



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ULAŞTIRMA VE LOJİSTİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**ASFALT GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE ELEKTROMANYETİK ISITMA YÖNTEMİNİN
ETKİNLİĞİ VE PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KADER FENERCİ

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ YAVUZ ABUT

**YALOVA
TEMMUZ 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ULAŞTIRMA VE LOJİSTİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

ASFALT GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE ELEKTROMANYETİK ISITMA YÖNTEMİNİN
ETKİNLİĞİ VE PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KADER FENERCİ
228123042

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ YAVUZ ABUT

YALOVA
TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “ASFALT GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE ELEKTROMANYETİK ISITMA YÖNTEMİNİN ETKİNLİĞİ VE PERFORMANS ANALİZİ” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Kader FENERCİ





ÖNSÖZ

Hayatımın önemli dönüm noktalarından biri olan bu yüksek lisans tez çalışması sürecinde, bilgi, deneyim ve rehberliğiyle bana ışık tutan, her aşamada yolumu aydınlatan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ABUT'a teşekkür ederim. Tez çalışmam sırasında karşılaştığım her sorunda desteğini yanımda hissettiren; deneysel çalışmalarda yol göstericiliği ve öğreticiliği ile bana büyük katkı sağlayan kıymetli hocam Arş. Gör. Merve CEYHAN ERDOĞAN'a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalar süresince katkılarıyla bana eşlik eden, görüş ve önerileriyle sürece değerli katkılar sağlayan sevgili arkadaşım Dilara Asena ÇELİK'e teşekkür ederim. Hayatımın her anında olduğu gibi bu zorlu süreçte de inançlarıyla beni güçlendiren, sevgilerini ve desteklerini daima yanımda hissettiren canım aileme sonsuz teşekkür ederim. Son olarak, tez süreci boyunca beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan; moral ve motivasyon desteğiyle her zaman yanımda olan değerli arkadaşım Anıl KARAKAŞ'a teşekkür ederim.

Temmuz – 2025

Kader FENERCİ



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	5
2.1. Asfalt Endüstrisinde Geri Dönüşüm.....	5
2.2. RAP'ın Geleneksel Isıtma Yöntemi (GIY) ile Optimizasyonu	8
2.3 RAP'ın Elektromanyetik Isıtma Yöntemi (EIY) ile Optimizasyonu	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	23
3.1. Malzemeler	23
3.1.1. Agregat.....	23
3.1.2. RAP.....	25
3.1.3. Bitüm	27
3.2. Deneyler.....	28
3.2.1. Elek analizi	28
3.2.2. Ekstraksiyon deneyi.....	28
3.2.3. Penetrasyon deneyi	29
3.2.4. Bitüm özgül ağırlık deneyi	29
3.3. Karışım Gradasyonunun Belirlenmesi.....	29
3.4. Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi	30
3.5. Marshall Briketi Üretimi	31
3.5.1. Geleneksel Isıtma Yöntemi (GIY) ile ısıtma	31
3.5.2. Elektromanyetik Isıtma Yöntemi (EIY) ile ısıtma.....	32
4. TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	39
4.1. Hacim Özgül Ağırlık	39
4.2. Su Absorpsiyonu	40
4.3. Stabilite ve Akma	41
4.4 Marshall Oranı.....	47
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49

KAYNAKLAR.....	51
EKLER	51
EK-1	51
ÖZGEÇMİŞ	57



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

KISALTMALAR

AI	: Asfalt Enstitüsü
EIY	: Elektromanyetik Isıtma Yöntemi
GIY	: Geleneksel Isıtma Yöntemi
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavements (Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama)
RCA	: Recycled Concrete Aggregate (Geri Kazanılmış Beton Agregası)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Agrega fiziksel özellikleri (KGM, 2023).....	24
Tablo 3.2. Agrega elek analizleri	24
Tablo 3.3. RAP elek analizi sonuçları.....	27
Tablo 3.4. Bitüme ait deneysel sonuçlar	28
Tablo 3.5. Aşınma Tip-1 Tabakası Karışım Gradasyonu.....	29



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İlk geri dönüşüm asfalt plentleri	6
Şekil 2.2. RAP içerikli asfalt üretimi	8
Şekil 3.1. Efor Madencilik’e ait bazalt taş ocağı.....	23
Şekil 3.2. Agregalar için elek analizi: a) El ile eleme, b) Sarsma tablası ile eleme	24
Şekil 3.3. Fonksiyonlarına ayrılmış agrega grupları	25
Şekil 3.4. Yalova, Taşköprü Belediyesi RAP stok sahası	26
Şekil 3.5. RAP elek analizi: a)Deneye hazırlama, b) El ile eleme	26
Şekil 3.6. Bitüm: a) Bitüm depolama, b) Penetrasyon deneyi, c) Özgül ağırlık deneyi	27
Şekil 3.7. Marshall deneyi akış şeması	34
Şekil 3.8.Marshall deneyi aşamaları	35
Şekil 4.1. Numunelerde hacim özgül ağırlık değişimi	39
Şekil 4.2. Numunelerde su absorpsiyonu değişimi	40
Şekil 4.3. GIY-Kontrol numunesi	41
Şekil 4.4. GIY-%10 RAP	42
Şekil 4.5. GIY-%30 RAP	42
Şekil 4.6. GIY-%50 RAP	43
Şekil 4.7. EIY-Kontrol numunesi.....	43
Şekil 4.8. EIY-%10 RAP.....	44
Şekil 4.9 .EIY-%30 RAP.....	44
Şekil 4.10. EIY-%50 RAP.....	45
Şekil 4.11. Numunelerde stabilite değişimi	45
Şekil 4.12. Numunelerde akma değişimi	46
Şekil 4.13. Numunelerde Marshall oranı değişimi.....	47



ASFALT GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE ELEKTROMANYETİK ISITMA YÖNTEMİNİN ETKİNLİĞİ VE PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Günümüzde sanayileşmenin artması, nüfus büyümesi ve ekonomik faaliyetlerin yoğunlaşmasıyla birlikte doğal kaynakların tüketimi hız kazanmış ve bu durum ciddi atık problemlerini beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, çevresel etkilerin azaltılması ve mevcut kaynakların daha verimli kullanılması amacıyla geri dönüşüm ve geri kazanım uygulamaları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ulaştırma sektörü, bu alanda en fazla doğal kaynak tüketen ve aynı zamanda en fazla atık üreten sektörlerden biridir. Özellikle karayolu altyapılarında kullanılan asfalt kaplamalar zamanla işlevselliğini yitirerek yenileme ihtiyacı doğurmakta ve bu da büyük miktarda asfalt atığı oluşmasına neden olmaktadır. Kullanım ömrünü tamamlamış asfalt tabakalarının yeniden değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyele sahiptir. Bu tez çalışmasında, asfalt üretiminde geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) kullanımının asfalt karışımlarının performansı üzerindeki etkileri; farklı RAP oranları ve iki farklı ısıtma yöntemi kullanılarak karşılaştırmalı şekilde incelenmiştir. %0, %10, %30 ve %50 oranlarında RAP içeren toplam 24 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlar, geleneksel ısıtma yöntemi (GIY) ve mikrodalga radyasyonu kullanan elektromanyetik ısıtma yöntemi (EİY) ile ayrı ayrı hazırlanmış ve bu yöntemlerin karışım özelliklerine etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Deneysel analizler kapsamında karışımların hacim özgül ağırlığı, su absorpsiyonu, stabilite, akma miktarı ve Marshall oranı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, EİY yönteminin özellikle %10 ve %30 RAP içeren karışımlarda daha yüksek hacim özgül ağırlığı sağladığını ve karışımın daha yoğun bir yapı kazandığını ortaya koymuştur. Ayrıca EİY, su emme oranlarını azaltarak karışımın neme karşı duyarlılığını düşürmüştür; %10 ve %50 RAP oranlarında stabilite açısından %25–30 oranında iyileşme sağlamıştır. Akma değerlerinde gözlemlenen azalma, EİY ile hazırlanan karışımların elastik deformasyona karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Marshall oranı açısından da EİY, deformasyona karşı daha dayanıklı karışımlar elde edilmesini mümkün kılmıştır. Tüm bu veriler ışığında, EİY yöntemiyle hazırlanan asfalt karışımlarının, GIY yöntemiyle hazırlananlara kıyasla hem fiziksel hem de mekanik özellikler bakımından daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geri Dönüşüm, Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama, Elektromanyetik Isıtma Yöntemi, Sürdürülebilirlik



EFFICIENCY AND PERFORMANCE ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC HEATING METHOD IN ASPHALT RECYCLING

ABSTRACT

Today, increasing industrialization, population growth, and the intensification of economic activities have accelerated the consumption of natural resources, leading to serious waste-related problems. In this context, recycling and recovery practices are gaining growing importance to reduce environmental impacts and use existing resources more efficiently. The transportation sector is one of the most resource-consuming and waste-generating sectors. In particular, asphalt pavements used in road infrastructure lose their functionality over time and need renewal, resulting in the generation of large amounts of asphalt waste. The reuse of asphalt layers that have reached the end of their service life holds significant potential both economically and in terms of environmental sustainability. In this thesis, the effects of using reclaimed asphalt pavement (RAP) in asphalt production on the performance of asphalt mixtures were investigated comparatively using different RAP contents and two different heating methods. A total of 24 different mixtures were prepared, containing 0%, 10%, 30%, and 50% RAP. The mixtures were produced using the conventional heating method (CHM) and the electromagnetic heating method (EHM), specifically employing microwave radiation, and the effects of these methods on mixture properties were analyzed in detail. Experimental analyses evaluated the bulk specific gravity, water absorption, stability, flow values, and Marshall quotient of the mixtures. The results showed that EHM provided higher bulk specific gravity, particularly in mixtures containing 10% and 30% RAP, resulting in a denser structure. Moreover, EHM reduced water absorption rates, thereby decreasing the moisture susceptibility of the mixtures, and improved stability by 25–30% at 10% and 50% RAP contents. The observed decrease in flow values indicates that the mixtures prepared with EHM are more resistant to elastic deformation. In terms of the Marshall quotient, EHM also enabled the production of mixtures with greater resistance to deformation. In light of all these findings, it was concluded that asphalt mixtures prepared with EHM performed better than those prepared with CHM in terms of both physical and mechanical properties.

Keywords: Recycling, Reclaimed Asphalt Pavement, Electromagnetic Heating Method, Sustainability



1. GİRİŞ

Dünya genelinde hızla artan nüfus, sanayileşmenin giderek hız kazanması ve ekonomik faaliyetlerin büyümesi, yalnızca kaynak tüketimini değil, aynı zamanda ortaya çıkan atık miktarını da önemli ölçüde artırmaktadır. Bu durum, çevresel etkilerin azaltılması ve atıkların ekonomik sisteme yeniden kazandırılması gerekliliğini gündeme getirmektedir. Söz konusu hedeflere ulaşabilmek için, geri dönüşüm uygulamalarının etkili ve sistematik bir biçimde hayata geçirilmesi büyük önem taşımaktadır. Gerek küresel ölçekte gerekse Türkiye özelinde çevresel bilinç her geçen gün gelişmekte; bu doğrultuda bilimsel yaklaşımlarla çeşitli projeler yürütülmekte ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen stratejiler geliştirilmektedir. Bu stratejiler içerisinde geri kazanım uygulamaları öne çıkmaktadır. Geri kazanım uygulamalarından biri de kullanım ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların sökülerek yeniden asfalt karışımlarında değerlendirilmesi sürecidir. Bu uygulama sayesinde hem doğal kaynak tüketimi azaltılmakta hem de ekonomik fayda sağlanmaktadır.

Nüfus artışıyla birlikte ulaştırma alanındaki ihtiyaçlar artmış, bu durum da sektöre yönelik büyük yatırımları beraberinde getirmiştir. Dünya üzerindeki yerleşim planı göz önüne alındığında en çok tercih edilen ulaşım ağı karayolları olarak öne çıkmaktadır. Bu sebeple yollar üzerinde meydana gelen deformasyon miktarı oldukça fazladır. Söz konusu deformasyonlar sonucunda, mal ve can güvenliğini sağlamak amacıyla yolların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir. Yenilemeyle beraber aynı oranda asfalt atığı da ortaya çıkmaktadır. Başlıca ulaşım yollarından biri olan karayolları, geri dönüşüm çalışmalarının uygulanabilirliği için önemli bir sektördür. Uygulanacak geri dönüşüm çalışmaları sayesinde ciddi ekonomik kazançlar elde edilebilmektedir. Bu nedenle, asfalt atıklarının geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımı ile ilgili detaylı araştırmalar yapılmaya devam edilmektedir.

Yol üstyapısını oluşturan bitümlü sıcak karışım tabakaları, proje ömrünün tamamlanmasının ardından belirli bir kullanım süresi sonunda işlevselliğini yitirmektedir. Maruz kaldığı türlü etkilerden sonra deformasyona uğrarlar ve artık kullanılamazlar. Bu sebeplerden dolayı üstyapıyı, ömrünü tamamladıktan sonra yenilemek ve onarmak gerekir. Yolun konforlu ve güvenli bir sürüş yüzeyine sahip olması için yol profilinin düzeltilmesi ve üstyapısının kazınıp sökülmesi gerekir. Kullanıldığı yerden sökülen asfalt tabakaları, tehlikeli atık sınıfına dâhil değildir. Kazınmış olan asfalt tabakalarının bu özelliği, geri dönüşüm çalışmalarının uygulanabilirliği için önemli bir üstünlüktür. Sökülen asfalt tabakalarının uygun yöntemlerle geri dönüştürülmesi, bu malzemelerin yeniden asfalt yol yapımında kullanılmasına olanak

sağlamaktadır. Böylelikle asfaltın geri dönüştürölüp yeniden kullanılması ile ekonomik ve çevresel kazanımlar sağlanabilmektedir.

Asfalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Birliğı (Asphalt Recycling and Reclaiming Association – ARRA) beş farklı geri dönüşüm tekniğı sunmaktadır (Kaya, 2011). Bu teknikler şunlardır:

- I. Soğuk düzeltme,
- II. Sıcak geri dönüşüm,
- III. Sıcak yerinde dönüşüm,
- IV. Soğuk geri dönüşüm,
- V. Tam derinlikli geri dönüşüm.

Eski asfalt kaplamalar, merkezi işlem tesislerinde geri dönüştürölülebileceğı gibi, yerinde toz haline getirilerek asfalt plentlerinde granöl veya stabilize edilmiş katmanlara dahil edilebilir. Yerinde sıcak ve yerinde soğuk geri dönüşüm yöntemleri, kaplama yüzeyinin belirli bir derinliğe kadar kazınması, geri kazanılan malzemenin işlenmemiş agrega ve bağlayıcı gibi zenginleştirici katkılarla karıştırılması süreçlerini içeren döngüsel işlemlerden oluşur. Bağlayıcının özelliklerinin iyileştirilmesi ve elde edilen karışımın tek bir işlemle serilip sıkıştırılması sayesinde asfalt, geri dönüştürölerek yeniden kullanılabilir hâle gelmektedir.

Asfaltta geri dönüşümde kullanılan RAP (Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama) malzemesinin ısıtılmasında kullanılan yöntemlerden biri de elektromanyetik ısıtma yöntemidir. Elektromanyetik radyasyonun asfalt geri dönüşümündeki kullanımı çok yaygın olmasa da teknolojiadaki ilerlemelerle birlikte bu alandaki araştırmalar giderek artmaktadır. Mikrodalga, kızılötesi ve radar gibi elektromanyetik radyasyon türleri, asfaltın ısıtılması ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi süreçlerinde kullanılmakta; bu da çevre dostu ve verimli geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesine imkân tanımaktadır.

Asfalt geri dönüşümünün enerji tüketimi, emisyon salınımı ve ekonomik etkileri göz önüne alındığında; doğayı korumak ve gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmak amacıyla, hızla gelişen teknolojilerden faydalanarak enerjinin en düşük seviyede, geri dönüşümün ise en yüksek düzeyde kullanıldığı sürdürölülebilir üstyapılar üzerine çalışmaların artırılması gerekmektedir (Erten vd., 2017).

Bu çalışmada, %0, %10, %30 ve %50 oranlarında RAP içeren asfalt karışımları hazırlanmış ve toplamda 24 farklı karışım elde edilmiştir. Numuneler, iki farklı ısıtma yöntemiyle hazırlanmış

ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında numuneler, geleneksel ısıtma yöntemiyle etüvde ısıtılmıştır. İkinci aşamada ise aynı içerikteki numuneler, elektromanyetik radyasyon temelli bir yöntem olan mikrodalga ile ısıtılmıştır. Bu bağlamda, her iki ısıtma yönteminin agrega karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, numunelerin performansı, farklı RAP oranlarının etkileri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Her iki yöntemle (etüv ve mikrodalga) elde edilen karışımların hacim özgül ağırlık, su absorpsiyonu, stabilite, akma ve Marshall oranı gibi özellikleri titizlikle analiz edilerek karşılaştırılmış; bu kapsamda, farklı RAP oranlarının bu parametreler üzerindeki etkileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, karışımların hem mekanik dayanımı hem de yoğunluk ve su emme özellikleri bakımından gösterdiği performans değerlendirilmiş, böylece geri dönüştürülmüş asfalt kullanımının ısıtma yöntemine etkisi ve asfalt karışım özellikleri üzerindeki etkileşimi ortaya konmuştur. Yapılan analizler sonucunda, optimum RAP kullanım oranı ile birlikte karışım performansını en üst seviyeye taşıyan en uygun ısıtma yöntemi belirlenmiş ve bu bulgular, sürdürülebilir asfalt kaplama tasarımına yönelik önemli sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda bu tez çalışması, RAP içeren agrega karışımlarının hazırlanmasında kullanılan ısıtma yöntemlerinin etkinliğini ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki potansiyel katkılarını inceleyen önemli bir çalışma olarak ön plana çıkmaktadır.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu bölümde, asfalt kaplamaların geri dönüşümünde elektromanyetik radyasyon teknolojisinin kullanımı ve RAP uygulamalarıyla ilgili olarak, ulusal ve uluslararası düzeyde yürütülmüş bilimsel çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Literatür çalışması, üç ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, RAP kullanımı ele alınmış ve bu malzemenin yol inşaatlarındaki gelişimi ile ilgili genel bilgiler sunulmuştur. İkinci aşamada, esnek üst yapılarda RAP malzemesinin kullanımına ilişkin yapılmış araştırmalara yer verilmiş, özellikle bu malzemenin performansı ve sürdürülebilirlik açısından sağladığı faydalar üzerinde durulmuştur. Üçüncü aşamada ise, RAP'in elektromanyetik radyasyon ile kullanımıyla ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş, mikrodalga ısıtma yönteminin bu malzemenin işlevselliği ve çevresel etkileri üzerindeki potansiyel etkileri araştırılmıştır.

2.1. Asfalt Endüstrisinde Geri Dönüşüm

Asfalt, yaklaşık 5000 yıllık bir geçmişe sahip olup, doğal kaynaklardan elde edilerek kullanılan geleneksel bir inşaat malzemesidir. İlk dönemlerde harç malzemesi olarak kullanılan asfalt, su geçirmezlik özelliği nedeniyle kaplama malzemesi olarak da tercih edilmekte olup, günümüzde de bu işlev doğrultusunda yaygın şekilde kullanılmaktadır. 20. yüzyılın başlarında motorlu taşıtların yaygınlaşmasıyla asfaltın düşük maliyeti ve dayanıklılığı öne çıkmış, bu da gelişmiş yol yapımında tercih edilmesini sağlamıştır. Asfalt karışım plentlerinin işletilmesine ise 1920-1930 yılları arasında başlanmıştır. Türkiye'de asfalt uygulamalarına ilk kez Osmanlı döneminde başlanmış olup, Cumhuriyet döneminde asfalt kaplama çalışmaları 1929 yılında resmen başlatılmıştır. Ayrıca, 1948 yılında ABD'den sağlanan Marshall yardımıyla asfalt kaplama uygulamaları yaygınlaşmış, 1950 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü'nün kurulmasıyla bu alanda kalıcı ve sistematik bir gelişim süreci başlamıştır. Asfaltın kısmi geri dönüşüm uygulamaları ise 1950'lerde başlamış ve bitüm fiyatlarındaki artışlar, soğuk geri dönüşüm tekniklerinin geliştirilmesini teşvik etmiştir. İlk aşamada asfalt karışımlarına maksimum %25 oranında geri dönüştürülmüş asfalt malzemesi eklenmiş, bu durum daha yumuşak bitüm kullanımı ve artan ısı uygulamalarını beraberinde getirmiştir. Elde edilen başarılı sonuçlar, asfalt kaplamaların geri dönüşümünün önemini artırmış ve bu alandaki çalışmaları teşvik etmiştir. Şekil 2.1'de ilk geri dönüşüm asfalt plentine yer verilmiştir (<https://rheofalt.com/>, t.y.).



