

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASFALT KAPLAMALARDA KIRINTI KAUÇUK KATKISININ
MARSHALL DENEYİ PARAMETRELERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Neslihan Enife CECANPINAR

EKİM 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASFALT KAPLAMALARDA KIRINTI KAÜÇUK KATKISININ
MARSHALL DENEYİ PARAMETRELERİNE ETKİSİ

Neslihan Enife CECANPINAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
" İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 /09 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 22 /10 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Atakan AKSOY

Trabzon 2025

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Neslihan Enife CECANPINAR Tarafından Hazırlanan**

**ASFALT KAPLAMALARDA KIRINTI KAÜÇUK KATKISININ
MARSHALL DENEYİ PARAMETRELERİNE ETKİSİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09 / 10 / 2025 gün ve 2123 sayılı
EYK kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Atakan AKSOY

Üye : Prof. Dr. Erol İSKENDER

Üye : Prof. Dr. Ufuk KIRBAŞ

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

“Asfalt Kaplamalarda Kırıntı Kauçuk Katkısının Marshall Deneyi Parametrelerine Etkisi” isimli bu Tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan Danışman Hocam Prof. Dr. Atakan Aksoy’a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Havva MERSİNLİOĞLU ve Yusuf MERSİNLİOĞLU’ya ve hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda arkamda olan eşim Ahmet CECANPINAR’a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Neslihan Enife CECANPINAR

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Asfalt Kaplamalarda Kırıntı Kauçuk Katkısının Marshall Deneyi Parametrelerine Etkisi” başlıklı bu çalışmayı başından sonuna kadar danışmanım Prof. Dr. Atakan AKSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, örnekleri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlara 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. 22/10/2025

Neslihan Enife CECANPINAR

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. Konunun Özgeçmişi	2
1.3. Çalışmanın Amacı	10
1.4. Karayolu Üstyapısı ve Türleri	10
1.4.1. Rijit Üstyapılar	11
1.4.2. Yarı Rijit Üstyapılar.....	12
1.4.3. Esnek Üstyapılar	12
1.5. Asfalt Kaplama Tabakası	13
1.5.1. Asfalt Kaplama Tabakası Bölümleri.....	13
1.5.2. Asfalt Kaplama Tabakasının Özellikleri.....	13
1.5.3. Asfalt Kaplama Tabakasının Kullanım Alanları.....	14
1.5.4. Asfalt Kaplamanın Özellikleri	14
1.6. Asfalt Karışımlarında Kullanılan Katkı Maddeleri ve Genel Etkileri.....	15
1.7. Öğütülmüş Kırıntı Kauçuk ve Özellikleri	16
1.7.1. Özellikleri.....	17
1.7.2. Asfalt Karışımlarına Katma Teknikleri, Avantajları ve Dezavantajları	17
1.7.3. Performans Sonuçları.....	19
1.8. Kırıntı Kauçuk Katkılı Asfalt Üzerine Yapılmış Çalışmalar	20
1.9. Sürdürülebilirlik, Çevresel ve Ekonomik Yaklaşımlar	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	23
2.1. Malzeme ve Yöntem	23

2.1.1. Kullanılan Malzemeler.....	23
2.1.2. Elek Analizi.....	26
2.1.3. Marshall deneyi.....	27
2.2. Karışım Tasarımı.....	29
3. BULGULAR.....	35
4. TARTIŞMA.....	58
5. SONUÇLAR.....	60
6. ÖNERİLER.....	62
7. KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ASFALT KAPLAMALARDA KIRINTI KAUÇUK KATKISININ MARSHALL DENEYİ PARAMETRELERINE ETKİSİ

Neslihan Enife CECANPINAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2025, 70 Sayfa

Bu çalışmada, %8-%10-%12 olarak seçilen farklı yüzdelerdeki kırıntı kauçuk katkısı ile oluşturulan asfalt kaplama numunelerine, Marshall Deneyi (TS EN 3720/12697, AASHTO T 245, ASTM D 1559) yapılarak Marshall parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Stabilite, akma, stabilite/akma oranları irdelenmektedir. Özellikle çok sayıda özdeş örnek hazırlanarak özdeş örnekler arasındaki heterojenlik homojenlik kavramının değerlendirilmesine yönelik yaklaşım getirilmiştir. Farklı ve kabul edilebilen kauçuk katkı oranlarında, özellikle çok sayıdaki örneğin hazırlanma amacı, özdeş örneklerin homojen olarak hazırlanabilmesine katkı ve bu yönle kalite kontrol süreçlerine yapılabilecek katkının değerlendirilmesi olmaktadır. Aşınma Tip 1 karışımı için toplam 54 adet briket üretilmiştir. Her bir seçenekte 18 adet briket üretilmiştir. İlk 18 briket %8, ikinci 18 briket %10 ve son olarak 18 brikette %12 oranında hazırlanmıştır. 54 brikete Marshall Testi yapıp stabilite, akma, stabilite/akma değerlendirmeleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asfalt kaplama, Kırıntı Kauçuk, Marshall Deneyi, Stabilite, Akma, Stabilite/Akma, Standart Sapma ve Varyans Analizi

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF CRUMB RUBBER ADDITIVE ON MARSHALL TEST PARAMETERS IN ASPHALT PAVEMENTS

Neslihan Enife CECANPINAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2025, 70 Pages

In this study, the Marshall Test (TS EN 3720/12697, AASHTO T 245, ASTM D 1559) was applied to asphalt pavement samples prepared with different percentages of crumb rubber additive selected as 8%, 10%, and 12% to investigate their effects on Marshall parameters. Stability, flow, and stability/flow ratios were examined. An approach was developed to evaluate the concept of heterogeneity and homogeneity among identical samples by preparing a large number of samples. The purpose of preparing a large number of samples with different and acceptable rubber additive ratios was to contribute to the homogeneous preparation of identical samples and to evaluate the contribution that could be made to quality control processes in this respect. A total of 54 briquettes were produced for the Wearing Type 1 mixture. 18 briquettes were produced for each option. The first 18 briquettes were prepared at 8%, the second 18 at 10%, and the last 18 briquettes at 12%. Marshall Tests were performed on 54 bricks, and stability, yield, and stability/yield evaluations were performed.

Key Words: Asphalt Pavement, Crumb Rubber, Marshall Test, Stability, Yield, Stability/Yield, Standard Deviation, And Variance Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Karışım performans diyagramı	3
Şekil 2. Marshall Stabilite diyagramı.....	7
Şekil 3. Ton başına maliyet karşılaştırması	9
Şekil 4. Yol üstyapısı tabakaları ve türleri.....	11
Şekil 5. Üstyapı kesiti	12
Şekil 6. Öğütülmüş kırıntı kauçuk görünümü.....	17
Şekil 7. Kırıntı kauçuğun asfalt karışımlarına katma teknikleri	18
Şekil 8. Katkı oranına göre Marshall stabilitesindeki değişim	21
Şekil 9. Normal asfalt ve kauçuk katkılı asfaltın çevresel ve ekonomik etkileri	22
Şekil 10. Karışım gradasyon eğrisi	25
Şekil 11. Elek analizi deney seti	27
Şekil 12. Malzemenin elendikten sonra boyutlarına göre tepsilenmesi.....	29
Şekil 13. Etüvde bekletilen agregalar	30
Şekil 14. Marshall karışımı için agrega ölçümü	30
Şekil 15. Belirlenen oranda agregaya kırıntı kauçuk eklenmesi.....	31
Şekil 16. Etüvde bekletilen kalıp ve mikser kabı.....	31
Şekil 17. Kalıba dökülen karışım.....	31
Şekil 18. Numuneye yağlı kâğıt koyulması	32
Şekil 19. Asfalt sıkıştırma tokmağıyla vuruş yapılması ve numunelerin sıkıştırılması.....	32
Şekil 20. Numunelerin kalıptan çıkarılması.....	33
Şekil 21. 30 dakika 60 °C sıcaklıkta bekletilen numuneler.....	33
Şekil 22. Marshall test cihazında numune kırılması	33
Şekil 23. %8 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite değerleri grafiği.....	37
Şekil 24. %8 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin akma değerleri grafiği.....	38
Şekil 25. %10 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite değerleri grafiği.....	39
Şekil 26. %10 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin akma değerleri grafiği.....	40
Şekil 27. %12 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite değerleri grafiği.....	41

Şekil 28.	%12 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin akma değerleri grafiği.....	42
Şekil 29.	%8 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite/akma değerleri grafiği	43
Şekil 30.	%10 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite/akma değerleri grafiği	44
Şekil 31.	%12 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite/akma değerleri grafiği	45
Şekil 32.	Farklı kırıntı kauçuk oranlarında ortalama stabilite/akma değerlerinin standart sapma grafiği	46
Şekil 33.	%10 Kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	47
Şekil 34.	%10 Kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	48
Şekil 35.	%12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	50
Şekil 36.	%12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	51
Şekil 37.	%12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%10 kırıntı kauçuk referanslı).....	53
Şekil 38.	%12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	54
Şekil 39.	Farklı kırıntı kauçuk oranlarında ortalama yük ve akma değerleri grafiği	56

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Marshall test sonuçları.....	6
Tablo 2. İnce agrega özellikleri.....	24
Tablo 3. Kaba agrega özellikleri	24
Tablo 4. Agrega kullanım oranları ve karışım gradasyonu.....	24
Tablo 5. Bitümlü bağlayıcı özellikleri	25
Tablo 6. Marshal biriket karışım oranları (1150gr. için)	25
Tablo 7. Ögütülmüş kırıntı kauçuk özellikleri.....	26
Tablo 8. Marshall test sonuçları.....	36
Tablo 9. %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	47
Tablo 10. %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	49
Tablo 11. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	50
Tablo 12. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı).....	52
Tablo 13. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%10 kırıntı kauçuk referanslı).....	53
Tablo 14. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%10 kırıntı kauçuk referanslı).....	55
Tablo 15. Farklı kırıntı kauçuk oranlarında ortalama yük ve akma değerleri grafiği.....	56

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

VMA	: Agregalar Arası Boşluk
VIM	: Boşluk Oranı
VFA	: Asfalt ile dolu boşluk oranı
CR	: Kırıntı Kauçuk
MQ	: Marshall Oranı
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
TMA	: Taş Mastik Asfalt
PMA	: Polimer Modifiyeli Asfalt
KGM	: Karayolları Genel müdürlüğü
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
BN	: Briket Numarası
CRMA	: Kırıntı Kauçukla Modifiye Edilmiş Asfalt Karışımı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelişen ve değişen dünyada, ilerleyen teknolojinin ortaya çıkardığı çevre kirliliği ve yol deformasyonları devletleri atık malzemeleri değerlendirme yoluna sevk etmiştir. Dünya çapında her yıl milyarlarca hurda lastik çöpe atılmaktadır. Ömrünü tamamlamış lastiklerin durumu ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Çoğu ülkede depolara atılan hurda lastikler önemli bir küresel sorun haline gelmiştir. Depolara atılan hurda lastiklerin çevresel riski fazla olduğu için bunları geri dönüştürmek akla gelen ilk çözümlerdendir. Çünkü hurda lastikler önemli bir hammadde kaynağıdır. Hem çevresel faktörlerden hem de kullanım açısından oldukça faydalı olacağından bu atıkları geri dönüştürme yoluna gidilmiştir (Çetin, 2013; Rath vd., 2022).

Son yıllarda, asfalt karışımlarında çevre dostu ve sürdürülebilir malzemelerin kullanımı üzerine yapılan araştırmalar artmıştır. Kırıntı kauçuk, atık lastiklerin geri dönüşümüyle elde edilen ve asfalt karışımlarında modifiye edici olarak kullanılan önemli bir katkı maddesidir. Kırıntı kauçuğun asfaltın mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri, çeşitli oranlarda ve farklı deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Özellikle Marshall Testi, bu etkilerin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Almusavi, Abdulrahman, Shakhan & Doğaroğlu, 2020).

Karayollarının çoğu performans etkilerinden dolayı bitümlü kaplama ile yapılmaktadır. 1990 'lı yıllardan beri modifiye bitümlü bağlayıcıların kullanımı sağladığı avantajlardan dolayı tercih edilmektedir. Otoyolların yapımının yanında kullanımından kaynaklanan deformasyonların en aza indirgenmesi hem maliyet açısından hem de sürdürülebilirliği açısından amaçlanmıştır. Bu sebeple araştırmacılar hurda lastiklerin asfalt bağlayıcılara geri dönüşebileceğini ve elde edilen ürünün asfalt kaplamalara performans açısından fayda sağladığını keşfetmişlerdir. Çeşitli projeler hurda lastiklerden elde edilen kırıntı kauçuğun (CR) yollarda geleneksel inşaat malzemelerinin yerine kullanılabileceğini göstermektedir. Asfalt kaplama endüstrisi, kaplama tasarımlarına kırıntı kauçuk eklemenin sürüş performansı açısından faydalı olacağını ve yol ömrünü uzatacağını kabul etmektedir.

Kırıntı kauçuk asfalt kaplamaları hem daha esnek hale getirir hem de daha sürdürülebilir olmasını sağlar (Poulikakos vd., 2022).

Bu nedenle asfalt karışımına kauçuk eklenmesi yolları araştırılmış ve ıslak ve kuru proses olarak iki yol geliştirilmiştir. Islak proses, kırıntı kauçuğun (CR) nin sıvı bitüme eklendiği işlemdir. Bu işlem iyi bir performans vermiştir ancak bazı sorunlar ortaya çıkarmıştır. Bunlar kırıntı kauçuğu ekleme ve depolama sorunlarıdır. Ekleme aşamasında CR nin yerleşmesi için sürekli çalkalanmanın gerekmesi ve bunun modifiye edilmiş asfalt karışımını depolamada zorluk çıkarması bunlardan birkaçıdır. Diğer yöntem olan kuru proses ise lojistik kolaylığı ve özel ekipman ihtiyacının az olması nedeniyle tercih sebebidir (Presti, 2013).

Günümüzde, kırıntı kauçukla modifiye edilmiş asfalt karışımı (CRMA), asfaltın hem gözenekli hem de düşük hava boşluklu üretilmesini sağlar. Bu da kauçuk ile birlikte kaplamanın düşük gürültülü olmasını sağlar. Kaplamada gürültünün azaltılmasının mekanik performansı olumsuz olarak etkileyebileceğide unutulmamalıdır. Burada kullanılan CR miktarı önem taşımaktadır (El-Ashwah & Abdelrahman, 2024).

Asfaltın sürdürülebilirliğine kırıntı kauçuk önemli ölçüde katkı sağlar. Bu da Karayolu taşımacılığına ve çevreye olumlu etki yapar. Günümüzde yolaltıyapısı üzerindeki ağır yükler katkı maddeli kaplamalara talebi arttırmıştır. Son araştırmalar kırıntı kauçuk kullanılarak modifiye edilen asfalt karışımlarının çevresel faydalarının yanında polimer ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarına göre maliyetide azalttığını göstermiştir (Poulikakos vd., 2022; Ghani vd., 2024).

Bu tez çalışması, üç farklı kırıntı kauçuk oranının (%8, %10, %12) Marshall testi sonuçları üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemeyi ve çevresel ile ekonomik faydaları birlikte değerlendirerek literatürde ki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Böylece, hem mühendislik uygulamalarına hem de sürdürülebilir yol yapım politikalarına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

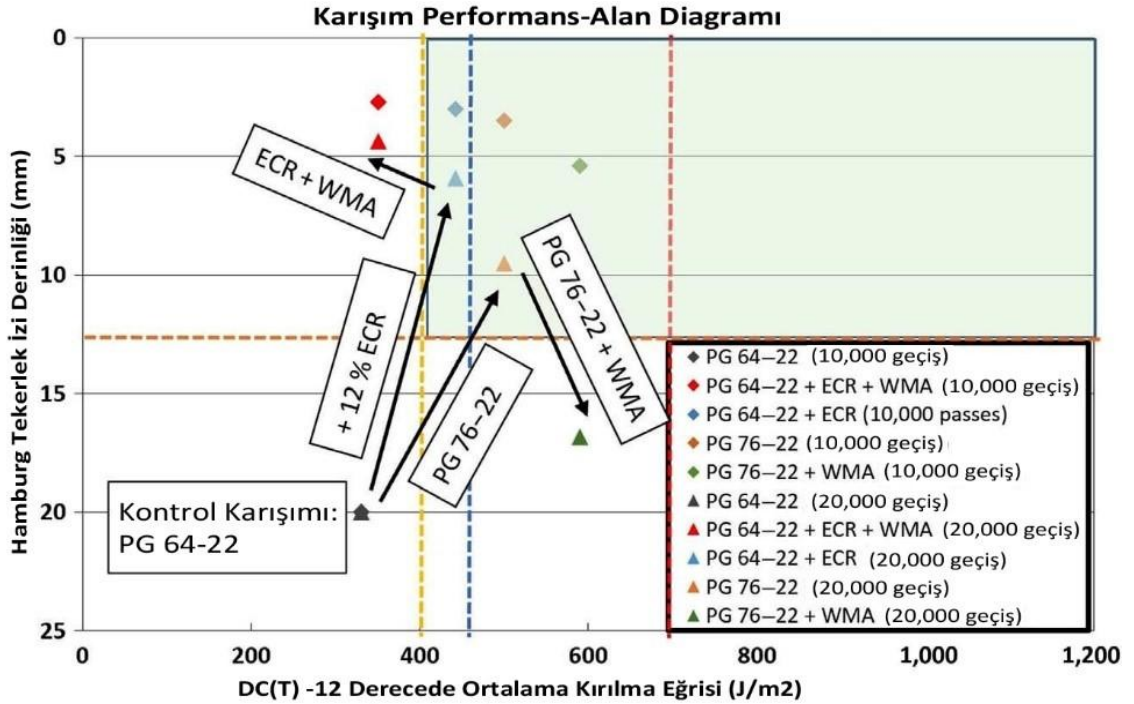
1.2. Konunun Özgeçmişi

Rath vd., (2021) araştırmalarında yoğun dereceli asfalt karışımlarının kuru proses yoluyla kırıntı kauçuk ile modifikasyonunun etkileri incelemişlerdir. Kırıntı kauçuk katkılı karışımları, modifiye edilmemiş ve polimer modifiye edilmiş karışımlarla bazı açılardan karşılaştırılmıştır. Bulgular, kırıntı kauçuk katkılı karışımların tekerlek izi ve çatlamaya karşı

direnci büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Bu da kırıntı kauçuk katkıli kaplamalarının daha uzun hizmet ömürlü olacağını göstermiştir. Karışımın daha düşük sıcaklıklarda çalışmasını ve sıkıştırılmasını sağlamak amacıyla WMA katkısı maliyetinden nedeniyle kırıntı kauçuk modifikasyonu ile ilave karışım maliyeti tasarrufu sağlanabilir.

Bu çalışmada kırıntı kauçuk ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının tekerlek izi direncinde belirgin bir artış sağladığı ortaya konulmuştur. Kırıntı kauçuk katkıli karışımlar, polimer modifiye kaplamalara kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Bununla birlikte, polimer modifikasyonunda benzer şekilde tekerlek izi direncine olumlu etkileri olduğu ancak bu etkinin kırıntı kauçuğa oranla daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Literatürde de belirtildiği üzere, farklı karışım sistemlerinde kullanılan modifikasyon yöntemleri farklı performans sonuçları doğurabilmektedir (Ghani vd., 2024; Rath vd., 2022).

Şekil 1’de görüldüğü gibi, modifikasyon yapılmamış (konvansiyonel) asfalt karışımları en düşük tekerlek izi direncine sahiptir. Buna karşılık, kırıntı kauçuk katkıli karışımlar tekerlek izi direncini önemli ölçüde artırarak hem çatlama direncini hem de tekerlek izi kriterlerini karşılamaktadır. Bu durum, kırıntı kauçuk ile modifiye edilmiş asfalt kaplamaların hizmet ömrünü uzatma potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır (Almusawi, Abdulrahman, Shakhan & Doğaroğlu, 2020).



Şekil 1. Karışım performans diyagramı (Ghani vd., 2024)

Poulidakos vd., (2020), kuru proses kullanılarak kırıntı kauçuk ile modifiye edilmiş altı karışım yapmışlar ve bunların üzerinde labaratuvar testleri yapmışlardır. Üretilen karışımlar, hacimsel özellikleri su hassasiyeti ve tekerlek izi değerleri bakımından yeterli bulunmuştur. Elde edilen tüm sonuçlar hem kırıntı kauçuk katkılı karışımlar için hem de referans polimer karışımlar için kabul edilebilir değerler arasında olduğunu ve bu da kırıntı kauçuğun asfalt karışımlarında polimerin yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

Ghani vd., (2023), Kırıntı kauçuk katkılı asfalt kaplama gibi alternatif kaplama malzemelerinin bazen şartnamelerde yer alsa da, deneyimli personel eksikliği, iş alışkanlıklarının sabit olması ve genellikle bilgi eksikliği nedeniyle karayolu kuruluşları tarafından hala yaygın olarak kullanılamamakta olduğunu görmüşlerdir. Araştırmalar, kırıntı kauçuk eklenerek elde edilen aşınma tabakasının katkısız asfalt karışımlarından elde edilen aşınma tabakalarına kıyasla kalıcı deformasyon açısından daha olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir. Kırıntı kauçuğun yol ağları için yoğun karışım tabakalarının özelliklerini iyileştirmek için kullanılabileceğini gibi geleneksel asfalt karışımlarına kıyasla %10' luk bir maliyet artışı ile kaplama malzemesi performansını arttırdığı görülmüştür.

Wulandari (2017), kuru karışım yöntemiyle %8 kırıntı kauçuk katkısının Marshall stabilite değerini arttırdığını ve akma değerini iyileştirdiğini belirtmiştir. Benzer şekilde, Tan (2022) %10 kırıntı kauçuk katkısının asfaltın rutting (yarılma) direncini arttırdığını ve dayanıklılığını iyileştirdiğini ifade etmiştir.

Al-Mosawe (2023) ise %8 kırıntı kauçuk katkısının Marshall stabilite değerini %20 oranında arttırarak asfaltın performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Bu çalışmalar kırıntı kauçuğun asfalt karışımlarının performansını iyileştirmede etkili bir katkı maddesi olduğunu ortaya koymaktadır.

Asfalt karışımlarında kırıntı kauçuk kullanımı, mekanik performans üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Kırıntı kauçuk katkısı, özellikle tekerlek izi (rutting) direncini artırmakta ve yüksek sıcaklıklarda deformasyon riskini azaltmaktadır. Rath, Meister, Jahangiri ve Buttlar (2022), yaptıkları laboratuvar çalışmalarında kırıntı kauçuk katkılı karışımların modifiye edilmemiş karışımlara kıyasla tekerlek izi dayanımında belirgin bir iyileşme sağladığını rapor etmiştir. Bu bulgu, ağır trafik yükleri altında yol hizmet ömrünün uzatılabileceğini göstermektedir.

Çatlama direnci açısından da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ghani ve arkadaşları (2023), kırıntı kauçuk katkılı karışımların hem çatlama hem de yorulma performansında katkısız karışımlardan daha iyi sonuçlar verdiğini vurgulamaktadır. Özellikle düşük

sıcaklıklarda ortaya çıkan termal çatlaklara karşı dayanıklılığın kırıntı kauçuk katkısı ile arttığı ve deformasyonların azaldığı belirtilmiştir. Bu durum, farklı iklim koşullarında kırıntı kauçuk kullanımını daha cazip hale getirmektedir.

Saha uygulamalarında elde edilen bulgular da laboratuvar sonuçlarını desteklemektedir. Ban, Barišić, Cuculić ve Zvonarić (2025), yaptıkları karşılaştırmalı çalışmada kırıntı kauçuk katkılı asfaltların hem asfalt beton hem de taş mastik asfalt (TMA) türlerinde çatlama ve sıcaklık kaynaklı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuç, kırıntı kauçuğun sadece laboratuvar deneylerinde değil, gerçek yol koşullarında da performansı artırdığını doğrulamaktadır.

Khadim ve Al-Mosawe (2024) tarafından yapılan bir çalışmada ise Marshall ve tekerlek izleme testleri kullanılarak kırıntı kauçuk katkılı asfalt karışımlarının performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, %6 ve %8 kırıntı kauçuk içeren karışımların optimum bağlayıcı içeriğinin sırasıyla %4.9 ve %5 olduğunu, bu oranların kontrol asfaltının %4.6'lık bağlayıcı içeriğinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Kırıntı kauçuk katkısının asfaltın rutting (yarılma) direncini artırdığı ve uzun vadeli deformasyonları azalttığı bulunmuştur.

