt kaplamalara ek malzeme olarak da katılabilmektedirler. Hem makro hem de nano boyutları asfalt endüstrisinde kullanılabilen kil minerallerinin nano boyutlu versiyonları daha çok ilgi görmektedir. Tekerlek izi direnci, rijitlik ve viskozite gibi çeşitli yönlerden faydalı oldukları araştırmalarda belirtilse de yaşlanma direnci ve depolama stabilitesini artırma noktasında daha çok ön plana çıkmaktadırlar. Kil

minerallerinin özel geometrik şekilleri de bağlayıcıya oksijenin etki etmesini engelleyebilmekte ve yaşlanmayı geciktirebilmektedir.

Bitkisel yağlardan elde edilen biyo-polimerler düşük toksik içerikleri, erişilebilirliklerinin kolaylığı, çevre dostu oluşu ve ekonomik avantajlarıyla öne çıkmaktadırlar. Ayçiçek yağı, palm yağı, mısır yağı, zeytinyağı vb. yağlar örnek olarak verilebilir. Biyopolimerler doğal yağ kaynaklı olduklarında uzun yağ asidi zincirleri sayesinde esnek ve kauçuğumsu özellikler gösterebilmektedir. Biyo-yaglar doğrudan veya iki adımlı olarak asfalt bağlayıcıya eklenebilmektedir. İki adımlı olarak hazırlanan yöntemde asfalt bağlayıcı ortalama 125°C'ye biyo-yag ortalama 100°C'ye kadar ısıtılmaktadır. Sonraki adımda da 110-180°C kesme sıcaklıklarında, dakika başına 1000-4500 devirde, 20-60 dakika boyunca karıştırılmaktadır. Biyo-yaglar asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklık özellikleri ve viskozitesi üzerindeki etkileri sayesinde eskimiş asfalt bağlayıcıların gençleştirilmesi işleminde etkili modifiye ediciler olarak görülmektedirler (Behnood & Gharehveran, 2019).

4. SONUÇLAR

Bu tez konusunun amacı polimer modifikasyon türlerinin ve modifikasyon koşullarının değerlendirilmesidir. Bu bağlamda bu çalışmada aşağıdaki sonuçları çıkarmak olanaklıdır:

- Asfalt kaplamalarda ortaya çıkan tekerlek izi, su hasarı, deformasyon gibi performans problemlerinin çözülmesi ve önlenmesi noktasında modifikasyon işlemi ön plana çıkmaktadır.
- Modifikasyon işleminde farklı katkıların yer alırken, polimerlerin başlıca kullanıma sahip olduğu görülmektedir. Polietilen, Polipropilen, Polivinil-Klorid, Polistiren, Etilen-Vinil-Asetat, Stiren-Bütadien-Stiren, Etilen-Propilen-Dien termopolimer, Isobüten-Izopren kopolimer, Stiren-Bütadien-Rubber, Stiren-Izopren-Stiren, reçineler, fiberler gibi farklı polimer çeşitleri modifikasyon işlemine dâhil edilmektedir. Plastomerlerden EVA, elastomerlerden SBS en yaygın kullanılan polimer çeşitleri olarak ön plana çıkmaktadır.
- Elastomerlerin plastomerlere kıyasla yaşlanma direncinin daha düşük olmasına karşın yüksek sıcaklıklardaki hizmet performansı elastomerleri ön plana çıkarmaktadır.
- Polimerlerin bağ şekline göre performans farklılıkları ortaya çıkmaktadır. Radyal bağ şeklinin lineer bağ şekline göre stabilitesinin daha iyi olduğu ve daha iyi dağılım sağladığı değerlendirilmektedir.
- Polimer modifikasyonu istenen sonucu verme noktasında bitüm tipi, polimer tipi, polimer molekül ağırlığı ve içeriği, sıcaklık, karıştırma hızı ve süresi gibi parametrelerden doğrudan etkilendiği ve başarılı bir modifikasyon işlemi için bu parametrelere özen gösterilmesi gerektiği görülmektedir.
- Çalışmalarda SBS polimeri ön plana çıkmaktadır. Antioksidanlar, biyo-y yağlar, nanomalzemeler ve RAP gibi geri dönüştürülebilir malzemelerle SBS'nin performansı birliktelik etkisiyle artırılmaya çalışılırken, ekonomik ve çevresel bağlamda olumlu çözümler sunulmaktadır.