Şekil 2.1. İlk geri dönüşüm asfalt plenti (<https://rheofalt.com/>, t.y.)

Paralel tamburlar, ilk olarak 1970 yılında ortaya çıkmıştır. Bu tamburlar, geleneksel ısıtma tamburlarına benzemekle birlikte RAP malzemesinin ayrı bir tamburda ısıtılmasına olanak sağlamıştır. Tambur içerisindeki kanatların özel ısı ayarı sayesinde etkin bir ısıtma süreci gerçekleştirilmiş ve bu sayede asfalt tesislerinde %60 oranında geri dönüşüm sağlanabilmektedir. Ancak %60'lık geri dönüşüm oranının, bitümün yaşı ve karışımın sertliği gibi faktörlere bağlı sınırlamalar içerdiği tespit edilmiştir. Bu sınırın aşılması amacıyla yeni denemeler yapılmış ve paralel tamburlar ile ısıtma sistemleri geliştirilmiştir. Günümüzde ise yeni nesil asfalt plentleri, bitüm veya RAP malzemesini yakma riski olmadan dolaylı ısıtma yöntemiyle ısıtabilmektedir. 2010 yılından itibaren asfaltın kalite kaybı yaşamadan %100 geri dönüşümü mümkün hale gelmiştir (<https://rheofalt.com/>, t.y.).

Pereira ve Santos (2006)'a göre, geri dönüşümün faydaları aşağıda verilmiştir;

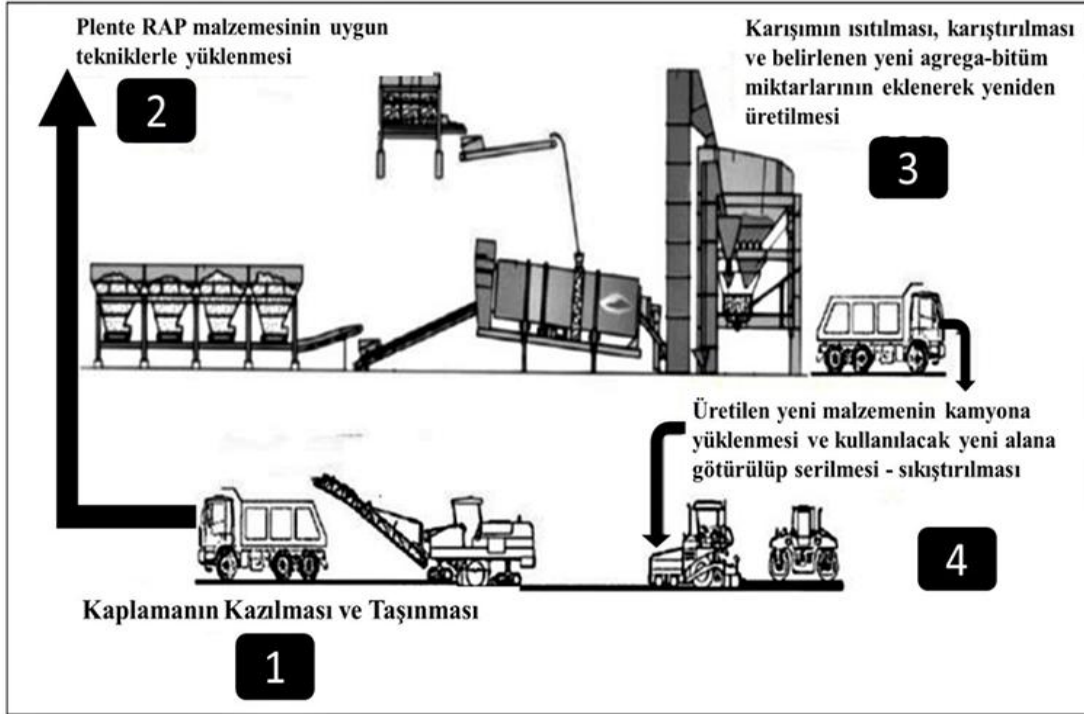
- Bitüm ve agrega gibi kullanılan malzeme miktarı azalır.
- Daha az yeni malzeme kullanıldığı için, malzemelerin nakliye işi azalır.
- Enerji tasarrufu sağlanır.
- Karışım özelliklerini iyileştirir.
- Doğal kaynaklar korunur.
- Ekonomik kazanım sağlanır.
- Yerinde geri kazanım ile mevcut tabakadan daha dayanıklı bir tabaka elde edilir.
- Yenileme sırasında yol yüzeyinden kazınan asfalt atık malzemelerinin çevreye terk edilmesi ve orada oluşturacağı çevre kirliliği önlenir.

Asfalt malzemesinin servis ömrü, bakım-onarım süreci ve proje ömrünün sona ermesiyle birlikte ortaya çıkan enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla, bu

malzemenin performansının iyileştirilmesi gerekmektedir. RAP malzemesinin kullanımı hem doğal kaynakların korunması hem de doğaya terk edildiğinde çevreye zarar verebilecek tehlikeli atıkların önlenmesi açısından önemli bir adımdır. RAP kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, uzun vadede yakıt, agrega ve asfalt bağlayıcısı gibi doğal kaynakların tüketimi azalmakta, buna paralel olarak sera gazı emisyonlarında da düşüş gözlemlenmektedir. Bu uygulama hem çevresel sürdürülebilirliği artırmakta hem de daha verimli bir karayolu hizmeti sunulmasına katkı sağlamaktadır (Pouranian & Shishehbor, 2019).

RAP, Türkiye’de görece yeni bir teknik olarak değerlendirilse de dünya genelinde, özellikle gelişmiş ülkelerde, yaygın biçimde uygulanan bir yöntemdir. Ülkeler, asfalt kaplamanın her tabakası için farklı RAP kullanım oranları belirleyerek bu oranlara uygun uygulamalar geliştirmiştir. Böylece sökülen ya da kazınmış asfalt tabakaları geri dönüştürülerek yeni karışımlarda belirli oranlarda tekrar kullanılabilir hâle gelmiştir. Ancak Türkiye’de, agreganın düşük maliyetle temin edilebilmesi ve çevre koruma bilincinin toplum genelinde yeterince yaygınlaşmamış olması gibi etkenler nedeniyle geri dönüşüm uygulamalarına geç başlanmıştır. Ayrıca doğal taş ocaklarından elde edilen agrega ile geri dönüşümle sağlanan malzemenin maliyetlerinin birbirine yakın olması ve geri dönüşüm tesislerine yapılacak yatırımların yüksek olması, bu alandaki gelişimi uzun süre sınırlamıştır. Türkiye’de 1980’li yıllardan itibaren karayollarında geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı teşvik edilmeye çalışılmış, ancak bu malzemelere olan talep özellikle 2000’li yıllarda artış göstermiştir. Bozulmuş asfalt tabakalarının yeniden kullanımı hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye açısından da büyük önem taşımaktadır (Oruç vd., 2018). Asfalt kaplamaların yeniden kullanımıyla ilgili ilk sistematik çalışmalar, Türkiye’de 1996 yılında İSFALT tarafından başlatılmıştır. Bu kapsamda, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından Çobançeşme-TEM bağlantı yolundan kazılarak çıkarılan asfalt kaplamalar, %25 oranında geri dönüştürülerek İstanbul’un Bağcılar ilçesinde gerçekleştirilen pilot bir uygulamada kullanılmıştır. Ancak bu uygulamada çeşitli teknik sorunlarla karşılaşmış ve geri dönüştürülmüş asfalt malzemelerin laboratuvar ortamında daha kapsamlı ve uzun süreli testlere tabi tutulması gerektiği anlaşılmıştır. 2001 yılında yapılan sınırlı denemelerin ardından, 2005 yılından itibaren geri dönüşümlü asfalt üretimine yönelik çalışmalara daha fazla önem verilmiş ve bu alandaki faaliyetler ivme kazanmıştır. Günümüzde RAP, özellikle sıcak karışım asfalt üretiminde en yaygın şekilde kullanılan geri dönüştürülmüş malzemelerden biri konumundadır. Ancak bu malzemenin kullanımı, uygulamanın gerçekleştirileceği ülkenin yürürlükteki yasa, yönetmelik ve teknik standartlarında belirtilen test prosedürlerine uygun şekilde yapılmalıdır.

Uygulanan testlerin sonuçlarına göre karışıma eklenecek RAP oranı belirlenmekte ve malzemenin performans açısından uygunluğu değerlendirilmektedir (Sönmez, 2012). Şekil 2.2.' de RAP içerikli asfalt üretimine yer verilmiştir.



Şekil 2.2. RAP içerikli asfalt üretimi (Arapoğlu, 2015)

2.2. RAP'in Geleneksel Isıtma Yöntemi (GIY) ile Optimizasyonu

Shuli Liu ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, RAP kullanımının enerji tüketimi, çevresel etkiler ve bitüm kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Nem içeriği, karışım sıcaklığı ve RAP oranı gibi faktörlerin enerji ve çevresel etkiler üzerindeki rolü üzerinde durulmuştur. Paralel akışlı tamburların, %50 RAP kullanımına kadar enerji ve çevresel açıdan verimli bir çözüm sunduğu, çiftli tamburların daha yüksek RAP oranlarında etkin olsa da artan enerji tüketimi ve yatırım maliyetiyle dezavantaj oluşturduğu tespit edilmiştir. Mevcut sistemlerdeki yüksek ısıtma sıcaklıklarının bitüm kalitesini olumsuz etkileyebileceği belirtilmiş, daha verimli ısıtma yöntemlerine ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır (Liu vd., 2017).

Kun Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, RAP karışımlarının üretiminde yer alan termal süreçlerin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Soğuk beslemeli geri dönüşüm sürecinde doğal agregalar ısıtılır, ardından kuru ve ıslak karıştırma ile silo depolama aşamaları uygulanır. Bu aşamalar, karışımın sertlik, bağlayıcı birleşme, çatlama direnci ve nem hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Üretim parametrelerinin titizlikle kontrol edilmesi, karışım performansını artırmakta ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Çalışma,

RAP uygulamalarının sürdürülebilir asfalt üretimi açısından potansiyelini ortaya koymakta ve üretim süreçlerinin optimizasyonu ile ileri modelleme teknikleri için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu vurgulamaktadır (K. Zhang vd., 2019).

M. Enieb ve çalışma arkadaşları, RAP malzemelerinin asfalt karışımlarında kullanım potansiyelini incelemiştir. RAP çevresel etkileri azaltmakta, yeni malzeme ihtiyacını düşürmekte ve ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Araştırmalar, %30 RAP oranının kalıcı deformasyon, esneklik modülü, yorulma dayanımı ve nem duyarlılığı gibi özellikler açısından optimum performans sunduğunu göstermektedir. RAP, karışımın sertliğini artırarak deformasyonu azaltmakta, yaşlanmış bağlayıcıların olumsuz etkileri ise katkı maddeleriyle dengelenebilmektedir. Ayrıca, RAP karışımlarının nem direnci, doğal karışımlara kıyasla daha yüksektir. Çalışma, doğru katkı maddeleri ve oranlarla RAP kullanımının hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sunduğunu ortaya koymaktadır (Enieb vd., 2021).

P. B. Gnanamurthy ve Kiran Kumar B. V. tarafından yapılan çalışmada, bitümlü karışımlara farklı oranlarda RAP malzemesi eklenerek, özellikleri incelenmiştir. Marshall yöntemiyle yapılan tasarımda RAP oranları %25, %40, %50, %60 ve %100 olarak kullanılmış ve %50 oranı optimum olarak belirlenmiştir. Laboratuvar testleri, RAP içeren karışımların Marshall stabilitesi ve hacimsel parametrelerde kontrol karışımıyla eşdeğer veya daha iyi performans sergilediğini göstermiştir. Stabilitate, RAP oranıyla artarken akma değerleri, %50 RAP'in üzerindeki karışımlarda sınırların dışına çıkmıştır. Nem hassasiyeti testleri, RAP karışımlarının nem dayanıklılığının tatmin edici olduğunu, ancak bitüm içeriğinin bu hassasiyeti tam olarak önleyemediğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, optimum RAP oranı kullanımının sıcak karışım asfalt özelliklerini iyileştirerek, ekonomik ve sürdürülebilir yol yapımına katkı sağladığı, özellikle sınırlı kaynakların bulunduğu veya malzemenin taşınmasının zor olduğu bölgelerde faydalı olacağı vurgulanmıştır (Gnanamurthy & B V, 2022).

Mohammad Naser ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, RAP ve RCA (Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası) karışımlarının sıcak asfalt performansına etkileri incelenmiştir. %25, %50, %75 ve %100 oranlarında RAP ve RCA kullanılan karışımlarda mekanik özellikler, stabilite, akma değerleri ve hacimsel parametreler test edilmiştir. Asfalt miktarı arttıkça, stabilite ve akma değerleri iyileşmiş, beyaz sert kaya karışımları en yüksek stabiliteyi göstermiştir. Kireçtaşı karışımlarında hava boşluğu %5'i aşınca, katkı gerekliliği ortaya çıkmıştır. %75 RAP kullanımı stabiliteyi artırırken, RCA'nın stabilite üzerindeki etkisi kullanılan oran ve asfalt miktarına göre değişmiştir. RAP ve RCA kombinasyonunda RCA oranı arttıkça, yük taşıma kapasitesi azalmış, optimum asfalt içeriği yükselmiştir. Sonuç olarak, %75'e kadar RAP

kullanımı stabiliteyi artırıp çevresel fayda sağlarken, RCA ekonomik olarak daha az avantajlı bulunmuştur. Çalışma sonucunda, RCA'nın alt temel katmanlarda kullanımı için daha fazla araştırmanın yapılması gerektiği bildirilmiştir (Naser vd., 2022).

M.K. Diptikanta Rout ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, RAP agregalarının beton karışımlarında kullanılabilirliği ve Zirkonya Silika Dumanı (ZSF) katkısının etkileri incelenmiştir. Farklı oranlarda yıkanmış ve kirli RAP agregaları içeren karışımların dayanım ve su emme özellikleri değerlendirilmiştir. Yıkanmış agregaların, daha iyi mekanik ve fiziksel performans sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle yıkanmış %40 RAP ve %10 ZSF içeren karışımlar, en yüksek dayanımı göstermiş ve optimum oranlar olarak belirlenmiştir. Çalışma, geri dönüştürülmüş agregaların çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet açısından, doğal agregalara uygun bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır (Rout vd., 2023).

Kocak ve Haider tarafından yapılan çalışmada, esnek yol kaplamalarında çukur onarımı için %100 RAP karışımlarının performansı ve maliyet etkinliği incelenmiştir. Petrol bazlı yenileyici içeren RAP karışımları, soğuk karışımlara göre daha yüksek performans göstermiş ve sıcak karışımlarla benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çekme dayanımı açısından en iyi sonuç, petrol bazlı emülsiyon içeren RAP karışımlarında gözlemlenmiştir. Yaşam döngüsü maliyet analizlerine göre, RAP ile yapılan onarımlar, soğuk karışımlara göre 22 kat, sıcak karışımlara göre ise 8 kat daha ekonomiktir. Bu bulgular, RAP karışımlarının yüksek performans ve düşük maliyet açısından güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır (Kocak & Haider, 2023).

Mohit Nandal ve çalışma arkadaşları, yaptıkları çalışmada RAP ile doğal agreganın fiziksel özelliklerini karşılaştırarak, esnek yol yapılarında temel ve alt temel malzemesi olarak kullanım potansiyelini incelemiştir. RAP'ın tane boyutu ve yoğunluğu doğal agregaya benzerken, su emme, darbe dayanıklılığı ve aşınma direnci açısından daha düşük performans sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, RAP agregası darbe testinde %53 daha dayanıklı, Los Angeles aşınma testinde ise %30 daha sert bulunmuştur. Isı haritası analizinde ise iki malzeme arasında %93 oranında benzerlik saptanmıştır. RAP kullanımının maliyetleri azalttığı ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığına dikkat çekilmiştir. Ancak, malzemenin kaynağı, yaşı ve kalitesine bağlı olarak özelliklerinde değişkenlik gösterebildiği için uygulama öncesinde dikkatli değerlendirmeler yapılması gerektiği önemle belirtilmektedir. Çalışma, RAP'ın doğal agrega yerine kullanımını desteklemekte, ancak uzun vadeli performansının daha fazla araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır (Nandal vd., 2023).

Hassan Ziari ve Mojtaba Hajiloo'nun çalışmasında, RAP ve üç farklı geri dönüşüm katkı maddesi içeren asfalt karışımlarının tasarımı incelenmiştir. Asfalt karışımlarının optimum bağlayıcı içeriği, Superpave (Yüksek Performanslı Kaplama Tasarımı) yöntemiyle belirlenmiştir. Ancak bu yöntemin çatlama direnci gibi bazı performans özelliklerini yeterince göz önünde bulundurmadağı tespit edilmiştir. Bu nedenle, optimum bağlayıcı içeriğinin tahmininde dengelenmiş karışım tasarımı yöntemi araştırılmıştır. Üç farklı bağlayıcı içeriği ile hazırlanan karışımlar, tekerlek izi, çatlama ve nem hasarına karşı test edilmiştir. Bulgular, Superpave yöntemiyle belirlenen optimum bağlayıcı içeriğinin tekerlek izi ve nem direncini sağlarken, çatlama direncinin yetersiz olduğunu göstermiştir. Geri dönüşüm katkı maddeleri çatlama direncini artırsa da optimum bağlayıcı içeriğinin artırılması gerektiği vurgulanmıştır. RAP oranı %25'ten %50'ye çıkarıldığında çatlama performansı azalmış, katkılarla bu sorun kısmen düzeltilmiştir. Sonuç olarak, yüksek RAP içeren karışımlar için Superpave yönteminin tek başına yeterli olmadığı, dengelenmiş karışım tasarımı yönteminin tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Ziari & Hajiloo, 2023).

Jiangmiao Yu ve çalışma arkadaşları, yüksek RAP ve RAS (Geri Kazanılmış Asfalt Şingil) içeren asfalt karışımların uzun vadeli performansına yönelik mevcut araştırmaları derlemiştir. Bu tür karışımların maliyet, enerji tasarrufu ve çevresel faydalar sağladığı görülse de özellikle düşük ve orta sıcaklıklarda çatlama eğilimi gibi dayanıklılık sorunları ortaya çıkardığı belirlenmiştir. Yapılan incelemelerde, yüksek RAP/RAS oranlarının, yüksek sıcaklıklarda performansı artırdığı, ancak çatlama riskini yükselttiği görülmüştür. Geri dönüşüm katkı maddelerinin uygun dozda kullanımı dayanıklılığı artırsa da aşırı kullanım çeşitli olumsuzluklara yol açabilmektedir. Çalışma, saha performansının doğru tasarım ve üretimle iyileştirilebileceğini belirtmekte, ayrıca yaşlanma modelleri, karışım optimizasyonu ve malzeme kalitesinin etkileri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiğini vurgulamaktadır (Yu vd., 2024).

Lei Jiang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yüksek RAP içeren sıcak yerinde geri dönüşüm asfalt karışımlarında optimal yeni bağlayıcı içeriğini belirlemek amacıyla bir tasarım metodolojisi uygulanmıştır. Tekerlek izi ve yarı dairesel eğilme testleriyle farklı RAP ve bağlayıcı dozlarının çukurlaşma ve çatlama performansları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yeni bağlayıcı eklemenin çatlama direncini artırırken çukurlaşma direncini azalttığını göstermiştir. Her %10 bağlayıcı artışı, dinamik stabilitenin %19 oranında düşmesine neden olmuştur. Örneğin, %80 RAP içeren yaşlandırılmış karışımlar için optimal bağlayıcı oranı %1,52 olarak

belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, saha uygulamaları için daha fazla alan testi yapılması ve laboratuvar tasarımlarının sahayla ilişkilendirilmesi önerilmektedir (Jiang vd., 2024).