Diğer bir çalışmada, Ban ve ark. (2025), kırıntı kauçuk katkılı asfalt karışımlarının rutting, çatlama ve sıcaklık kaynaklı deformasyonlara karşı dirençlerini artırdığını, ayrıca sertlik ve dayanıklılıklarını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Ancak, bu çalışmada kırıntı kauçuğun kayma direnci üzerindeki etkileri konusunda sınırlı bilgi bulunmaktadır.

Ancak, mevcut literatürde kırıntı kauçuğun asfalt karışımlarındaki performans üzerindeki etkileri genellikle tek bir katkı oranı veya belirli bir deneysel yöntemle sınırlıdır. Özellikle %8, %10, %12 kırıntı kauçuk oranlarının Marshall testi sonuçları üzerindeki karşılaştırmalı etkileri konusunda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca, çevresel ve ekonomik analizlerin teknik performans kriterleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Guerrero-Bustamante, 2024).

Candra vd., (2021), geliştirilmiş kırıntı kauçuğun asfalt karışımlarında kullanımı üzerine birçok çalışma yapmış ve yapılan çalışmalar sonucunda kırıntı kauçuk kullanımının asfaltın kalitesini ve özelliklerini arttırdığını belirlemişlerdir. Kırıntı kauçuk lastik atıklarından elde edilen ürünler oldukları için asfalt karışımlarının elastikiyetini arttırmakta önemli bir rol oynamaktadırlar. Kırıntı kauçuk katkılı karışımların kullanılması, trafik gürültüsünü azaltma, yol performansını iyileştirme ve yol maliyetlerini düşürme gibi avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca uygun bileşim ve oranlarda kırıntı kauçuk kullanımı asfalt karışımlarının performansını artırdığı gibi çatlama ya karşı direncinide arttırmaktadır.

Kırıntı kauçuk katkısının asfalt karışımlarındaki en önemli etkilerinden biri, karışımın mekanik özelliklerini iyileştirmesidir. Özellikle tekerlek izi direncinde ve çatlama davranışında kırıntı kauçuk katkısının olumlu sonuçlar verdiği, sunumdaki saha ve laboratuvar deneyleriyle gösterilmiştir. Kırıntı kauçuk, bağlayıcıdan ziyade karışımın fiziksel ve mekanik yapısını değiştiren bir modifikatör olarak görev yapmakta, üretim sonrası bağlayıcının viskozitesini artırarak deformasyona karşı daha dirençli bir yapı sağlamaktadır (Tyre Recycling Solutions, 2022).

Bu araştırmada, kırıntı kauçuk, asfalt karışımının ağırlığının %2, %4, %6, %8 ve %10 'luk oranlarda asfalt karışımına eklenerek elde edilen numuneler üzerinde Marshall testi yapılmıştır. Kırıntı kauçuğun karıştırılması, asfaltla karıştırılmadan önce kırıntı kauçuk ve agregaların karıştırıldığı kuru bir proses yöntemiye gerçekleştirilmiştir. Marshall Testi sonuçlarına göre numunelerin stabilite, akma ve hacimsel değerlerine ulaşılmıştır. Tablo-1 de gösterilen Marshall test sonuçlarına göre en yüksek VMA ve VIM yüzdesi nin %10 oranında kırıntı kauçuk ilavesiyle elde edildiğini görülmektedir (Almusawi vd., 2020; Ghani vd., 2024; Rath vd., 2022).

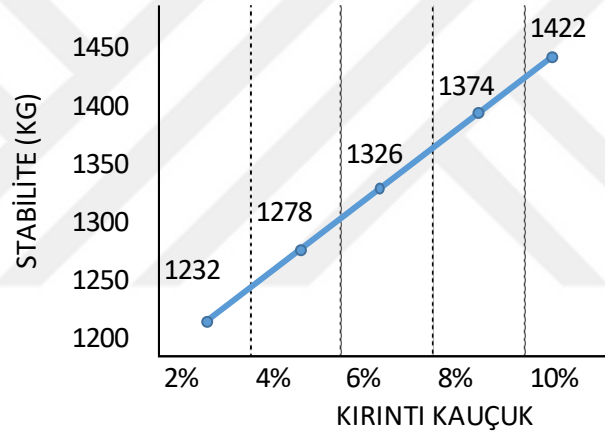
Tablo 1. Marshall test sonuçları (Almusawi vd., 2020; Ghani vd., 2024)

No	CR	Boşluk (%)			Stabilite (kg)	Akış (mm)	MQ
		VIM	VMA	VFA			
1	2%	4,39	16,85	75,36	1232	3,42	360,23
2	4%	4,59	16,87	74,56	1278	3,31	386,1
3	6%	5,09	16,94	73,96	1326	3,23	410,53
4	8%	5,39	17,04	73,56	1374	3,18	432,08
5	10%	5,49	17,12	72,86	1422	3,14	452,87

Tabloda görüldüğü üzere; CR oranının artması ile VMA değerleri artmaktadır. Asfaltla dolu boşluk değerleri ise VMA aksine azalmaktadır. CR oranının artması stabiliteyi arttırmaktadır. Akma değerlerinde azalma oluşmaktadır. Marshall oranı değerleri değerlendirildiğinde, CR oranının artmasıyla birlikte MQ oranlarının da arttığı görülmektedir.

Marshall testi sonuçları incelendiğinde, kırıntı kauçuk (CR) katkı oranı arttıkça stabilite değerlerinin düzenli bir artış gösterdiği, buna karşın akma değerlerinde kademeli bir azalış yaşandığı görülmektedir. Referans olarak %2 katkılı karışım (1232 kg stabilite, 3,42 mm akma) alındığında, stabilite değerinde %4 katkı oranında yaklaşık %3,7, %6

katkıda %7,6, %8 katkıda %11,5 ve %10 katkıda %15,4 oranında artış meydana gelmiştir. Bu sonuç, kırıntı kauçuğun taşıma kapasitesini belirgin şekilde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Akma değerleri ise tam tersi bir eğilim göstermiştir. %2 katkıda 3,42 mm olan akma değeri, %4 katkıda %3,2, %6 katkıda %5,6, %8 katkıda %7,0 ve %10 katkıda %8,2 oranında azalmıştır. Bu durum, katkı oranı arttıkça karışımın daha rijit bir yapı kazandığını, deformasyona karşı direncin arttığını, ancak esneklik kabiliyetinin azaldığını göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, %10 oranında katkı stabilite açısından optimum performans sağlarken, akma değerlerinde gözlenen azalma karışımın kırılma riskinin artabileceğini de işaret etmektedir. Dolayısıyla, stabilite ve esneklik arasında bir denge kurmak için %6–%8 aralığında ki katkı oranları daha uygun mühendislik performansı sergileyebilmektedir.



Şekil 2. Marshall Stabilite diyagramı (Almusawi vd., 2020; Ghani vd., 2024)

Şekil 2’de görüldüğü gibi kırıntı kauçuk katkısı asfalt karışımların stabilitesini artırmaktadır. Kırıntı kauçuk yüzdesi arttıkça asfalt karışımının stabilitesi de artmaktadır. Bu çalışmada, en yüksek stabilite 1422 kg stabilite değeri ile %10 oranında kırıntı kauçuk ilavesinden elde edilmiştir. Elde edilen en düşük akış ise %10 oranında kırıntı kauçuk ilavesinden elde edilen 3,14 mm'dir. Doğru yüzdeye sahip geliştirilmiş kırıntı kauçuk katkılı asfalt karışımlarının üretilmesi için bu gibi deney sonuçları referans alınabilir. Böylece istenilen dayanımda asfalt karışımı elde edilebilir.

Asfalt kaplamalarda sürdürülebilirlik ve çevresel faydalar son yıllarda giderek önem kazanmıştır. Özellikle atık lastiklerin kırıntı kauçuk olarak asfalt karışımlarında değerlendirilmesi, hem çevre dostu bir çözüm hem de yol performansını artıran bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Sunumda da belirtildiği gibi, dünya genelinde sürdürülebilir yollar

ve döngüsel kaplama üretimi yönünde artan bir ilgi bulunmaktadır. Kırıntı kauçuk kullanımıyla hem daha dayanıklı hem de çevresel etkileri azaltılmış yollar elde etmek mümkün olmaktadır (Tyre Recycling Solutions, 2022).

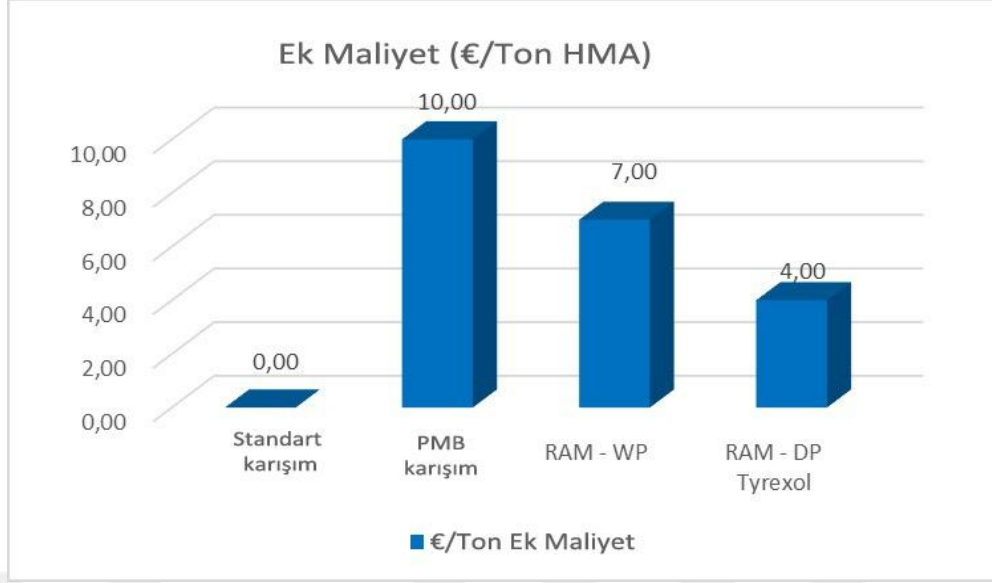
Son olarak, kırıntı kauçuk katkısının çevresel etkileri de göz ardı edilemez. Atık lastiklerin geri dönüştürülerek asfalt üretiminde kullanılması, hem doğal kaynak tüketimini azaltmakta hem de sera gazı salınımlarını sınırlamaktadır. Yapılan saha çalışmalarında kırıntı kauçuk katkılı asfaltların daha sessiz yol yüzeyleri oluşturduğu, yakıt tüketimini düşürdüğü ve lastik aşınmalarını azalttığı ortaya konmuştur (Tyre Recycling Solutions, 2022).

Kırıntı kauçuk kullanımı, asfalt kaplamalarda çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlamaktadır. Atık lastiklerin geri dönüştürülerek yol yapımında değerlendirilmesi, doğal kaynak tüketimini azaltmakta ve çevreye verilen zararı en aza indirmektedir. Guerrero-Bustamante ve arkadaşları (2024), kırıntı kauçuğun döngüsel ekonomi kapsamında yol yapımında yeniden kullanılarak atık yönetimine olumlu katkı sunduğunu ve sürdürülebilir altyapı politikaları için önemli bir çözüm olduğunu belirtmiştir.

Ayrıca, kırıntı kauçuğun yol performansına sağladığı katkılar sayesinde kaplama ömrünün uzaması, bakım-onarım sıklığını azaltmakta ve dolaylı olarak sera gazı emisyonlarını düşürmektedir. Malluru ve Ghabchi (2025), kırıntı kauçuk katkılı asfaltların polimer katkılı asfalta kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olduğunu ve çevresel açıdan daha avantajlı bir çözüm sunduğunu vurgulamaktadır.

Kırıntı kauçuğun bir diğer önemli katkısı ise yol kaplamalarının ekonomik açıdan daha avantajlı hale gelmesidir. Sunumda yer alan maliyet analizlerine göre, polimer modifiyeli asfalta kıyasla kırıntı kauçuğun daha düşük üretim maliyetine sahip olduğu ve bakım giderlerini azalttığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, kırıntı kauçuk katkılı kaplamaların hizmet ömrünün uzaması, uzun vadede ciddi maliyet tasarrufları sağlamaktadır (Tyre Recycling Solutions, 2022).

Şekil 3'te Asfalt modifikasyon tekniklerine göre karışım ton başına maliyet karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 3. Ton başına maliyet karşılaştırması (Tyre Recycling Solutions, 2022)

Kırıntı kauçuk katkılı asfalt karışımları, yalnızca teknik performans açısından değil, aynı zamanda ekonomik verimlilik bakımından da avantajlar sunmaktadır. Yapılan maliyet karşılaştırmalarında, kırıntı kauçuğun polimer modifiyeli asfaltlara (PMA) kıyasla daha düşük üretim maliyetine sahip olduğu görülmüştür. Malluru ve Ghabchi (2025), kırıntı kauçuk katkılı asfaltların özellikle üretim ve uygulama sürecinde ek ekipman gerektirmemesi sayesinde maliyetleri azalttığını ve geleneksel polimer katkılarına kıyasla daha uygun fiyatlı bir alternatif sunduğunu belirtmektedir.

Kırıntı kauçuğun ekonomik avantajı yalnızca ilk üretim maliyetleriyle sınırlı değildir. Uzun vadede, bu katkı maddesinin yol kaplamalarının hizmet ömrünü uzatması, bakım ve onarım giderlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır. Jung vd., (2002), kırıntı kauçuk katkılı yolların bakım maliyetlerinde yaklaşık %40 oranında azalma sağladığını, Buttlar ve Rath (2020) ise yaşam döngüsü maliyetlerinde %43'e varan tasarruf elde edildiğini ifade etmektedir. Bu bulgular, kırıntı kauçuk kullanımının ekonomik sürdürülebilirlik açısından da güçlü bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca, saha uygulamalarında kırıntı kauçuk katkılı asfaltların daha uzun ömürlü olduğu ve bakım aralıklarının daha seyrek hale geldiği rapor edilmiştir. Ghani ve arkadaşları (2023), kırıntı kauçuk ile üretilen kaplamaların deformasyona karşı dayanıklılığı sayesinde yol bakım sıklığının azaldığını ve bu durumun kamu maliyetlerinde ciddi bir azalma sağladığını vurgulamaktadır. Dolayısıyla, kırıntı kauçuk teknolojisi yalnızca teknik

faidalarıyla değil, aynı zamanda kamu bütçeleri üzerinde yarattığı olumlu ekonomik etkilerle de önem kazanmaktadır.

1.3. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, asfalt karışımlarında farklı oranlarda (%8, %10, %12) kırıntı kauçuk katkısının kullanımının Marshall stabilize deneyi sonuçlarına etkisini incelemektedir. Çalışma kapsamında hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen Marshall Testleri aracılığıyla, kırıntı kauçuk oranlarının asfalt karışımlarının performans kriterleri üzerindeki rolü değerlendirilmiştir. Böylelikle, kauçuk katkılı asfalt karışımlarının mekanik özelliklerindeki değişimlerin ortaya konulması ve optimum katkı oranının belirlenmesine yönelik bilimsel bir katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

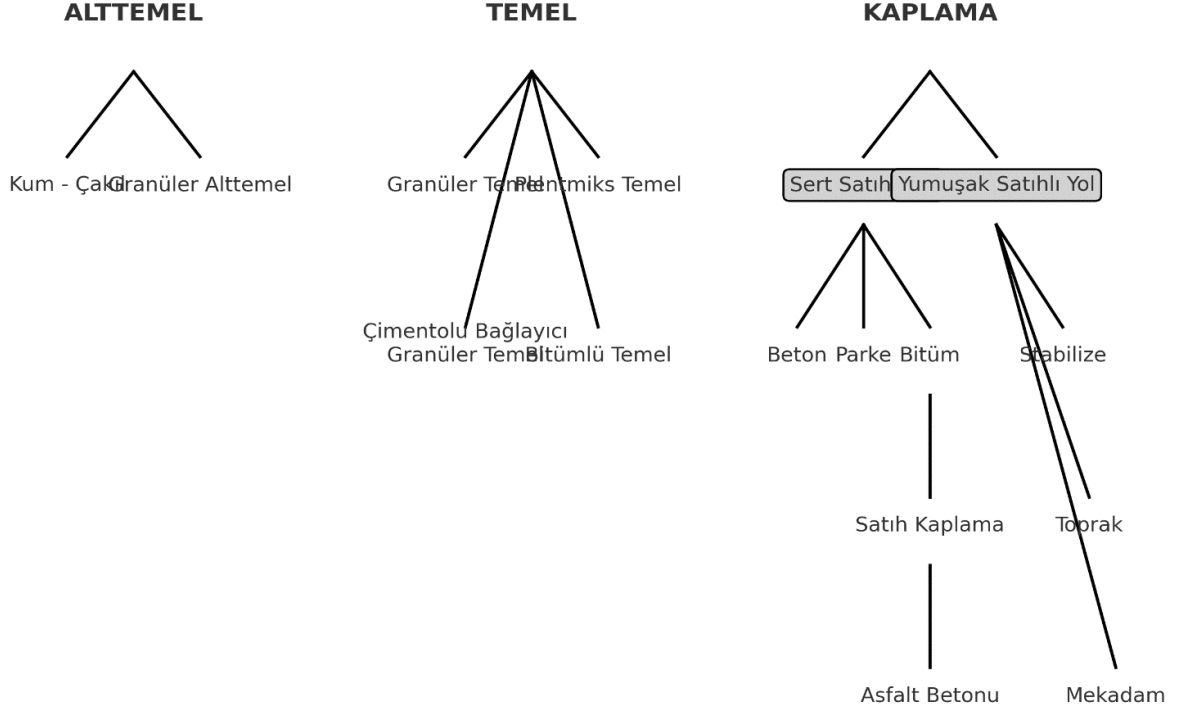
Araştırmanın bir diğer hedefi ise, asfalt üretiminde kırıntı kauçuk kullanımının olası faydalarını değerlendirmektir. Bu kapsamda, geri dönüştürülmüş kauçuğun karışımlara dahil edilmesiyle hem çevresel hem de ekonomik avantajlar sağlanabileceği öngörülmektedir. Özellikle, atık lastiklerin geri kazanımı sayesinde çevreye verilen zararın azaltılması, doğal kaynak tüketiminin sınırlanması ve daha sürdürülebilir bir yol yapım yaklaşımının benimsenmesi mümkündür. Ayrıca, kauçuk katkılı asfaltın esneklik, çatlak direnci ve hizmet ömrü açısından iyileştirilmiş performans göstermesi, yol altyapısında bakım ve onarım maliyetlerinin azaltarak uzun vadede ekonomik fayda sağlayabilmektedir.

1.4. Karayolu Üstyapısı ve Türleri

Karayolu üstyapısı, trafik yüklerini zemine güvenli bir şekilde aktarmak ve taban zemininin taşıma gücünü aşmasını engellemek amacıyla inşa edilen kaplama tabakalarından oluşur. Bu yapı genellikle alttemel, temel ve kaplama tabakaları şeklinde düzenlenir. Alttemel tabakası; kırmataş, çakıl, kum, silt ve kil gibi doğal malzemelerden oluşturulur ve altyapının üzerine serilerek destek sağlar. Kaplama ile alttemel arasına yerleştirilen, trafiğin doğrudan etki etmediği tabaka ise temel tabakası olup; doğal malzemeler, stabilize karışımlar veya bitümlü-çimentolu karışımlardan meydana gelebilir (Eker, t.y.; Ilıcalı vd., 2001).

Aşağıdaki şekil, yol üstyapısının tabakalarını ve türlerini göstermektedir. Üstyapı; alttemel, temel ve kaplama olmak üzere üç ana bölümden oluşmakta, her bölüm kendi içinde farklı malzeme ve yöntemlerle uygulanabilmektedir.

YOL ÜSTYAPISI



Şekil 4. Yol üstyapısı tabakaları ve türleri (URL - 1, 2020)

• Karayolu Üstyapısı Türleri

Karayolu üstyapıları, kullanılan malzeme türleri ve yapım yöntemlerine göre üç ana grupta sınıflandırılır: Rijit Üstyapılar (beton yollar), Esnek Üstyapılar (asfalt yollar) ve Yarı Rijit Üstyapılar. Uygulanacak üstyapı tipinin seçimi; taban zemini özellikleri, trafik yoğunluğu, çevresel faktörler ve ekonomik koşullar göz önüne alınarak yapılır (Turhan, 2013).

1.4.1. Rijit Üstyapılar

Rijit üstyapılar, çimento betonu kullanılarak oluşturulan kaplamalardır. Bu sistemde yükler zemine geniş bir yüzey üzerinden aktarılır ve deformasyon riski azaltılır. Beton yollar, genellikle 20–25 m² büyüklüğünde plaklar halinde yapılır ve enine-boyuna derzlerle

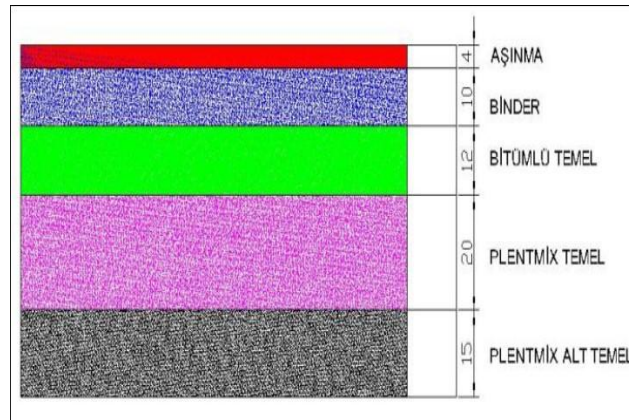
birbirinden ayrılır. Plakanın altına temel tabakasının uygulanıp uygulanmaması, taban zemininin dayanımına bağlıdır (İlıcılı vd., 2001).

1.4.2. Yarı Rijit Üstyapılar

Yarı rijit üstyapılar, esnek kaplamaların üzerine hidrolik bağlayıcı içeren bir veya birden fazla tabaka eklenerek inşa edilir. Bu yapı türü, yükleri daha geniş bir yüzeye yayarak zemine aktarır ve rijit üstyapıların dayanıklılığını esnek üstyapıların esnekliği ile birleştirir (İlıcılı vd., 2001).

1.4.3. Esnek Üstyapılar

Esnek üstyapı, trafik yüklerini tabakalar aracılığıyla kademeli olarak zemine aktaran ve yük altında belirli ölçüde şekil değiştirebilen yol kaplama sistemidir. Bu yapı genellikle bitümlü sıcak karışımlar kullanılarak inşa edilir ve aşınma tabakası, binder tabakası, temel ve alttemel tabakalarından oluşur. Trafik yükleri üstten alta doğru azaldığı için kullanılan malzemelerin dayanım özellikleri de tabakalar arasında kademeli olarak düşmektedir. Böylece üst tabakalar yüksek mukavemetli malzemelerden yapılırken, alt tabakalarda daha düşük kaliteli fakat ekonomik malzemeler tercih edilebilmektedir (Huang, 2004; Yıldırım, 2007).



Şekil 5. Üstyapı kesiti (URL - 1,2020)

1.5. Asfalt Kaplama Tabakası

Asfalt kaplama tabakası, esnek üstyapının en üst kısmını oluşturan ve doğrudan trafik yüklerine maruz kalan bölümdür. Bu tabaka, taşıt yüklerini alt tabakalara güvenli biçimde aktarmakla birlikte yol yüzeyinin düzgünlüğünü, sürüş konforunu ve güvenliğini sağlar. Ayrıca iklim koşullarından kaynaklanan olumsuz etkilerin alt tabakalara ulaşmasını engelleyerek üstyapının ömrünü uzatır (Huang, 2004).

1.5.1. Asfalt Kaplama Tabakası Bölümleri

Asfalt kaplama genellikle üç ana tabakadan meydana gelmektedir:

- Aşınma Tabakası: Yüzeyin en üstünde yer alır ve taşıtların doğrudan temas ettiği tabakadır. Pürüzlülük, düzgünlük ve su geçirimsizliği sağlamasının yanı sıra, kayma direncinin yüksek olması gerekir.
- Binder Tabakası: Aşınma ile temel tabakası arasında yük aktarımını sağlayan ara tabakadır. Trafikten gelen yükleri kademeli olarak alt tabakalara iletir ve genellikle yüksek kaliteli agrega-bitüm karışımlarından yapılır.
- Bitümlü Temel Tabakası: Binder tabakasının altında yer alır ve trafiğin büyük bölümünü taşıyarak alt temel tabakalarına yayar. Böylece yolun uzun vadeli dayanıklılığı artırılır (Roberts vd., 1996).