- Polimer modifikasyon teknolojisinde ECR'nin yeni bir yöntem olarak geliştiği ve eski yöntemlerin olumsuzluk algısını gidermeye yönelik eklemelerle geliştirilerek sunulduğu görülmektedir.
- Kauçuk modifikasyonlarının bitüm ile düşük uyumluluğuna karşın tekerlek izi direncini arttırdığı görülmektedir.
- Dünyadaki doğal kaynakların azalması ile alternatif yöntemlerin daha ilgi çekici olmaya başladığı ve başta polimer katkıları olmak üzere çeşitli geri dönüştürülebilir ve yenilenebilir katkı çeşitlerinin daha da yaygınlık kazanacağı ön görülmektedir.
- Polimer modifiye bitümlerin kullanım alanlarının geniş bir yelpazeye dağılması ve performans konusundaki etkinliğinin yanı sıra geleneksel karışım yöntemlerinden farklı olarak ılık karışım gibi yöntemlerin dâhiliyle birlikte sürdürülebilirlik konusunda da öne çıktığı görülmektedir.
- Yaygın olarak kullanılan SBS, EVA ve kauçuk malzemeler için yaklaşık olarak; katkı oranı %2-6, bitüm sınıfı 50/70, karıştırma sıcaklığı 180°C, karıştırma hızı 500-5000 devir/dakika, karıştırma süresi 30-120 dakika parametrelerinin seçilmesi durumunda modifikasyon işleminden elde edilecek performansın kabul edilebilir başarı bölgesinde kaldığı değerlendirilmektedir.
- Bu çalışmada yer verilen araştırmalardan elde edilen veriler göz önünde bulundurularak daha spesifik bir yaklaşım sunulduğunda ve ortaya çıkan grafikler incelendiğinde; SBS türü katkı ve %5'lik katkı içeriğinin, bitüm tipi olarak 50/70 penetrasyonlu bitümün, 180°C karıştırma sıcaklığının, 3000 ve 5000 devir/dakika karıştırma hızının ve 60 dakika karıştırma süresinin en yaygın kullanıma sahip olduğu görülmektedir.

5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada bu tez konusu ile çalışma yapmak isteyen araştırmacılara ve uygulayıcılara iletmek istenen öneriler aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- Asfalt kaplamalarda polimer modifiye bitüm uygulamasının birçok yönden olumlu katkı sağlayarak gerek asfaltın performansını gerek uygulamanın ekonomik yönünü güçlendirdiği görülmesiyle birlikte hâlâ daha stabilite, uyumluluk ve performans açısından gelişime açık olduğu görülmektedir. Bu dezavantajların giderilmesi noktasında daha ekonomik ve etkili yöntemlerin tespiti için araştırmalar yapılabilir.
- Sürdürülebilirliğin dünya genelindeki önemi göz önüne alındığında çeşitli atık polimer malzemelerin yeniden işleme katılarak polimer modifiye bitüm elde edilmesi durumundaki performans parametrelerine dair araştırmalar yapılabilir.
- Modifikasyon işleminde kullanılmak üzere su ve biyo bazlı, geri dönüştürülebilir, kendi kendine iyileşebilen yöntemlerin de sürdürülebilirlik açısından alternatif yöntemler olarak değerlendirilmesi mümkündür.