Maria Tsakoumaki ve Christina Plati'nin yaptığı çalışmada, dünya genelinde RAP malzemelerinin yol kaplamalarındaki kullanımı incelenmektedir. Çalışma, sürdürülebilir yapılaşma ve çevre dostu teknolojiler kapsamında RAP'in önemine dikkat çekmektedir. RAP kullanımı, asfalt üretiminde çevresel etkileri azaltmakla birlikte, özellikle asfalt tabakalarında genellikle %30 oranında tercih edilmektedir. Yüzey katmanlarında ise bu oran genellikle %10-25 arasındadır. Hindistan ve İspanya gibi ülkelerde yerinde geri dönüşümle %100 RAP kullanımı mümkündür. RAP'in performansı, karışım tasarımı, trafik yoğunluğu, bağlayıcı oranı ve depolama koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Yüksek oksitlenme, ince taneleşme ve agrega çeşitliliği, RAP malzemesinin dayanıklılığını etkileyebilmektedir. Çalışma, RAP'in fiziksel özellikleri ve yol dayanıklılığı üzerindeki etkilerinin daha detaylı incelenmesi gerektiğini vurgulamakta ve ülkelerin RAP kullanımını artırmak için standartlar geliştirmesini önermektedir (Tsakoumaki & Plati, 2024).

2.3 RAP'in Elektromanyetik Isıtma Yöntemi (EIY) ile Optimizasyonu

Elektromanyetik radyasyon, elektriksel ve manyetik alanların senkronize salınımları sonucu ortaya çıkan, boşlukta ışık hızında yayılan bir enerji türüdür. Bu dalgalar, frekanslarına göre farklı sınıflarda incelenir ve radyo dalgalarından gama ışınlarına kadar geniş bir spektrumu kapsar. Özellikle mikrodalga ve kızılötesi bölgede yer alan radyasyon türleri, malzeme ısı özelliklerini değiştirme potansiyelleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında dikkat çekmektedir. Bu radyasyonun belirli frekanslarda malzeme yapısıyla etkileşimi, enerji absorpsiyonu ve ısı dönüşüm mekanizmaları üzerinden gerçekleşir. Bu bağlamda elektromanyetik dalgaların, asfalt karışımları içerisindeki agregaların fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyerek performans karakteristiklerini dönüştürebileceği öngörülmektedir. Özellikle RAP içeren karışımlarda elektromanyetik radyasyonun kontrollü uygulanması hem geri kazanım verimliliğini artırabilir hem de çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilir.

ZHU Songqing ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada, asfalt kaplamalarının geri dönüşüm sürecinde mikrodalga ısıtma teknolojisinin etkinliği, Fourier ısı transfer teorisi temel alınarak değerlendirilmiştir. Fourier ısı transfer teorisi, ısıнын sıcaklık farkı nedeniyle malzeme içinde, ısı iletkenlik ve sıcaklık değişimine bağlı olarak yayılmasını açıklar. Asfalt karışımının mikrodalga enerjisini emmesi ve bu enerjinin iç ısıya dönüşmesi, asfaltın geri dönüşümünü

hızlandıran önemli bir etken olarak modellenmiştir. Bu çalışmada geliştirilen iki boyutlu ısı transfer modeli, mikrodalga enerjisinin iç ısı üretimi üzerindeki etkisini, yakın alan radyasyon yasası doğrultusunda hesaplamaktadır. Mikrodalga enerjisi, piramidal anten kullanılarak asfalt yüzeyine yönlendirilmiş ve burada meydana gelen enerji kayıpları, atmosfere karışan enerji olarak belirlenmiştir. Mikrodalga ısıtma deneyleri, 2,45 GHz frekansında hem sürekli hem de kesikli ısıtma yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Sürekli ısıtma esnasında asfalt yüzeyindeki sıcaklık 70 °C'ye kadar yükselirken, kesikli ısıtma yönteminde (5 dakika ısıtma, 1 dakika ara) sıcaklık dağılımı daha dengeli bir şekilde yayılmış ve en yüksek sıcaklık 65 °C olarak ölçülmüştür. Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları, kesikli ısıtma yönteminin daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığını ve asfaltın geri dönüşüm kalitesini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, mikrodalga ısıtma teknolojisinin asfalt geri dönüşüm sürecinde daha etkili bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu araştırma, mikrodalga ile sıcak yerinde geri dönüşüm teknolojisinin optimize edilmesinde analitik modellerin kullanımının asfalt kaplamaların geri dönüşüm verimliliğini artırabileceğini ve bu süreçlerde önemli iyileşmeler sağlayabileceğini ortaya koymaktadır (ZHU vd., 2009).

Tongsheng Sun ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışma, mikrodalga teknolojisi kullanılarak yerinde asfalt kaplamalarının geri dönüştürülmesinde sıcaklık kontrolünün optimizasyonuna odaklanmaktadır. Mikrodalgalar, asfalt karışımlarıyla etkileşime girerken, asfaltın enerjiiyi emmesi ve bu enerjinin ısıya dönüşmesi süreci aracılığıyla ısınmasını sağlar. Bu etkileşim, asfaltın geri dönüşüm sürecinde sıcaklık kontrolünün önemini ortaya koymaktadır. Sıcaklık kontrol modeli, mikrodalga ısıtma sırasında elektrik alanı yayılma denklemi ile ısı akışı kontrol denkleminin birleşimiyle geliştirilmiştir. Yapılan analizler, sıcaklık dağılımının asfalt karışımının yapısı ve elektrik alanı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle, sıcaklıkların daha homojen bir şekilde dağılması açısından aralıklı ısıtma yönteminin, sürekli ısıtma yöntemine kıyasla daha verimli olduğu bulunmuştur. Deneysel veriler, 30 saniyelik aralıklarla yapılan ısıtmanın asfalt karışımlarının geri dönüşüm etkinliğini artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, mikrodalga ısıtma sürecindeki parametrelerin optimizasyonu, sıcaklık dağılımının homojenliğini artırarak bakım kalitesini iyileştirmektedir. Maksimum elektrik alanı ve dielektrik kayıp faktörü gibi parametrelerin artırılması, asfalt karışımların iç sıcaklık alanlarında daha etkili ısı transferi sağlanmasına imkân tanımaktadır. Çalışma, mikrodalga ile asfalt kaplamalarının yerinde geri dönüşümü için uygun sıcaklık kontrol stratejileri geliştirmiş ve bu stratejiler sayesinde operasyonel verimliliği artırmıştır. Elde

edilen bulgular, asfalt bakım süreçlerinin kalitesinin artırılmasına ve daha verimli bir geri dönüşüm sürecinin sağlanmasına katkı sunmaktadır (Sun vd., 2009).

Songqing Zhu ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada mikrodalga ısıtma yöntemiyle geri dönüştürülmüş asfalt karışımının performansını incelemişlerdir. Mikrodalga ısıtma ile geleneksel ısıtma yöntemlerinin, asfalt karışımının yüksek sıcaklık stabilitesi, düşük sıcaklık çatlama direnci, suya karşı dayanıklılığı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, mikrodalga ısıtmanın geleneksel ısıtmaya kıyasla asfalt karışımının suya dayanıklılığını, düşük sıcaklık esnekliğini ve genel performansını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık stabilitesi açısından, mikrodalga ısıtma ile ısıtılan asfalt karışımının deformasyon test sonuçları, geleneksel ısıtma yöntemi ile benzer çıkmış, ancak mikrodalga ısıtma, deformasyon derinliğini %5-10 oranında daha düşük seviyede tutmuştur. Mekanik özellikler açısından ise mikrodalga ısıtma, asfalt karışımının deformasyon kapasitesini %7-12 oranında artırmış, ancak bazı göstergelerde geleneksel ısıtma yöntemine göre daha düşük performans sergilemiştir. Mikrodalga ısıtma, düşük sıcaklık çatlama direncinde geleneksel ısıtmaya kıyasla daha üstün bir performans göstermiştir. Bu yöntemle elde edilen numunelerde eğilme dayanımında %15-20 oranında bir artış gözlenmiş, kırılma modülü ise %10-15 daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, mikrodalga ısıtmanın düşük sıcaklıklarda asfalt karışımının esnekliğini artırarak soğuk mevsimlerde asfaltın daha iyi performans göstermesini sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca mikrodalga ısıtma ile işlenen geri dönüştürülmüş asfalt karışımı, suya karşı dayanıklılık testlerinde geleneksel ısıtma yöntemlerine göre daha yüksek performans sergilemiştir. Marshall suya karşı dayanıklılık testi ve donma-çözülme testi sonuçlarına göre mikrodalga ısıtma, asfalt ile agrega arasındaki yapışmayı güçlendirerek suya karşı dayanıklılığı artırmıştır. Mikrodalga ısıtma ile elde edilen numunelerde suya dayanıklılık oranı %8-12, donma-çözülme dayanıklılık testi sonrası ise %10 daha yüksek bulunmuştur. Sonuç olarak, mikrodalga ısıtma yöntemi, geleneksel ısıtma yöntemlerine kıyasla geri dönüştürülmüş asfalt karışımının performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu bulgular, mikrodalga ısıtmanın asfalt karışımlarının yol performansını artırmada etkili bir yöntem olduğunu ve çevresel etkilere karşı daha dayanıklı ve sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Zhu vd., 2011).

Tongsheng Sun tarafından gerçekleştirilen bu araştırmada, asfalt karışımların ısıtılmasında mikrodalga ısıtma teknolojisinin avantajları ve elektromanyetik modelleme ilkeleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, geleneksel kızılötesi ısıtma yöntemlerinin asfalt kaplamalarda sıcaklık dağılımında düzensizliklere yol açabileceği ve bu sorunun mikrodalga

ısıtma tekniği ile nasıl etkili bir şekilde aşılabileceği ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Mikrodalga ısıtma, elektromanyetik enerji aracılığıyla malzemelerde ısının dönüşümünü sağlayan bir prensibe dayanır. Bu süreçte, malzemelerin kutupsal özelliklerine bağlı olarak mikrodalga enerjisi daha verimli bir şekilde emilir. Bu durum, mikrodalga ısıtmanın daha homojen ve hızlı bir ısıtma sağlayabileceğini göstermektedir. Araştırma, elektromanyetik alanın iletim derinliği ve yansımaya katsayıları üzerinde de durarak mikrodalga enerjisinin yol malzemelerinde nasıl dağıldığını ve ısıtma derinliklerinin malzeme türlerine göre nasıl farklılık gösterdiğini incelemiştir. Çalışma sonucunda, mikrodalga ısıtma yönteminin asfalt kaplama yüzeylerinde daha derin, homojen ve verimli bir ısıtma sağladığı ve kızılötesi ısıtmanın neden olduğu yüzey yanma problemlerini etkili bir şekilde çözüme kavuşturabileceği gösterilmiştir (Sun, 2013).

A. Benedetto ve A. Calvi tarafından gerçekleştirilen pilot çalışma, asfalt üretimi ve geri dönüşüm süreçlerinde mikrodalga ısıtma teknolojisinin potansiyel kullanımını araştırmaktadır. Çalışma, asfalt ve agregaların mikrodalga ısıtma süreçlerini inceleyen laboratuvar testleriyle başlamış, bu testlerde mikrodalga ısıtma yönteminin asfalt ve agregalar üzerindeki etkileri, malzemenin elektromanyetik özellikleri ve mikrodalga enerjisinin malzeme içindeki yayılma kapasitesi incelenmiştir. Mikrodalga ısıtma ile malzemenin doğrudan enerji alması sağlanarak, geleneksel ısıtma yöntemlerine göre daha hızlı ve homojen bir ısıtma elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, bu yöntemle sıcaklık ve ısı dağılımının daha hızlı ve daha eşit bir şekilde gerçekleştiği gözlenmiştir. Laboratuvar testlerinde, agregaların türü (bazalt ve silisli kireçli agregalar), malzemenin su içeriği ve asfaltın bitüm oranı gibi faktörlerin mikrodalga ısıtma süreci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, mikrodalga ile ısıtma teknolojisinin asfalt üretiminde potansiyel faydalarını doğrulamış ve geleneksel ısıtma yöntemlerine göre daha verimli bir ısıtma sağladığını göstermiştir. İkinci aşamada, deneysel sonuçların bir sayısal simülasyon modeli ile doğrulaması yapılmıştır. Bu model, mikrodalga ısıtma tesislerinin tasarımında kullanılabilecek bir araç olarak geliştirilmiştir. Sayısal simülasyonlar, gerçek ölçekte mikrodalga ısıtma sistemlerinin performansını tahmin etmeye yardımcı olmuştur. Sonuç olarak, mikrodalga ısıtma teknolojisinin asfalt üretiminde çevresel etkileri azaltma ve enerji tasarrufu sağlama potansiyeline sahip bir ısıtma teknolojisi olduğu belirtilmiştir (Benedetto & Calvi, 2013).

Riyaz Niefertgodien ve Kim Jenkins tarafından yapılan çalışmanın ilk bölümünde, mikrodalga ısıtma teknolojisi ile asfalt karışımların üretiminde enerji verimliliğinin sağlanma potansiyeli incelenmiştir. Asfalt endüstrisinde, enerji verimliliği sağlayan yöntemlerle sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Üretimde kullanılan malzemelerin

geri dönüştürülmesiyle ek enerji tasarrufu sağlanmakta ve emisyon oranlarında azalma görülmektedir. Geleneksel ısıtma yöntemlerinde ısı yalnızca malzemenin yüzeyine iletilirken, mikrodalga ısıtma, tüm malzeme hacmini eşit şekilde ısıtarak daha hızlı ve verimli bir ısınma sağlamaktadır. Mikrodalgalar, dielektrik malzemelerde elektrik alan ile etkileşerek kutup moleküllerinin hızlı salınımlarını yaparak ısı üretir. Bu süreç, malzemenin elektriksel özelliklerine ve kullanılan frekansa bağlı olarak çeşitli etkileşimlerle gerçekleşmektedir. Yarı sıcak köpüklü bitüm karışımı teknolojisi, asfalt üretiminde kullanılan ve daha düşük sıcaklıkta karışım hazırlamaya olanak tanıyan bir yöntemdir. Mikrodalga ısıtma, karışımların üretiminde ısıtmayı hızlandırmakta ve RAP kullanılarak daha çevre dostu ve ekonomik çözümler sunmaktadır. Ayrıca, asfalt üretim hızını artırmakta, enerji tüketimini azaltmakta ve karışımların kalitesini iyileştirmektedir. Bu çalışma kapsamında, köpüklü bitümle stabilize edilmiş malzemelerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, mikrodalga teknolojisinin etkin bir ısıtma yöntemi olarak kullanılması önerilmektedir. Mikrodalgaların hacimsel ısınma kapasitesi sayesinde enerji tasarrufu sağlanırken, uygun malzemeler kullanıldığında hızlı ısınma ile üretkenlik artmaktadır. (Nieftagodien & Jenkins, 2013).

A. González ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, mikrodalga ısısı ile çatlak iyileştirme kapasitesine sahip asfalt karışımların özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, RAP malzemesi ve metal liflerin asfalt karışımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan testler, RAP içeriğinin karışımın yoğunluğu üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını, ancak metal lif içeriği arttıkça karışım yoğunluğunun azaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, RAP içeriği arttıkça hava boşluklarında bir azalma gözlemlenirken, metal lif oranı arttıkça hava boşluklarında genel bir artış meydana gelmiştir. Karışımların sıcaklıkla birlikte sertliklerinde azalma gözlenmiş, ancak RAP içeriği arttıkça metal lif eklenmesi, karışımın sertliğini artırmıştır. Mikrodalga ısısı ile yapılan iyileştirme testlerinde, asfalt örneklerinin yüzey sıcaklıkları 54°C ile 87°C arasında değişmiş, ortalama sıcaklık ise 69°C olmuştur. Yapılan bilgisayarlı tomografi taramaları, karışımlar içerisinde lif kümelerinin oluştuğunu ve agregaların metal içerdiğini, bunun da lif içermeyen karışımlara göre daha iyi ısınma sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, mikrodalga ısısı ile çatlak iyileştirme potansiyeline sahip asfalt karışımların, %30'a kadar RAP ve metal lif içermesi durumunda bu potansiyeli koruduğu belirlenmiştir (González vd., 2018a).

A. Gonzalez ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, mikrodalga radyasyonunun asfalt karışımların çatlak iyileştirme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada, metal talaşları ve RAP'in mikrodalga ile ısıtılan asfalt karışımların performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, mikrodalga radyasyonu ile ısıtılan asfalt karışımların

yüzey sıcaklıklarının, indüksiyon yöntemiyle elde edilen sıcaklıklardan daha yüksek olduğunu göstermektedir. Mikrodalga ısıtı sonrası asfalt karışımların ortalama yüzey sıcaklığı 71,7 °C olarak ölçülürken, indüksiyon ısıtısında bu değer 50,85 °C'ye ulaşmıştır. Bu durum, mikrodalga radyasyonun asfalt karışımların ısıtılmasında daha etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Metal talaşlarının asfalt karışımlarına eklenmesinin çatlak iyileştirme özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Mikrodalga ile ısıtıldığında, metal talaşlarının karışım içerisinde daha homojen bir şekilde dağıldığı ve karışımın hava boşluklarının arttığı gözlemlenmiştir. Talaşların düzensiz şekilleri, genişlikleri ve yönelimleri karışımın heterojen bir yapı oluşturmaya yol açmıştır. Mikrodalga ısıtma ile metal talaşlarının asfalt karışımlarındaki ısı iletkenliği artırdığı ve bu şekilde çatlak iyileştirme sürecini desteklediği belirlenmiştir. Sonuç olarak, mikrodalga radyasyonun asfalt karışımların çatlak iyileştirme yeteneğini artırmada önemli bir potansiyele sahip olduğu ve atık metal talaşları ile RAP malzemelerin bu süreçte verimli bir şekilde kullanılabileceği bildirilmiştir. Bu bulgular, çevre dostu ve sürdürülebilir asfalt kaplamalarının geliştirilmesinde mikrodalga teknolojisinin potansiyel avantajlarını ortaya koymaktadır (González vd., 2018b).

José Manuel Lizárraga ve Juan Gallego çalışmalarında, mikrodalga ısıtma yöntemi ile uygulanan termomekanik iyileştirmenin, asfalt karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri ve karışımların yeniden sertlik kazanma süreçleri incelenmiştir. Araştırmada, içerisinde %0, %4 ve %8 oranlarında elektrik ark ocağı çelik cürufu bulunan karışımlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Mikrodalga ısıtma yönteminin kullanımıyla asfalt karışımlarında iç ısınmanın hızlandırılması ve iyileşme verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar, %8 Elektrikli Ark Ocağı (EAF) cürufu içeren geri dönüştürülmüş asfalt karışımın, düşük enerji tüketimiyle daha hızlı ısındığını ve iyileşme verimliliğini artırdığını göstermiştir. Özellikle, bu karışım enerji tüketiminde %69'a kadar tasarruf sağlarken, sertlik iyileşme oranında %61'e varan bir artış gerçekleştirmiştir. Ayrıca, iyileşme oranlarının RAP ve çelik cürufu içeriği ile mikrodalga ısıtma sıcaklığı arasında doğrudan bir ilişki olduğu belirlenmiştir. 80 °C'ye kadar ısıtma uygulandığında, %4 EAF çelik cürufu içeren karışımlarda iyileşme oranlarında önemli bir artış gözlemlenirken, %8 EAF çelik cürufu içeren karışımlarda ise sıcaklık 60 °C'nin üzerine çıktığında, iyileşme oranlarının sabitlendiği tespit edilmiştir. Bu araştırma, geri dönüştürülmüş asfalt karışımların iyileştirilmesinde, mikrodalga ısıtma yönteminin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, çelik cürufu içeren karışımların yorulma direnci ve nem hassasiyetinin daha kapsamlı biçimde incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bunun yanı sıra, taşınabilir mikrodalga ısıtma ekipmanlarının geliştirilmesiyle, bu teknolojinin

kentsel yol yüzeyleri ve otoyolların onarımında etkin bir şekilde kullanılabileceği bildirilmiştir (Lizárraga & Gallego, 2020).