1.5.2. Asfalt Kaplama Tabakasının Özellikleri

Asfalt kaplama tabakasının başlıca özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Trafik yüklerini alt tabakalara güvenli biçimde dağıtır.
- Esnek yapısı sayesinde iklim ve trafik koşullarına uyum sağlar.
- Su geçirimsizliği ile alt tabakaları korur.
- Pürüzsüz ve güvenli bir yüzey sunarak sürüş konforunu artırır.
- Lokal bozulmalar kolayca tamir edilebilir.
- Tekerlek izi, çatlama ve yorulma gibi deformasyonlara karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmalıdır (Yıldırım, 2007).

1.5.3. Asfalt Kaplama Tabakasının Kullanım Alanları

Karayolu üstyapılarında en yaygın biçimde kullanılan asfalt, ayrıca havaalanı pistleri, otoparklar, yaya yolları ve bisiklet güzergâhlarında da uygulanmaktadır. Sıcak asfalt karışımları, hem trafik yüküne hem de iklim koşullarına uygun olarak tasarlanarak uzun ömürlü ve yüksek taşıma kapasiteli kaplamalar elde edilmesine olanak tanımaktadır (National Asphalt Pavement Association [NAPA], 2020).

1.5.4. Asfalt Kaplamanın Özellikleri

Bitümlü sıcak karışımların performansını belirleyen fiziksel ve mekanik özellikler sekiz ana başlık altında incelenebilir: stabilite, rijitlik, dayanıklılık (durabilite), yorulma mukavemeti, esneklik, geçirimsizlik, kayma direnci ve işlenebilirlik (Huang, 2004; Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 1996; Yıldırım, 2007).

1. Stabilite

Stabilite, asfalt kaplamanın trafik yükü altında deformasyona karşı gösterebildiği dirençtir. Stabilite değeri yüksek olan karışımlar dayanıklı kabul edilirken, düşük stabilite değerine sahip karışımlar yük altında daha kolay şekil değiştirdiği için tercih edilmez. Marshall deneyi bu özelliğin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (ASTM D1559).

2. Rijitlik

Rijitlik, asfalt karışımının yükleme hızı ve süresine bağlı olarak değişir. Yükleme hızının artmasıyla rijitlik yükselirken, sürenin uzamasıyla azalma görülür. Karışım yoğunluğunun azalması veya asfaltın penetrasyon derecesinin artması rijitliği olumsuz etkiler. Bu özellik, asfaltın termoplastik ve viskoelastik davranışlarıyla ilişkilidir (Huang, 2024).

3. Dayanıklılık (Durabilite)

Dayanıklılık, asfalt karışımının trafik yükleri ve çevresel koşullar altında uzun süre bozulmadan kalabilme yeteneğidir. Yeterli bitüm miktarı kaplamanın çatlamalara ve soyulmalara karşı direncini artırır. Ancak optimumun altındaki bitüm miktarı dayanımı zayıflatır ve kaplamanın ömrünü kısaltır (Roberts vd., 1996).

4. Yorulma Mukavemeti

Yorulma mukavemeti, kaplama tabakasında tekrarlanan yükler altında meydana gelen çatlaklara karşı direnci ifade eder. Yüksek sertlik derecesine sahip karışımlar genellikle daha

yüksek yorulma dayanımı gösterir. Ancak aşırı rijit karışımlar esneklik kaybı nedeniyle çatlama da yatkın olabilir (Yıldırım, 2007).

5. Esneklik

Esneklik, kaplamanın trafik yükleri veya çevresel etkiler sonucu meydana gelen oturma ve çatlaklara karşı uyum gösterebilme yeteneğidir. Özellikle soğuk iklime sahip bölgelerde esneklik, üstyapı tasarımında kritik bir faktör olarak görülmektedir (Huang, 2004).

6. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, asfalt kaplamanın suya ve havaya karşı direncini ifade eder. Kaplamanın boşluk oranı arttıkça geçirimsizlik azalır ve özellikle donma-çözülme döngülerinde tabakalar zarar görür. Bu nedenle aşınma tabakasında boşluk oranı genellikle %3–5 aralığında istenir (Roberts vd., 1996).

7. Kayma Direnci

Kayma direnci, araçların hareket halindeyken frenleme sırasında güvenliğini sağlayan en önemli yüzey özelliğidir. Yüzeyin pürüzlülüğü ile doğrudan ilişkilidir ve özellikle agreganın tipi (örneğin kırmataş) kayma direncini önemli ölçüde artırır (Yıldırım, 2007).

8. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, sıcak karışım asfaltın uygulama ve sıkıştırma kolaylığıdır. Agregaların şekli, gradasyonu, yüzey özellikleri ve karışımdaki bağlayıcı miktarı işlenebilirliği doğrudan etkiler. Düşük işlenebilirliğe sahip karışımlar yeterli sıkışma göstermediği için stabilite değerleri de düşük olur (Roberts vd., 1996).

1.6. Asfalt Karışımlarında Kullanılan Katkı Maddeleri ve Genel Etkileri

Asfalt kaplamaların performansını artırmak amacıyla farklı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkılar, kaplamanın hem mekanik hem de çevresel koşullara karşı dayanımını iyileştirmeye yönelik geliştirilmiştir. Genel olarak polimerler, kauçuk türevleri, selüloz elyaf, nanomalzemeler ve atık esaslı katkılar en yaygın kullanılan grupları oluşturmaktadır (Poulidakos vd., 2022; Rath vd., 2022).

1. Polimer Katkılar

Polimerler, bitümün esnekliğini artırmakta ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan deformasyonlara karşı direnç sağlamaktadır. Özellikle polimer modifiyeli bitüm (PMB), çatlama eğilimini azaltarak servis ömrünü uzatmaktadır (Poulidakos vd., 2022).

2. Kauçuk Katkılar

Ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen kırıntı kauçuk, sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Kırıntı kauçuk kullanımı, hem atık yönetimine katkı sağlamakta hem de karışımların tekerlek izi ve çatlama direncini artırmaktadır (Rath vd., 2022).

3. Elyaf Katkılar

Selüloz ve sentetik elyaf, karışımın iç stabilitesini geliştirmekte ve bağlayıcı akmasını engelleyerek özellikle taş mastik asfalt (TMA) tipinde homojen bir yapı sağlamaktadır (Jahromi & Khodaii, 2008).

4. Nanomalzemeler

Nanokil, nano-silika ve karbon nanotüpler gibi nanomalzemeler, asfaltın rutting ve yorulma direncini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca bağlayıcının yaşlanma sürecini yavaşlatarak uzun ömürlü kaplamalar elde edilmesine katkı sunmaktadır (Yao vd., 2018).

5. Atık ve Endüstriyel Yan Ürünler

Uçucu kül, cüruf, plastik ve cam atıkları gibi endüstriyel yan ürünlerin asfalt karışımlarında kullanımı, hem çevresel fayda sağlamakta hem de ekonomik olarak maliyetleri azaltmaktadır. Bu tür katkılar, kaplamaların mekanik dayanımını ve çevresel sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Chen vd., 2020).

Katkı maddelerinin kullanımı, asfalt kaplamaların yük taşıma kapasitesi, çatlama direnci, deformasyon direnci ve hizmet ömrü üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Ayrıca bu katkılar sayesinde asfalt karışımlarının çevresel etkileri azaltılmakta ve sürdürülebilir ulaşım altyapısına katkı sağlanmaktadır (Poulikakos, Bueno, Pasquini, & Partl, 2022; Rath, Meister, Jahangiri, & Buttlar, 2022).

1.7. Öğütülmüş Kırıntı Kauçuk ve Özellikleri

Öğütülmüş kırıntı kauçuk, ömrünü tamamlamış lastiklerin mekanik olarak parçalanması sonucu elde edilen kauçuk parçacıklarının, özel işlemlerle modifiye edilerek asfaltla daha uyumlu hale getirilmiş biçimidir. Geleneksel kırıntı kauçuktan farklı olarak öğütülmüş kırıntı kauçuk , yüzey işlemleri ve aktivasyon yöntemleri sayesinde bitümle daha iyi bağ oluşturur ve böylece asfalt karışımlarının performansını artırır (Rath vd., 2022).



Şekil 6. Öğütülmüş kırıntı kauçuk görünümü (Tyre Recycling Solutions, 2022)

1.7.1. Özellikleri

Öğütülmüş kırıntı kauçuğun öne çıkan özellikleri arasında yüksek elastikiyet sağlaması, kaplamanın yorulma ve çatlama direncini artırması, tekerlek izi oluşumunu azaltması ve yüksek sıcaklıklarda deformasyona karşı dayanım göstermesi yer almaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda termal çatlakların engellenmesine yardımcı olur. Çevresel açıdan da önemli bir katkı sunarak atık lastiklerin geri dönüşümünü sağlar. Bunun yanında, yüzey modifikasyonu sayesinde bitümle uyumluluğu artar ve ayrışma riskini düşürür. Ayrıca asfalt kaplamaların gürültü seviyelerini azaltıcı etkisi de rapor edilmiştir (Ghani vd., 2024; Yıldırım, 2007).

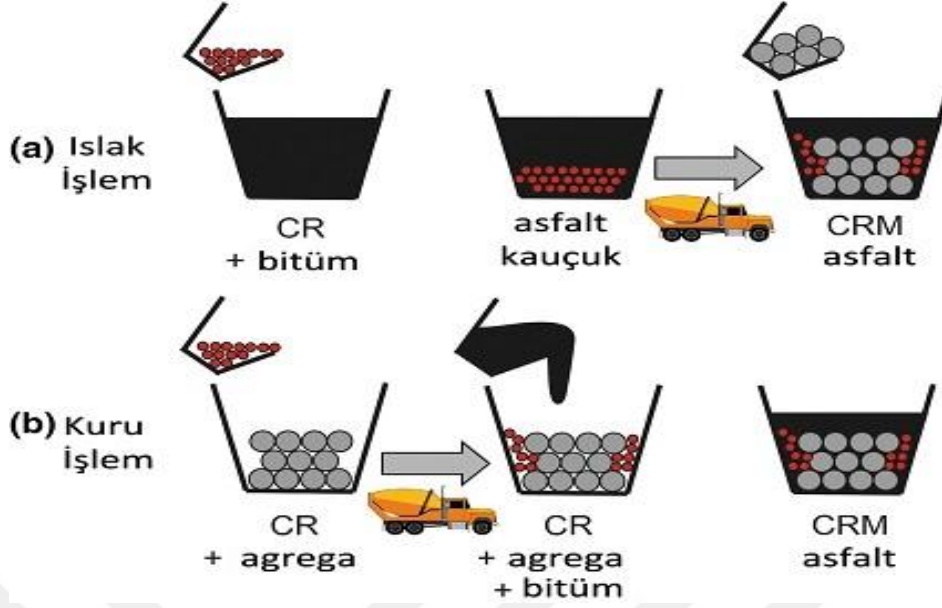
Kırıntı kauçuk esas olarak asfalt karışımlarında modifiye bağlayıcı üretiminde kullanılmaktadır. Bu sayede kaplamaların servis ömrü uzamakta, bakım maliyetleri düşmekte ve yol güvenliği artmaktadır.

1.7.2. Asfalt Karışımlarına Katma Teknikleri, Avantajları ve Dezavantajları

Kırıntı kauçuk asfalt karışımlarına üç farklı yöntemle dahil edilir:

- Yaş proses: Kauçuk, belirli sıcaklık ve sürede bitümle reaksiyona girerek modifiye bağlayıcı oluşturur (asphalt rubber).
- Kuru proses: Kauçuk parçacıkları, agrega ile birlikte doğrudan karışıma katılır.
- Terminal blend: Yaş prosese benzer şekilde, bağlayıcı rafineri/terminal ortamında hazırlanıp şantiyeye sevk edilir (Shen vd., 2017).

Aşağıda Şekil 7’de kırıntı kauçuğun asfalt karışımlarına katma yöntemleri gösterilmektedir.



Şekil 7. Kırıntı kauçuğun asfalt karışımlarına katma teknikleri (Tyre Recycling Solutions, 2022)

Kuru proses yöntemi, kırıntı kauçuğun asfalt bağlayıcıya doğrudan karıştırılmadığı, bunun yerine agrega ile birlikte karışıma katıldığı bir uygulama şeklidir. Bu yöntemde kırıntı kauçuk, mineral agrega gibi davranarak karışımın yapısına entegre olur ve böylece asfaltın elastikiyetini ve mekanik performansını artırır (Huang, 2004).

Uygulamada öncelikle kırıntı kauçuk parçacıkları genellikle 0,5–2 mm boyutlarına kadar öğütülüp kurutulur. Daha sonra kuru agregalarla birlikte karıştırıcıya ilave edilir. Bu aşamada kullanılan kırıntı kauçuk miktarı genellikle toplam karışımın %1–3’ü oranında seçilir. Sonrasında ısıtılmış bitüm, kırıntı kauçuk ve agrega karışımına eklenir ve homojen bir yapı oluşana kadar karıştırılır. Hazırlanan sıcak karışım, asfalt finişeri ile serildikten sonra silindirlerle sıkıştırılarak yüzey yoğunluğu sağlanır. Karışım sıcaklığı genellikle 160–170 °C aralığında tutulur (Rath vd, 2022).

Kuru prosesin avantajları arasında ekonomik olması, özel ekipman gerektirmemesi ve şantiye ortamında kolay uygulanabilmesi yer alır. Bununla birlikte, bağlayıcı ile kırıntı kauçuk arasında tam bir reaksiyon gerçekleşmediği için, rutting direnci ve yaşlanmaya karşı dayanımı, yaş prosese göre daha sınırlı olabilmektedir (Ghani vd, 2024).

Kırıntı kauçuk katkısı, özellikle yaş proses uygulamalarında asfaltın tekerlek izi direncini ve yorulma ömrünü artırmaktadır. Ayrıca yüzey gürültüsünü ve su sıçramasını azaltarak konforu geliştirmekte, atık lastiklerin değerlendirilmesi sayesinde çevresel

sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Picado-Santos vd., 2020; U.S. Tire Manufacturers Association [USTMA], 2023).

Buna karşılık, kırıntı kauçuk kullanımı bazı zorluklar da doğurmaktadır. Bitümün kauçuk tarafından absorpsiyonu nedeniyle optimum bağlayıcı içeriği artar ve işlenebilirlik zorlaşabilir. Kuru proses karışımlarında kompaksiyon ve boşluk kontrolü daha güçtür. Ayrıca yaş proses uygulamalarında özel ekipman ve sıcak depolama gerekmesi maliyetleri yükseltmektedir (Lo Presti, 2013; Bilema vd., 2023).

Sonuç olarak, kırıntı kauçuğun asfalt kaplamalarda kullanımı hem performans iyileştirmesi hem de çevresel faydaları nedeniyle önem taşımaktadır. Ancak yöntem seçimi, proje hedeflerine, mevcut ekipmana ve ekonomik koşullara bağlı olarak dikkatle yapılmalıdır.

Avantajlar

- Sürdürülebilirlik: Atık lastiklerin geri dönüştürülerek yüksek değerli bir girdi olarak kullanılması, döngüsel ekonomi hedefleriyle uyumludur.
- Performans iyileştirmeleri: Tekerlek izi direncini artırmak, çatlamayı azaltmak ve servis ömrünü uzatmak gibi faydalar sağlar.
- İşlenebilirlik: Geleneksel yaş proses kauçuk-bitüm modifikasyonuna göre üretim sırasında daha az işlem ve ekipman gerektirir.
- Çevresel fayda: Gürültü seviyelerini azaltır ve yüzey su yönetimini iyileştirir, bu da yol güvenliği ve kullanıcı konforunu artırır (TRS, 2022).

Dezavantajlar

- Maliyet: İşlenmiş kauçuk üretimi ve tedarik zinciri, klasik bitüm veya polimer katkılarına göre daha pahalı olabilir.
- Uygulama adaptasyonu: Farklı yol idarelerinin şartnamelerine uyum sağlamak ve saha uygulamalarında standartlaştırma halen zorluk yaratmaktadır.
- Teknik bilgi ihtiyacı: Karışım tasarımı ve performans optimizasyonu için deneyim gereklidir; aksi halde homojenlik sorunları yaşanabilir (Clark & Rath, 2022).

1.7.3. 1.7.3. Performans Sonuçları

1. Tekerlek İzi Direnci (Rutting)

Kırıntı kauçuk katkılı asfalt karışımları, yüksek sıcaklıklarda deformasyona karşı geleneksel bağlayıcılara kıyasla daha yüksek direnç göstermektedir. Bu, özellikle yoğun

trafik yüklerine maruz kalan yol kesimlerinde kaplamanın ömrünü uzatmakta ve bakım ihtiyacını azaltmaktadır (TRS, 2022).

2. Çatlama Dayanımı

Laboratuvar testleri ve saha uygulamaları, kırıntı kauçuk katkılı karışımların düşük sıcaklıklarda daha iyi çatlak direnci sunduğunu göstermektedir. Böylece hem termal çatlakların oluşumu gecikmekte hem de yorulma çatlaklarının ilerlemesi yavaşlamaktadır (Clark & Rath, 2022).

3. Gürültü Azaltma

Kırıntı kauçuk katkısı, yol yüzeyinde daha açık doku oluşmasına ve lastik-yol etkileşiminin değişmesine katkıda bulunur. Bu sayede özellikle şehir içi bölgelerde trafik gürültüsünde azalma sağlanır ve kullanıcı konforu artar (TRS, 2022).

4. Sürdürülebilirlik Katkısı

Kırıntı kauçuğun asfalt karışımlarında kullanımı, geri dönüştürülmüş malzemelerin yüksek katma değerli bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu uygulama, doğal kaynak tüketimini azaltmakta ve karbon ayak izini düşürerek çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir (Clark & Rath, 2022).

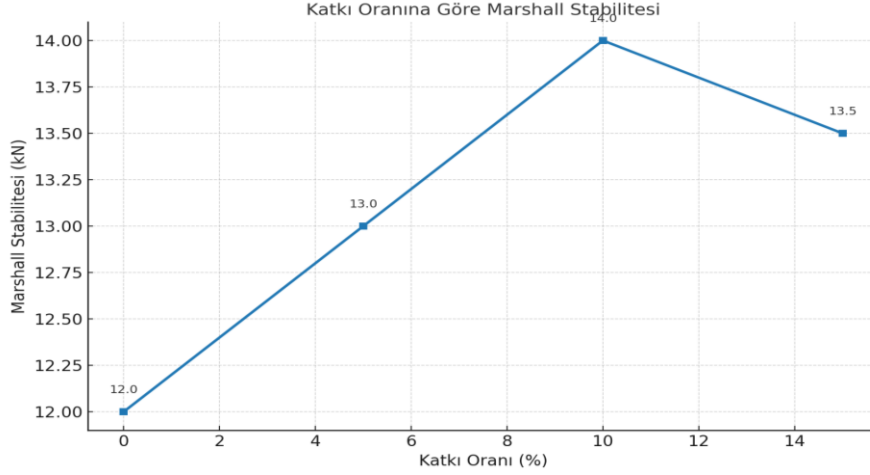
Kırıntı kauçuk teknolojisi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de teknik performans açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Tekerlek izi direnci, çatlama dayanımı ve gürültü azaltma gibi avantajları ile öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, ekonomik maliyetler ve uygulama adaptasyonu göz önünde bulundurulmalı, özellikle uzun dönem saha performansına ilişkin veriler artırılmalıdır (Poulidakos vd., 2022; Ghani vd., 2024).

1.8. Kırıntı Kauçuk Katkılı Asfalt Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Kırıntı kauçuk katkılı asfalt üzerine yapılan araştırmalar, bu katkının performans parametreleri üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir. Örneğin, Almeida vd., (2019) %10 kırıntı kauçuk katkılı asfalt numunelerinin Marshall stabilitesinde %15'e varan artış sağladığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, Li vd. (2020) %15 katkı oranının suya karşı direnci artırdığını, ancak işlenebilirliği olumsuz etkileyebildiğini belirtmiştir.

ABD ve Avrupa'daki saha uygulamalarında kauçuk katkılı asfalt kaplamaların ömürlerinin klasik sıcak karışım asfalta göre %30 daha uzun olduğu görülmüştür (Kaloush vd., 2017). Ayrıca Arizona eyaletinde yapılan bir çalışmada kauçuk katkılı asfalt kaplamaların yol gürültüsünü 7–12 dB azalttığı rapor edilmiştir (Way, 2011).

Son yıllarda yapılan meta-analizler, kırıntı kauçuk katkısının asfalt karışımlarında yorulma direncini ve rutlanma direncini iyileştirdiğini, ancak yüksek katkı oranlarında işlenebilirlik sorunları ve maliyet artışı yarattığını ortaya koymaktadır (Mashaan vd., 2014).



Şekil 8. Katkı oranına göre Marshall stabîlitesindeki değişim (Almusawi vd., 2020; Ghani vd., 2024)

Şekil 8’de katkı oranının Marshall stabîlitesi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, katkı miktarındaki artışın belirli bir seviyeye kadar stabîliteyi olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Katkısız karışımda 12,0 kN olan stabîlite değeri, %4 oranında katkı ile 13,0 kN’a yükselmiş, %10 katkı oranında ise maksimum değer olan 14,0 kN’a ulaşmıştır. Ancak %15 katkı oranında stabîlite değeri hafif bir azalma yaşanmış ve değer 13,5 kN seviyesine gerilemiştir. Bu sonuçlar, kırıntı kauçuk katkısının optimum seviyeye kadar asfalt karışımlarının yük taşıma kapasitesini artırdığını, fakat aşırı katkının karışımın iç yapısını olumsuz etkileyerek stabîliteyi düşürebileceğini ortaya koymaktadır (Almusawi vd., 2020; Ghani vd., 2024).

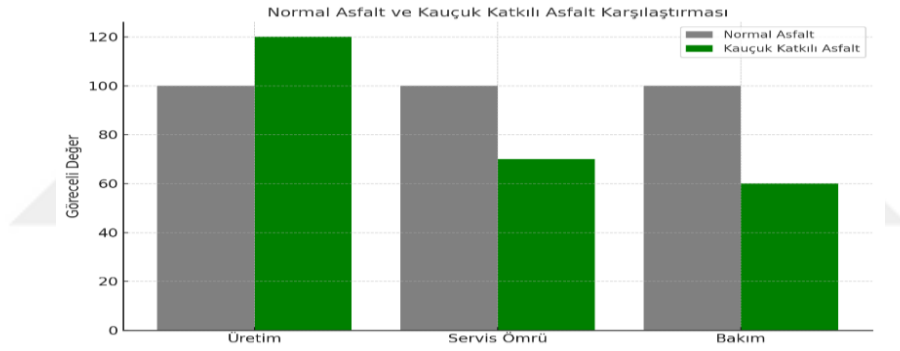
1.9. Sürdürülebilirlik, Çevresel ve Ekonomik Yaklaşımlar

Atık lastiklerin asfalt kaplamalarda değerlendirilmesi, sürdürülebilir yol inşaatı açısından önemli bir stratejidir. Her yıl dünya genelinde milyonlarca ton atık lastik ortaya çıkmakta ve bu lastiklerin büyük bir kısmı çevreye zarar verecek şekilde depolanmaktadır.

Kauçuk katkılı asfalt üretimi, bu atıkların yeniden ekonomiye kazandırılmasına imkân tanımaktadır (Wang vd., 2018).

Yaşam döngüsü değerlendirmelerine göre (Fathollahi vd., 2021), kauçuk katkılı asfaltların üretiminde enerji tüketimi daha yüksek olsa da, servis ömrünün uzun olması nedeniyle bakım ve onarım maliyetlerinde önemli düşüşler sağlanmaktadır. Böylece toplam çevresel etki, geleneksel asfaltlara göre daha düşük olmaktadır. Ekonomik açıdan da değerlendirildiğinde, uzun servis ömrü, atık lastiklerin geri dönüşümüyle elde edilen hammadde avantajı ve daha az bakım ihtiyacı, bu yöntemi cazip hale getirmektedir.