6. KAYNAKLAR

- Aksoy, A., & Iskender, E. (2008). Creep in conventional and modified asphalt mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 161(4), 185–195.
- Aksoy, A., İskender, E., Oruç, Ş. & Özen, H. (2012). SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkıların Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması. *İMO Teknik Dergi*, 380, 5967-5986.
- Alataş, T., & Yılmaz, M. (2013). Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 42, 161–167.
- Alkan, M. A., Komut, M. (2023). *Karayolları Esnek Üstyapılar Rehabilitasyon Tasarım Rehberi*. Ankara. KGM, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.
- Alnadish, A.M., Singh, N.S.S. & Alawag, A.M. (2023). Applications of Synthetic, Natural, and Waste Fibers in Asphalt Mixtures: A Citation-Based Review. *Polymers*, 15, 1004.
- Alqudah, O. (2016). *Antioksidan Katkıların Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri ve Yaşlanma Davranışları Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Al-Sabaei, A., Yussof, N. I. M., Napiyah, M., & Sutanto, M. (2019). A review of using natural rubber in the modification of bitumen and asphalt mixtures used for road construction. *Jurnal Teknologi*, 81(6), 81-88.
- Altuntaş, H. D. (2023). *Nanokil/SBS/Bitüm Nanokompozit İçin En Uygun Modifikasyon Koşullarının Geleneksel ve Superpave Bağlayıcı Deneyleri ile Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Araz, N.G. (2022). *Asfalt Kaplamalarda Bitüm Yüzdesine ve Sıcaklığa Bağlı Olarak Marshall Deneyi Parametrelerinin İncelenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Ayyıldız, D., İskender, E., & Aksoy, A. (2021). Taş mastik asfalt karışımlarda SBS/nanokil/bitüm nano-kompozitler için optimum bileşim oranının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(4), 1847-1862.
- Badre, S., Goncalves, C. C., Norinaga, K., Gustavson, G. & Mullins, O. C. (2006). Molecular size and weight of asphaltene and asphaltene solubility fractions from coals, crude oils and bitumen. *Fuel*, 85(1), 1–11.
- Behnood, A., & Modiri Gharehveran, M. (2019). Morphology, Rheology and Physical Properties of Polymer-Modified Asphalt Binders. *European Polymer Journal*, 112, 766-791.

- Bostancıoğlu, M. (2012). *Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler ile Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Chen S., Jin E., Xu G., Zhuo S. & Chen X. (2023). Factors Influencing the Low-Temperature Properties of Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Based on Orthogonal Tests. *Polymers*, 15(1), 52.
- Chen, Z., Zhang, H., Duan, H., & Wu, C. (2020). Determination of time-temperature superposition relationship of SBS modified asphalt based on special rheological phenomenon caused by SBS-formed structure in asphalt matrix. *Construction and Building Materials*, 260, 119835.
- Çavdar, E. (2019). *Bitkisel Atık Yağ Katkısının SBS Modifiyeli Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Daly, W. H., Negulescu, I. & Balamurugan, S. S. (2019). Chemical Characterization of Asphalts Related to Their Performance. *Louisiana Transportation Research Center Report Project Number 12-3B*, 560.
- Diab, A., Pais, J., Chen, S., Gupta, A., Li, X., You, L. & Hasan, M. R. M. (2022). High, intermediate and low temperature performance appraisal of elastomeric and plastomeric asphalt binders and mixes. *Journal of Elastomers & Plastics*, 54(2), 225-246.
- Diab, A., You, Z., Adhikari, S., You, L., Li, X., & El-Shafie, M. (2020). Investigating the mechanisms of rubber, styrene-butadiene-styrene and ethylene-vinyl acetate in asphalt binder based on rheological and distress-related tests. *Construction and Building Materials*, 262, 120744.
- Dumanlı, O. (2022). *Polimer Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların Modifikasyon Prosedüründe Karıştırma Parametrelerinin Etkisinin Araştırılması*. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa.
- Erkuş, Y., Kök, B.V. & Yılmaz, M. (2021). Doğal Asfalt ve SBS Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 81-90.
- Fricke D. (2024, Ocak 10). *Benefits of Polymer Mix Modifiers to Asphalt*.: <https://blog.chasecorp.com/bridge-and-highway/benefits-of-polymer-mix-modifiers-to-asphalt> adresinden alındı.
- Geçkil, T., Aksağan, Z. & İnce, C.B. (2021). Atık Lastiklerden Elde Edilen Siyah Karbonun Asfaltın İşlenebilirlik Özelliklerine Etkisi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, 294-306.
- Ghani, U., Zamin, B., Tariq Bashir, M., Ahmad, M., Sabri, M.M.S. & Keawsawasvong, S. (2022). Comprehensive Study on the Performance of Waste HDPE and LDPE Modified Asphalt Binders for Construction of Asphalt Pavements Application. *Polymers*, 14, 3673.