Tongsheng Sun ve Hanqian Sheng tarafından yapılan araştırmada, asfalt yol kaplamalarının mikrodalga ile sıcak geri dönüşüm sürecindeki ısı transferi incelenmiş ve farklı kalınlıklar ile nem içeriğine sahip asfalt kaplamaların ısıtma süreçlerinde meydana gelen sıcaklık değişimleri simüle edilmiştir. Asfalt yol kaplamalarının boyutları 30 cm × 20 cm × 15 cm olarak belirlenmiş, mikrodalga anteninin etkileşim alanı ise 15 cm × 12 cm olarak ayarlanmıştır. Başlangıç sıcaklığı 18 °C olarak kabul edilmiş ve 15 dakika boyunca mikrodalga ısıtma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. %2, %4 ve %6 olmak üzere üç farklı nem içeriğine sahip asfalt yol kaplamalarının sıcaklık değişimleri gözlenmiştir. Simülasyonlar sonucunda, asfalt kaplamaların yüzeyindeki ortalama sıcaklık, nem içeriği sırasıyla %2, %4 ve %6 olan örneklerde 107,8 °C, 101,7 °C ve 95,5 °C olarak kaydedilmiştir. Yüzeyden 5 cm derinlikte, aynı nem oranlarına sahip asfalt kaplamaların ortalama sıcaklıkları sırasıyla 90 °C, 84,7 °C ve 79,5 °C'ye düşerken; 10 cm derinlikte ise bu sıcaklıklar 73,4 °C, 69,3 °C ve 65 °C olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, derinlik arttıkça sıcaklığın azaldığını ve düşük nem içeriğine sahip asfaltların daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaştığını göstermektedir. Mikrodalga ile ısıtma sürecinde, asfalt yol kaplamalarının kalınlığı arttıkça yüzeydeki sıcaklık artışı yavaşlamaktadır. İnce kaplamalar daha hızlı ısınırken, kalın kaplamalar aynı süre içinde daha düşük sıcaklıklara ulaşmaktadır. Ayrıca, nem içeriği düşük asfalt kaplamalarda, nem oranı yüksek olanlara göre daha yüksek sıcaklıklar gözlenmiş ve bu fark, ısıtma süresiyle birlikte artmıştır. Sonuç olarak, mikrodalga sıcak geri dönüşüm teknolojisinin, asfalt yol kaplamalarını daha dengeli ve etkili bir şekilde ısıtılmasını sağladığı tespit edilmiştir. Bu sayede onarım süreçlerinin verimliliğinin arttığı belirlenmiştir (Sun & Sheng, 2020).

Zhenjun Wang ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, soğuk geri dönüştürülmüş asfalt emülsiyon karışımı üzerinde oda sıcaklığı, etüv ve mikrodalga gibi farklı ısıtma yöntemlerinin, yolun erken aşamadaki performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Özellikle mikrodalga ısıtma yönteminin, karışımın mikro yapısı üzerindeki etkileri araştırılmış, mikrodalga parametrelerinin, asfalt karışımın performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Elde edilen bulgular, karışımın mekanik özelliklerinin mikrodalga parametrelerine ve malzeme bileşenlerine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Mikrodalga ısıtma süresi ve gücü arttıkça, karışımın dolaylı çekme dayanımında anlamlı bir artış gözlenmiştir. Ayrıca, mikrodalga uygulamasının karışımın nem hassasiyetini iyileştirdiği, ancak asfalt emülsiyonunun suya karşı duyarlılığı nedeniyle bu iyileşmenin sınırlı düzeyde

kaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, mikrodalga ısıtımını, karışımın yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi direncini önemli ölçüde artırmış ve dinamik stabiliteyi geliştirmiştir. Düşük sıcaklıktaki çatlak direncinde de artış sağlanmış olmakla birlikte, bu artışın sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, mikrodalga ısıtımının, asfalt emülsiyonunun ayrışma sürecini hızlandırdığı ve çimento hidratasyon ürünlerinin oluşumunu artırdığı tespit edilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bu çalışmada, mikrodalga ısıtma teknolojisinin gelecekte saha uygulamaları için kullanılabilirliği önerilmiş, bu yöntemin, soğuk geri dönüştürülmüş asfalt karışımların ilk kürlenme sürecindeki performansını artırmak için potansiyel bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır (Wang vd., 2020).

Xiao Chen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, sıcak yerinde geri dönüşüm için mikrodalga ısıtmanın potansiyeli incelenmiş ve mikrodalga ile kızılötesi ısıtma yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu bağlamda, yaygın olarak kullanılan kızılötesi ısıtma yöntemi ile mikrodalga ısıtmanın özellikleri değerlendirilmiştir. Laboratuvar testleri ve sayısal modelleme kullanılarak her iki ısıtma yönteminin termal parametreleri, ısı transferi ve enerji tüketimi analiz edilmiştir. Asfalt karışımların termal parametrelerini belirlemek amacıyla laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiş ve deneysel verilere dayalı olarak elektromanyetik parametrelerin kalibrasyonu için sayısal modelleme kullanılmıştır. Ayrıca, mikrodalga ve kızılötesi ısıtma yöntemlerinin sıcaklık dağılımları, ısı transferi oranları ve enerji tüketimleri, kontrollü saha koşullarında analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Farklı asfalt karışımların termal özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiği tespit edilmesine rağmen, mikrodalga ısıtma altında ısı transferi oranlarının yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki gösterdiği belirlenmiştir. Kızılötesi ısıtma ile karşılaştırıldığında, mikrodalga ısıtma yalnızca asfalt yüzeyini benzer sıcaklıklara kadar ısıtmakla kalmamış, aynı zamanda asfaltın daha derin katmanlarında da sıcaklık artışını anlamlı ölçüde artırmıştır. Çalışmada, farklı asfalt karışımların ısı transferi oranlarının değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Mikrodalga ısıtmanın, ısıtma verimliliğini artırmak amacıyla uygulanan güç artışından etkin bir şekilde fayda sağladığı görülürken, kızılötesi ısıtma yöntemi için aynı durumun geçerli olmadığı ve güç artışının verimliliği olumsuz etkileyebileceği tespit edilmiştir. Her iki yöntemde de güç artışı enerji tüketimini artırsa da mikrodalga ısıtma aynı güç seviyesinde kızılötesi ısıtmaya kıyasla yaklaşık %60 daha az enerji ve zaman harcamaktadır. Kızılötesi ısıtma her ne kadar yaygın olarak kullanılmakta olsa da yüzeyde kararmaya yol açabilmekte ve asfaltın iç kısımlarının yeterince ısınmasını sağlayamamaktadır. Ayrıca, propan gazı ile çalışan kızılötesi sistemler duman üretimine neden olmakta, bu da çevresel açıdan bazı endişeleri beraberinde getirmektedir. Buna karşılık,

mikrodalga ısıtma asfalt kaplamayı daha verimli bir şekilde ısıtarak yüzeyde kararmayı önlemekte ve bağlayıcının yaşlanmasını azaltmaktadır. Hızlı ısı transferi sağlayan bu yöntem, kısa işlem süresi ve sıfır hava emisyonu gibi avantajlara da sahiptir. Sonuç olarak, mikrodalga ısıtma, asfalt kaplamaların alt tabakalarını daha etkili biçimde ısıtarak hem işlem süresini hem de enerji tüketimini azaltmakta, bu da sera gazı emisyonlarını düşürerek yol kaplamalarının sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, asfalt karışımların ısı transferi oranlarını daha verimli şekilde iyileştirirken, kızılötesi ısıtmaya göre daha az enerji tüketmektedir (Chen vd., 2022).

Yifei Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma, RAP karışımların mikrodalga ile ısıtma verimliliğini incelemeyi amaçlamaktadır. Mikrodalga ısıtma teknolojisi, çevre dostu oluşu, derinlemesine ve homojen ısıtma sağlayabilmesi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Ancak RAP'in düşük dielektrik sabiti, bu teknolojinin ısıtma verimliliğini sınırlayan önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Isıtma verimliliği genellikle sıcaklık artışıyla ölçülmektedir. Ancak bu yöntem, yalnızca içerikleri benzer olan asfalt karışımları için geçerlidir. İçerik farklılıkları veya yoğunluk değişimleri olduğunda, sıcaklık artışına dayalı ölçümler güvenilirliğini yitirmektedir. Deneysel bulgular, bazalt agregalı asfalt karışımların diğer agrega türlerine kıyasla mikrodalga enerjisini daha verimli şekilde emdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, agrega parçacık boyutunun artmasıyla birlikte mikrodalga emilim kapasitesinin yükseldiği, bunun ise agregaların dielektrik özellikleri ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. RAP karışımlarına eklenen aktif karbon, çelik fiber ve metal atıklar gibi iletken malzemelerin, mikrodalga emilimini önemli ölçüde artırabildiği tespit edilmiştir. Öte yandan, bitüm içeriği arttıkça, asfaltın dielektrik sabitinin düştüğü ve bu durumun mikrodalga ısıtma verimliliğini olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Çalışma bulguları, asfalt karışımlarında kullanılan bileşenlerin mikrodalga ısıtma verimliliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, mikrodalga ısıtma teknolojisinin, asfaltın iyileştirilmesi ve sürdürülebilir asfalt üretimi açısından yüksek bir potansiyel taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır (Y. Zhang vd., 2022).

Federico Gulisano ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, soğuk geri dönüştürülmüş asfalt karışımların mikrodalga teknolojisi ile kendiliğinden iyileşme performansı incelenmiştir. Mikrodalga ısıtma, asfalt karışımların mekanik özelliklerini kısmen geri kazandırabilmekle birlikte, tamamen iyileşme sağlayamamaktadır. Çalışmada, soğuk geri dönüştürülmüş asfalt karışımların iyileşme performansı, elektrikli ark ocağı cürufu katkı oranı, mikrodalga ısıtma süresi ve yeniden sıkıştırma etkileri açısından değerlendirilmiştir. Farklı elektrikli ark ocağı cürufu oranlarıyla hazırlanan asfalt karışımlarına, mikrodalga ısıtma ve yeniden sıkıştırma işlemleri uygulanmıştır. İyileşme performansı, karışımların ilk dolaylı çekme dayanımının geri

kazanımı ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, mikrodalga ısıtma ve yeniden sıkıştırma ile soğuk geri dönüştürülmüş asfalt karışımların iyileşme performansının arttığı gözlenmiştir. Özellikle 80°C sıcaklık ve 50 döngü yeniden sıkıştırma ile yüksek iyileşme oranları elde edilmiştir. Elektrikli ark ocağı cürufu, mikrodalga ısı iletkenliğini artırmış, ancak %10 oranında cüruf içeren karışımların hızlı ısınması iyileşmeyi olumsuz etkilemiştir. %5 oranında elektrikli ark ocağı cürufu içeren karışımlar daha az enerjiyle ısınabilmiş ve buna bağlı olarak iyileşme performansında artış gözlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma mikrodalga destekli kendiliğinden iyileşme teknolojilerinin, soğuk geri dönüştürülmüş asfalt karışımların daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, elektrikli ark ocağı cürufu içeriği ile sıcaklık etkileşimlerinin daha detaylı incelenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Gulisano vd., 2024).

W. Sorociak ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada, sıcak karışım asfalt üretim sürecinde RAP malzemesinin mikrodalga radyasyonu ile ısıtılmasının etkinliği incelenmiştir. Mikrodalga teknolojisi, geleneksel ısıtma yöntemlerine kıyasla karbon salınımını azaltarak, çevre üzerindeki olumsuz etkileri sınırlandırma potansiyeline sahiptir. Araştırma, farklı RAP içerikleri ve bitüm türleri (SBS polimer modifikasyonlu ve modifikasyonsuz bitüm) kullanılarak gerçekleştirilen testlerden oluşmaktadır. Mikrodalga ile ısıtmanın, modifiye bitüm ve modifiye edilmemiş bitüm üzerindeki farklı etkileri incelenmiş olup, bu durum asfalt karışımların performansını doğrudan etkilemiştir. Mikrodalga ile ısıtılan RAP, özellikle su içeriği bulunan malzemelerde daha yüksek ısıtma verimliliği göstererek, asfalt karışımın sıkıştırılabilirliğini artırmış ve hava boşluklarını azaltmıştır. Su içeriği %3 ve üzeri olan RAP, en yüksek ısıtma verimliliğine ulaşmıştır. Çalışma, mikrodalga ısıtma teknolojisinin çevre dostu bir alternatif sunduğunu, özellikle nemli RAP kullanımında daha düşük enerji tüketimi ve sıcaklık gereksinimleri sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, SBS polimer modifikasyonu içeren bitüm ile yapılan asfalt karışımların mikrodalgalarla daha hızlı ısındığı ve bu süreçte farklı ısınma davranışları sergilediği gözlenmiştir. Bu durum, polimerin mikrodalgalarla etkileşime girerek bitümün kimyasal yapısını değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Çalışma sonucunda, mikrodalga ısıtma yönteminin fosil yakıt kullanımını azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağladığı ve çevre dostu asfalt üretimine imkân tanıdığı belirlenmiştir (Sorociak vd., 2024).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneyisel çalışmalar Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği, Ulaştırma Geotekniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.1. Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin deneylerdeki kullanımının uygunluğunu tespit etmek amacıyla, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KGM, 2023) Bitümlü Sıcak Karışım, Aşınma Tip-1 kriterleri referans alınmıştır.

3.1.1. Agregat

Deneyisel çalışmalarda, Karayolları Teknik Şartnamesi– Kısım 407'ye (KGM, 2023) referansla, asfalt betonunun aşınma tabakasında Los Angeles testine dayalı kayıp oranının %27'yi geçmemesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu çerçevede, Bursa – İznik sınırları içinde faaliyet gösteren Efor Madencilik'e ait bazalt agregalar temin edilerek kullanılmıştır. Agregat taş ocağına ait görsel Şekil 3.1.'de sunulmaktadır.



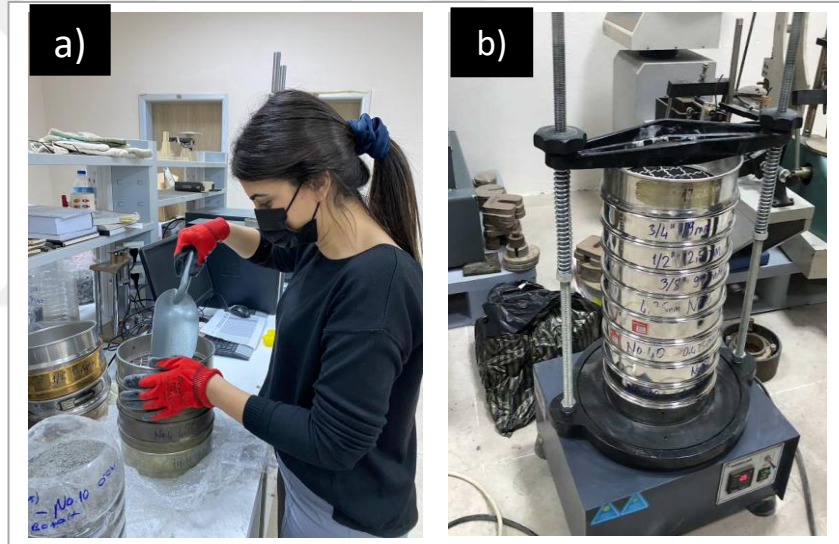
Şekil 3.1. Efor Madencilik'e ait bazalt taş ocağı

Agregaların, Geleneksel Aşınma Tip-1 karışımlarında kullanılıp kullanılmayacağının tespit edilebilmesi için, fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesi (2023) – Kısım 407'de (KGM, 2023) tarif edilen yöntemlere göre belirlenen agregat fiziksel özellikleri, Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Agregâ fiziksel özellikleri (KGM, 2023)

DENEY	SONUÇ	STANDART	Şartname (KTŞ 2023)
Mg ₂ SO ₄ Donma Kaybı, (%)	1,5	TS EN 1367-2	Max %16
L.A. Aşınma Kaybı, (%)	15	TS EN 1097-2	Max %27
Yassılık İndeksi, (%)	12	BS 812	Max %20
Plastisite İndeksi, (%)	NP	TS 1900	NP
Su Absorpsiyonu, (%)	İri = 0,38 İnce = 0,42	TS EN 1097-6	Max %2
Soyulma Mukavemeti, (%)	70-75	KTŞ Kısım 403 Ek-A	Min %60
Metilen Mavisi Deneyi, (%)	0,8	TS EN 933-9	Max %1,5

İkinci aşamada agregalar için elek analizleri ASTM C-136 göre gerçekleştirilmiştir (ASTM C136/C136M-19, 2019). Elek analizleri numune boyutlarına göre hem sarsma tablasından geçirilerek hem de el yordamıyla yapılmıştır (Şekil 3.2). Her bir agregâ grubuna ait elek analizi sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Agregâlar için elek analizi: a) El ile eleme, b) Sarsma tablası ile eleme

Tablo 3.2. Agregâ elek analizleri

ELEKLER (ASTM C-136)		GEÇEN (%)		
		12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm
3/4"	19,1 mm	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7 mm	38,3	97,4	100,0
3/8"	9,52 mm	5,5	78,6	100,0
No.4	4,75 mm	3,0	16,3	94,2
No.10	2,00 mm	2,7	6,3	60,9
No.40	0,425 mm	2,2	3,2	22,7
No.80	0,180 mm	2,0	2,8	14,3
No.200	0,075 mm	1,9	2,4	10,2

Marshall deneyinin uygulanabilmesi için, her bir agrega grubunun 0,075 mm ile 19,1 mm arasındaki elek aralıklarına göre fraksiyonlarına ayrılması gerekmektedir. Bu amaçla, kapsamlı bir planlama doğrultusunda agrega grupları ilgili fraksiyonlara ayrılmış ve Marshall deneyine hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.3'te fonksiyonlarına ayrılmış agrega gruplarına yer verilmiştir.



Şekil 3.3. Fonksiyonlarına ayrılmış agrega grupları

3.1.2. RAP

RAP malzemesi, çalışmada kullanılmak üzere Yalova ili sınırları içerisinde yer alan Taşköprü Belediyesine ait stok sahasından temin edilmiştir. RAP malzemesi, laboratuvar ortamında yapılacak değerlendirmelere uygun hâle getirilmiştir. Bu kapsamda, malzemenin fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla aşağıda sıralanan deneysel çalışmalar belirli bir sıra doğrultusunda titizlikle uygulanmıştır:

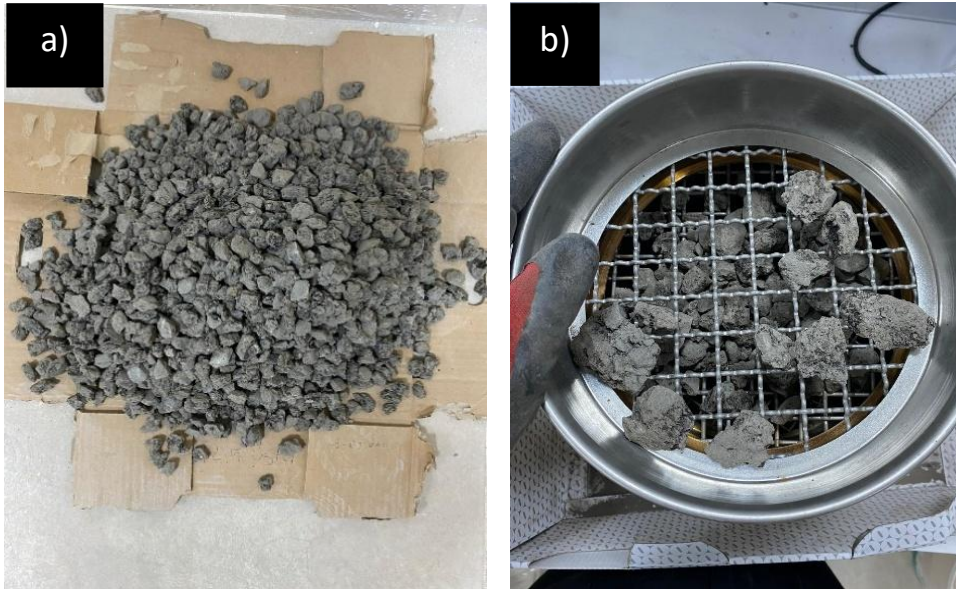
- RAP malzemesinin elek analizi yapılarak, 19,1 mm ile 4,75 mm elek aralığında uygun fraksiyonlar elde edilmiştir,
- RAP içeriğindeki bitüm oranı, ASTM D2172 standardına uygun olarak "Test Method B – Reflux Extractor" yöntemi ile belirlenmiştir (ASTM D2172/D2172M–24, 2024),
- Ekstraksiyon işlemi sonucunda elde edilen kuru agrega üzerinde elek analizi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.4.'te Yalova, Taşköprü Belediyesi'ne ait RAP stok sahasına yer verilmiştir.