Çevresel faydalar arasında CO₂ emisyonlarının azalması, depolama alanı ihtiyacının düşmesi ve gürültü kirliliğinin azaltılması öne çıkmaktadır (Kazemian vd., 2025). Dolayısıyla kauçuk katkılı asfalt, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 9. Normal asfalt ve kauçuk katkılı asfaltın çevresel ve ekonomik etkileri (Wang vd., 2018; Fathollahi vd., 2021; Kazemian vd., 2025)

Şekil 9’da normal asfalt ve kauçuk katkılı asfaltın çevresel ve ekonomik performansları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, kauçuk katkılı asfaltın üretim aşamasında daha yüksek bir çevresel ve ekonomik değer sergilediği görülmektedir. Servis ömrü açısından değerlendirildiğinde, kauçuk katkılı asfaltın normal asfalta göre belirgin şekilde daha uzun bir kullanım süresine sahip olduğu, dolayısıyla bakım sıklığını ve maliyetini azalttığı görülmektedir. Bakım aşamasında ise kauçuk katkılı asfaltın performansının daha yüksek olduğu yani daha az bakım gerektirdiği görülmektedir. Genel olarak, kauçuk katkılı asfaltın kullanımının kaynak verimliliğini artırdığı, karbon emisyonlarını azalttığı ve altyapı maliyetlerini düşürerek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığı söylenebilir. (Wang vd., 2018; Fathollahi vd., 2021; Kazeiman vd., 2025)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme ve Yöntem

Bu araştırmada; agregası, bitüm ve kırıntı kauçuk katkı malzemesi kullanılmıştır. İnce agregası fiziksel özellikleri Tablo 2’de, kaba agregası fiziksel özellikleri Tablo 3’de verilmektedir. Elek analizi tane boyut dağılımı verileri ve elek ortalamaları Tablo 4’de ve bitüm yüzdesi de %5,4 olarak hesaplanmıştır. Karışım gradasyon eğrisi Şekil 10’da verilmiştir.

Tablo 5 bitüm özelliklerini vermektedir. Dizaynda (0-7), (7-12), (12-19) mm dane boyutu agregalar ve B 50/70 bitüm kullanılmıştır. Gradasyonun hazırlanmasında, Tablo 4’de ki elek ortalamaları alındı. Gümüşhane Gülaçar Taşocağından temin edilen karışık granülometrideki kalker cinsi agregalarla karışımındaki bitüm miktarının %8, %10 ve %12 si kadar kırıntı kauçuk bitümden hemen önce granül agregaya eklenmiştir. Aşınma Tip 1’e göre dizayn edilen numunelerin Marshall biriket karışım oranları Tablo 6’de gösterilmiştir. Karışımındaki bitüm miktarının %8 ‘i için 4,9 gr, %10’u için 6,2 gr,%12’ si için ise 7,5 gr kırıntı kauçuk hesap edilip eklenmiştir. Elde edilen numuneler Marshall Metoduna göre kırılıp Stabilitate ve akma değerleri elde edilmiştir.

2.1.1. Kullanılan Malzemeler

• İnce Agregası

4.75 mm’lik (No:4) elekten geçip 0,075 mm ‘lik (No.200) elek üzerinde kalan malzemedir. İnce agregası, kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşabilir. İnce agregası özellikleri belirlemek için uygulanan testler aşağıda Tablo 2’ de gösterilmiştir (Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM], 2013).

• Kaba Agregası

Agregası karışımının 4,75 mm ‘lik (No.4) elek üzerinde kalan kısmı olup kırmataş, kırma çakıl veya bunların karışımından oluşmaktadır. . Kaba agregası özellikleri belirlemek için uygulanan testler aşağıda Tablo 3’ ‘de gösterilmiştir (Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM], 2013).

Tablo 2. İnce agregâ özellikleri

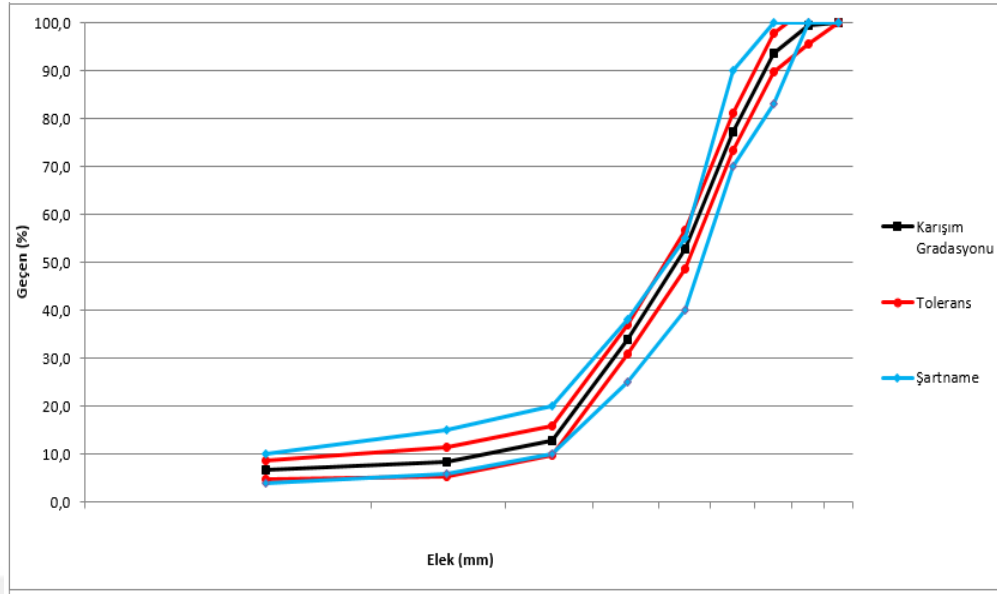
Sıra No	Deney Adı	Standart	Birim
1	Plastisite İndeksi	TS 1900-1	%
2	Metilen Mavisi	TS EN 933-9+A1	MB
3	Kurutulmuş Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³
4	Görünür Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³
5	Doygun Kuru Yoğunluk	TS EN 1097-6	Mg/m ³
6	Su Emme	TS EN 1097-6	%
7	Filler Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-7	Mg/m ³

Tablo 3. Kaba agregâ özellikleri

Sıra No	Deney Adı	Standart	Birim
1	Los Angeles Aşınma	TS EN 1097-2	%
2	Yassılık İndeksi, 5-12 Mm	TS EN 933-3	%
3	Yassılık İndeksi, 12-19 Mm	TS EN 933-3	%
4	Soyulma Mukavemeti	TS EN 12697-11	%
5	Kil ve Ufanabilir Taneler	ASTM C142	%
6	Kuru Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³
7	Görünür Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³
8	Doygun Kuru Yoğunluğu	TS EN 1097-6	Mg/m ³
9	Su Absorbsiyonu	TS EN 1097-6	%

Tablo 4. Agregâ kullanım oranları ve karışım gradasyonu

Tane Boyu	%	%	%	Hesapl. Ortalama	K.T.Ş Aşınma TİP-1 Kısım 407 Limitleri				
	12-19	7-12	0-7		İşyeri Karşm Grd.	Tolerans		Şartname	
	10%	34%	56%	100%					
1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4	94,3	100,0	100,0	99,4	99,4	95,4	103,4	100,0	100,0
1/2	72,7	89,6	100,0	93,7	93,7	89,7	97,7	83,0	100,0
3/8	1,3	62,1	100,0	77,2	77,2	73,2	81,2	70,0	90,0
NO:4		9,9	88,1	52,7	52,7	48,7	56,7	40,0	55,0
NO:10		1,3	59,8	33,9	33,9	30,9	36,9	25,0	38,0
NO:40			21,2	12,9	12,9	9,9	15,9	10,0	20,0
NO:80			15,0	8,4	8,4	5,4	11,4	6,0	15,0
NO:200			10,9	6,8	6,8	4,8	8,8	4,0	10,0



Şekil 10. Karışım gradasyon eğrisi

- Bitüm

Bitüm, petrol rafinerilerinde ham petrolün damıtılması ile elde edilen ve yolyapımında ve bakımında kullanılan maddedir. Burada deneylerde 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Aşağıda Tablo 5’ de Bitümlü bağlayıcı özellikleri gösterilmiştir. (Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM], 2013).

Tablo 5. Bitümlü bağlayıcı özellikleri

Sıra No	Deney Adı	Standart	Deneyde Kullanılan Bitüm Sınıfı
			B 50/70
1	Penetrasyon, (25°C) 0,01 mm	TS EN 1426	54
2	Yumuşama Noktası, (°C)	TS EN 1427	46-54
3	Kütle Değişimi, %	TS EN 12607-1	≤0,5
4	Yumuşama Noktası Yükselmesi, (°C)	TS EN 1427	≤9
5	Parlama Noktası, (°C)	TS EN ISO 2592	≥230
6	Çözünürlük, %	TS EN 12592	≥99,0

Tablo 6. Marshal biriket karışım oranları (1150gr. için)

0-7	7-12	12-19	Bitüm
56%	34%	10%	5.4%
644gr.	391gr.	115gr	62.1gr

Öğütülmüş Kırıntı Kauçuğun Özellikleri

Tablo 7. ‘de Öğütülmüş Kırıntı Kauçuğun özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 7. Öğütülmüş kırıntı kauçuk özellikleri (Presti, 2013; Clark & Rath, 2022)

Öğütülmüş Kırıntı Kauçuğun Özellikleri	
Mülkiyet	Ölçülen Sonuç
Birincil bileşen	ASTM-30 geri dönüştürülmüş kırıntı kauçuk
Görünüş	Siyah, ince taneli kırıntı malzemesi
Özgül ağırlık	1,15± 0,04
Parlama noktası	246°C
Otomatik ateşleme sıcaklığı	371°C
Suda çözünürlüğü	0.1-1.0 %

Tablo 7’de öğütülmüş kırıntı kauçuğun temel fiziksel ve kimyasal özellikleri sunulmaktadır. Öğütülmüş kırıntı kauçuğun temel bileşeni ASTM-30 standardına uygun geri dönüştürülmüş kırıntı kauçuktur. Görünüş itibarıyla siyah ve ince taneli bir malzeme olan öğütülmüş kırıntı kauçuk, özgül ağırlık bakımından 1,15±0,04 değerine sahiptir. Parlama noktası 246°C, otomatik ateşleme sıcaklığı ise 371°C olarak belirlenmiştir. Ayrıca suda çözünürlüğü %0,1–1,0 aralığında olup, bu özellikler öğütülmüş kırıntı kauçuğun asfalt kaplamalarda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir (Presti, 2013; Clark & Rath, 2022).

2.1.2. Elek Analizi

Agrega numunesinin tane boyutlarına göre dağılımı, granülometri olarak adlandırılmaktadır. Bu dağılımın grafiksel gösterimi ise granülometri eğrisi ile ifade edilir. Elek analizi yöntemi, ilgili standartlarda tanımlanan elekler kullanılarak agregaların tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesine imkân tanımaktadır. Bu işlem, elle veya mekanik sallama cihazları yardımıyla gerçekleştirilebilmektedir (TS EN 933-1, 2012; Huang, 2004).

Elek analizi cihazı aşağıda Şekil 10’da gösterilmiştir. Deney öncesinde uygulanacak eleme yöntemi (kuru, yaş veya her ikisi), kullanılacak eleklerin numaraları ve göz açıklıkları belirlenmelidir. Elek serisinin, incelenen malzemenin özelliklerini yeterli düzeyde yansıtabilecek sayıda olması gereklidir (Roberts vd., 1996).



Şekil 11. Elek analizi deney seti

Deneyin ilk aşamasında, agrega numunesi 110 °C sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 24 saat kurutularak sabit kütleye ulaşması sağlanır. Daha sonra farklı açıklıklara sahip standart elekler, en büyük açıklıktan en küçüğe doğru sıralanarak deney düzeni oluşturulur. Kuru numune, en üstteki elekten başlanarak sırayla elenir. Her bir elekte kalan agrega miktarı tartılarak deney formuna kaydedilir. Son aşamada, eleklerden geçen ve kalan malzeme miktarlarının toplam numune kütlesine oranları hesaplanır ve elde edilen veriler kullanılarak tane boyutu dağılım eğrisi oluşturulur. Bu eğri, agreganın üstyapı malzemesi olarak kullanım uygunluğunu ve performansını değerlendirmek için temel bir kriter olarak kabul edilmektedir (Karaşahin & Terzi, 2007; TS EN 933-1, 2012).

2.1.3. Marshall Deneyi

• Deneyin Amacı

Marshall stabilite deneyi, bitümlü sıcak karışımlarda optimum bitüm miktarının belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir (Roberts vd., 1996).

Karışım tasarımında temel hedef, hem uzun ömürlü hem de ekonomik bir üstyapı elde etmektir. Bu bağlamda deneyin amaçları şu şekilde özetlenebilir:

- Dayanıklı bir yol tabakası elde etmek için gerekli bitüm miktarını tespit etmek,
- Trafik yükleri altında kalıcı deformasyonlara karşı yeterli stabiliteyi sağlamak,
- Sıkıştırılmış tabakanın, trafik etkisiyle oluşabilecek küçük oturmaları kuma, akma ve stabilite kaybı olmadan karşılamasını; aynı zamanda tabaka içerisinde fazla hava boşluğu veya rutubet kalmayacak şekilde optimum boşluk oranını sağlamak,

- Segregasyon (ayırışma) riski olmadan uygun serimi sağlayacak, işlenebilir ve ekonomik bir karışım ile doğru agrega gradasyonunu belirlemek (TSE, 2015).

Bunların yanı sıra deney ile karışımların dayanım, akma değerleri ve çeşitli fiziksel özellikleri belirlenerek yol üstyapısının performansı hakkında önemli veriler elde edilmektedir (Çevrim, 2022).

- Deneyin Prensibi

Marshall deneyinin temel prensibi, hazırlanan bitümlü karışım numunelerinin standart koşullarda sıkıştırılması ve belirli sıcaklık altında yüklenerek deformasyona karşı gösterdiği direncin ölçülmesidir (Roberts vd., 1996).

Bu yöntem ile her numune için stabilite (taşıma kapasitesi) ve akma (plastik deformasyon yeteneği) değerleri belirlenir. Elde edilen veriler, karışımın trafik yükleri altındaki performansının değerlendirilmesi ve optimum bitüm oranının saptanması için kullanılır (TSE, 2015).

- Deneyin Yapılışı

Marshall deneyinin uygulama adımları şu şekildedir:

1. Belirlenmiş gradasyona sahip 1150 g agrega, 160 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilir; bitüm ise aynı sıcaklıkta 2–3 saat tutulur. Deneyde kullanılacak ekipmanlar da ısı kaybını önlemek için etüvde bulundurulur (Çevrim, 2022).
2. Etüvden çıkarılan agrega karıştırma kabına alınır, ortasına açılan boşluğa tartılmış miktarda bitüm eklenir. Bitüm oranı, agrega kütlelerinin %3,5 ile %6,5'i arasında yedi farklı seviyede belirlenir. Her oran için üçer numune hazırlanarak toplam 21 adet numune elde edilir (Roberts vd., 1996).
3. Agrega ve bitüm 1,5–2 dakika boyunca mikserde karıştırılır; sıcaklık kaybı olmaması için mikser kabı ve başlığı önceden ısıtılır (Çevrim, 2022).
4. Karışım kalıplara yerleştirilir, sıcaklığı ölçülür (140 °C'nin altına düşmemelidir) ve her iki yüzüne Marshall tokmağı ile BSK için 75, TMA için 50 darbe uygulanır (TSE, 2015).
5. Tokmaklama işleminden sonra numuneler soğumaya bırakılır. Üzerlerindeki kâğıtlar sıcak iken çıkarılır. Yaklaşık 3 saat sonra kriko yardımıyla kalıptan çıkarılan numuneler etiketlenir ve oda sıcaklığında 24 saat bekletilir (TSE, 2015).
6. Ertesi gün numunelerden çapaklar temizlenir, yükseklik ölçümleri yapılır. Ardından havadaki ve sudaki ağırlıkları tespit edilir (TSE, 2015).

7. Numuneler, 60 °C'deki su banyosunda 30 dakika bekletildikten sonra Marshall cihazında 51 mm/dak hızla yüklenir. Bu işlem sırasında akma ve stabilite değerleri kaydedilir (Roberts vd., 1996).
8. Sonuçlar tablollaştırılır ve numuneler arasındaki yükseklik farklarını gidermek amacıyla düzeltme faktörleri uygulanır (TSE, 2015).
9. Daha sonra bitüm oranına bağlı olarak pratik özgül ağırlık, dayanım, boşluk oranı ve bitümle dolu boşluk oranı grafikleri çizilir. Bu grafiklerden, farklı kriterlere göre optimum bitüm oranı belirlenir ve ortalama değer alınır (TSE, 2015).
10. Son olarak, elde edilen optimum değerler şartname sınırları ile karşılaştırılır. Eğer akma ve dayanım değerleri uygun ise optimum bitüm oranı kabul edilir (Çevrim, 2022).

2.2. Karışım Tasarımı

Gümüşhane Gülaçar Taşocağından temin edilen karışık granülometrideki agregalar bir tesiste eleme işlemine tabi tutulmuş ve elendikten sonra belirlenen şartname limitleri içerisinde kalan granülometriye göre boyutlarına ayrılarak tepsilere konulmuştur.

Tepsilenen agregalar yapılacak briket üretimi için kurumaya bırakıldı.



Şekil 12. Malzemenin elendikten sonra boyutlarına göre tepsilenmesi

Elenen malzeme etüve 18 saat önceden konuldu ve 160 °C'ye ayarlı etüvde bekletildi

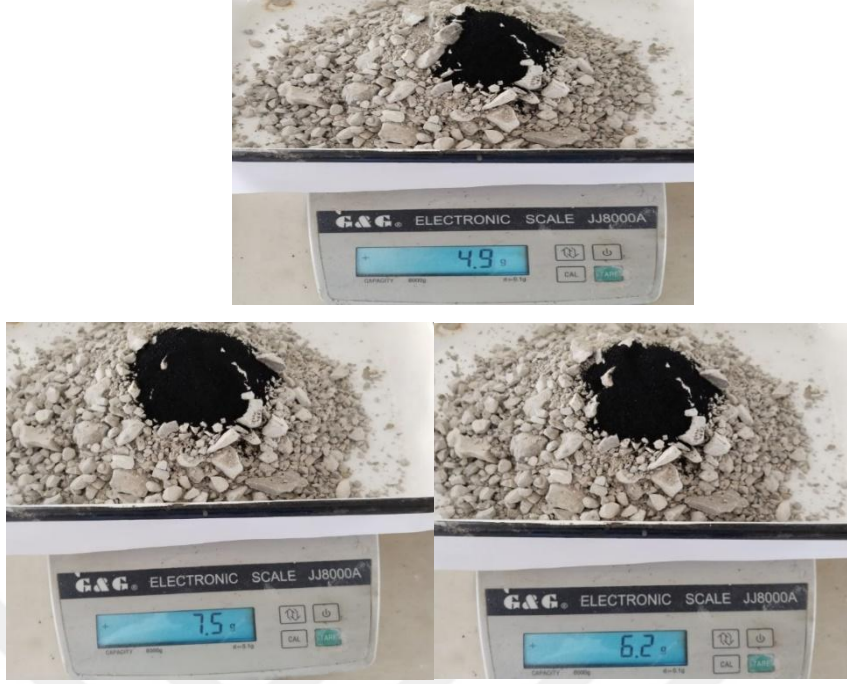


Şekil 13. Etüvde bekletilen agregalar

Kuruyan agregalar daha iyi karışma ve işlenebilirlik için briket oluşumundan hemen önce tekrar ısıtıldı. Marshall numuneleri ASTM D 1559 standardına göre hazırlandı. Karışım toplam 1150 gr agregat ile oluşturuldu.



Şekil 14. Marshall karışımı için agregat ölçümü



Şekil 15. Belirlenen oranda agregaya kırıntı kauçuk eklenmesi



Şekil 16. Etüvde bekletilen kalıp ve mikser kabı



Şekil 17. Kalıba dökülen karışım



Şekil 18. Numuneye yağlı kâğıt koyulması

Numune kalıbının taban kısmına uygun ölçülerde kesilmiş yağlı kâğıtlar koyuldu. Karışım sona erdikten sonra karışımın sıcaklığını düşürmemesi için etüvde tutulan kürek yardımıyla, mikser kabında bulunan malzeme numune kalıbının içerisine koyuldu. Üst kısmına da yağlı kâğıt konulan Marshall tokmağına yerleştirilip 75 vuruş yapılır. Aynı işlem kalıp ters çevrilip diğer yüzeyine de uygulanır. Diğer yüzüne de 75 vuruş yapıldıktan sonra kâğıtlar sökülür ve 3 saat soğuması beklendikten sonra krika yardımıyla briketler çıkartılır.



Şekil 19. Asfalt sıkıştırma tokmağıyla vuruş yapılması ve numunelerin sıkıştırılması

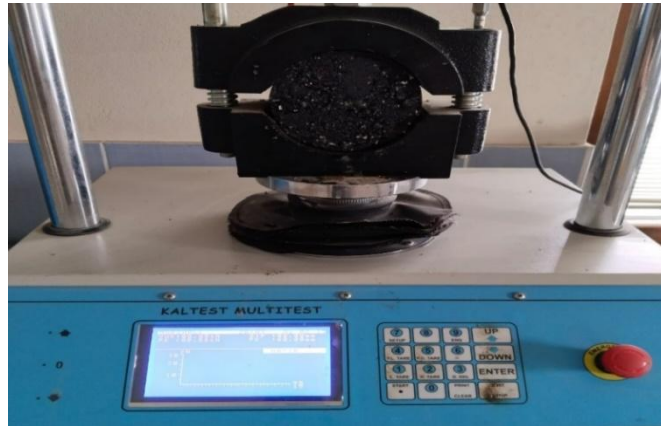


Şekil 20. Numunelerin kalıptan çıkarılması

Oda sıcaklığında bir gün bekletilen briketler yüzeyleri düzeltilerek 30 dakika 60 °C sıcaklıkta su banyosunda bekletildi. Bekletilen briketler kurulanıp Marshall test aletine yerleştirilip kırıldı. Akma değerleri ve stabilite değerleri cihazdan okunup not alındı.



Şekil 21. 30 dakika 60 °C sıcaklıkta bekletilen numuneler



Şekil 22. Marshall test cihazında numune kırılması

Marshall stabilite ve akma değerleri dijital olarak Marshall test cihazından okundu. Briketlerin daha önceden üç farklı noktadan kumpas yardımıyla ölçülmüş yüksekliklerinin ortalamasına göre okunan değerler düzeltme faktörleriyle çarpılarak gerçek stabilite değerleri tespit edildi.



3. BULGULAR

Marshall stabilite deneyi, farklı kırıntı kauçuk oranlarının asfalt karışımlarının mekanik performansına etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Deneylerden elde edilen ortalama değerler incelendiğinde, %8 kırıntı kauçuk oranında 14,36 kN stabilite ve 4,69 mm akma değerine ulaşılmıştır. %10 kırıntı kauçuk oranında stabilite değeri 16,63 kN ile en yüksek seviyeye çıkmış, akma değeri ise 4,04 mm olarak ölçülmüştür. %12 kırıntı kauçuk oranında ise stabilite 16,43 kN olarak korunmasına rağmen akma değeri 4,32 mm seviyesine yükselmiştir.

Bu sonuçlar, kırıntı kauçuk oranı arttıkça stabilite değerinde genel bir artış olduğunu, ancak belirli bir noktadan sonra özellikle %12'den itibaren bu artışın sınırlı kaldığını göstermektedir. Öte yandan, akma değerleri %8 oranında daha yüksek iken %10'da azalmış ve karışım daha rijit bir yapı sergilemiştir. %12 oranında ise akma değerinin tekrar yükselmesi, karışımın elastikiyetinin tekrar arttığını ve deformasyona daha yatkın hale geldiğini göstermektedir. Bu bulgular, literatürde kırıntı kauçuk katkısının asfalt karışımlarında hem stabiliteyi hem de plastisiteyi dengeleyici bir rol oynadığını ortaya koyan çalışmalarla uyumludur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, %10 kırıntı kauçuk oranı optimum performans noktası olarak öne çıkmaktadır. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (KTŞ, 2013) göre Marshall deneyi sonucunda elde edilmesi gereken akma değerleri tüm tabaka türleri (binder, aşınma Tip-1/2/3) için 2 mm ile 4 mm aralığında olmalıdır. Bu sınırlar, asfalt karışımlarının yeterli rijitlikte olmasını sağlarken aşırı deformasyon eğilimini de önlemeyi amaçlamaktadır.