- Gökalp, İ., Çetin, H. M., Özinal, Y., Gündoğan, H. & Uz, V.E. (2019). Polimer Modifiye Bitüm Modifikasyonuna Etki Eden Parametreler Üzerine Bir Literatür Araştırması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 954-964.
- Haggam, R. A., Ibrahim, I. M., Abdelatif, M. E., Abd Elrhman, A. E. L. M. & El-Kholy, S. A. (2014). Improvement of Asphalt Properties Using Polymethyl Methacrylate. *Open Journal of Organic Polymer Materials*, 4, 43-54.
- Han D., Hu G. & Zhang J. (2023). Study on Anti-Aging Performance Enhancement of Polymer Modified Asphalt with High Linear SBS Content. *Polymers*, 15(2), 256.
- He, W., Zhao, Z., Yuan, J. & Xiao, F. (2023). Recent development of ethylene–vinyl acetate modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 363, 129800.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K. ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı. (2001). *Asfalt ve Uygulamaları*. İstanbul. İsfalt Bilimsel Yayın.
- İskender, E., Aksoy, A., & Ozen, H. (2012). Indirect performance comparison for styrene–butadiene–styrene polymer and fatty amine anti-strip modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 30, 117–124.
- İşıkyakar, G. (2009). *Polimer Modifiye Asfaltların Reolojik ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesinde Fluoresan Mikroskopi Yönteminin Kullanımı*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- İskender, C. (2023). *Nanokil-SBS/EVA-Bitüm Modifikasyonunda Optimum Modifikasyon Parametrelerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- İskender, E. (2008). *Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- İskender, E. & Aksoy, A. (2021). Nanokil/Polimer/Bitüm Nanokompozit Hazırlama Yönteminin Asfalt Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Teknik Dergi*, 616, 10885-10906.
- Karakaş, A.S. (2014). *Bitümlü Sıcak Karışımların Trafik Etkisi Altında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- KGM. (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*. Ankara. Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Komut, M., Yüknü, K., Öztürk, T. (2021). *Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı*. Ankara. KGM, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.