Şekil 3.4. Yalova, Taşköprü Belediyesi RAP stok sahası

Ekstraksiyon analizi sonuçlarına göre, kuru agrega esas alınarak hesaplanan bitüm oranı %4,6 olarak belirlenmiştir. Ekstraksiyon işleminden önce ve sonra gerçekleştirilen elek analizi bulguları ise Tablo 3.3.'te ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında, RAP içeriği asfalt karışımına yalnızca iri agrega fraksiyonunu (4,75 mm üzeri) kapsayacak şekilde, ağırlıkça %0, %10, %30 ve %50 oranlarında ilave edilmiştir. Numune hazırlama aşamalarında, RAP malzemesinde mevcut olan %4,6 oranındaki bitüm dikkate alınarak, karışıma ilave edilecek toplam bağlayıcı miktarından bu oran düşülmüş ve gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Şekil 3.5.'te RAP elek analizi sürecine yer verilmiştir.



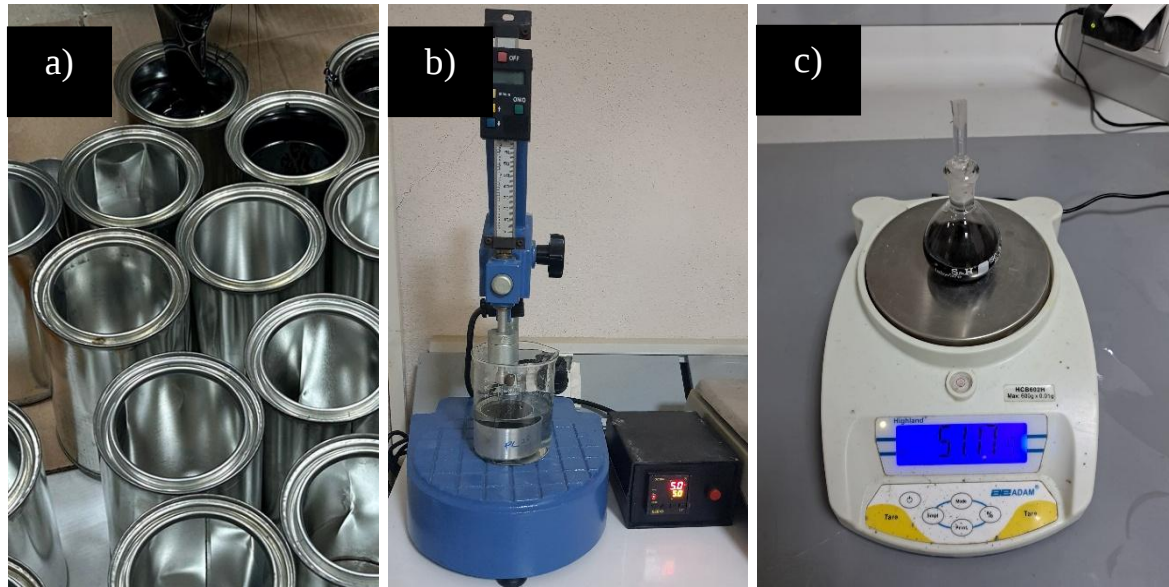
Şekil 3.5. RAP elek analizi: a) Deneye hazırlama b) El ile eleme

Tablo 3.3. RAP elek analizi sonuçları

ELEKLER (ASTM C-136)		GEÇEN (%)	
		Ekstraksiyon Öncesi	Ekstraksiyon Sonrası
3/4"	19,1 mm	99,4	100,0
1/2"	12,7 mm	61,0	81,8
3/8"	9,52 mm	32,8	65,0
No.4	4,75 mm	2,7	29,6
No.10	2,00 mm	2,0	20,5
No.40	0,425 mm	1,5	13,0
No.80	0,180 mm	1,4	10,5
No.200	0,075 mm	1,2	7,8

3.1.3. Bitüm

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılan 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm, Tüpraş İzmit Rafinerisi'nden temin edilmiştir. Laboratuvar ortamında yarı katı formda bulunan bitüm, akışkan hâle gelinceye kadar ısıtılmış, bu işlem sırasında sıcaklık 135 °C'yi geçmeyecek şekilde kontrol altında tutulmuştur. Isıtma işleminin ardından bitüm, kullanım kolaylığı sağlamak amacıyla birer litrelik teneke kutulara aktarılmıştır. Bağlayıcının fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla TS EN 1426 standardına uygun olarak penetrasyon deneyi ve TS EN 15326 standardına göre özgül ağırlık tayini gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular, Tablo 3.4'te detaylı olarak sunulmaktadır. Şekil 3.6.'da bitüm ve bitüme uygulanan deneylere yer verilmiştir.



Şekil 3.6. Bitüm: a) Bitüm depolama, b) Penetrasyon deneyi, c) Özgül ağırlık deneyi

Tablo 3.4. Bitüme ait deneysel sonuçlar

DENEY	SONUÇ	STANDART	Şartname (KTŞ 2023)
Penetrasyon (25 °C) (0,1 mm)	57	TS EN 1426	Max 70
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1,025	TS EN 15326	-

3.2. Deneyler

3.2.1. Elek analizi

Elek analizi, değişik boyuttaki tanelerden meydana gelmiş kırılmış ya da ufalanmış malzemenin “Tane Boyu Dağılımını” belirlemek için gerçekleştirilen deneydir. Bir malzemedeki tanelerin miktarları ve boyutları arasındaki ilişki boyut dağılımı olarak adlandırılır. Numune karışımının sahip olduğu boyut dağılımı, numune içerisindeki malzemenin miktarını ve boyutunu belirtir. Beton ve asfalt gibi yapı malzemelerinde kullanılacak agregaların uygun tane dağılımına sahip olması, dayanım ve işlenebilirlik açısından büyük önem taşır.

Analiz sırasında, farklı göz açıklıklarına sahip elekler üst üste yerleştirilir. Elek setinin en üstüne agrega numunesi konur ve bir sarsıcı yardımıyla belirli bir süre boyunca titreştirilerek malzemenin eleklerden geçmesi sağlanır. Elekler üzerinde kalan agrega miktarları tek tek tartılır ve her bir fraksiyonun toplam içindeki yüzdesi hesaplanır. Bu sonuçlarla tane dağılım eğrisi oluşturularak malzemenin sınıflandırılması yapılır.

Bu çalışmada, doğal agregalar ve RAP hem el yordamıyla hem de sarsma tablası kullanılarak elek analizi yöntemiyle boyutlarına göre ayrıştırılmıştır. RAP numuneleri, reçeteye uygun olarak 4,75–9,5 mm, 9,5–12,5 mm ve 12,5–19 mm olmak üzere üç farklı elek aralığında elenmiştir. Doğal agregalar ise yine reçeteye bağlı olarak; 0,0075 mm altı, 0,075–0,180 mm, 0,180–0,425 mm, 0,425–2,0 mm, 2,0–4,75 mm, 4,75–9,5 mm, 9,5–12,5 mm ve 12,5–19,1 mm olmak üzere sekiz farklı elek aralığında sınıflandırılmıştır.

3.2.2. Ekstraksiyon deneyi

Deneyin amacı, bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarından alınan asfalt numunesi içindeki bitüm miktarını bulmak, numune içindeki agregaların hangi oranda karıştığını tespit etmektir (ASTM D2172, 2024). Bu çalışmada ekstraksiyon deneyi Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılmıştır.

3.2.3. Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi, 100 gramlık bir yük altında, 25 °C sıcaklıkta ve 5 saniyelik bir süre boyunca standardize edilmiş bir iğnenin bitüm numunesine batırılması ve bu süreçte kat ettiği mesafenin ölçülmesi esasına dayanır. Bu deney, asfalt çimentolarının sertlik veya kıvamlılık özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır (TS EN 1426, 2024).

3.2.4. Bitüm özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık, 25 °C’de bitümün sahip olduğu birim hacim ağırlığının, aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Bitümlü maddelerin karakteristik özelliklerine bağlı olarak özgül ağırlık tayini için farklı yöntemler uygulanabilir, ancak genellikle bu değer, piknometre yöntemi kullanılarak belirlenir (TS EN 15326, 2009).

3.3. Karışım Gradasyonunun Belirlenmesi

Bu çalışmada, Bitümlü Sıcak Karışım Aşınma Tip-1 için Karayolları Teknik Şartnamesi’nde (KGM, 2023) belirtilen tane boyut dağılımı esas alınarak karışım gradasyonu oluşturulmuştur. Bu doğrultuda, agrega bileşenleri, 0–5 mm arası ince agrega fraksiyonu için %45, 5–12 mm arası orta boyutlu agrega fraksiyonu için %45 ve 12–19 mm arası iri agrega fraksiyonu için %10 oranında belirlenmiştir. Tablo 3.5’te Aşınma Tip-1 tabakasının için oluşturulmuş olan karışım gradasyonuna yer verilmiştir.

Tablo 3.5. Aşınma Tip-1 Tabakası Karışım Gradasyonu

Aşınma (Tip-1) Tabakası Karışım Gradasyonu									
Kullanım Oranı		%10	%45	%45	Karışım Gradasyonu	Aşınma Tip-1 Limitleri			
		12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm		Şartname	Tolerans		
3/4"	19,1 mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100
1/2"	12,7 mm	38,3	97,4	100,0	92,7	88	100	88	95
3/8"	9,52 mm	5,5	78,6	100,0	80,9	72	90	76	84
No.4	4,75 mm	3,0	16,3	94,2	50,0	42	52	44	52
No.10	2,00 mm	2,7	6,3	60,9	30,5	25	35	27	33
No.40	0,425 mm	2,2	3,2	22,7	11,9	10	20	10	16
No.80	0,180 mm	2,0	2,8	14,3	7,9	7	14	7	12
No.200	0,075 mm	1,9	2,4	10,2	5,9	3	8	4	8

3.4. Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi

Asfalt karışımların tasarımında optimum bitüm oranını belirlemek, karışımın mekanik özelliklerinin ve uzun ömürlülüğünün sağlanmasında kritik bir adımdır. Geleneksel yöntemler ve deneysel çalışmalar, bitüm oranlarının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan ampirik bağıntıların temelini oluşturmuştur. Belirlenen karışım gradasyonu sonrasında bitüm oranının tespiti için ADTPF (2024), AI (1986), FHWA (1997), KGM (2021)'de tarif edilen Denklem (3.1) kullanılmıştır:

$$P = 0,035 \times a + 0,045 \times b + K + F \quad (3.1)$$

Bu formülde kullanılan parametreler ve açıklamaları şu şekildedir:

- P: % cinsinden tahmini bitüm oranı.
- a: Agreganın, ağırlıkça 2 mm'lik elekten geçen kısmının yüzdesi.
- b: Agreganın, ağırlıkça 2 mm ile 0,075 mm arasındaki eleklerden geçen kısmının yüzdesi.
- c: Agreganın, ağırlıkça 0,075 mm'lik elekten geçen kısmının yüzdesi.

Not: a, b ve c değerleri en yakın tam sayıya yuvarlanmalıdır.

- K: c değerine bağlı olarak değişen sabit katsayı:

$$c \leq 5 \text{ ise } K = 0,20$$

$$6 \leq c \leq 10 \text{ ise } K = 0,18$$

$$11 \leq c \leq 15 \text{ ise } K = 0,15$$

- F: 0-2 aralığında olmak üzere agreganın su absorpsiyon yüzdesinin üçte biri olarak alınan değerdir.

Denklem 3.1 ile verilen ampirik formül, özellikle RAP içeren karışımların tasarımında, laboratuvar deneylerinden önce, başlangıç bitüm oranının tahmini için önemli bir rol oynamaktadır. Formül, agrega gradasyonu ile agreganın su absorpsiyon özelliklerine dayanarak, bitümlü karışımın yaklaşık bitüm içeriğini tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle saha deneyiminin sınırlı olduğu durumlarda ya da laboratuvar deneylerine başlamadan önce başlangıç bitüm oranının belirlenmesinin gerekli olduğu tasarım aşamalarında, söz konusu formül pratik bir başlangıç noktası sunmaktadır. Bu sayede deneysel çalışmalarda zaman ve kaynak tasarrufu sağlanırken, aynı zamanda karışım tasarım sürecinin daha verimli ilerlemesine katkı sağlanmaktadır. Her ne kadar bu formül, Asphalt Institute tarafından yayımlanan MS-2 gibi standart belgelerde doğrudan yer almasa da sektörel uygulamalar ve yerel mühendislik pratiklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması için belirlenmiş olan ve aşağıda verilen karışım gradasyonu ve agrega su absorpsiyonu değerleri ile optimum bitüm oranı hesaplanmış ve %4,75 olarak bulunmuştur.

$$a = 69$$

$$b = 25$$

$$c = 6$$

$$K = 0,18$$

$$F = 0,4$$

$$P (\%) = 4,75$$

3.5. Marshall Briketi Üretimi

Marshall deneyi, sıcak karışım asfaltların stabilite ve akma miktarını değerlendirmede kullanılan bir deney yöntemidir. Bu çalışmada Marshall deneyi, TS EN 12697-34 standardı temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Marshall stabilite deneyi, bir agrega karışımına farklı yüzdelere sahip bağlayıcı ekleyerek, bitümlü karışımın boşluk oranının tespit edilmesi, en uygun bağlayıcı oranının belirlenmesi, kuru agregalı karışımında bulunan boşlukların bağlayıcı madde olan bitüm ile doldurulma oranlarının tespit edildiği bir yükleme deneyidir (TS EN 12697-34, 2020).

Çalışma kapsamında, briket üretim için geleneksel ısıtma yöntemi (etüv) ile ısıtılmış 12 farklı karışım ve elektromanyetik ısıtma yöntemi (mikrodalga) kullanılarak ısıtılmış 12 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışım gradasyonundan sonra hazırlanan reçeteye göre, her bir numune için toplam 1100 g olacak şekilde briket karışım oranları laboratuvar koşullarında hazırlanmıştır. Deneyisel çalışmada kullanılan reçete EK-1’de verilmiştir.

3.5.1. Geleneksel Isıtma Yöntemi (GIY) ile ısıtma

Karayolları Teknik Şartnamesi (KGM, 2023) esas alınarak, Aşınma Tipi 1’e uygun olarak belirlenen gradasyonda, her biri 1100 g ağırlığında olacak şekilde %0, %10, %30 ve %50 oranlarında RAP içeren numuneler hazırlanmıştır. Her RAP oranı için üçer adet olmak üzere, toplamda 12 numune GIY kullanılarak üretilmiştir. Briket üretim aşamalarında aşağıdaki işlem algoritması esas alınmıştır;

- 1- Her bir agrega ve RAP karışımı, 160 °C sıcaklıktaki etüvde 2 saat süreyle ısıtılmıştır.
- 2- Deneylerde kullanılan karıştırma kabı, spatula, briket kalıpları ve benzeri ekipmanlar 160 °C sıcaklıktaki etüvde ısıtılmıştır.

- 3- Bitüm, 155 °C’de 30 dakika süreyle etüvde ısıtılmıştır.
- 4- Isıtma işleminin ardından, agrega karışımı kuru olarak karıştırılmıştır. Bu işlem sonrasında, sırasıyla %0 RAP içeren karışım için %4,75; %10 RAP için %4,31; %30 RAP için %3,43 ve %50 RAP içeren karışım için %2,55 oranında AC 50/70 bitüm ilave edilerek sıcak karışımlar hazırlanmıştır.
- 5- Hazırlanan sıcak asfalt karışımı, 155 °C’de bitüm ilavesiyle birlikte toplam 2 dakika süreyle homojen olarak karıştırılmıştır.
- 6- Etüvden çıkarılan numune kalıplarının alt yüzeyleri ince bir kâğıt ile kaplanmış, ardından sıcak karışım kalıplara dökülerek şişlendikten sonra üst yüzeylere de kâğıt yerleştirilmiştir.
- 7- Sıcak numuneler, Marshall tokmağı kullanılarak 135 °C’de her iki yüzeyden 75’er kez tokmaklanarak sıkıştırılmıştır.
- 8- Sıkıştırma işlemi tamamlanan numuneler numaralandırılmış ve kalıpların içerisinde soğumaya bırakılmıştır.
- 9- Numuneler, bir gün boyunca oda sıcaklığında soğutularak dinlendirilmiş ve krik o yardımıyla kalıplarından çıkarılarak düz bir zemine yerleştirilmiştir.
- 10- Briketlerin çap ve yükseklik ölçümleri kumpas yardımıyla gerçekleştirilmiştir.
- 11- Briketlerin hacim özgül ağırlık ve su absorpsiyon düzeyleri Arşimet terazisi kullanılarak hesaplanmıştır.
- 12- Briketler, 60 °C sıcaklıktaki su banyosunda 30 dakika süreyle kür işlemine tabi tutulmuş ve işlem sonunda sudan çıkarılarak havlu ile kurulanmıştır.
- 13- Numunelerin yük ve deformasyon özelliklerini değerlendirmek amacıyla TS EN 12697-34 standardına uygun olarak stabilite ve akma deneyleri gerçekleştirilmiştir (TS EN 12697-34, 2020).

3.5.2. Elektromanyetik Isıtma Yöntemi (EIY) ile ısıtma

Karayolları Teknik Şartnamesi (KGM, 2023) esas alınarak, Aşınma Tipi 1’e uygun olarak belirlenen gradasyonda, her biri 1100 g ağırlığında olacak şekilde %0, %10, %30 ve %50 oranlarında RAP içeren numuneler hazırlanmıştır. Her RAP oranı için üçer adet olmak üzere, toplamda 12 adet bitümlü sıcak karışım üretilmiş ve ısıtma prosesinde elektromanyetik ısıtma yöntemi kullanan bir mikrodalga fırın (230 V gerilimde çalışan, 1050 W nominal giriş gücüne

ve 2450 MHz frekansa sahip SEG SMW 20-W model) kullanılmıştır. Briket üretim aşamalarında aşağıdaki işlem algoritması esas alınmıştır;