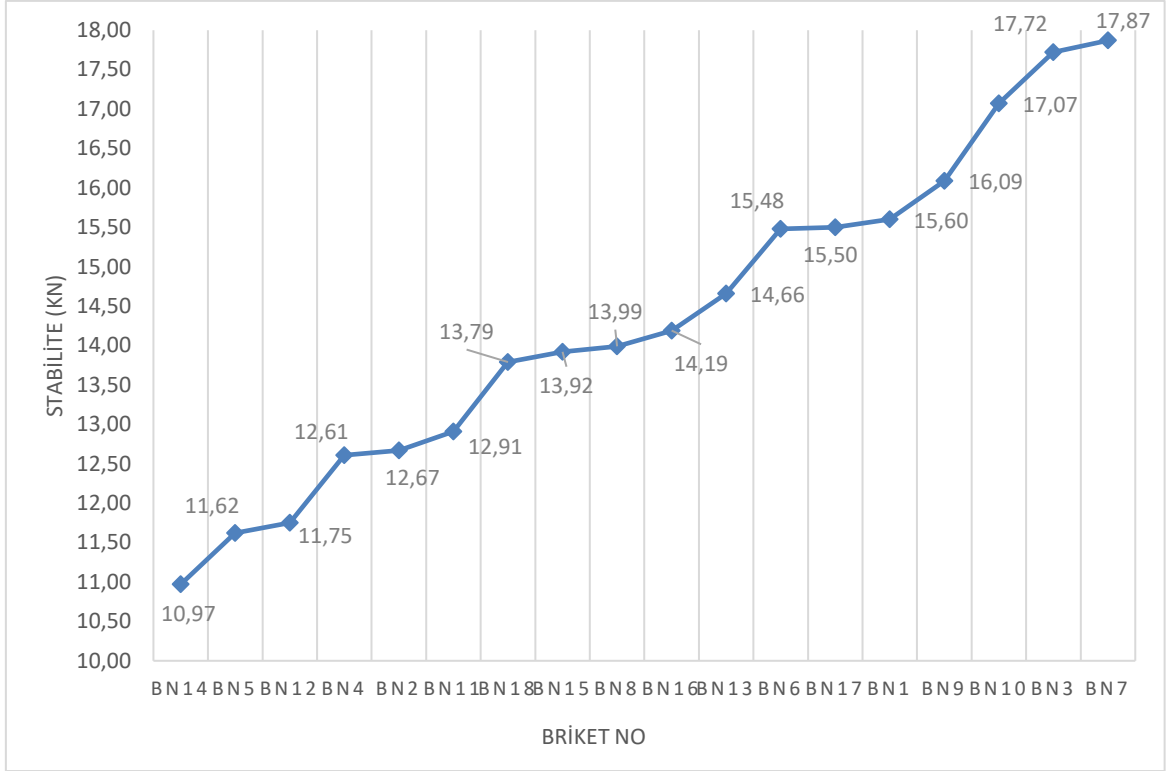
Yapılan deneylerde kırıntı kauçuk katkılı karışımlardan elde edilen ortalama akma değerleri incelendiğinde; %8 kırıntı kauçuk oranında 4,69 mm, %10 kırıntı kauçuk oranında 4,04 mm, %12 kırıntı kauçuk oranında ise 4,32 mm bulunmuştur. Bu sonuçlar, %8 ve %12 kırıntı kauçuk oranlarında akma değerlerinin KTŞ tarafından öngörülen üst sınırı aştığını, dolayısıyla bu oranların şartnameye tam olarak uygun olmadığını göstermektedir. Buna karşılık %10 kırıntı kauçuk oranında elde edilen 4,04 mm değeri, sınır değere çok yakın olmakla birlikte kabul edilebilir düzeydedir.

Sonuç olarak, KTŞ kriterleri ile deneysel bulgular karşılaştırıldığında, %10 kırıntı kauçuk oranı optimum performansa en yakın karışım olarak öne çıkmaktadır. Hem stabilite değerinin en yüksek seviyeye ulaşması hem de akma değerinin şartname sınırlarıyla uyumlu olması bu sonucu desteklemektedir.

Tablo 8. Marshall test sonuçları

CR ORANI	Yük (kN)	Akma (mm)	CR ORANI	Yük (kN)	Akma (mm)	CR ORANI	Yük (kN)	Akma (mm)
8%	15,6	5,98	10%	17,92	2,87	12%	14,98	5,31
	12,67	4,76		19,23	3,40		15,21	5,68
	17,72	3,54		18,94	3,67		13,31	5,49
	12,61	5,21		17,78	5,04		16,34	4,81
	11,62	6,18		19,32	3,61		15,31	5,44
	15,48	6,14		17,01	4,00		11,82	6,42
	17,87	4,57		18,97	3,83		17,2	2,96
	13,99	4,20		18,83	3,30		19,32	5,00
	16,09	4,11		12,13	4,97		20,69	3,31
	17,07	4,51		10,07	5,14		17,81	3,79
	12,91	2,20		21,54	3,31		17,24	3,80
	11,75	3,75		15,68	3,98		19,94	3,21
	14,66	4,98		13,66	5,22		16,14	3,29
	10,97	4,90		14,32	4,45		14,14	4,14
	13,92	4,81		14,22	4,35		16,1	3,80
	14,19	4,93		11,57	4,88		18,66	3,37
	15,5	4,43		19,39	3,63		18,24	3,31
	13,79	5,24		18,77	3,15		13,37	4,55
ORT.	14,36	4,69	ORT.	16,63	4,04	ORT.	16,43	4,32

Ortalama yükseklik 63,5 mm alınmış olup düzeltme faktörü 1 alınmıştır. Yukarıdaki oranlara göre her bir yüzdeden 18 adet briket hazırlanmıştır. Marshall test cihazında kırılan briketlerin akma ve yük değerleri yukarıda Tablo 7' de gösterilmiştir.



Şekil 23. %8 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite değerleri grafiği

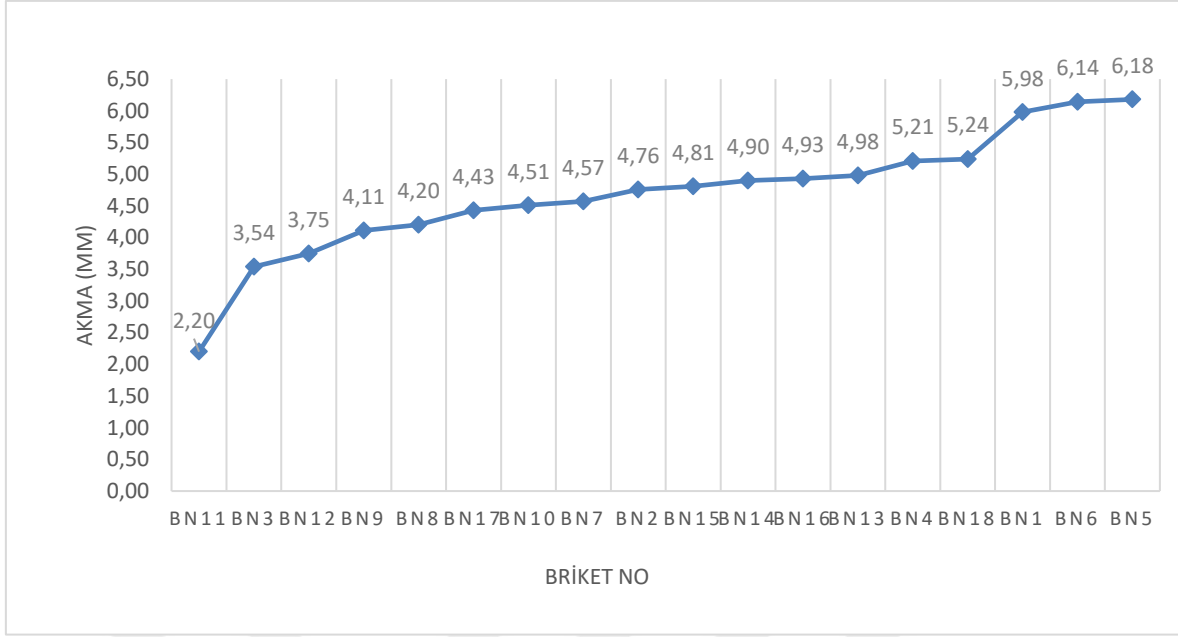
En düşük stabilite değeri 10,97 kN ile 14 numaralı brikette ölçülmüştür. Bu değer, serinin alt sınırını oluşturmakta ve malzemenin daha zayıf bir dayanım gösterdiğini işaret etmektedir. En yüksek stabilite değeri ise 17,87 kN ile 7 numaralı brikette elde edilmiştir. Bu değer, serinin üst sınırını göstermekte ve optimum stabilite açısından öne çıkmaktadır.

En yüksek stabilite değeri ile en düşük stabilite değeri arasındaki fark;

Fark = $17,87 - 10,97 = 6,90$ kN olup oransal olarak fark;

$6,90/10,97 \cdot 100 = 62,89$ yani en düşük ve en yüksek değer arasında yaklaşık %63'lük bir artış söz konusudur.

Grafik incelendiğinde, değerlerin düşük stabilite seviyelerinden başlayarak kademeli şekilde yükseldiği, arada küçük dalgalanmalar olsa da genel artan yönde olduğu görülmektedir. Özellikle 13 numaralı briketten sonra stabilite değerlerinde belirgin bir artış vardır.



Şekil 24. %8 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin akma değerleri grafiği

En düşük akma değeri 2,20 mm ile 11 numaralı briketten elde edilmiştir. Bu değer, serinin en düşük deformasyon kapasitesini göstermektedir. Numune, yük altında oldukça rijit davranmış ve çok az şekil değiştirmiştir. En yüksek akma değeri ise 6,18 mm ile 5 numaralı briketten elde edilmiştir. Bu değer, en yüksek deformasyon kapasitesine işaret etmektedir. Numune, yük altında daha fazla akma göstermiştir.

En yüksek ve en düşük akma değeri arasındaki fark;

$6,18 - 2,20 = 3,98$ mm dir. Oranlarsak $3,98/2,20 \cdot 100 = 180,9$ yani, en yüksek akma değeri en düşük değerden yaklaşık %181 daha fazladır.

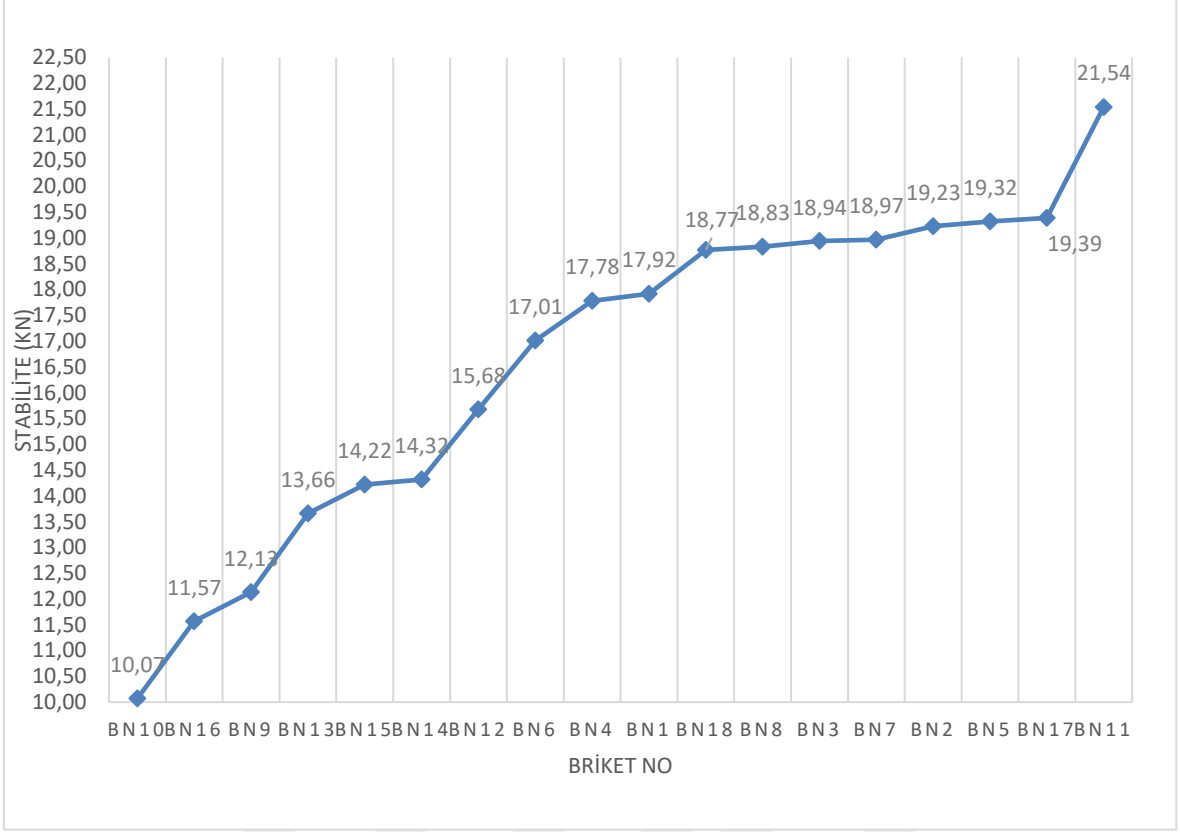
Bu çok yüksek bir farktır ve karışım içerisindeki bağlayıcı, agrega yapısı ve katkı oranlarının farklı numunelerde önemli değişkenlik gösterdiğini ortaya koyar.

Grafik incelendiğinde, akma değerlerinin 2,20 mm'den başlayarak kademeli şekilde yükseldiği görülmektedir.

2,20–4,5 mm aralığı: İlk numunelerde daha rijit bir davranış vardır. Bu, bağlayıcının düşük olması veya agregaların boşluksuz sıkışmasıyla açıklanabilir.

4,5–5,0 mm aralığı: Orta grup numunelerde akma daha dengeli ve sabittir. Bu aşama, optimum karışım koşullarına yaklaşıldığını gösterir.

5,0–6,18 mm aralığı: Son kısımda akma değerleri belirgin biçimde yükselmektedir. Bu durum bağlayıcı miktarının fazla olması veya kauçuk katkısının elastikiyet sağlamasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 25. %10 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite değerleri grafiği

En düşük stabilite değeri 10,07 kN ile 10 numaralı brikette ölçülmüştür. Bu değer, serinin alt sınırını oluşturmakta ve malzemenin daha zayıf bir dayanım gösterdiğini işaret etmektedir. En yüksek stabilite değeri ise 21,54 kN ile 11 numaralı brikette elde edilmiştir. Bu değer, serinin üst sınırını göstermekte ve optimum stabilite açısından öne çıkmaktadır.

En yüksek stabilite değeri ile en düşük stabilite değeri arasındaki fark;

$$21,54 - 10,07 = 11,47 \text{ kN olup oransal olarak fark;}$$

$11,47/10,07 \times 100 = 113,90$ yani en yüksek stabilite değeri, en düşük değerden yaklaşık %114 daha yüksektir. Bu oldukça büyük bir farktır ve karışım parametrelerinin stabilite üzerinde çok güçlü bir etkisi olduğunu göstermektedir.

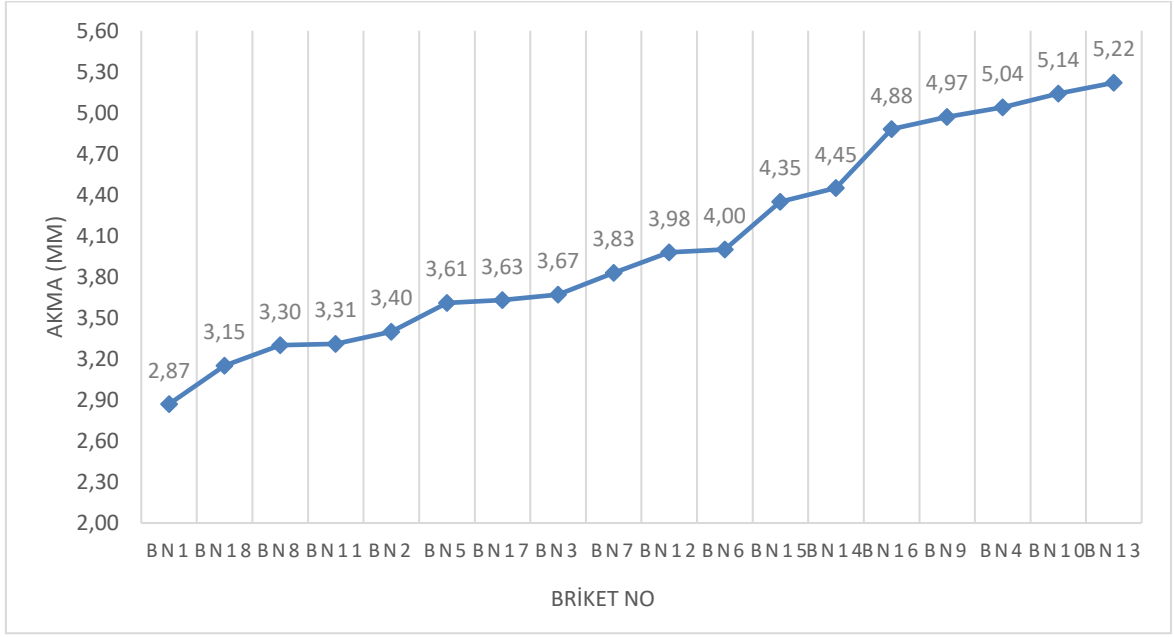
Grafik soldan sağa incelendiğinde stabilite değerlerinin 10,07 kN'den başlayarak kademeli şekilde arttığı görülmektedir.

10–14 kN aralığı: İlk numuneler düşük stabilite göstermekte olup, bu grupta bağlayıcı yetersizliği veya agreganın uygun diziliş göstermemesi söz konusu olabilir.

15–18 kN aralığı: Orta grup numunelerde stabilite belirgin şekilde yükselmiş ve kararlı bir eğilim sergilenmiştir.

18–21,54 kN aralığı: Son kısımda değerler üst seviyelere çıkmış ve özellikle BN11’de ani bir sıçrama ile en yüksek değer elde edilmiştir.

Bu grafikte stabilite değerleri 10,07 kN ile 21,54 kN arasında değişmekte, en yüksek ve en düşük değer arasında %114’lük fark bulunmaktadır. Bu durum, karışım parametrelerinin stabiliteyi belirlemede kritik rol oynadığını ve özellikle katkı malzemelerinin asfalt performansını ciddi şekilde artırabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 26. %10 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin akma değerleri grafiği

En düşük akma değeri 2,87 mm ile 1 numaralı briketten elde edilmiştir. Bu değer, numunenin yük altında oldukça rijit davrandığını ve deformasyon kabiliyetinin düşük olduğunu göstermektedir. En yüksek akma değeri ise 5,22 mm ile 13 numaralı briketten elde edilmiştir. Bu değer, en yüksek deformasyon kapasitesine işaret etmektedir. Numune, yük altında daha fazla şekil değiştirmiştir.

En yüksek ve en düşük akma değeri arasındaki fark;

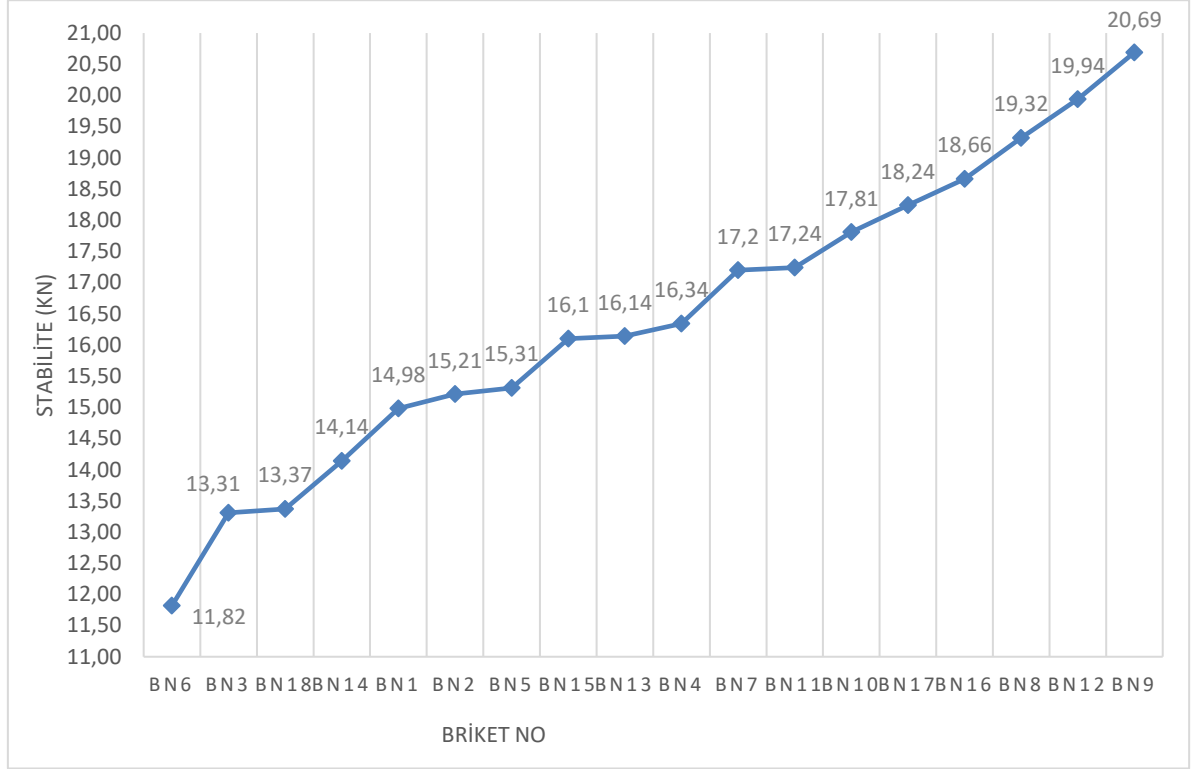
$5,22 - 2,87 = 2,35$ mm oranlarsak $2,35/2,87 \times 100 = 81,88$ yani, en yüksek akma değeri en düşük değerden yaklaşık %82 daha fazladır.

Grafik incelendiğinde değerler 2,87 mm’den başlayarak kademeli şekilde 5,22 mm’ye doğru yükselmiştir.

2,8–3,6 mm aralığı: İlk numunelerde düşük deformasyon gözlenmiştir. Bu, bağlayıcının düşük olması veya agregaların çok sıkı dizilmesinden kaynaklanabilir.

3,6–4,5 mm aralığı: Orta grup numunelerde akma değerleri daha dengeli ve optimum seviyeye yaklaşmıştır.

4,5–5,22 mm aralığı: Son kısımda akma değerleri belirgin artış göstermiştir. Bu durum, bağlayıcı miktarının fazla olması ya da kauçuk katkısının esnekliği artırmasından kaynaklanabilir.



Şekil 27. %12 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite değerleri grafiği

En düşük stabilite değeri 11,82 kN ile 6 numaralı brikette ölçülmüştür. Bu değer, serinin alt sınırını oluşturmakta ve malzemenin daha zayıf bir dayanım gösterdiğini işaret etmektedir. En yüksek stabilite değeri ise 20,69 kN ile 9 numaralı brikette elde edilmiştir. Bu değer, en yüksek dayanımı temsil etmekte olup, bağlayıcı miktarının optimuma yakın olduğunu ve agrega gradasyonunun yük taşıma kapasitesine katkı sağladığını göstermektedir.

En yüksek stabilite değeri ile en düşük stabilite değeri arasındaki fark;

$$20,69 - 11,82 = 8,87 \text{ kN olup oransal olarak fark;}$$

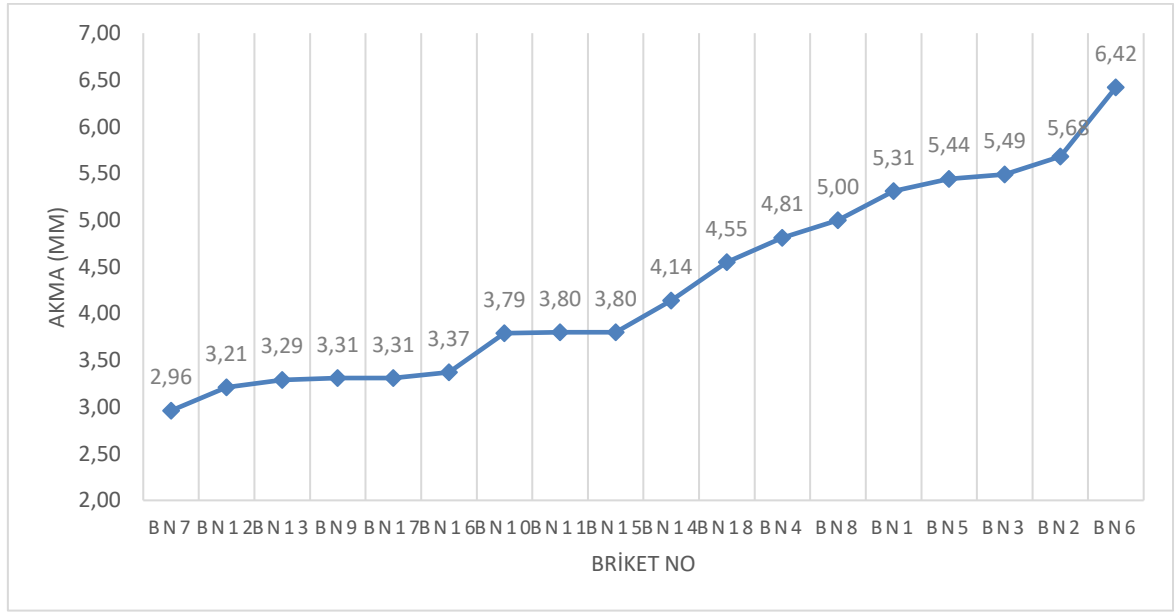
$8,87/11,82 \times 100 = 75,04$ yani en yüksek stabilite değeri, en düşük değerden yaklaşık %75 daha yüksektir.