- Koopmans, R., Vanderlinden, R. & Vansant, E. (1982). Reactivity of Ethylene Vinyl-Acetate Copolymers a Critical-Evaluation of the Comprehensive Patent Literature on the Acetoxy-Hydroxide Transformation of Ethylene Vinyl-Acetate Copolymers, *Polymer Engineering & Science*, 22, 645–652.
- Korkut, S., & Kocaefe, D. (2009). Isıl İşlemin Odun Özellikleri Üzerine Etkisi. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 5(2), 11-34.
- Korzay, B., Aksoy, A., & Tekin, M. E. (2023). Sönmüş Kireç-Diatomit-SBS Katkılarıyla Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplamaların Performans Analizi. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 34(6), 53-79.
- Kök, B. V., Yılmaz, M. & Kuloğlu, N. (2011). Asfaltit ve SBS Modifiyeli Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 14(3), 193-197.
- Kutluhan, S., Açar, E. (2009). Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunu Etkileyen Faktörler ve Azaltmaya Yönelik Öneriler. *İtüdergisi/d*, 8(6), 179-191.
- Li, J., Zhu, L., Yan, X., Xin, C., Yu, M. & Cheng, D. (2022). Preparation and Macro-Micro Properties of SBS/REOB Modified-Rejuvenated Asphalt. *Polymers*, 14, 5071.
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Wang, H., & Sun, W. (2019). Phase field simulation and microscopic observation of phase separation and thermal stability of polymer modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 204, 132–143.
- Lin, P., Liu, X., Ren, S., Xu, J., Li, Y. & Li, M. (2023). Effects of Bitumen Thickness on the Aging Behavior of High-Content Polymer-Modified Asphalt Mixture. *Polymers*, 15, 2325.
- Lu, X., & Isacsson, U. (2000). Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. *Polymer Testing*, 20(1), 77–86.
- Orhan, F. (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. Ankara. KGM, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.
- Özdemir Kaya, D., Topal, A. & Şengöz, B. (2020). The Influences of Altering The Mixing Conditions on The Properties of Polymer Modified Bitumen: An Overview. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(2), 1105-1116.
- Özen, H., Aksoy, A., Tayfur, S., & Çelik, F. (2008). Laboratory performance comparison of the elastomer-modified asphalt mixtures. *Building and Environment*, 43(7), 1270–1277.
- 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.
- Rath, P., Meister, J., Jahangiri, B. & Buttlar, W. (2022). Evaluation of the Effects of Engineered Crumb Rubber (ECR) on Asphalt Mixture Characteristics. *Journal of Testing and Evaluation*, 50(2), 848-64.

- Read, J., Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook 5th Edition*. London. Thomas Telford Publishing.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. Lanham, MD. National Asphalt Pavement Association Education Foundation.
- Saboo, N., Kumar, R., Kumar, P. & Gupta, A. (2018). Ranking the Rheological Response of SBS-and EVA-Modified Bitumen Using MSCR and LAS Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018165.
- Santagata, E., Baglieri O., Dalmazzo D. & Tsantilis L. (2013). Evaluation of the anti-rutting potential of polymer-modified binders by means of creep-recovery shear tests. *Materials and Structures*, 46, 1673–1682.
- Sarışın, E., Yalçın, E., & Öner, J. (2020). Hibrit polimerlerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 201-212.
- Sengoz, B., Bagayogo, L., Oner, J., & Topal, A. (2017). Investigation of rheological properties of transparent bitumen. *Construction and Building Materials*, 154, 1105–1111.
- Sengul, C. E., Oruc, S., Iskender, E., & Aksoy, A. (2013). Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance. *Construction and Building Materials*, 41, 777–783.
- Singh, M., Kumar, P., & Anupam, A. K. (2016). Effect of type of aggregate on permanent deformation of bituminous concrete mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 17(2), 417–433.
- Singh, D., & Sawant, D. (2016). Understanding effects of RAP on rheological performance and chemical composition of SBS modified binder using series of laboratory tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(3), 178–189.
- Şanlıer, İ. (2018). *Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kapsamında Taş Mastik Asfalt (TMA) Uygulamaları, Performanslarının Karşılaştırılması ve Maliyet Analizi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Tan, Y., Guo, M., Cao, L., & Zhang, L. (2013). Performance optimization of composite modified asphalt sealant based on rheological behavior. *Construction and Building Materials*, 47, 799–805.
- Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A. (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21(2), 328–337.
- Tunç, A. (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*. Ankara. Asil Yayınevi.
- Tunç, A. (2004). *Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları*. Ankara. Asil Yayınevi.

- Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Ankara. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Uğurlu, N. (2019). *Kağıt Üretimi Atık Maddesi Olan Magnezyum Lignosülfonatın Asfalt Modifikasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt.
- Umar, F., Açar, E. (1991). *Yol Üstyapısı*. İstanbul. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası.
- Uncu, D. (2017). *Polimer Modifiye Bitüm Özelliklerinin Nanomalzemeler Kullanılarak İyileştirilmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- URL-1. (2023, Ekim 24). Theconstructor: <https://theconstructor.org/transportation/corrugation-shoving-flexible-pavements/30886/> adresinden alındı.
- URL-2. (2023, Ekim 24). Insapedia: <https://insapedia.com/asfalt-yollarda-meydana-gelen-kusur-ve-hasar-cesitleri/> adresinden alındı.
- URL-3. (2023, Ekim 25). Pavementinteractive: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/pavement-tests/flexural-fatigue/> adresinden alındı.
- URL-4. (2023, Eylül 5). Insapedia: <https://insapedia.com/bitumlu-sicak-karisimlarin-fiziksel-ve-mekanik-ozellikleri/> adresinden alındı.
- URL-5. (2023, Eylül 12). Asmüd: http://www.asmud.org.tr/Asfalt_Karisimleri.asp adresinden alındı.
- URL-6. (2024, Ocak 11). İstanbulteknik: <https://www.istanbulteknik.com/tr/urundetay/22/polimer-modifiye-bitum-katkisi-sbs> adresinden alındı.
- URL-7. (2024, Ocak 11). Grandviewresearch: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/styrene-butadiene-styrene-market-report> adresinden alındı.
- Vahapoğlu, V. (2013). Kauçuk Türü Malzemeler: Sınıflandırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 25-34.
- Vamegh M., & Ameri, M. (2021). Rutting performance of road pavement asphalt binders modified by polymers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 174-4, 206-213.
- Wang, X., Liu, J., Wang, Z., Jing, H. & Yang, B. (2022). Investigations on Adhesion Characteristics between High-Content Rubberized Asphalt and Aggregates. *Polymers*, 14, 5474.
- Wu, B., Luo, C., Pei, Z., Chen, C., Xia, J. & Xiao, P. (2021). Evaluation of the Aging of Styrene-Butadiene- Styrene Modified Asphalt Binder with Different Polymer Additives. *Materials*, 14, 5715.

- Xu G., Yu Y., Yang J., Wang T., Kong P. & Chen X. (2021). Rheological and Aging Properties of Composite Modified Bitumen by Styrene–Butadiene–Styrene and Desulfurized Crumb Rubber. *Polymers*, 13(18), 3037.
- Yan, C., Yuan, L., Yu, X., Ji, S. & Zhou, Zhengfeng. (2022). Characterizing the fatigue resistance of multiple modified asphalts using time sweep test, LAS test and elastic recovery test. *Construction and Building Materials*, 322, 125806.
- Yılmaz, B. (2016). *Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Yildirim, Y. (2007). Polymer Modified Asphalt Binders, *Construction and Building Materials*, 21(1), 66-72.
- Yuan, D., Xing, C., Jiang, W., Xiao, J., Wu, W., Li, P. & Li, Y. (2022). Viscoelastic Behavior and Phase Structure of High-Content SBS-Modified Asphalt. *Polymers*, 14, 2476.
- Zhao Z., Wang L., Wang W. & Shangguan X. (2022). Experimental Investigation of the High-Temperature Rheological and Aging Resistance Properties of Activated Crumb Rubber Powder/SBS Composite-Modified Asphalt. *Polymers*, 14(9), 1905.
- Zhang, M., Wang, C., Luo, A., Liu, Z., & Zhang, X. (2019). Molecular dynamics simulation on thermophysics of paraffin/EVA/graphene nanocomposites as phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 114639.
- Zhu, J., & Kringos, N. (2015). Towards the development of a viscoelastic model for phase separation in polymer-modified bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup1), 39–49.
- Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18–38
- Zhuang, C., Li, N., Zhao, W., & Cai, C. (2017). Effects of SBS Content on the Performance of Modified Asphalt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 216, 012028.

ÖZGEÇMİŞ

Sertaç POLAT, İlköğrenimini Beşirli İMKB İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2016 yılında Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2016-2020 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2020 yılında bu bölümden mezun oldu. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