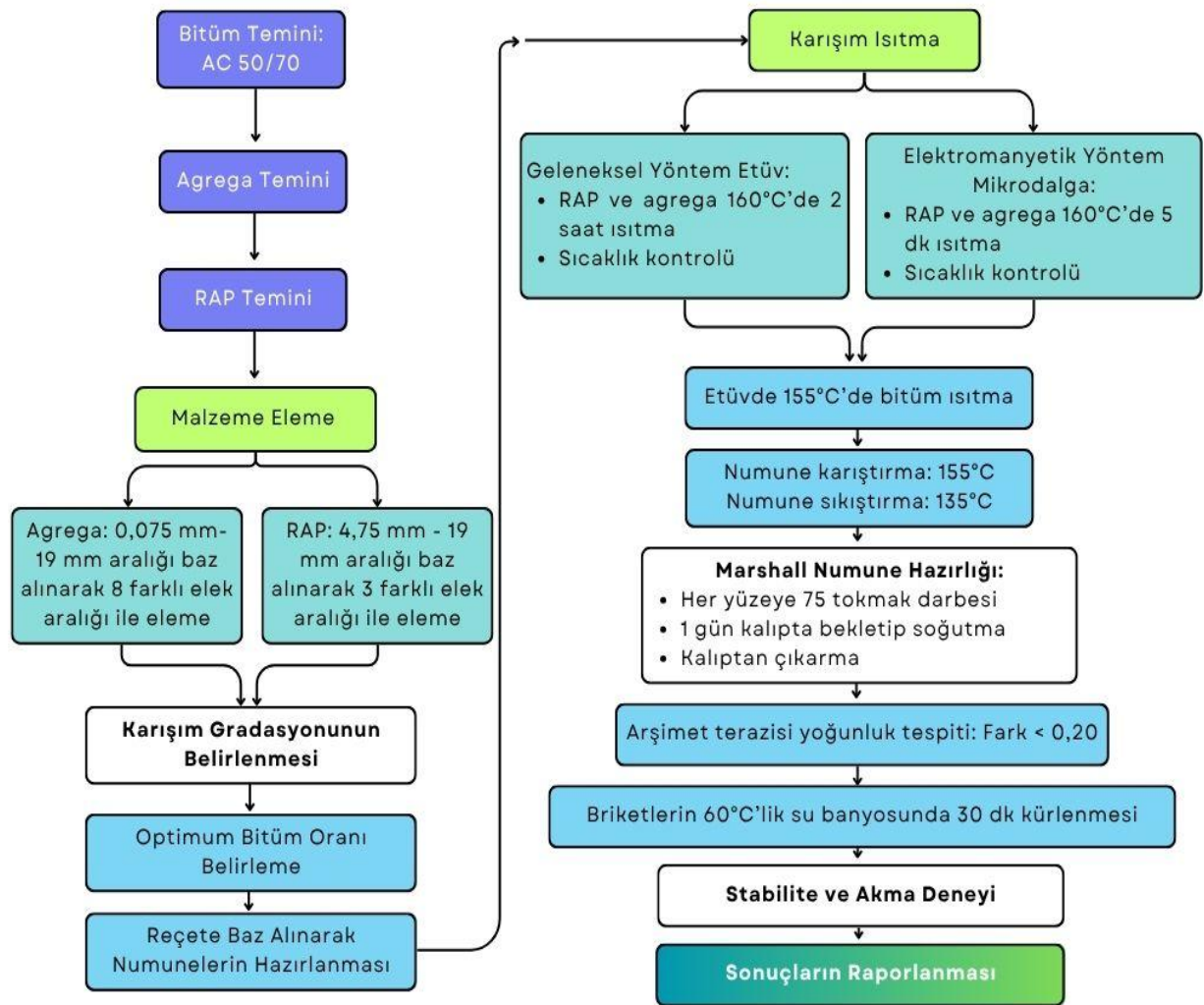
- 1- Mikrodalga fırın, 1 dakika süreyle ön ısıtmaya tabi tutulmuş ve bu süreçte fırın içerisindeki cam tepsi yaklaşık 60 °C'ye ulaşmıştır.
- 2- Doğal agrega ve RAP karışımı cam tepsiye yerleştirilerek 5 dakika süreyle ısıtılmıştır. Isıtma süresi sonunda doğal agrega ve RAP karışımının sıcaklığı 160°C olarak ölçülmüştür.
- 3- Deneylerde kullanılan karıştırma kabı, spatula, briket kalıpları ve benzeri ekipmanlar 160 °C sıcaklıktaki etüvde ısıtılmıştır.
- 4- Bitüm, 155 °C'de 30 dakika süreyle etüvde ısıtılmıştır. Bitümün mikrodalga yöntemi ile ısıtılması, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların oksidatif yaşlanmayı hızlandırma riski taşıması nedeniyle, kontrollü sıcaklık koşullarında ve homojen ısı dağılımı sağlayan etüvde ısıtılması tercih edilmiştir.
- 5- Isıtma işleminin ardından, agrega karışımı kuru olarak karıştırılmıştır. Bu işlem sonrasında, sırasıyla %0 RAP içeren karışım için %4,75; %10 RAP için %4,31; %30 RAP için %3,43 ve %50 RAP içeren karışım için %2,55 oranında AC 50/70 bitüm ilave edilerek sıcak karışımlar hazırlanmıştır.
- 6- Hazırlanan sıcak asfalt karışımı 155 °C'de bitüm ilavesiyle birlikte toplam 2 dakika süreyle homojen olarak karıştırılmıştır.
- 7- Etüvden çıkarılan numune kalıplarının alt yüzeyleri ince bir kâğıt ile kaplanmış, ardından sıcak karışım kalıplara dökülerek şişlendikten sonra üst yüzeylere de kâğıt yerleştirilmiştir.
- 8- Sıcak numuneler, Marshall tokmağı kullanılarak 135 °C'de her iki yüzeyden 75'er kez tokmaklanarak sıkıştırılmıştır.
- 9- Sıkıştırma işlemi tamamlanan numuneler numaralandırılmış ve kalıpların içerisinde soğumaya bırakılmıştır.
- 10- Numuneler, bir gün boyunca oda sıcaklığında soğutularak dinlendirilmiş ve kriko yardımıyla kalıplarından çıkarılarak düz bir zemine yerleştirilmiştir.
- 11- Briketlerin çap ve yükseklik ölçümleri kumpas yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

12- Briketlerin hacim özgül ağırlık ve su absorpsiyon düzeyleri Arşimet terazisi kullanılarak hesaplanmıştır.

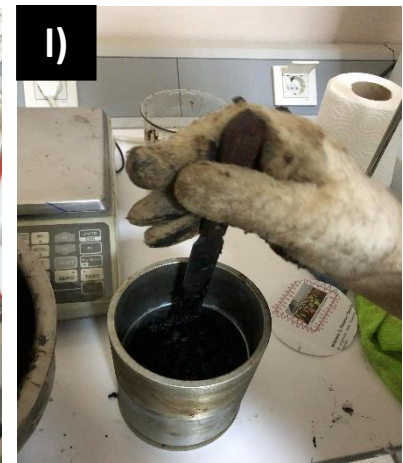
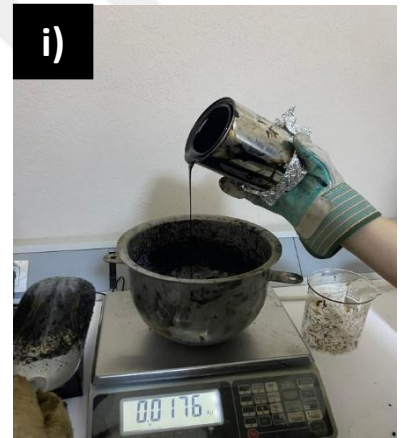
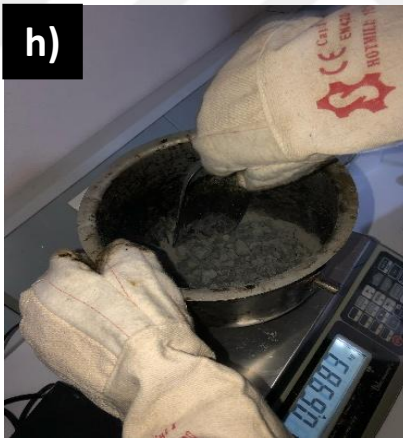
13- Briketler, 60 °C sıcaklıktaki su banyosunda 30 dakika süreyle kür işlemine tabi tutulmuş ve işlem sonunda sudan çıkarılarak havlu ile kurulanmıştır.

14- Numunelerin yük ve deformasyon özelliklerini değerlendirmek amacıyla TS EN 12697-34 standardına uygun olarak stabilite ve akma deneyleri gerçekleştirilmiştir (TS EN 12697-34, 2020).

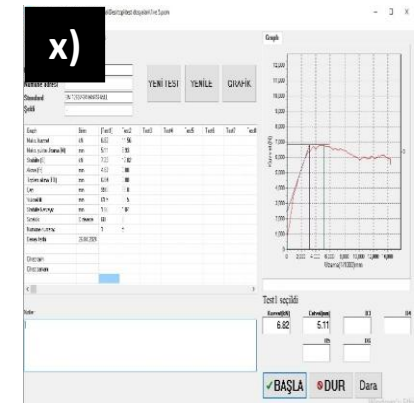
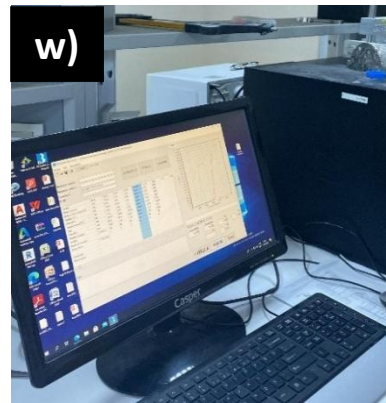
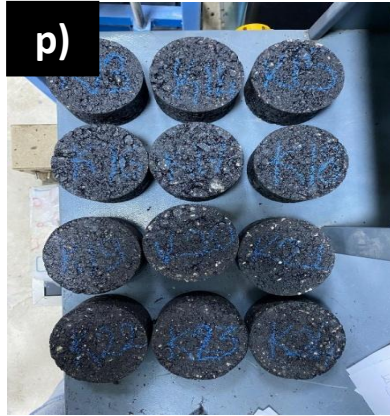
Deneyssel çalışma kapsamında, Marshall deneyi akış şeması Şekil 3.7’de, Marshall deney aşamaları ise Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Marshall deneyi akış şeması



Şekil 3.8. Marshall deneyi aşamaları



Şekil 3.8. Marshall deneyi aşamaları (Devam)

Şekil 3.8.'de yer alan Marshall deneyi aşamalarına ait açıklamalar aşağıda verilmiştir.

- a) Agreganın numunesi
- b) RAP içerikli agreganın numunesi
- c) Kalıp, karıştırma kabı ve spatulanın etüvde ısıtılması
- d) RAP içerikli agreganın etüvde ısıtılması
- e) Mikrodalga fırında ısı ayarı yapılması
- f) RAP içerikli agreganın mikrodalga fırında ısıtılması
- g) Mikrodalga fırında RAP içerikli agreganın sıcaklık kontrolü
- h) RAP içerikli agreganın karıştırılması
- i) RAP içerikli agregaya bitüm ilavesi
- j) Bitümlü malzemenin karıştırılması
- k) Numunenin kalıba yerleştirilmesi
- l) Numunenin şişlenmesi
- m) Marshall tokmağında sıkıştırma işlemi
- n) Bir gün süreyle kalıpta bekletme
- o) Numunenin kriko yardımı ile kalıptan çıkarılması
- p) Marshall briketleri
- q) Briketlerin kumpas ile çap ve kalınlıklarının ölçümü
- r) Tel sepet içerisindeki Marshall briketi
- s) Dijital terazi ve su tankı
- t) Su tankı ve sıcaklık ölçümü
- u) Su tankı içerisindeki Marshall briketleri
- v) Stabilite ve akma test cihazı
- w) Bilgisayara veri aktarımı
- x) Sonuçların raporlanması

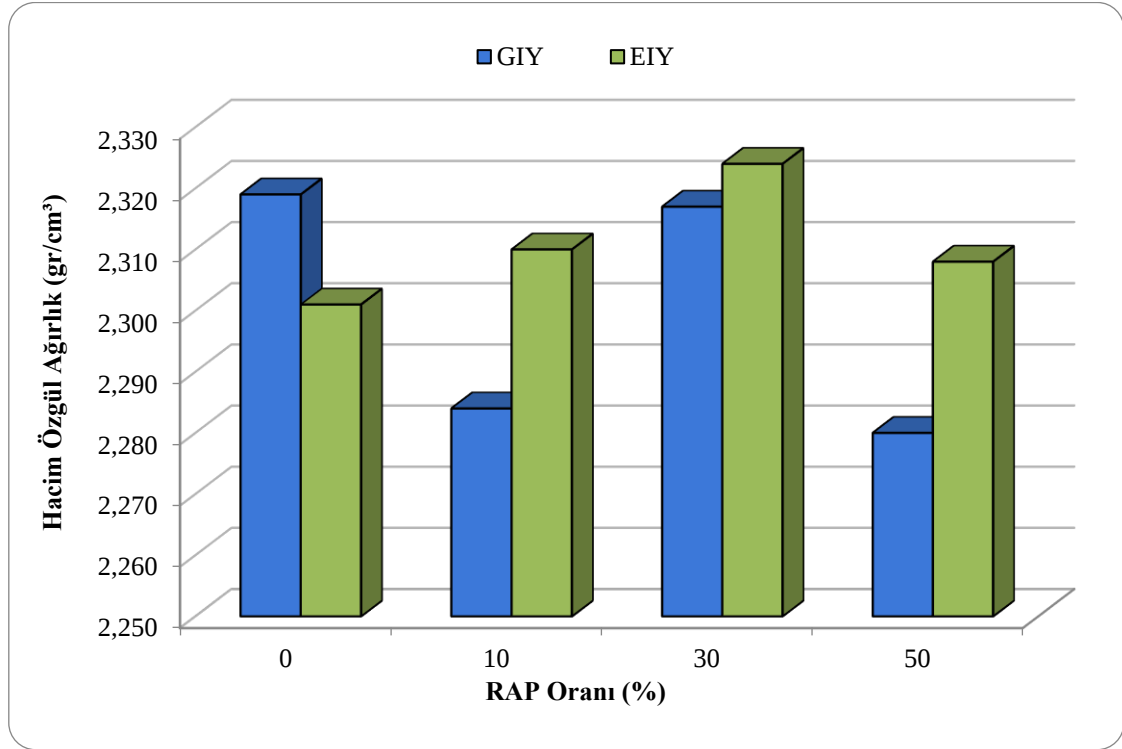


4. TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda, GIY ile EIY, asfalt karışım performansını etkileyen hacim özgül ağırlık, su absorpsiyonu, stabilite, akma ve Marshall oranı gibi parametreler açısından değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

4.1. Hacim Özgül Ağırlık

Şekil 4.1.'de numunelerde hacim özgül ağırlık değişimine yer verilmiştir.



Şekil 4.1. Numunelerde hacim özgül ağırlık değişimi

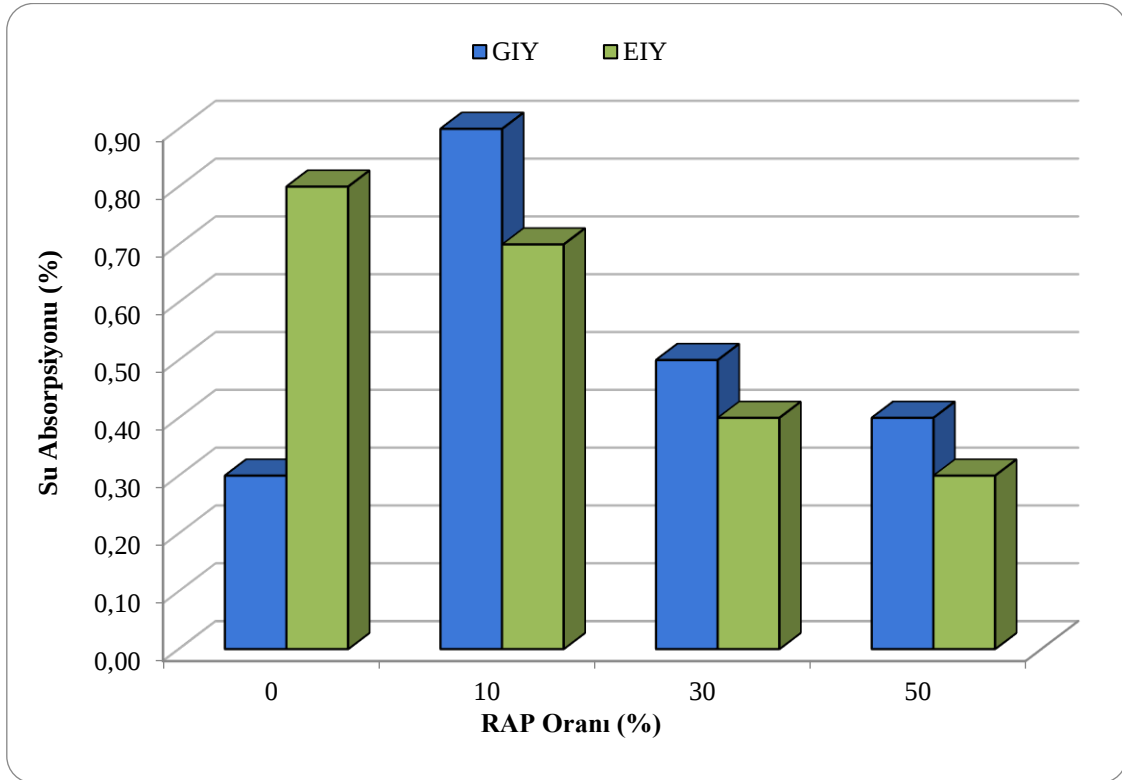
Hacim özgül ağırlık, asfalt karışımının birim hacimdeki kütlesini ifade eden ve karışımın kompaktlık düzeyiyle doğrudan ilişkili olan temel bir performans parametresidir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, EIY ile ısıtılan numunelerde, RAP içermeyen karışım dışında tüm karışımlarda daha yüksek özgül ağırlık değerlerine ulaşılmıştır. Özellikle %10 ve %30 oranlarında RAP içeren karışımlarda, EIY ile ısıtılan numunelerin, GIY ile hazırlananlara göre daha yoğun bir iç yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, mikrodalga ısıtmanın agrega-bitüm etkileşimini daha etkin biçimde sağladığını ve karışım içerisindeki boşluk oranını azalttığını ortaya koymaktadır.

Mikrodalga enerjisinin, dielektrik özellikler doğrultusunda malzeme içinde doğrudan ısı üretmesi, agregaların iç kısımlarına kadar etkili bir şekilde nüfuz etmesi ve bağlayıcının daha homojen şekilde ısıtılmasını sağlaması, bu performans farkının başlıca nedenleri arasında yer

almaktadır. Böylece bitümün viskozitesi, agrega yüzeyleriyle daha kuvvetli bir yapışmayı mümkün kılacak düzeyde optimize edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, EIY özellikle yüksek geri dönüşüm oranlarına sahip karışımlarda dahi etkili bir sıkışma sağlayarak, hacim özgül ağırlık açısından GIY'a kıyasla daha yüksek bir performans ortaya koymuştur.

4.2. Su Absorpsiyonu

Şekil 4.2.'de numunelerde su absorpsiyonu değişimine yer verilmiştir.



Şekil 4.2 Numunelerde su absorpsiyonu değişimi

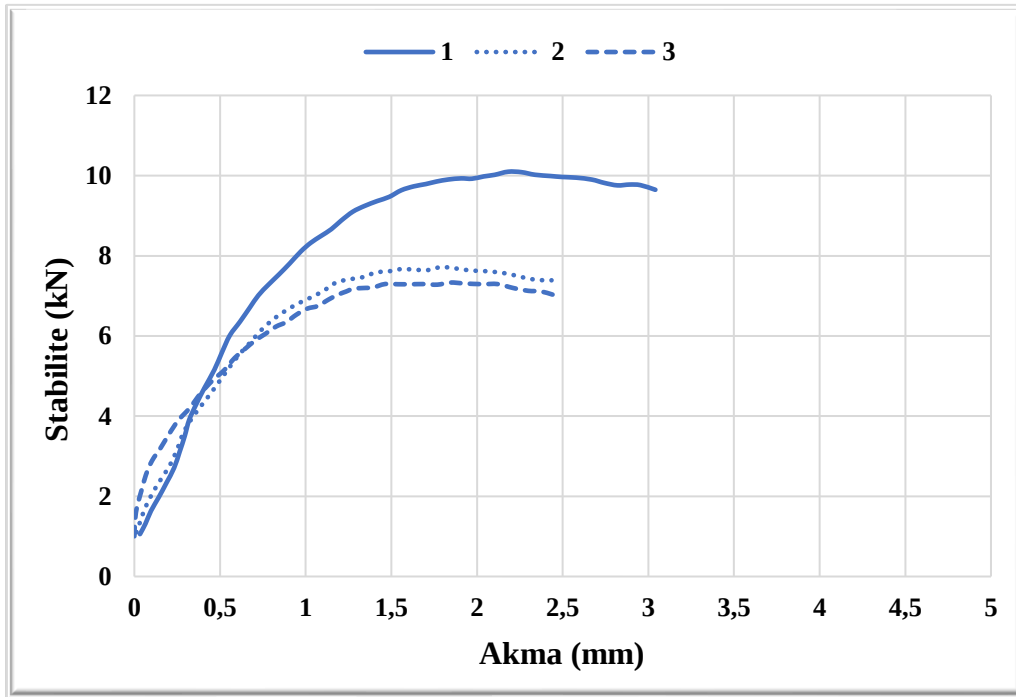
Su absorpsiyonu, asfalt karışımın su geçirgenliği ve dayanıklılığını belirleyen önemli bir fiziksel parametredir. Yüksek su emme oranları, karışımda fazla boşluk bulunduğunu ve bu boşlukların su dolması riskini artırdığını gösterir, bu da uzun vadede yapısal bozulmalara yol açabilir.

Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda, EIY ile ısıtılan tüm RAP içerikli karışımların, GIY ile hazırlanan karışımlara kıyasla daha düşük su emme oranlarına sahip olduğu gözlenmiştir. Örneğin, %10 RAP içerikli karışımlarda GIY'da %0,90 olan su emme oranı, EIY'de %0,70'e düşmüştür. Benzer şekilde, %30 ve %50 RAP oranlarına sahip EIY ile hazırlanan karışımlarda su emme oranları sırasıyla %0,40 ve %0,30 olarak daha düşük seviyelerde kalmıştır.