Şekil, 11,82 kN'den başlayıp 20,69 kN'ye kadar çıkan düzenli bir artış trendi göstermektedir.

12–15 kN aralığı: Düşük stabilite seviyeleri - bağlayıcı miktarının yetersiz veya homojen dağılmamış olabileceği ihtimalini göstermektedir.

15–18 kN aralığı: Orta grup numuneler → daha dengeli ve kabul edilebilir değerler, optimuma yaklaşan karışımdır.

18–20,7 kN aralığı: Yüksek stabilite değerleri → agrega ve bitümün uyumu, katkı maddesinin etkinliği burada kendini göstermektedir.



Şekil 28. %12 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin akma değerleri grafiği

En düşük akma değeri 2,96 mm ile 7 numaralı briketten elde edilmiştir. Bu değer, yük altında oldukça rijit bir davranışı göstermektedir. Numunenin deformasyon kabiliyeti sınırlıdır. En yüksek akma değeri ise 6,42 mm ile 6 numaralı briketten elde edilmiştir. Bu değer, en fazla şekil değiştirme kapasitesine sahip numuneyi temsil etmektedir. Fazla bağlayıcı veya katkı, deformasyon kabiliyetini artırmış olabilir.

En yüksek ve en düşük akma değeri arasındaki fark;

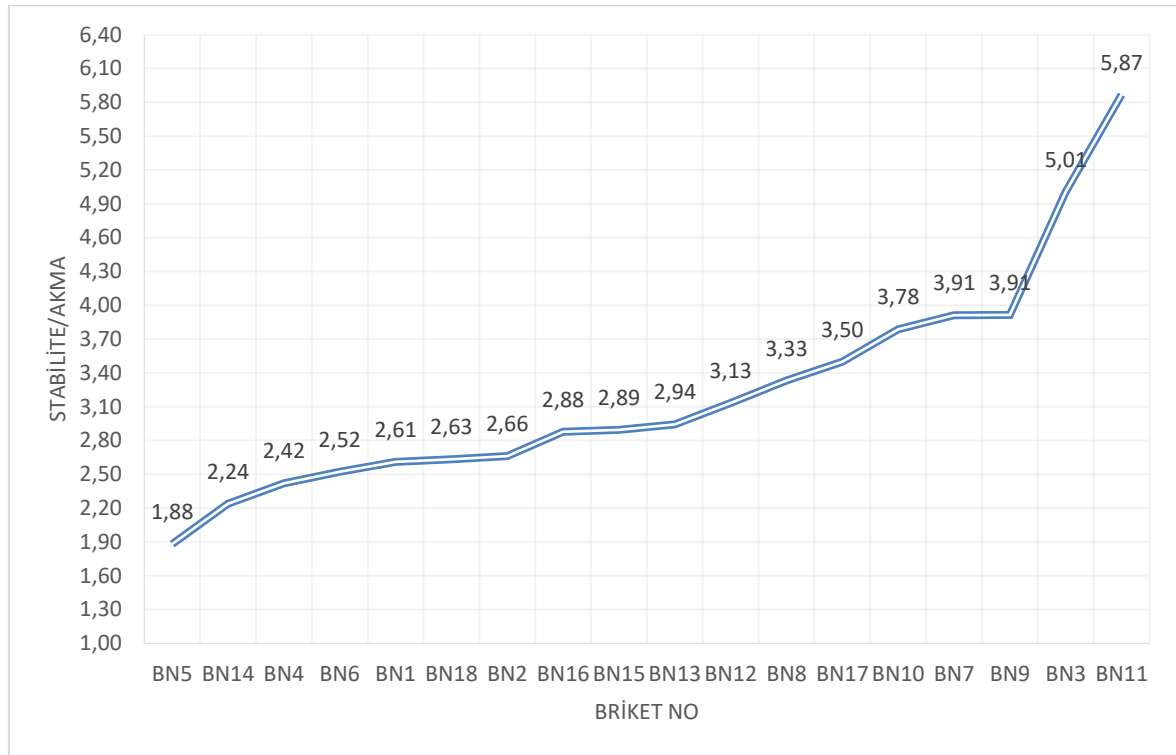
$6,42 - 2,96 = 3,46$ mm oranlarsak $3,46/2,96 \cdot 100 = 116,90$ yani, en yüksek akma değeri en düşük değerden yaklaşık %117 daha fazladır.

Şekil incelendiğinde, akma değerlerinin 2,96 mm'den başlayarak kademeli olarak 6,42 mm'ye yükseldiği net bir şekilde görülmektedir.

3,0–3,5 mm aralığı (ilk numuneler): Rijit ve düşük deformasyon kapasitesi, muhtemelen düşük bitüm oranı veya sıkı agrega yapısı.

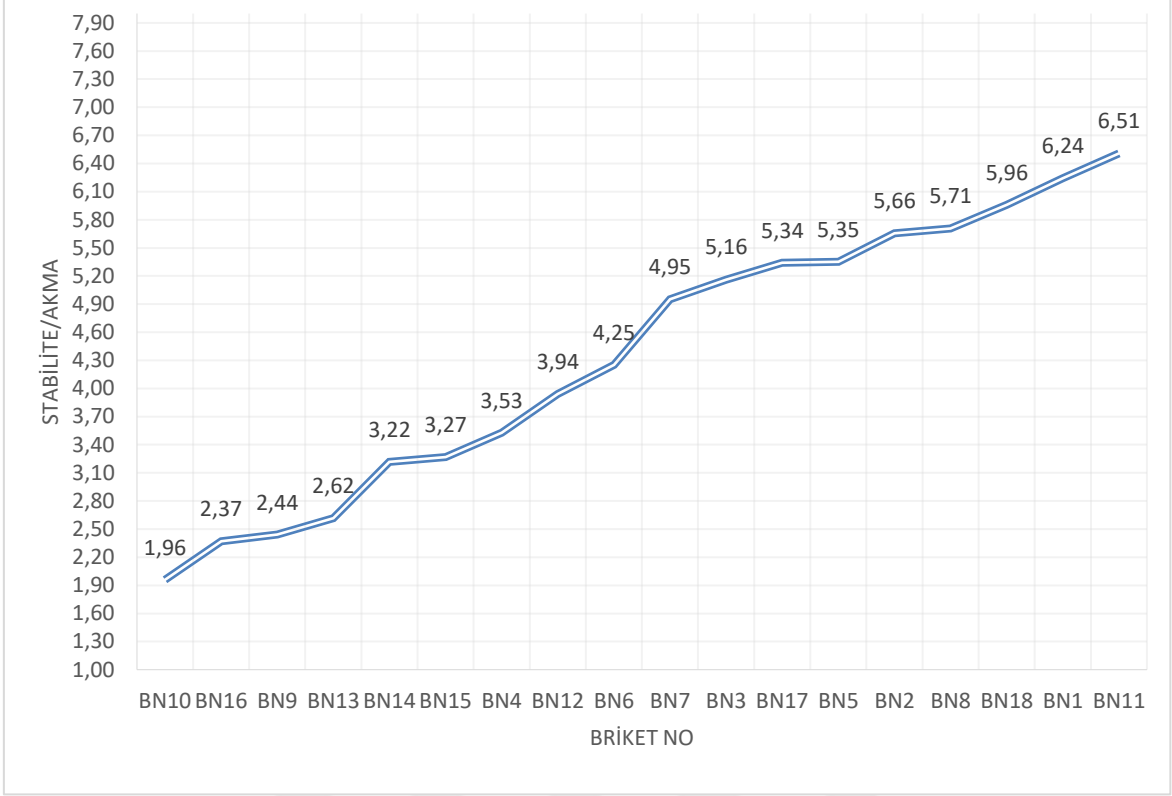
3,5–4,5 mm aralığı (orta grup): Daha dengeli değerler, optimuma yakın akma davranışını göstermektedir.

4,5–6,42 mm aralığı (son grup): Artan esneklik; özellikle BN6 gibi yüksek değerler fazla bağlayıcı veya katkının deformasyon kapasitesini artırmasıyla açıklanabilir.



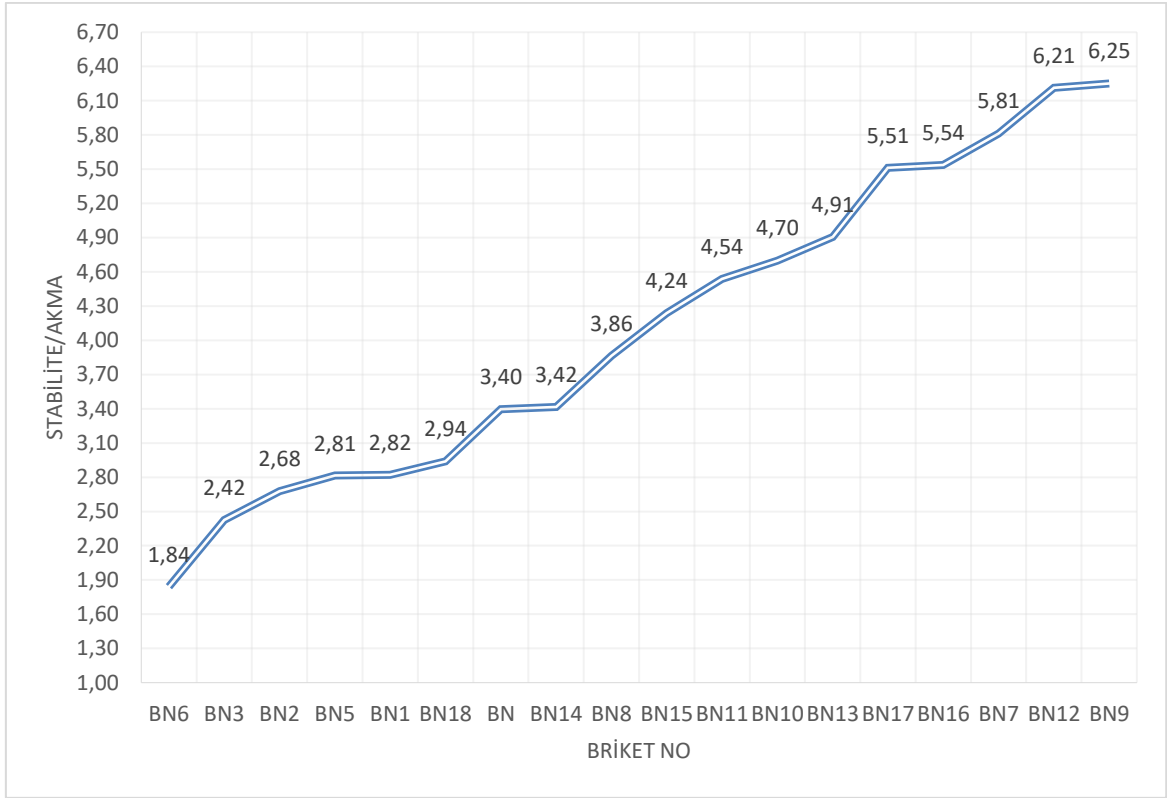
Şekil 29. %8 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite /akma değerleri grafiği

Şekildeki değerlere göre briket numunelerinin stabilite/akma oranları arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. En düşük değer BN5 (1,88) iken, en yüksek değer BN11 (5,87) olarak kaydedilmiştir. Bu durum, numuneler arasında yaklaşık %212'lik bir performans farkı olduğunu göstermektedir. Orta seviyede yer alan numuneler genellikle 2,5 – 3,5 aralığında yoğunlaşmış, üst gruptaki numuneler ise 3,9 – 5,9 aralığında daha yüksek performans sergilemiştir. Genel eğilim, düşük değerlerden yüksek değerlere doğru kademeli bir artış yönündedir. Bu farklılıklar, karışım içeriği, kırıntı kauçuk oranı, sıkıştırma derecesi veya laboratuvar koşullarındaki değişkenlikten kaynaklanmış olabilir.



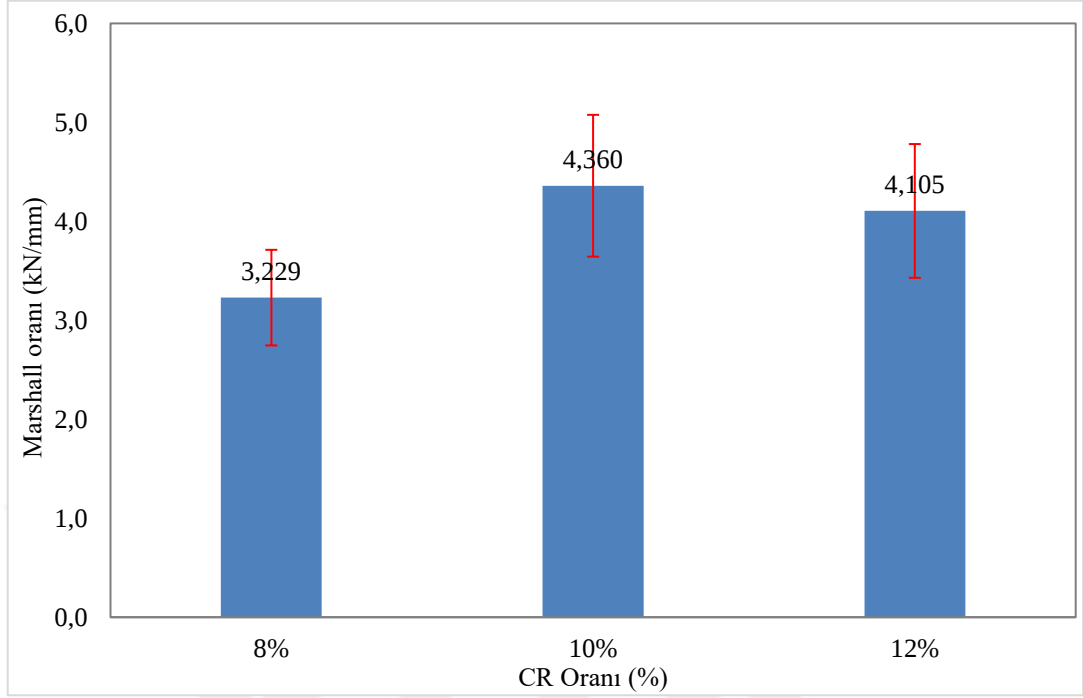
Şekil 30. %10 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite/akma değerleri grafiği

Şekilden elde edilen verilere göre briket numunelerinin stabilite/akma oranlarında belirgin bir artış eğilimi gözlenmektedir. En düşük değer BN10 numunesinde 1,96 olarak ölçülürken, en yüksek değer BN11 numunesinde 6,51 olarak kaydedilmiştir. Bu iki uç değer arasında yaklaşık %232'lik bir performans farkı bulunmaktadır. Orta seviyedeki numuneler genellikle 3,0 – 4,5 aralığında yoğunlaşmış olup dengeli bir performans göstermektedir. Buna karşılık BN7, BN3, BN17, BN5, BN2, BN8, BN18, BN1 ve BN11 numuneleri daha yüksek değerler sergileyerek 5,0 – 6,5 aralığında üst seviyede bir performans ortaya koymuştur. Genel eğilim, düşük değerlerden yüksek değerlere doğru kademeli bir artış şeklindedir. Bu sonuçlar, karışım parametreleri (örneğin kırıntı kauçuk oranı, bitüm miktarı, sıkıştırma derecesi) ile stabilite/akma oranı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Özellikle BN11 numunesi, en yüksek değeriyle optimum karışım koşullarına en yakın performansı sergilemiştir.



Şekil 31. %12 Kırıntı kauçuk ile elde edilen 18 adet briketin stabilite/akma değerleri grafiği

Şekilden elde edilen sonuçlara göre briket numunelerinin stabilite/akma oranlarında belirgin bir artış eğilimi gözlenmektedir. En düşük değer BN6 numunesinde 1,84 olarak ölçülmüş, en yüksek değer ise BN9 numunesinde 6,25 olarak kaydedilmiştir. Bu iki uç değer arasında yaklaşık %240'lık bir fark bulunması, numuneler arasındaki performans farklılıklarını açıkça ortaya koymaktadır. Orta seviyedeki numuneler çoğunlukla 2,8 – 4,0 aralığında toplanırken, BN13, BN17, BN16, BN7, BN12 ve BN9 numuneleri daha yüksek değerler sergileyerek üst performans grubunu oluşturmuştur. Genel eğilim, düşük değerlerden yüksek değerlere doğru kademeli bir artış şeklindedir. Özellikle BN9 numunesi, en yüksek değeriyle optimum koşullara en yakın sonucu vermektedir.

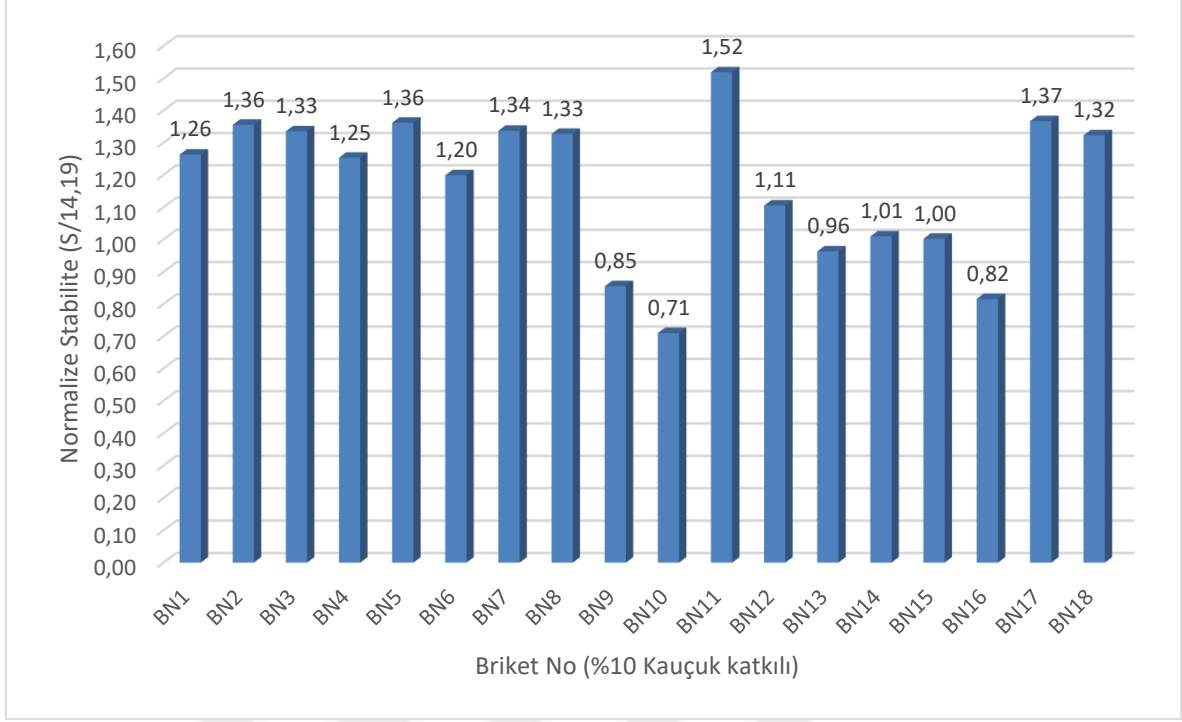


Şekil 32. Farklı kırıntı kauçuk oranlarında ortalama stabilite /akma değerlerinin standart sapma grafiği

Grafik incelendiğinde, CR oranı %8'den %10'a artırıldığında stabilite/akma değerinde belirgin bir artış meydana geldiği görülmektedir. %8 CR oranında ortalama stabilite/akma 3,229 kN/mm iken, %10 CR oranında bu değer 4,360 kN/mm'ye yükselmiştir. Bu durum belirli bir orana kadar karışıma ilave edilen kırıntı kauçuğun agregalar arasındaki bağ dayanımını artırarak yük taşıma kapasitesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

Ancak CR oranının %12'ye çıkarılmasıyla stabilite/akma değerinde hafif bir azalma gözlenmiştir.(4,105kN/mm).Bu düşüş, yüksek oranda kauçuk ilavesinin bitüm içeriğindeki kohezyon ve agrega bitüm aderansını olumsuz etkileyebileceğini, dolayısıyla karışım stabilitesini sınırlayabileceğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, karışıma optimum düzeyde (%10) kırıntı kauçuk ilavesinin stabilite/akma üzerinde en yüksek olumlu etkiyi oluşturduğu; daha yüksek oranlarda ise bu etkinin azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Standart sapma değerlerinin düşük olması da deneysel verilerin güvenilir ve tekrarlanabilir olduğunu desteklemektedir



Şekil 33. %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı)

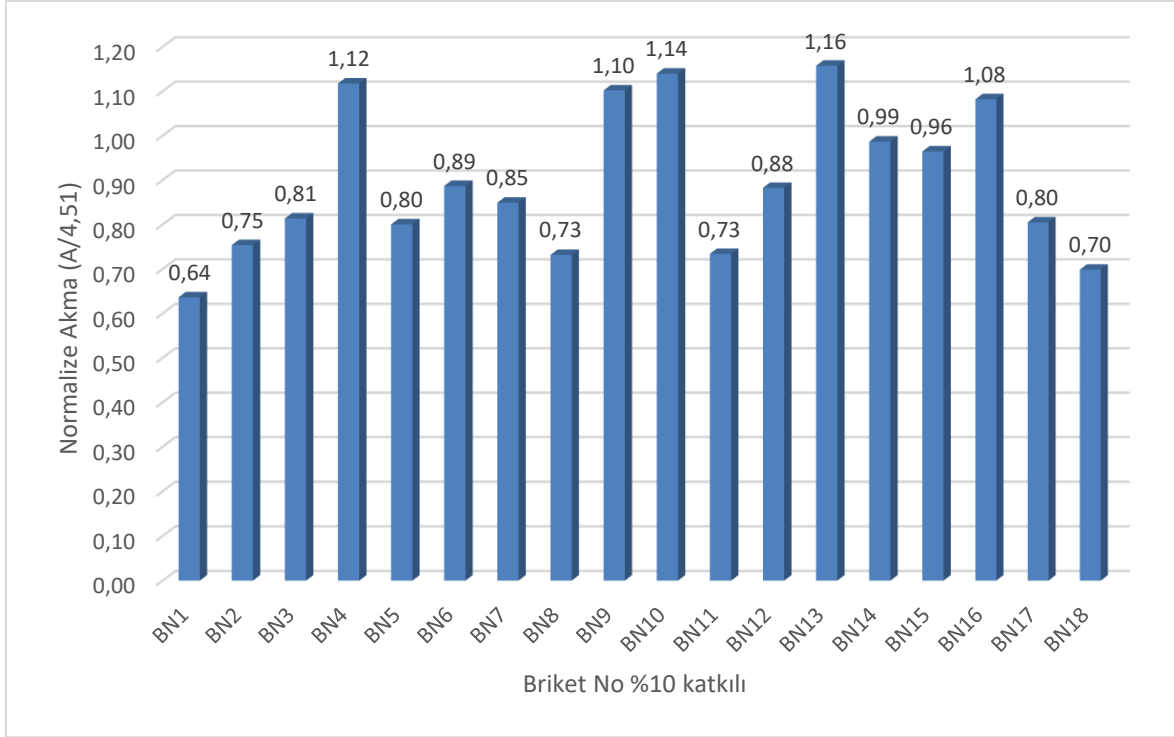
Şeklin yatay eksenindeki değerleri %10 kırıntı kauçuk katkısı kullanılarak elde edilmiş 18 numunenin briket numaralarını göstermektedir. Dikey eksen ise bu herbir briketin stabilite değerinin %8 kırıntı kauçuk katkı oranlı ortalamaya en yakın stabilite değerine sahip briketin stabilitesine bölünerek bulunmuş değerleri göstermektedir. %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin stabilite değerleri, %8 kırıntı kauçuk grubunun ortalama stabilitesine en yakın değeri (14,19 kN, 16 numaralı briket) referans alınarak normalize edilmiştir. Böylece her bir numunenin %8 katkısına göre göreceli stabilite performansı ortaya konmuştur.

Tablo 9. %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı)

Briket No	Stabilite (kN) - %10 CR	Normalize Stabilite (S/14,19)
1	17.92	1.26
2	19.23	1.36
3	18.94	1.33
4	17.78	1.25
5	19.32	1.36
6	17.01	1.20
7	18.97	1.34
8	18.83	1.33

Tablo 9'un devamı

Briket No	Stabilite (kN) - %10 CR	Normalize Stabilite (S/14,19)
9	12.13	0.85
10	10.07	0.71
11	21.54	1.52
12	15.68	1.11
13	13.66	0.96
14	14.32	1.01
15	14.22	1.00
16	11.57	0.82
17	19.39	1.37
18	18.77	1.32



Şekil 34. %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı)

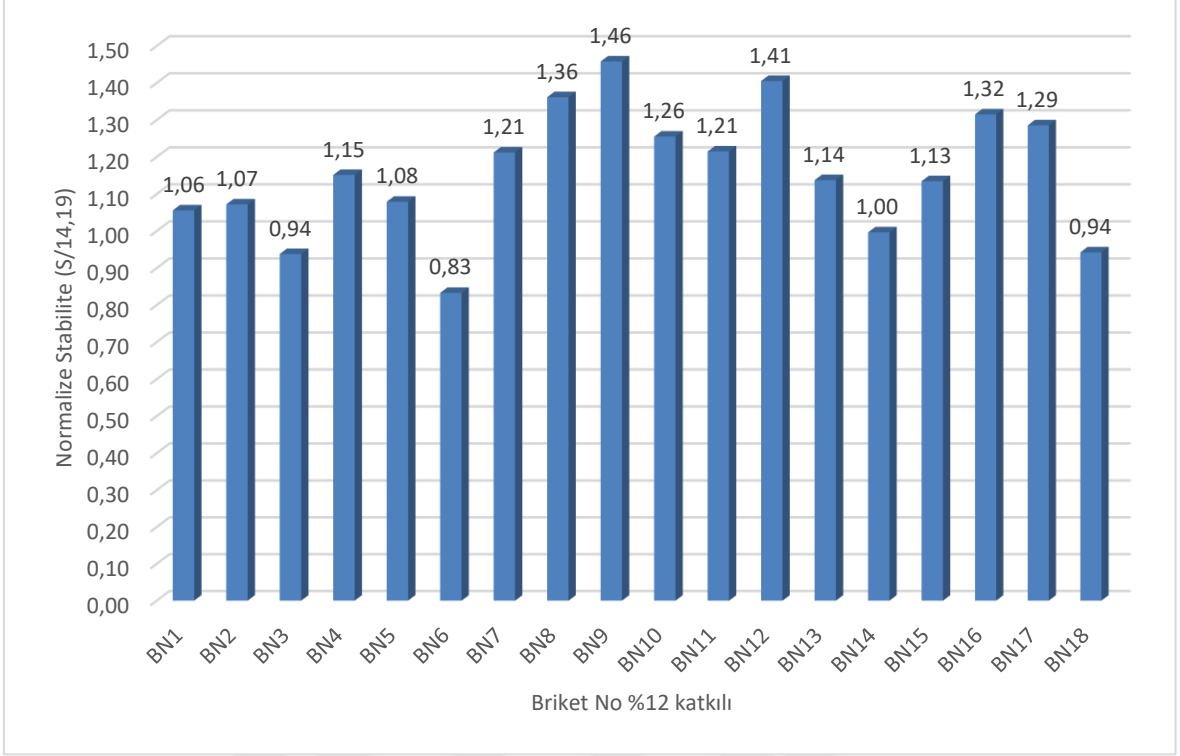
Şeklin yatay eksenindeki değerleri %10 kırıntı kauçuk katkısı kullanılarak elde edilmiş 18 numunenin briket numaralarını göstermektedir. Dikey eksen ise bu herbir briketin akma değerinin %8 kırıntı kauçuk katkı oranlı ortalamaya en yakın akma değerine sahip briketin akma değerine bölünerek bulunmuş değerlerini mm cinsinden göstermektedir. %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin akma değerleri, %8 kırıntı kauçuk grubunun ortalama akmasına en yakın değeri (4,51 mm, 10 numaralı briket) referans alınarak normalize edilmiştir. Bu

yöntemle, %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin akma performansı, %8 kırıntı kauçuk katkılı grubun tipik (ortalamaya en yakın) akma değeri referans alınarak değerlendirilmiştir. Böylece her bir numunenin, %8 katkılı karışıma göre göreceli akma performansı karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

Tablo 10. %10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı)

Briket No	Akma (mm) - %10 CR	Normalize Akma (A/4,51)
1	2.87	0.64
2	3.40	0.75
3	3.67	0.81
4	5.04	1.12
5	3.61	0.80
6	4.00	0.89
7	3.83	0.85
8	3.30	0.73
9	4.97	1.10
10	5.14	1.14
11	3.31	0.73
12	3.98	0.88
13	5.22	1.16
14	4.45	0.99
15	4.35	0.96
16	4.88	1.08
17	3.63	0.80
18	3.15	0.70

%10 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin akma değerleri, %8 kırıntı kauçuk grubunun ortalamaya en yakın akma değerine (4,51 mm, 10 numaralı briket) bölünerek normalize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, numuneler arasında hem artış hem de azalış eğilimlerinin mevcut olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte ortalama değerlere bakıldığında, %8 kırıntı kauçuk için akma değeri 4,69 mm iken %10 kırıntı kauçuk için bu değer 4,04 mm olarak bulunmuştur. Bu durum, genel eğilimin akma değerlerinde düşüş yönünde olduğunu, yani %10 katkısının karışımı daha rijit hale getirdiğini göstermektedir. Ancak tekil numune sonuçlarında gözlenen yüksek değişkenlik, karışım homojenliğinin azalabileceğine ve bazı numunelerde rijitliğin aşırı artarak çatlama riskini yükseltebileceğine işaret etmektedir. Dolayısıyla, %10 katkı oranı akma davranışı açısından genel bir iyileşme eğilimi sergilese de, performansın güvenilirliği ve homojenliği bakımından dikkatle değerlendirilmelidir.



Şekil 35. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı)

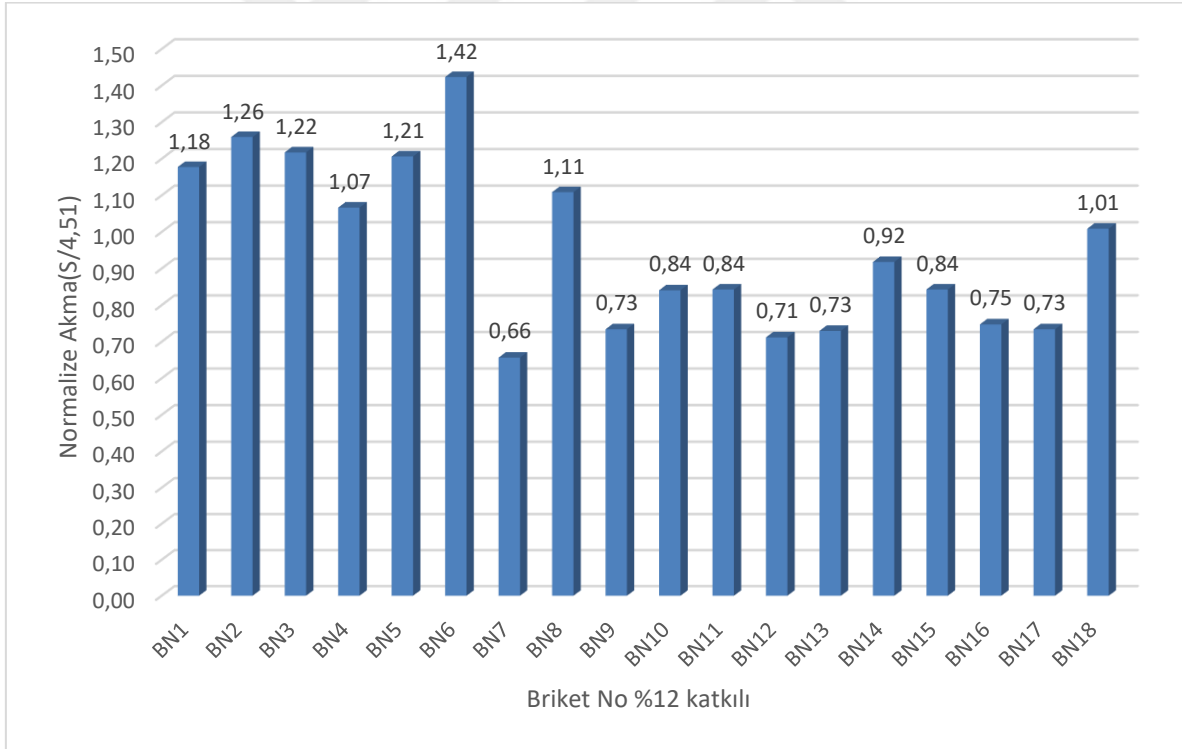
Şeklin yatay eksenindeki değerleri %12 kırıntı kauçuk katkısı kullanılarak elde edilmiş 18 numunenin briket numaralarını göstermektedir. Dikey eksen ise bu her bir briketin stabilite değerinin %8 kırıntı kauçuk katkı oranlı ortalamaya en yakın stabilite değerine sahip briketin değerine bölünerek bulunmuş değerlerini KN cinsinden göstermektedir. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin stabilite değerleri, %8 kırıntı kauçuk grubunun ortalama stabilitesine en yakın değeri (14,19 kN, 16 numaralı briket referans alınarak normalize edilmiştir. Bu yöntemle, %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin stabilite performansı, %8 kırıntı kauçuk katkılı grubun tipik (ortalamaya en yakın) stabilite değeri referans alınarak değerlendirilmiştir. Böylece %12 katkılı karışımların stabilite davranışları, %8 katkısına göre göreceli artış ve azalış eğilimleri üzerinden okunabilmektedir.

Tablo 11. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı)

Briket No	Stabilite (kN) - %12 CR	Normalize Stabilite (S/14,19)
1	14.98	1.06
2	15.21	1.07
3	13.31	0.94

Tablo 11'in devamı

Briket No	Stabilite (kN) - %12 CR	Normalize Stabilite (S/14,19)
4	16.34	1.15
5	15.31	1.08
6	11.82	0.83
7	17.20	1.21
8	19.32	1.36
9	20.69	1.46
10	17.81	1.26
11	17.24	1.21
12	19.94	1.41
13	16.14	1.14
14	14.14	1.00
15	16.10	1.13
16	18.66	1.32
17	18.24	1.29
18	13.37	0.94



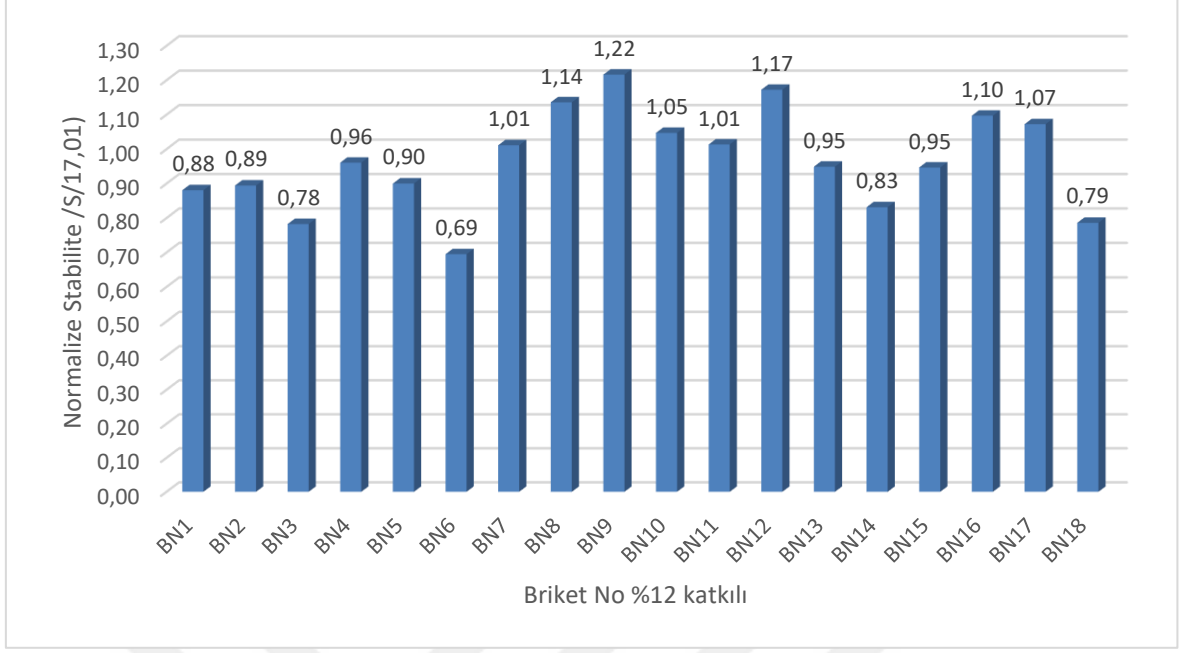
Şekil 36. %12 kırıntı kauçuk katkıli numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı)

Şeklin yatay eksenindeki değerleri %12 kırıntı kauçuk katkısı kullanılarak elde edilmiş 18 numunenin briket numaralarını göstermektedir. Dikey eksen ise bu herbir briketin akma

değerinin %8 kırıntı kauçuk katkı oranlı ortalama en yakın akma değerine sahip briketin akma değerine bölünerek bulunmuş değerlerini mm cinsinden göstermektedir. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin akma değerleri, %8 kırıntı kauçuk grubunun ortalama akmasına en yakın değeri (4,51 mm, 10 numaralı briket) referans alınarak normalize edilmiştir. Bu yöntemle, %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin akma performansı, %8 kırıntı kauçuk katkılı grubun tipik (ortalama en yakın) akma değeri referans alınarak değerlendirilmiştir. Böylece her bir numunenin, %8 katkılı karışıma göre göreceli akma performansı karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

Tablo 12. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%8 kırıntı kauçuk referanslı)

Briket No	Akma (mm) - %12 CR	Normalize Akma (A/4,51)
1	5.31	1.18
2	5.68	1.26
3	5.49	1.22
4	4.81	1.07
5	5.44	1.21
6	6.42	1.42
7	2.96	0.66
8	5.00	1.11
9	3.31	0.73
10	3.79	0.84
11	3.80	0.84
12	3.21	0.71
13	3.29	0.73
14	4.14	0.92
15	3.80	0.84
16	3.37	0.75
17	3.31	0.73
18	4.55	1.01



Şekil 37. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%10 kırıntı kauçuk referanslı)

Şeklin yatay eksenindeki değerleri %12 kırıntı kauçuk katkısı kullanılarak elde edilmiş 18 numunenin briket numaralarını göstermektedir. Dikey eksen ise bu herbir briketin stabilite değerinin %10 kırıntı kauçuk katkı oranlı ortalamaya en yakın stabilite değerine sahip briketin değerine bölünerek bulunmuş değerlerini kN cinsinden göstermektedir. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin stabilite değerleri, %10 kırıntı kauçuk grubunun ortalama stabilitesine en yakın değeri (17,01 kN, 6 numaralı briket referans alınarak normalize edilmiştir. Bu yöntemle, %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin stabilite performansı, %10 kırıntı kauçuk katkılı grubun tipik (ortalamaya en yakın) stabilite değeri referans alınarak değerlendirilmiştir. Böylece %12 katkılı karışımların stabilite davranışları, %10 katkısına göre görece artış ve azalış eğilimleri üzerinden okunabilmektedir.

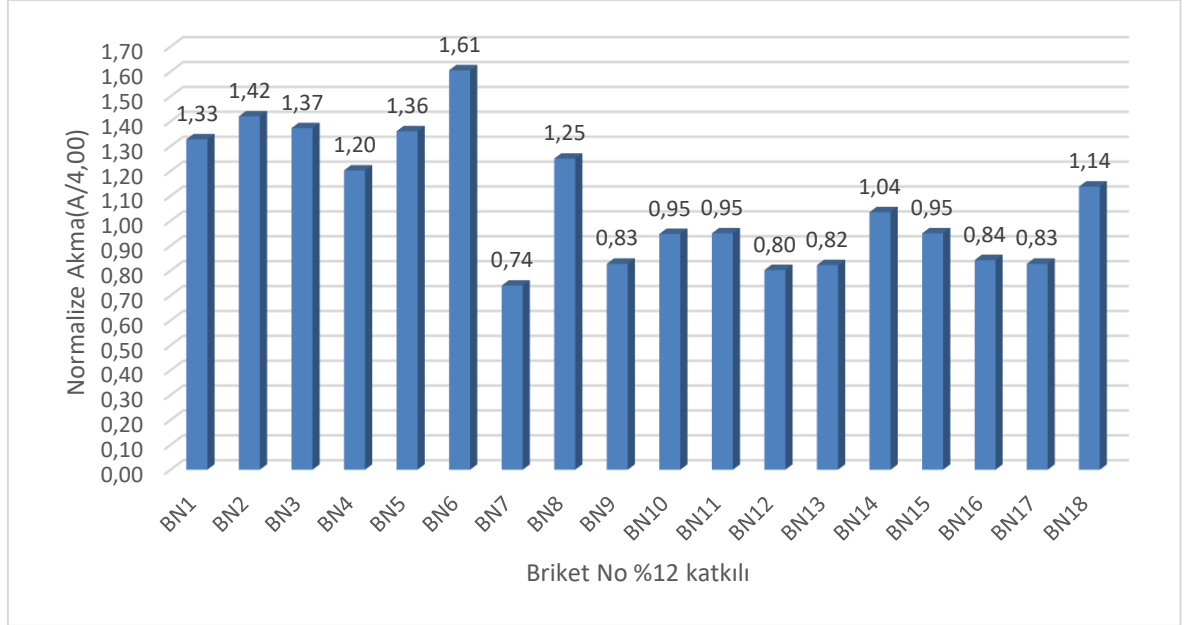
Tablo 13. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize stabilite değerleri (%10 kırıntı kauçuk referanslı)

Briket No	Normalize Stabilité (S/17,01)
1	0,88
2	0,89
3	0,78
4	0,96
5	0,90
6	0,69

Tablo 13'ün devamı

Briket No	Normalize Stabilité (S/17,01)
7	1.01
8	1.14
9	1.22
10	1.05
11	1.01
12	1.17
13	0.95
14	0.83
15	0.95
16	1.10
17	1.07
18	0.79

Normalize değerler incelendiğinde, %12 katkılı karışımların %10 katkısına göre hem artış hem de azalış sergilediği, ortalamanın ise yaklaşık 1,00 civarında olduğu görülmektedir. Numuneler arasındaki geniş varyasyon, yüksek katkı oranında karışım homojenliğinin azaldığını göstermektedir.



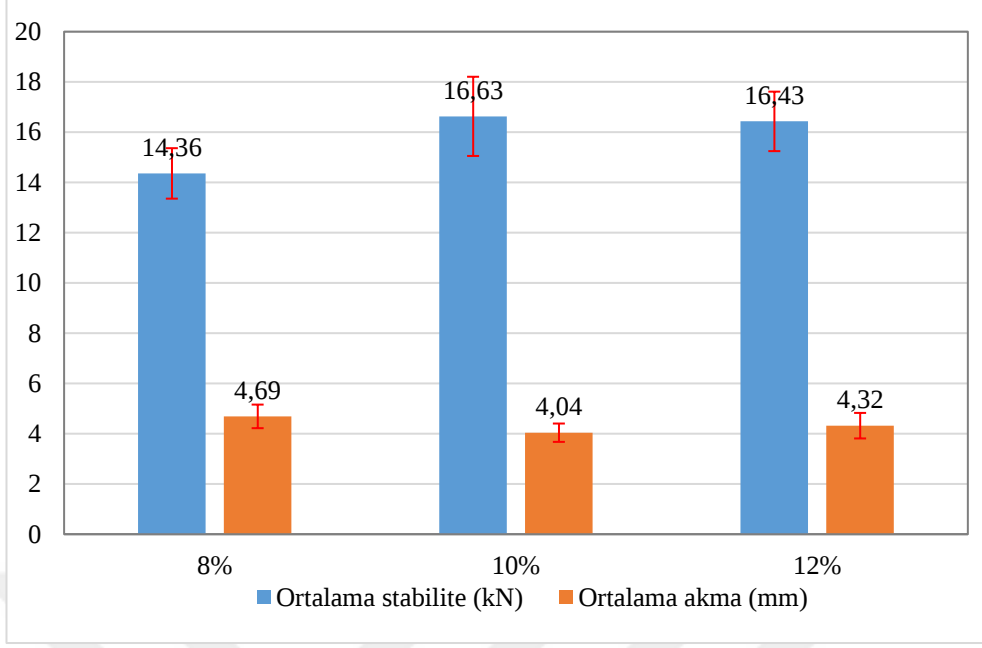
Şekil 38. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%10 kırıntı kauçuk referanslı)

Şeklin yatay eksenindeki değerleri %12 kırıntı kauçuk katkısı kullanılarak elde edilmiş 18 numunenin briket numaralarını göstermektedir. Dikey eksen ise bu her bir briketin akma

değerinin %10 kırıntı kauçuk katkı oranlı ortalama en yakın akma değerine sahip briketin değerine bölünerek bulunmuş değerlerini mm cinsinden göstermektedir. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin akma değerleri, %10 kırıntı kauçuk grubunun ortalama akmasına en yakın değeri (4,00 mm, 6 numaralı briket referans alınarak normalize edilmiştir.

Tablo 14. %12 kırıntı kauçuk katkılı numunelerin normalize akma değerleri (%10 kırıntı kauçuk referanslı)

Briket No	Normalize Akma (A/4,00)
1	1.33
2	1.42
3	1.37
4	1.20
5	1.36
6	1.61
7	0.74
8	1.25
9	0.83
10	0.95
11	0.95
12	0.80
13	0.82
14	1.04
15	0.95
16	0.84
17	0.83
18	1.14



Şekil 39. Farklı kırıntı kauçuk oranlarında ortalama yük ve akma değerlerinin standart sapma grafiği

Marshall Ortalama Stabilite ve Akma Değerlerinin Değerlendirilmesi

Her bir kırıntı kauçuk katkı oranı için elde edilen ortalama stabilite ve akma değerleri kendi içinde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, her katkı oranının karışıma sağladığı dayanım ve deformasyon özelliklerini ayrı ayrı ortaya koymaktadır.

Tablo 15. Farklı kırıntı kauçuk oranlarında ortalama yük ve akma değerleri grafiği

Kırıntı Kauçuk Oranı	Ortalama Stabilite (kN)	Ortalama Akma (mm)
%8 katkılı	14.36	4.69
%10 katkılı	16.63	4.04
%12 katkılı	16.43	4.32

%8 katkılı: Ortalama stabilite 14,36 kN, akma ise 4,69 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar karışımın daha esnek ancak düşük rijitlikte olduğunu göstermektedir.
 %10 katkılı: Ortalama stabilite 16,63 kN ile en yüksek değere ulaşırken, akma 4,04 mm ile en düşük seviyeye düşmüştür. Bu durum, karışımın hem dayanım hem de rijitlik açısından en dengeli ve optimum özellikleri sağladığını ortaya koymaktadır.
 %12 katkılı: Ortalama stabilite 16,43 kN olup %10 katkıya çok yakın kalmıştır. Ancak

akmanın 4,32 mm'ye yükselmesi, karışımın rijitliğinin azaldığını ve esnekliğinin arttığını göstermektedir. Bu durum, yüksek katkı oranında karışım homojenliğinin zayıfladığına işaret etmektedir.