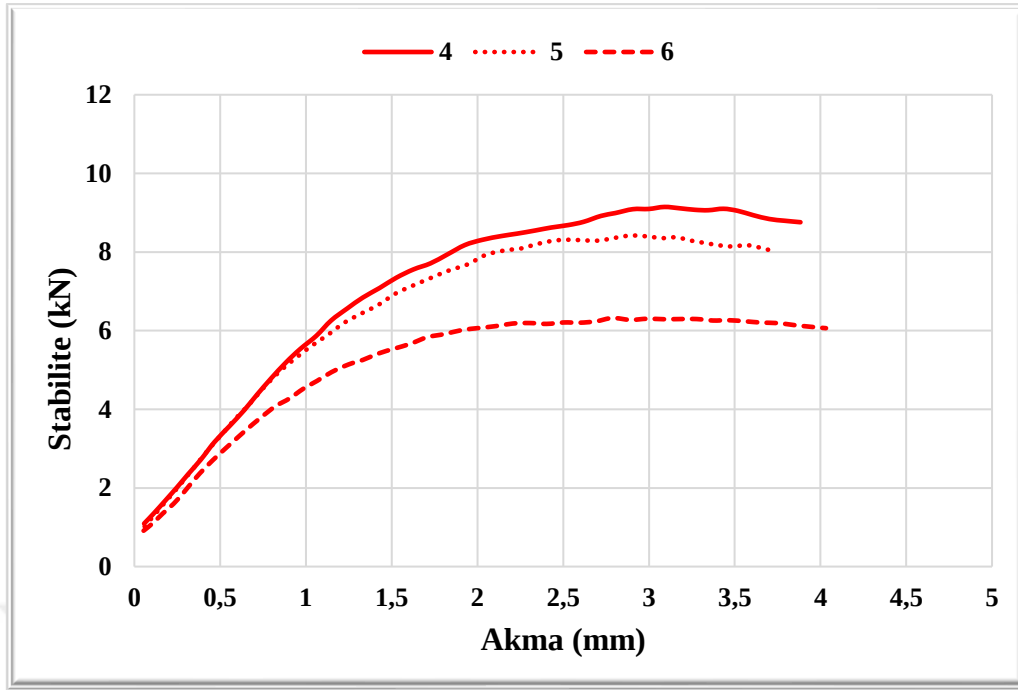
Bu sonuçlar, EIY'nin karışım içi boşlukları azaltarak suya karşı direnci artırdığını ortaya koymaktadır. Böylece mikrodalga ile hazırlanan asfalt karışımları, yalnızca mekanik davranış açısından değil, çevresel etkilere karşı da daha dayanıklı ve uzun ömürlü bir çözüm sunmaktadır.

4.3. Stabilite ve Akma

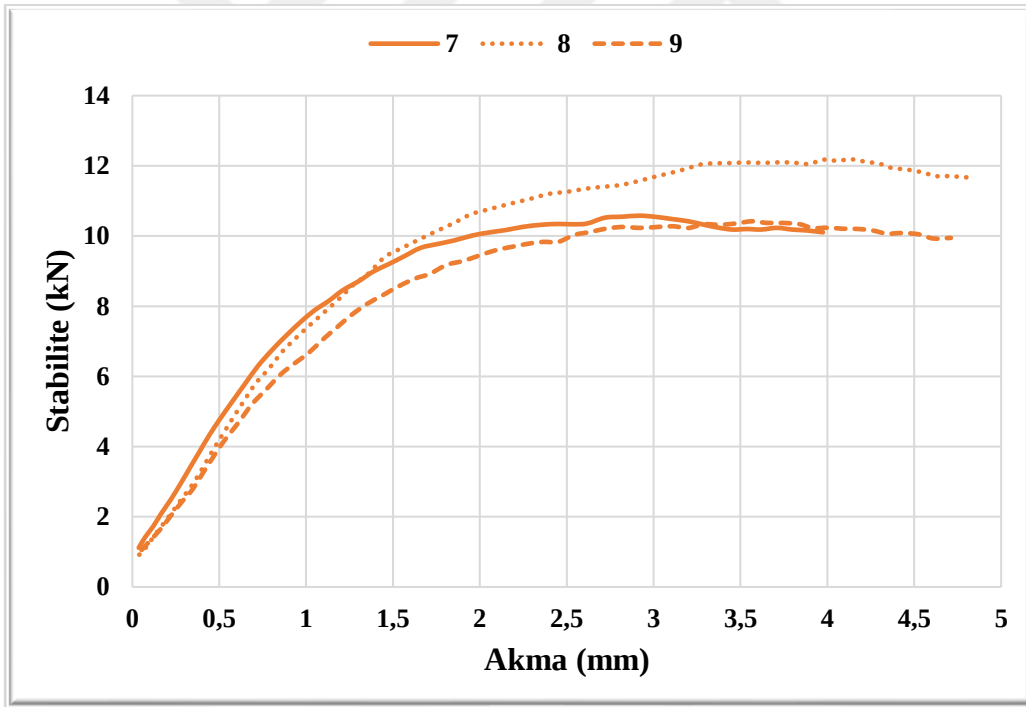
Marshall deneyi sonucunda elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan stabilite ve akma ilişkisini gösteren grafikler Şekil 4.3 ile Şekil 4.10 arasında verilmiştir. Her bir grafik, ilgili karışımın mekanik performansını görsel olarak ortaya koymakta ve özellikle maksimum yük (stabilite) değerleri ile bu yüke karşılık gelen deformasyon (akma) miktarlarını net bir şekilde göstermektedir. Bu grafiklerdeki maksimum stabilite noktaları, briketin taşıyabileceği maksimum yük kapasitesini, bu noktaya karşılık gelen akma değerleri ise plastik deformasyon davranışını temsil etmektedir. Elde edilen bu iki temel verinin oranlanmasıyla Marshall Oranı hesaplanmıştır. Bu oran, karışımın rijitlik karakterini yansıtarak performans karşılaştırmalarında önemli bir kriter sunmaktadır. Örneğin, Şekil 4.3'te gösterilen 1 numaralı numune, yaklaşık 10 kN ile en yüksek stabiliteye ulaşırken, akma miktarı da diğer gruplara göre daha büyük olmuştur. Bu durum, ilgili karışımın daha yüksek bir taşıma kapasitesi ve deformasyon toleransına sahip olduğunu göstermektedir.



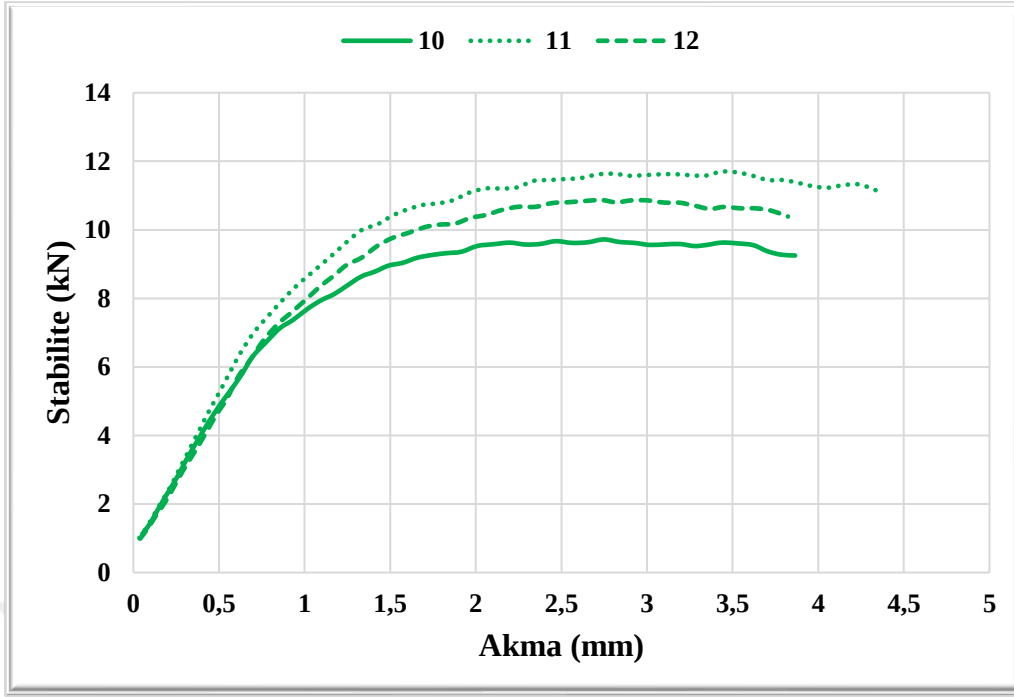
Şekil 4.3. GIY – Kontrol numunesi için stabilite – akma grafiği



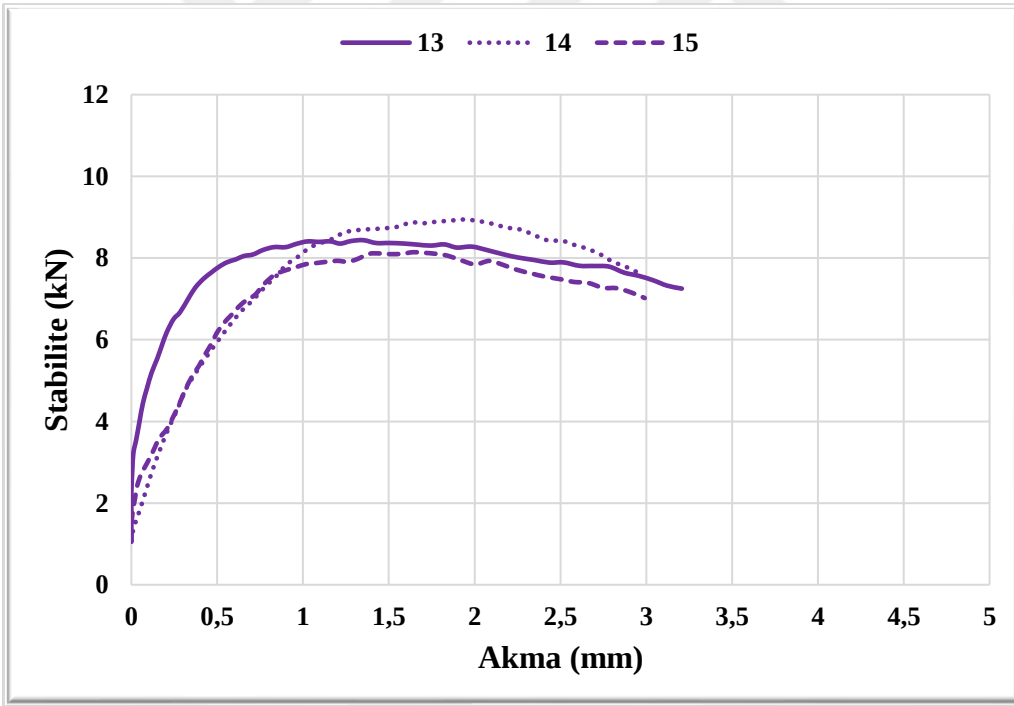
Şekil 4.4. GIY – %10 RAP için stabilite – akma grafiği



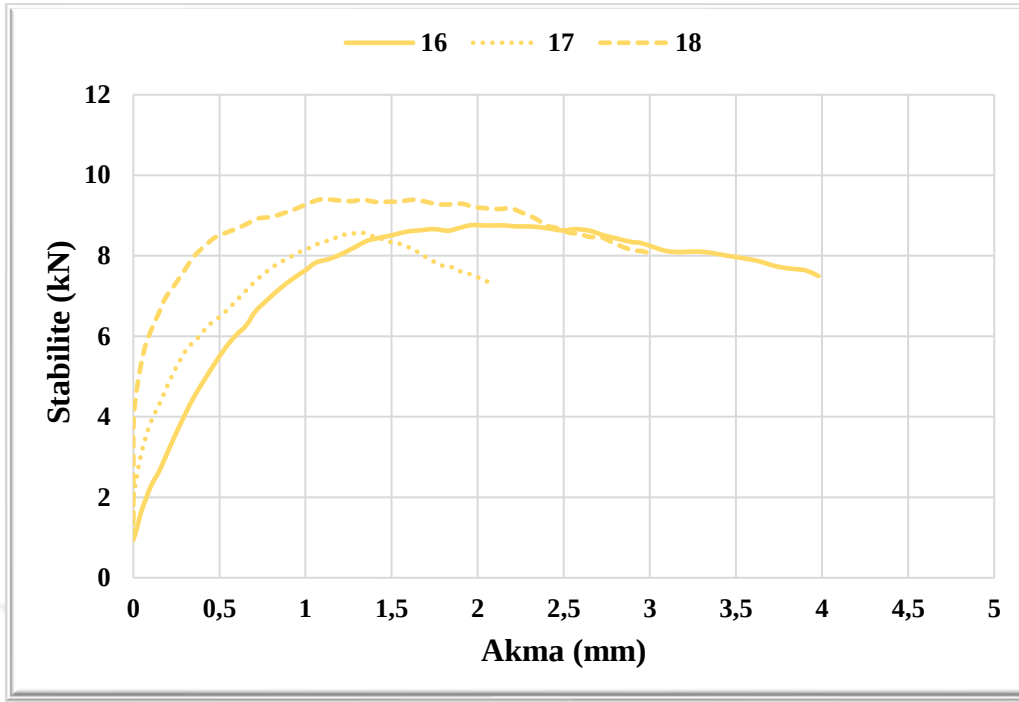
Şekil 4.5. GIY – %30 RAP için stabilite – akma grafiği



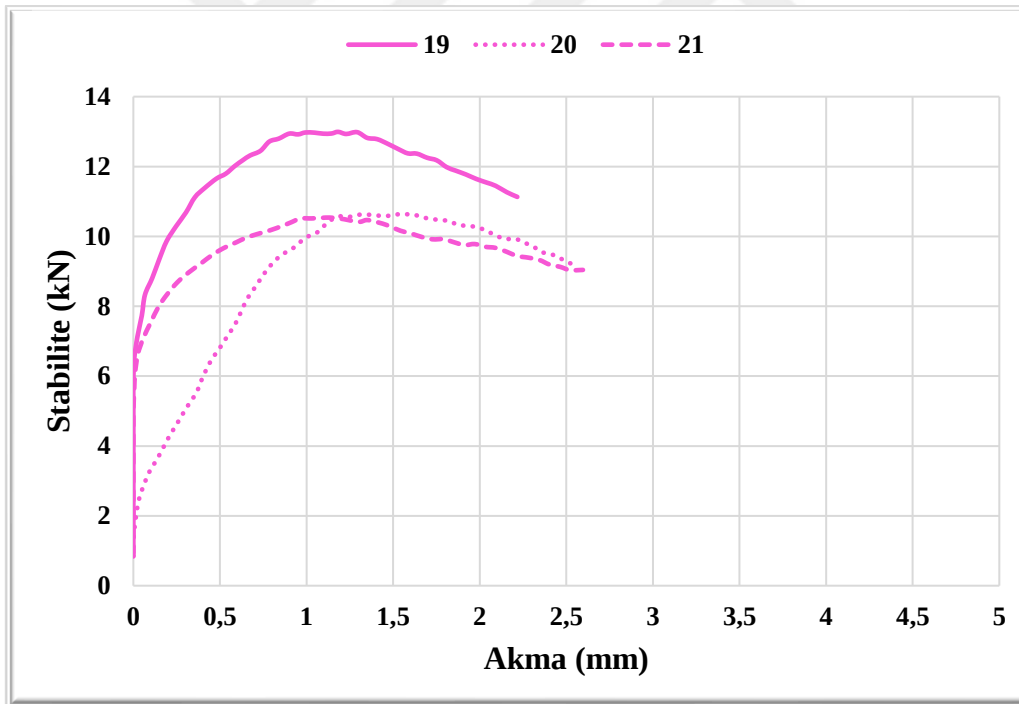
Şekil 4.6. GIY – %50 RAP için stabilite – akma grafiği



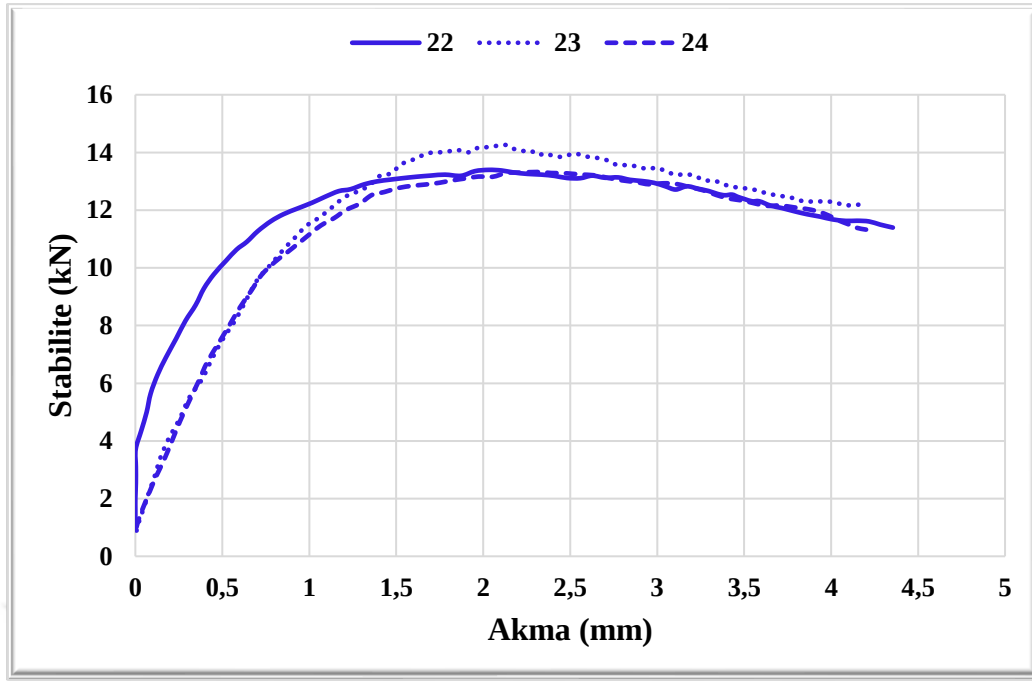
Şekil 4.7. EIY – Kontrol numunesi için stabilite – akma grafiği



Şekil 4.8. EIY – %10 RAP için stabilite – akma grafiği

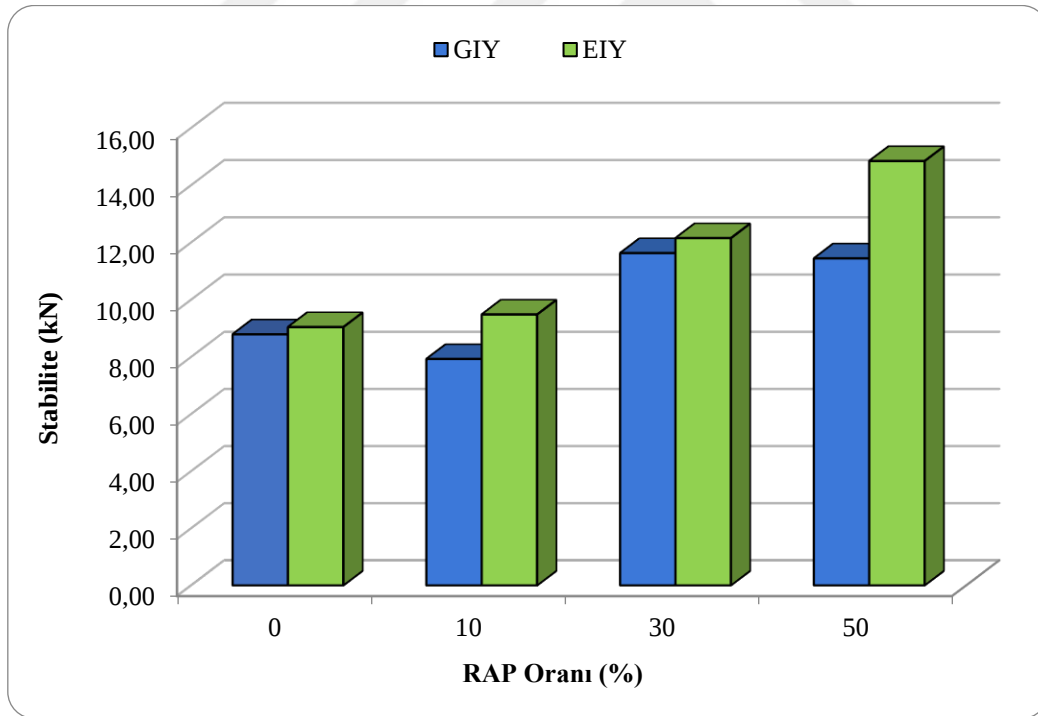


Şekil 4.9. EIY – %30 RAP için stabilite – akma grafiği



Şekil 4.10. EIY – %50 RAP için stabilite – akma grafiği

Şekil 4.11.'de numunelerde stabilite değişimine yer verilmiştir.