Şekil 40 incelendiğinde, stabilite ve akma parametrelerine ait standart sapma değerlerinin düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Bu durum, deneysel verilerin istatistiksel güvenilirliğinin yüksek olduğunu ve sonuçların tekrarlanabilir nitelikte elde edildiğini göstermektedir. CR oranındaki artışla birlikte stabiliteye ait standart sapma değerlerinde gözlenen kısmi yükselme, karışım içerisinde kauçuk partiküllerinin dağılım homojenliğinin belirli oranlarda değişebileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, ortalama değerler kendi içinde değerlendirildiğinde %10 kırıntı kauçuk katkısının stabilite ve akma değerleri bakımından optimum dengeyi sağladığı ve mühendislik açısından en uygun katkı oranı olduğu görülmektedir. Standart sapma değerleri, karışımın genel performans tutarlılığını desteklemektedir.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı oranlarda kırıntı kauçuk katkısının asfalt karışımlarının Marshall stabilite ve akma değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, katkı oranının artmasıyla birlikte stabilite değerlerinde genel bir artış eğilimi olduğunu, akma değerlerinde ise dalgalı bir değişim görüldüğünü ortaya koymuştur. Özellikle %10 katkı oranı, en yüksek ortalama stabilite değerine (16,63 kN) ulaşırken akma değerinin (4,04 mm) Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) sınırlarına en yakın olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın %8 ve %12 katkı oranlarında akma değerlerinin şartname sınırlarını aştığı belirlenmiştir. Bu bulgular, optimum performansın %10 kırıntı kauçuk oranında elde edildiğini göstermektedir.

Numune bazında incelendiğinde, %8 katkılı karışımların stabilite değerleri 10,97–17,87 kN aralığında değişmiş, %12 katkılı karışımlarda ise bu değer 11,82–20,69 kN arasında gözlenmiştir. Özellikle %10 katkılı karışımlarda stabilite aralığının 10,07–21,54 kN'ye kadar genişlemesi, katkı oranının artmasıyla performans farklılıklarının da arttığını ortaya koymaktadır. Bu durum, yüksek katkı oranlarında karışımın homojenliğinin azalabileceğine işaret etmektedir. Standart sapma değerlerinin %10 katkıda $\pm 1,47$ ile daha yüksek bulunması, bu yorumu destekler niteliktedir. Diğer yandan normalize edilmiş değerler incelendiğinde, %10 katkının %8'e kıyasla stabilite performansını belirgin biçimde iyileştirdiği, ancak akma performansında tekil numuneler arasında farklılıkların oluştuğu görülmektedir. Bu sonuçlar, katkı oranının artmasının sadece dayanımı değil, aynı zamanda karışımın homojenlik düzeyini de etkilediğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, özellikle %10 kırıntı kauçuk oranında en yüksek stabilite değerine ulaşılması ve akma değerinin şartnameye en uygun düzeyde bulunması bakımından literatürde ki benzer araştırmalarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Nitekim JETIR'da yayımlanan bir çalışmada da %8, %10 ve %12 oranlarında yapılan Marshall deneyleri sonucunda optimum katkının %10 civarında olduğu, daha yüksek oranlarda ise akma değerlerinde artış ve işlenebilirlik sorunları gözlemlendiği rapor edilmiştir (A Study on the Performance of Crumb Rubber Modified Bitumen Mixes, 2019).

Benzer şekilde Romadhon, Setyawan ve Rahman (2021), %2–%10 katkı aralığında stabilitenin arttığını, optimum noktanın ise %8–%10 arasında gerçekleştiğini bildirmiştir. Khadim ve arkadaşları (2024) da kırıntı kauçuk katkısının tekerlek izi direncini ve stabiliteyi önemli ölçüde artırdığını, ancak yüksek katkı oranlarında performansın homojenlik sorunları nedeniyle dalgalanabileceğini belirtmiştir. Ragab ve çalışma arkadaşlarının (2025) optimizasyon odaklı araştırması ise kuru karışımlarda optimumun yaklaşık %12,6 ıslak karışımlarda ise %8,4 olduğunu ortaya koyarak sürecin türüne bağlı olarak optimumun değişebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte Nguyen ve arkadaşları (2018), bağlayıcı özellikleri ve kür süresine bağlı olarak optimum katkının daha düşük oranlarda (%4–6) da elde edilebileceğini, dolayısıyla bağlayıcı tipi, sindirme süresi ve tane boyutunun kritik parametreler olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca %6–%15 katkı aralığında yapılan başka bir çalışmada, stabilite değerlerinin yüksek oranlarda da artmaya devam ettiği, ancak akma değerlerinde belirgin bir yükselişin görüldüğü rapor edilmiştir (Kandhal & Mallick, 2020). Tüm bu bulgular değerlendirildiğinde, bu çalışmada elde edilen sonuçların literatürdeki genel eğilimi desteklediği; optimum katkı oranının bağlayıcı özellikleri, karışım süreci (kuru/ıslak) ve kür koşullarına bağlı olarak %8–%12 aralığında değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, asfalt karışımlarında farklı oranlarda (%8, %10 ve %12) kırıntı kauçuk katkısının Marshall stabilite, akma ve stabilite/akma oranı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Stabilite Değerleri:

%8 katkılı numunelerde stabilite değerleri 10,97–17,87 kN aralığında değişmiş, ortalama değer 14,36 kN olarak belirlenmiştir. Bu oran, karışıma temel bir dayanım kazandırmış olsa da daha düşük stabilite seviyeleriyle sınırlı kalmıştır.

%10 katkılı numunelerde stabilite değerleri 10,07–21,54 kN arasında olup ortalama stabilite 16,63 kN'ye yükselmiştir. Bu sonuç, katkı oranının artırılmasıyla stabilite değerlerinde belirgin bir artış sağlandığını göstermektedir.

%12 katkılı numunelerde ise stabilite değerleri 11,82–20,69 kN aralığında bulunmuş, ortalama 16,43 kN olmuştur. Bu oran, %10 katkıya yakın bir değer sunmakla birlikte ek bir artış sağlamamıştır.

Genel olarak stabilite açısından en yüksek ortalama değer %10 katkıda elde edilmiş, %12 katkıda ise karışım homojenliği azalarak değerler arasında dalgalanmalar artmıştır.

2. Akma Değerleri:

%8 katkıda akma değerleri 2,20–6,18 mm aralığında değişmiş ve ortalama 4,69 mm olarak ölçülmüştür. Bu durum, karışımın daha esnek fakat düşük rijitlikte olduğunu göstermektedir.

%10 katkıda akma değerleri 2,87–5,22 mm arasında olup ortalama 4,04 mm'ye düşmüştür. Bu, daha rijit bir karışım davranışı ve kalıcı deformasyona karşı artan direnç anlamına gelmektedir.

%12 katkıda akma değerleri 2,96–6,42 mm aralığında bulunmuş ve ortalama 4,32 mm olmuştur. Bu değer, %10'a göre daha yüksek olup karışımın rijitliğinin azaldığını ve esnekliğinin arttığını ortaya koymaktadır.

Akma açısından %10 katkı optimum sonuç vermekte, %12 katkıda ise rijitlik kaybı dikkat çekmektedir.

3. Stabilite/Akma Oranları:

%8 katkılı numunelerde bu oran 1,88–5,87 aralığında,

%10 katkılı numunelerde 1,96–6,51 aralığında,

%12 katkılı numunelerde ise 1,84–6,25 aralığında bulunmuştur.

En yüksek ortalama performans %10 katkı oranında gözlenmiştir.

4. Standart Sapma ve Homojenlik:

%8, %10 ve %12 katkı gruplarında hesaplanan standart sapma değerleri sırasıyla $\pm 0,99$; $\pm 1,47$ ve $\pm 1,39$ olarak belirlenmiştir.

%10 katkı grubunda sapmanın daha yüksek olması, değerler arasında geniş bir dağılımın bulunduğunu göstermektedir. Bu, katkı oranının artışıyla birlikte karışımın daha yüksek performans potansiyeli sunduğunu, ancak homojenlik açısından dikkat edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

5. Normalize Sonuçlar:

Normalize edilmiş stabilite ve akma değerleri üzerinden yapılan karşılaştırmalarda, %10 katkı %8'e göre belirgin bir performans artışı sergilemiştir.

%12 katkıda ise %10'a kıyasla hem artış hem azalış yönünde dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu durum, yüksek katkı oranının karışımda homojenliği olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Genel sonuçlar şu şekildedir;

%8 katkılı karışımlar düşük stabilite ve yüksek akma değerleri nedeniyle optimum performans göstermemektedir.

%10 katkılı karışımlar, yüksek stabilite ve düşük akma değerleri ile optimum performansı sağlamış, rijitlik ve dayanım açısından en uygun katkı oranı olarak öne çıkmıştır.

%12 katkılı karışımlar ise stabiliteyi korumakla birlikte akma değerlerinde artış göstermiş, bu da karışımın rijitliğinin azaldığını ve homojenliğin bozulduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında yapılan deneysel değerlendirmeler %10 kırıntı kauçuk katkısının Marshall stabilite ve akma kriterleri bakımından en dengeli ve mühendislik açısından uygulanabilir katkı oranı olduğunu ortaya koymaktadır.

6. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, %8, %10 ve %12 kırıntı kauçuk katkı oranlarının Marshall deney parametreleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Ancak asfalt karışımlarında kırıntı kauçuk katkısının performansını daha geniş kapsamlı değerlendirebilmek için aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

1. Farklı Katkı Oranlarının Araştırılması:

%8, %10 ve %12 dışında, daha düşük oranlarda (%2, %4, %6) ve daha yüksek oranlarda (%14, %16, %18) kırıntı kauçuk katkısı denenerek optimum aralık daha kesin biçimde belirlenebilir. Özellikle %10–%12 arasındaki geçiş bölgesinde (%11 katkı gibi) daha yoğun deney yapılması, optimum noktayı netleştirebilir.

2.Farklı Bitüm Oranının Optimizasyonu:

Kırıntı kauçuk (CR) oranı arttıkça karışımın viskozitesi ve bağlayıcının elastik özellikleri değişmektedir. Bu nedenle, farklı CR oranları için bitüm oranı da arttırılarak deneylerin tekrarlanması, optimum bitüm içeriğinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır. Böylece karışımın dayanım, stabilite ve işlenebilirlik özellikleri arasındaki denge daha hassas biçimde optimize edilebilir.

3. Farklı Karışım Tiplerinin İncelenmesi:

Bu çalışma Marshall yöntemiyle standart bitümlü sıcak karışımlar üzerinde yürütülmüştür. İleride taş mastik asfalt (SMA) veya modifiye bağlayıcılı karışımlarda kırıntı kauçuğun etkileri incelenebilir.

4. Mekanik Deneylerin Genişletilmesi:

Marshall stabilite ve akma değerlerinin yanı sıra tekerlek izi (rutting), yorulma (fatigue), düşük sıcaklık çatlama testleri gibi performans odaklı deneylerin yapılması, kırıntı kauçuk katkısının uzun dönem davranışı hakkında daha ayrıntılı bilgi sağlayacaktır.

5. Su Hasarı ve Dayanıklılık Testleri:

Kırıntı kauçuk katkılı asfalt karışımlarında su hasarına karşı direnç, uzun dönem performansın belirlenmesi açısından kritik bir parametredir. Bu nedenle nem duyarlılığı ve soyulma direnci gibi su etkisine bağlı testlerin uygulanması, karışımın çevresel koşullara dayanıklılığının değerlendirilmesi açısından yararlı olacaktır.

6. Farklı Boyut ve Kaynaklarda Kırıntı Kauçuk Kullanımı:

Bu çalışmada kullanılan kırıntı kauçuk belirli boyut ve özelliklere sahipti. Gelecek araştırmalarda farklı granülometriye sahip kırıntı kauçukların veya farklı kaynaklardan (örneğin kamyon lastiği, binek lastiği) elde edilen kauçukların performans üzerindeki etkileri araştırılabilir.

7.Karıştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması:

Bu çalışmada kırıntı kauçuk katkısı karışımlara kuru yöntem ile dahil edilmiştir. Ancak, ıslak yöntem kullanılarak yapılacak ek deneyler, iki yöntemin performans farklarının belirlenmesine olanak sağlayacaktır. Islak yöntemde kauçuğun bitüm içinde homojen şekilde dağılması, bağlayıcının elastikiyetini ve yaşlanma direncini artırabilirken; kuru yöntem uygulaması, üretim kolaylığı ve maliyet açısından avantaj sunmaktadır. Her iki yöntemin avantaj ve dezavantajlarının deneysel olarak karşılaştırılması, optimum karışım tekniğinin belirlenmesi açısından önemli katkı sağlayacaktır.

7. KAYNAKLAR

- A Study on the Performance of Crumb Rubber Modified Bitumen (CRMB) Mixes. (2019). JETIR, 6(6), 1–6.
- Almeida, A., Silva, H., & Oliveira, J. (2019). Mechanical performance of asphalt mixtures with crumb rubber modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 207, 702–713.
- Al-Mosawe, H. M. (2023). Enhancing asphalt mixture performance with crumb rubber. *E3S Web of Conferences*, 264, 03017.
- Al-Mosawe, H. M., & Khadim, H. M. (2024). Enhancing asphalt mixture performance with crumb rubber: A sustainable solution for improved durability and mechanical properties.
- Almusawi, A., Abdulrahman, H. S., Shakhan, M. R., & Doğaroğlu, B. (2020). Effects of crumb rubber size and concentration on Marshall parameters of rubberized asphalt mixture. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(6), 1048–1052.
- Araz, N. G. (2022). Asfalt kaplamalarda bitüm yüzdesine ve sıcaklığa bağlı olarak Marshall deneyi parametrelerinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- ASTM D1559. (1989). Standard Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. ASTM International.
- ASTM D1559. (2000). Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. ASTM International.
- Ban, I., Barišić, I., Cuculić, M., & Zvonarić, M. (2025). Performance evaluation of waste rubber-modified asphalt mixtures: A comparative study of asphalt concrete and stone mastic
- Buttlar, W., & Rath, P. (2020). RMA economic benefit examples. *Transportation Research Record*.
- Candra, A. I., Romadhon, F., Karisma, D. A., Nastotok, M. H., Dewanta, R. K., & Wicaksono, H. (2021). Increasing the stability of asphalt concrete mixture using crumb rubber. *E3S Web of Conferences*, 328, 10002.
- Chen, M., Xu, G., Chen, J., & Zhang, Y. (2020). Recycling of industrial solid waste as fine aggregate in asphalt mixture: Performance and environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120841.
- Clark, R., & Rath, P. (2022, December 20). Asphalt modification with engineered crumb rubber (ECR) technology. Presentation at Karayolları Genel Müdürlüğü Technical Seminar, Ankara, Turkey.

- Clark, T., & Rath, P. (2022). Advances in engineered crumb rubber modified asphalt: Sustainability and performance perspectives. *Journal of Sustainable Materials in Civil Engineering*, 4(2), 85–97.
- Çetin, A. (2013). Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures. *International Journal of Polymer Science*, 2013, 1–7.
- Çevrim, K. (2022). Marshall stabilite deneyi laboratuvar uygulama notları. Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- El-Ashwah, A. S., & Abdelrahman, M. (2024). Analysis of the frictional performance development of recycled stone matrix asphalt (SMA) mixtures. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(10), 1–14.
- Fathollahi, M., Arabani, M., & Zarei, M. (2021). Life cycle assessment of crumb rubber modified asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123978.
- Ghabchi, R., & Al-Mosawe, H. M. (2021). Technical challenges of utilizing ground tire rubber in asphalt mixtures: A state-of-the-art review. *Materials*, 14(10), 2312.
- Ghani, U., Milazzo, S., Giancontieri, G., Buttitta, G., Gu, F., & Lo Presti, D. (2024). Investigating the ability of road specifications to discriminate the rutting behavior of rubberized asphalt mixtures in Italy. *Infrastructures*, 9(7), 113.
- Ghani, U., Milazzo, S., Giancontieri, G., Buttitta, G., Gu, F., & Lo Presti, D. (2024). Investigating the ability of road specifications to discriminate the rutting behavior of rubberized asphalt mixtures in Italy. *Infrastructures*, 9(2), 19.
- Ghani, U., Milazzo, S., Giancontieri, G., Mignini, C., Buttitta, G., Gu, F., & Lo Presti, D. (2023). Unveiling the benefits of engineered crumb rubber for asphalt mixtures via performance-related characterization: Rutting behavior. *Engineering Proceedings*, 36(1), 39.
- Guerrero-Bustamante, O., Camargo, R., Dawd, I., Duque, J., Polo-Mendoza, R., Gálvis, J., Díaz, J., Daza, O., Cucunuba, J., & Acosta, C. (2024). Implementation of crumb rubber (CR) in road pavements: A comprehensive literature review. *Infrastructures*, 9(12), 223.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Huang, Y. H. (2015). *Pavement analysis and design*. Pearson Education.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., & Eren, K. (2001). *Asfalt ve Uygulamaları* (İsfalt Bilimsel Yayın No:1). İsfalt Yayınları.
- Jahromi, S. G., & Khodaii, A. (2008). Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 22(5), 1764–1770.

- Jung, D. H., Kaloush, K., & Way, G. (2002). Life cycle cost analysis of asphalt rubber pavements. Arizona Department of Transportation Report.
- Kaloush, K., Way, G., & Zhu, H. (2017). Laboratory evaluation of asphalt rubber mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 18(1), 23–39.
- Kandhal, P. S., & Mallick, R. B. (2020). Investigation of crumb rubber modified asphalt mixes with varying rubber contents. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(9), 04020271. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003350)
- Karaşahin, M., & Terzi, S. (2007). Agregaların yol kaplamalarında kullanım uygunluğunun değerlendirilmesi. *İnşaat Mühendisliği Dergisi*, 18(3), 45-56.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (2013). Karayolu teknik şartnamesi. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Kazemian, M., Arabani, M., & Kiani, M. (2025). Effects of crumb rubber-modified asphalt as a pavement on railway trackbeds. *Buildings*, 10(4), 84.
- Kerni, C., & Al-Mosawe, H. M. (2024). Utilization of crumb rubber as a partial replacement of binder in asphalt mixtures: Effects on mechanical properties and performance. *E3S Web of Conferences*, 126, 01030.
- Khadim, H. M., & Al-Mosawe, H. M. (2024). Crumb rubber modification for enhanced rutting resistance in asphalt mixtures. *Open Engineering*, 14(1), 20220500.
- Khadim, H. M., Al-Khafaji, A., & Abbas, K. (2024). Crumb rubber modification for enhanced rutting resistance of asphalt mixtures. *Engineering Science*, 9(1), 25–34.
- Li, X., Shen, J., & Wu, S. (2020). Effect of crumb rubber modification on water sensitivity of asphalt mixtures. *Materials*, 13(4), 865.
- Malluru, S., & Ghabchi, R. (2025). A state-of-the-practice review on the challenges and advancements in crumb rubber-modified asphalt binders. *Materials*, 18(10), 2312.
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2014). A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–21.
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (2020). *The Asphalt Handbook*. NAPA.
- Nguyen, H. T. T., Nguyen, T. A., & Bui, T. T. (2018). Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of rubberized asphalt binders. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 7(4), 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.11.002>
- Pearl United. (2023). Crumb rubber powder 30 mesh. Pearl United.
- Poulikakos, L. D., Bueno, M., Pasquini, E., & Partl, M. N. (2022). Waste tyre rubber in asphalt pavements: A review. *Construction and Building Materials*, 341, 127659.

- Poulikakos, L. D., Bueno, M., Pasquini, E., & Partl, M. N. (2022). Waste tyre rubber in asphalt pavements: A review. *Construction and Building Materials*, 341, 127659.
- Poulikakos, L. D., Buttlar, W., Schüwer, N., Lo Presti, D., Balmer, T., & Bueno, M. (2022). Can crumb rubber modifier effectively replace the use of polymer-modified bitumen in asphalt mixture? *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 7(5), 515–530.
- Poulikakos, L., et al. (2022). Performance of polymer-modified asphalt mixtures: A review. *Construction and Building Materials*, 345, 128236.
- Presti, D. lo. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863–881.
- Ragab, M., Mohamed, H., & Ibrahim, S. (2025). Comparative optimization of crumb rubber-modified asphalt mixes using dry and wet processes. *Construction and Building Materials*, 420, 133980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.133980>
- 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), 1–12.
- Rath, P., Meister, J., Jahangiri, B., & Buttlar, W. G. (2022). Performance evaluation of crumb rubber modified asphalt mixtures: A state-of-the-art review. *Resources, Conservation and Recycling*, 179, 106115.
- Rath, P., Meister, J., Jahangiri, B., & Buttlar, W. G. (2022). Performance and sustainability evaluation of crumb rubber modified asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132309.
- Rath, P., Meister, J., Jahangiri, B., & Buttlar, W. G. (2022). Recycling tire rubber in asphalt pavements: Current status, future opportunities and challenges. *Construction and Building Materials*, 349, 128450
- Rath, P., Redmond, C., Zuberer, D., & Buttlar, W. (n.d.). Advances in pavement performance enhancement with dry process engineered ground tire rubber. Unpublished manuscript.
- Razmi, A., & Ghabchi, R. (2018). Fracture resistance of asphalt concrete modified with crumb rubber and Sasobit at low temperatures. *Construction and Building Materials*, 174, 1–9.
- Renecal. (2024). TyreXol™ MMA30: Rubber powder for asphalt. Renecal.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA Education Foundation.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. NAPA Research and Education Foundation.

- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction (2nd ed.). National Asphalt Pavement Association Education Foundation.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction (2nd ed.). National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Romadhon, F., Setyawan, A., & Rahman, A. (2021). Increasing the stability of asphalt concrete mixture using waste crumb rubber. E3S Web of Conferences, 328, 10002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132810002>
- Sarı, S. C. (2024). Geri dönüştürülmüş asfalt kaplamaların SBS polimeri ve soyulma önleyici birlikteliğindeki performans analizi (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Siswanto, H., Supriyanto, B., Pranoto, P. R., Chandra, & Hakim, A. R. (2017). Marshall properties of asphalt concrete using crumb rubber modified of motorcycle tire waste. AIP Conference Proceedings, 1887, 020042.
- Sivrikaya, U. (2022). Introduction of participants and companies. Unpublished report.
- Tan, E. H. (2022). The optimal use of crumb rubber in hot-mix asphalt by dry process. Materials Today: Proceedings, 49, 1186–1191.
- TRS. (2024). TyreXol™ intelligent compounding solutions. TRS – Technical Rubber Solutions. <https://www.trs-ch.com/en/intelligent-compounding/market-applications> asphalt gradings. Infrastructures, 10(5), 107.
- TS EN 933-1. (2012). Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method. Türk Standartları Enstitüsü (TSE).
- Turhan, İ. (2013). Arazi ve laboratuvar sıkıştırma şartlarının bitümlü sıcak karışımların hacimsel ve mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012). TS EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler – Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini – Eleme yöntemi. Ankara: TSE Yayınları.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2015). TS EN 12697-34: Bitümlü karışımlar – Deney metotları – Bölüm 34: Marshall Deneyi. Ankara: TSE.
- Tyre Recycling Solutions SA, (2022). Introduction to dry process rubber asphalt: Performance, production and economics. ECR Technical Seminar, 20 December 2022, Karayolları Genel Müdürlüğü,
- URL – 1. (2020, Haziran 19). <https://insaatt.com/karayolu-nedir-karayolu-altyapisi-ve-ustyapisi/> . adresinden alındı.

- Wang, T., Chen, X., & Gao, J. (2018). Environmental benefits of recycling waste tires in asphalt pavements: A life cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 180, 550–558.
- Way, G. (2011). Rubberized asphalt concrete pavements in Arizona: State of the practice. Arizona DOT Report.
- Wulandari, P. S. (2017). Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete. *Materials Science and Engineering*, 187, 012123. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/187/1/012123>
- Yao, H., You, Z., Li, L., Goh, S. W., & Lee, C. H. (2018). Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 165, 84–93.
- Yıldırım, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66–72.
- Yıldırım, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66–72.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini İskenderPaşa İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra ortaokul ve lise eğitimini 2000 yılında Yunus Emre Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2001 öğretim yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2005 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Tezli yüksek lisans programına başladı. Aynı yıl devlet memuru olarak Erzincan'a atanmıştır. Derslerine devam edip vermesine rağmen te kısmına gelince aksaklıklardan dolayı devam edememiştir. Tekrar afla dönmüş tezini yaparken aynı zamanda kendi mesleğini icra etmeye devam etmiştir. 2009 yılı itibari ile Karayolları 10.Bölge Müdürlüğü'nde Yol Yapım servisinde Kesin Hesap Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve 1 çocuk annesidir.