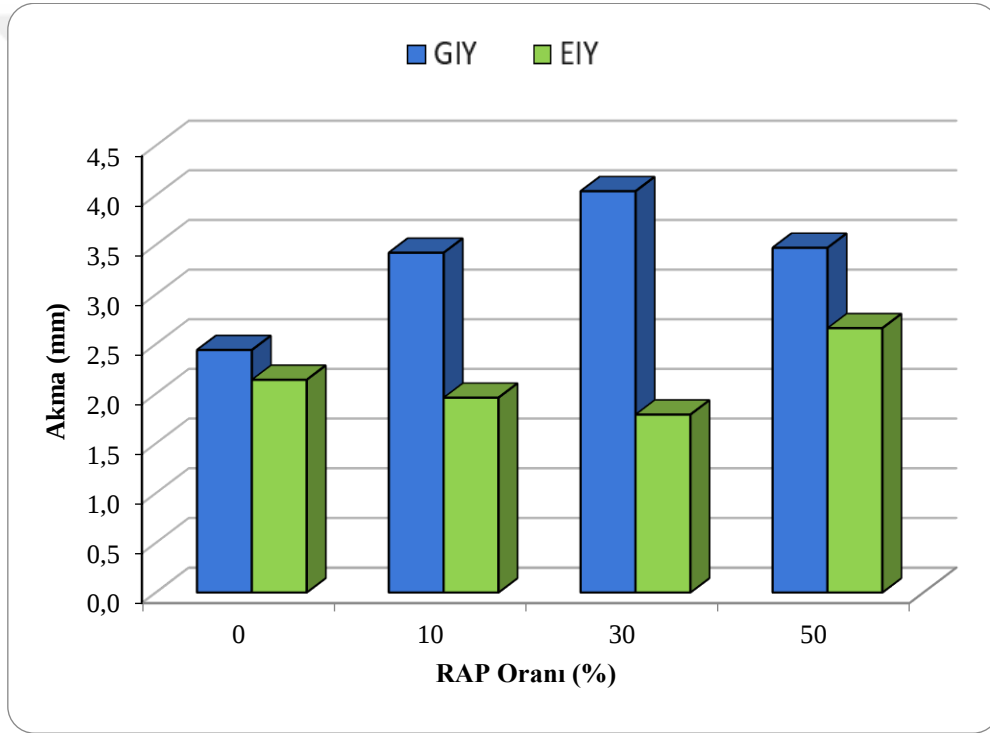
Şekil 4.11. Numunelerde stabilite değişimi

Stabilite, asfalt karışımının taşıma kapasitesini ve trafik yükleri altındaki dayanımını belirleyen kritik bir parametredir. Yapılan deneyler sonucunda, EIY ile hazırlanan karışımların tüm RAP oranlarında, GIY ile üretilenlere kıyasla daha yüksek stabilite değerleri sergilediği görülmüştür.

Özellikle %10 ve %50 RAP içerikli numunelerde bu fark belirginleşmiş olup, EIY ile ısıtılan karışımların stabilite değerleri, GIY'a kıyasla yaklaşık %25 ila %30 oranında artış göstermiştir.

Bu veriler, mikrodalga ile ısıtmanın agregalar ile bağlayıcı arasındaki yapışmayı (aderansı) güçlendirdiğini ve bağlayıcının daha etkin bir şekilde aktive edildiğini göstermektedir. Ayrıca mikrodalga enerjisinin, RAP içerisindeki yaşlanmış bitümün yeniden aktive edilmesini sağlayarak karışımın taşıma kapasitesini doğrudan artırdığı görülmektedir. Bu durum, mikrodalga ısıtma yönteminin yalnızca ısıtma verimliliği açısından değil, aynı zamanda asfalt karışımının yapısal performansının iyileştirilmesi açısından da önemli avantajlar sunduğunu ortaya çıkarmaktadır.

Şekil 4.12.'de numunelerde akma değişimine yer verilmiştir.



Şekil 4.12. Numunelerde akma değişimi

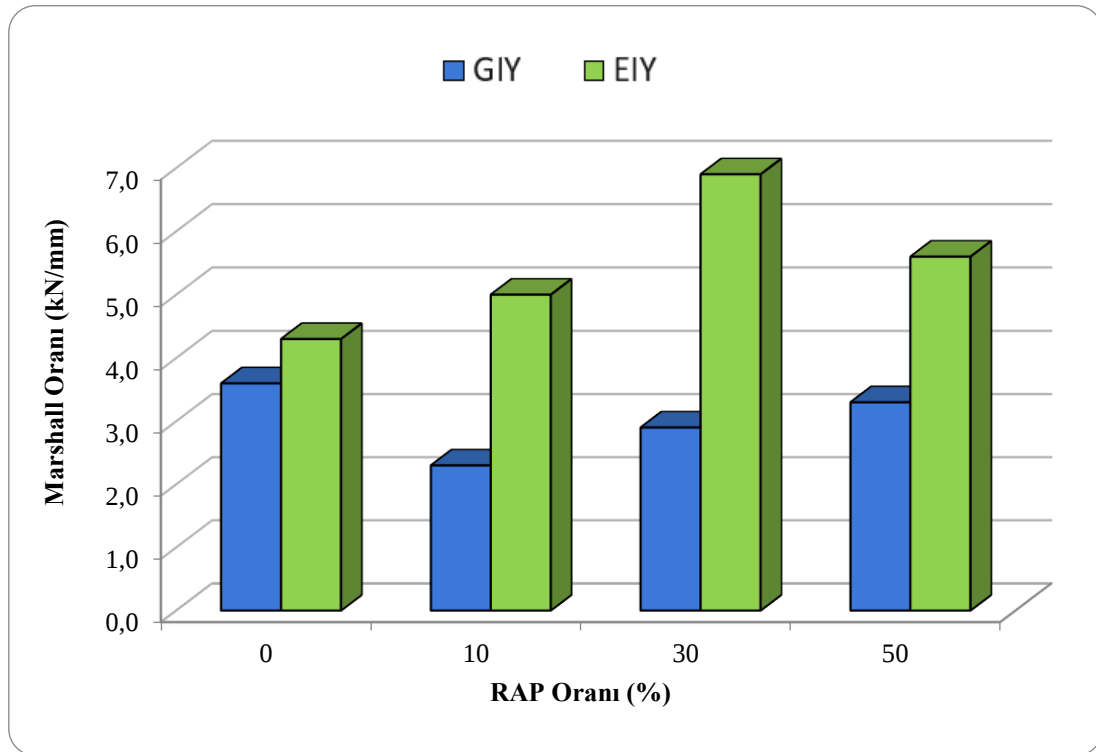
Akma, asfalt karışımın yük altında maruz kaldığı plastik deformasyon miktarını ifade eden önemli bir mekanik parametredir. Yüksek akma değerleri, karışımın elastik davranışının yoğun olduğunu gösterirken, düşük değerler ise daha rijit ve dayanıklı bir yapı olduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler, EIY ile hazırlanan karışımlarda akma değerlerinin GIY'a kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu fark, özellikle %10 ve %30 RAP içerikli karışımlarda belirgin olarak gözlenmiştir.

Düşük akma değerleri, mikrodalga ile ısıtılan karışımların daha rijit ve stabil bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, asfalt kaplamanın servis ömrü boyunca tekerlek izlerinde

oluşabilecek kalıcı deformasyonlara karşı daha yüksek direnç sağlayacağını göstermektedir. Mikrodalga yöntemiyle sağlanan homojen ısı dağılımı, bağlayıcının viskozitesinin etkin şekilde kontrol edilmesine olanak sağlar ve karışımın yumuşamasını engeller. Sonuç olarak mikrodalga yöntemiyle elastik deformasyon eğilimi azalarak karışımın sertliği artmakta ve mekanik dayanımı güçlenmektedir.

4.4 Marshall Oranı

Şekil 4.13.'de numunelerde Marshall oranı değişimine yer verilmiştir.



Şekil 4.13. Numunelerde Marshall oranı değişimi

Marshall oranı, asfalt karışımın rijitlik (sertlik) seviyesini değerlendirmek amacıyla kullanılan temel parametrelerden biridir. Stabilite değerinin akma miktarına oranlanmasıyla hesaplanan bu katsayı, karışımın birim deformasyon başına taşıma kapasitesini göstermektedir. Elde edilen veriler sonucunda, EIY ile hazırlanan karışımların GIY ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek Marshall oranı değerleri gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, EIY ile üretilen karışımların hem daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğunu hem de deformasyona karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Özellikle %30 RAP oranına sahip EIY ile hazırlanan numunede elde edilen 6,9 kN/mm değerindeki yüksek rijitlik, karışımın trafik yüklerine karşı yüksek düzeyde direnç sağlayabileceğini ifade etmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, asfalt geri dönüşüm sürecinde EIY olan mikrodalga ısıtma yönteminin GIY ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi sonucunda aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır;

- Hacim özgül ağırlık verileri incelendiğinde, EIY ile hazırlanan asfalt karışımları, özellikle %10 ve %30 RAP oranlarında, geleneksel yöntemle göre daha yüksek değerler sergilemiştir. Bu durum, karışım içerisindeki boşluk oranının azaldığını ve kompakt yapının güçlendiğini göstermektedir.
- Su absorpsiyonu verileri incelendiğinde, EIY tüm RAP oranlarında su emme oranlarını düşürmüştür. %10 RAP oranında %0,70, %30 RAP oranında %0,40, %50 RAP oranında ise %0,30 gibi değerler, mikrodalga ısıtmanın karışım içindeki geçirimli boşlukları azalttığını ve suya karşı direnci artırdığını göstermektedir.
- Stabilite verileri incelendiğinde, EIY ile hazırlanan karışımlar, tüm RAP oranlarında daha yüksek taşıma kapasite değerlerine ulaşmıştır. Özellikle %30 ve %50 RAP içeren karışımlarda %25–30 oranında stabilite artışı gözlenmiştir.
- Akma verileri incelendiğinde, EIY özellikle %10 ve %30 RAP oranlarında, geleneksel yöntemle kıyasla daha düşük plastik deformasyon değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Bu durum, karışımın plastik deformasyona daha az eğilimli ve daha rijit bir yapıda olduğunu göstermektedir.
- Marshall oranı verileri incelendiğinde, EIY ile hazırlanan karışımlar, GIY'a kıyasla daha yüksek Marshall oranı performansı göstermiştir. Bu parametre hem yüksek yük taşıma kapasitesi hem de düşük deformasyon değerlerinin bir sonucu olarak, asfalt karışımın yük altında daha stabil ve rijit bir yapı kazandığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, EIY hem fiziksel hem de mekanik özellikler bakımından asfalt geri dönüşüm performansını artırmakta ve daha dayanıklı karışımların elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- EIY, özellikle yüksek RAP oranlarına sahip karışımlarda başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu yöntemin saha uygulamalarında da yaygınlaştırılması, pilot uygulamalar yapılması, geri dönüştürülmüş asfalt kullanımını artırarak çevresel ve ekonomik faydalar sağlayabilir.

- Laboratuvar ortamında elde edilen olumlu sonuçların, saha uygulamalarında da doğrulanması amacıyla uzun vadeli performans testleri yapılmalıdır. Böylece EIY'nin gerçek trafik koşullarındaki etkinliği daha net biçimde değerlendirilebilir.
- EIY'nin enerji tüketimi, iş gücü ve ekipman maliyeti gibi yönlerden kapsamlı bir değerlendirmesi yapılmalı, bu yöntemle sağlanan teknik avantajlar, ekonomik sürdürülebilirlik açısından analiz edilmelidir.
- Mobil elektromanyetik ısıtma sistemleriyle çalışan asfalt plantlerinin geliştirilmesinde ve bu teknolojilerin uygulanmasında, elektromanyetik radyasyonun çevreye yayılması, kontrolsüz enerji sızıntısı ve bu durumun canlılar üzerindeki potansiyel etkileri gibi çevresel riskler göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, mikrodalga sistemlerin çalışması sırasında oluşabilecek elektromanyetik kirlilik, çevredeki diğer elektronik sistemlerde bozulmalara yol açabilir. Bu nedenle, mobil plant tasarımlarında karbon salınımı azaltma hedefinin yanı sıra, radyasyon sızıntısını önleyici mühendislik çözümlerine, biyolojik varlıkların korunmasına ve çevresel sınır değerlere uyuma da öncelik verilmelidir.
- Elde edilen olumlu sonuçlar doğrultusunda, asfalt geri dönüşüm standartlarında mikrodalga teknolojisine yer verilmesi yönünde çalışmalar yapılmalı, bu yöntemin norm ve standartlara dahil edilmesi teşvik edilmelidir.

Bu tez çalışması kapsamında, asfalt geri dönüşümünde elektromanyetik radyasyon kullanımına ilişkin araştırmaların genişletilmesi gerektiği ve pilot uygulamalar yapılarak saha performanslarının analiz edilmesinin önemi vurgulanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Arapoğlu, A. S. (2015). *Bozulmuş Asfalt Karışımların Geri Dönüşüm Maliyet Analizi ve Optimum Geri Kazanım Mesafesinin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ), Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ADTPF-Alaska Department of Transportation and Public Facilities. (2024). *Alaska test methods manual*. (September 1, 2024).
- AI-The Asphalt Institute. (1986). *MS-20 Asphalt hot-mix recycling*. Asphalt Institute; (2nd ed., Manual Series No. 20).
- ASTM D2172/D2172M–24. (2024). *Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures (ASTM D2172/D2172M–24)*.
- ASTM C136/C136M–19. (2019). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ASTM C136/C136M–19)*.
- Benedetto, A., & Calvi, A. (2013). A pilot study on microwave heating for production and recycling of road pavement materials. *Construction and Building Materials*, 44, 351-359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.082>
- Chen, X., Wang, H., Jiang, B., & Venkateela, G. (2022). Evaluation of Microwave Heating for Potential Applications in Hot In-Place Recycling of Asphalt Pavement. *Transportation Research Record*, 2676(9), 256-268. <https://doi.org/10.1177/03611981221086635>
- Enieb, M., Hasan Al-Jumaili, M. A., Eedan Al-Jameel, H. A., & Eltwati, A. S. (2021). Sustainability of using reclaimed asphalt pavement: Based-reviewed evidence. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012242>
- Erten, K. M., Terzi, S., & Akbulut, H. (2017, Kasım). Asfalt Geri Dönüşümü ve Sürdürülebilirlik İlişkisi. *Asfaltta Geri Kazanım ve Sürdürülebilirlik*.
- FHWA-Federal Highway Administration. (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*.
- Gnanamurthy, P. B., & B V, K. K. (2022). Experimental Study on Characterization of Bituminous Mixes Containing Recycled Asphalt Pavement Materials for the Construction of Surface Course in Flexible Pavements. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(5), 3271-3276. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.43072>
- González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., & Schlangen, E. (2018a). Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating. *Construction and Building Materials*, 159, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.070>
- González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., & Schlangen, E. (2018b). Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating. *Journal of Environmental Management*, 214, 242-251. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.001>

- Gulisano, F., Flores, G., & Gallego, J. (2024). Healing response of cold recycled asphalt mixtures with electric arc furnace slag under microwave heating and re-compaction. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 57(4). <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02326-w>
- <https://rheofalt.com/>. (t.y.).
- Jiang, L., Shen, J., & Wang, W. (2024). Performance of High-Dose Reclaimed Asphalt Mixtures (RAPs) in Hot In-Place Recycling Based on Balanced Design. *Materials*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ma17092096>
- Kaya, B. (2011). *Bitümlü Karışımların Geri Dönüşümü, Çevresel Etkileri ve Maliyet Analizi*. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Fen Bilimleri Enstitüsü.
- KGM – Karayolları Genel Müdürlüğü. (2021). *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı*, Ankara, Türkiye. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.
- KGM – Karayolları Genel Müdürlüğü. (2023). *Karayolları Teknik Şartnamesi*, Ankara, Türkiye. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı.
- Kocak, S., & Haider, S. W. (2023). Performance and cost evaluations of 100% recycled hot asphalt mixtures for pothole patching applications in flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131921>
- Liu, S., Shukla, A., & Nandra, T. (2017). Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 75, ss. 879-893). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.080>
- Lizárraga, J. M., & Gallego, J. (2020). Self-healing analysis of half-warm asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) slag and reclaimed asphalt pavement (RAP) using a novel thermomechanical healing treatment. *Materials*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/ma13112502>
- Nandal, M., Sood, H., & Gupta, P. K. (2023). Comparative Study on Physical Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement and Natural Aggregate in Flexible Pavement. *E3S Web of Conferences*, 405. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340504041>
- Naser, M., Abdel-Jaber, M. tasim, Al-shamayleh, R., Louzi, N., & Ibrahim, R. (2022). Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate on the behavior of hot mix asphalts. *Transportation Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100140>
- Nieftagodien, R., & Jenkins, K. (2013). *Suitability of Microwave Application to Heat Reclaimed Asphalt and Crushed Aggregates as an Energy Efficient Method in the Production of Half Warm Mix*. <http://scholar.sun.ac.za>
- Oruç, Ş., Yılmaz, B., & Mazlum, M. S. (2018). Geri Kazanılan Asfalt Kaplamaların Sıcak Asfalt Karışımlarda Yeniden Kullanabilirliğinin Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 87-93.

- Pereira, P. A. A., & Santos, L. P. (2006, Mart). Technical-Economical Evaluation of Pavement Recycling Alternatives. *Third Gulf Conference on Roads*.
- Pouranian, M. R., & Shishehbor, M. (2019). Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review. *Environments*, 6(6).
- Rout, M. K. D., Sahdeo, S. K., Biswas, S., Roy, K., & Sinha, A. K. (2023). Feasibility Study of Reclaimed Asphalt Pavements (RAP) as Recycled Aggregates Used in Rigid Pavement Construction. *Materials*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/ma16041504>
- Sorociak, W., Grzesik, B., Szoltysik, J., Bzówka, J., Mieczkowski, P., & Klemens, M. (2024). Analysis of Reclaimed Asphalt Pavement Heating with Microwave Radiation. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09552-y>
- Sönmez, İ. (2012, Mayıs). İSFALT'ın Asfalt Karışımlarında Geri Dönüşüme Bakışı. *Asfaltta Geri Dönüşüm Teknikleri ve Uygulamaları Semineri*.
- Sun, T. (2013). Research on key electromagnetic model for microwave hot recycling of asphalt mixtures. *Applied Mechanics and Materials*, 312, 354-357. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.312.354>
- Sun, T., & Sheng, H. (2020). Heat transfer analysis of microwave hot recycling for asphalt pavement. *The Journal of Engineering*, 2020(1), 1-5. <https://doi.org/10.1049/joe.2019.1047>
- Sun, T., Shi, J., Zhang, Z., & Zheng, J. (2009, Mayıs). Temperature control strategies for microwave hot in-place recycling of asphalt pavements. *Proceedings of the 2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA 2009)*.
- TS EN 1426. (2025). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - İğne batma derinliği tayini*
- TS EN 12697-34. (2020). *Bitümlü Karışımlar – Deney Yöntemleri – Bölüm 34: Marshall Deneyi (TS EN 12697-34:2020)*.
- TS EN 15326. (2009). *Bitümlerin Yoğunluk ve Özgül Ağırlığının Ölçülmesi — Kapiler Tıpalı Piknometre Yöntemi (TS EN 15326)*.
- Tsakoumaki, M., & Plati, C. (2024). A Critical Overview of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Pavement Construction. *Infrastructures* (C. 9, Sayı 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/infrastructures9080128>
- Wang, Z., Dai, N., Wang, X., Li, G., & Guo, H. (2020). Early-stage road property improvements of cold recycled asphalt emulsion mixture with microwave technology. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121451>
- Yu, J., Lin, Z., Zou, G., Yu, H., Leng, Z., & Zhang, Y. (2024). Long-term performance of recycled asphalt mixtures containing high RAP and RAS. *Journal of Road Engineering* (C. 4, Sayı 1, ss. 36-53). KeAi Publishing Communications Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.01.003>

- Zhang, K., Huchet, F., & Hobbs, A. (2019). A review of thermal processes in the production and their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials* (C. 206, ss. 609-619). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.057>
- Zhang, Y., Yang, L., Li, J., Wang, Q., & Guo, B. (2022). Influence of the particle sizes and densities of RAP on microwave heating efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.093>
- Zhu, S., Shi, J., & Hao, F. (2011). Research on the pavement performance of recycled asphalt mixture processed by microwave. *Advanced Materials Research*, 148-149, 987-993. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.987>
- Zhu, S., Shi, J., Jiang, L., & Wu, B. (2009). Research on Heat Transfer Model of Asphalt Pavements Subjected to Microwave Heating Recycling. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 4(2).
- Ziari, H., & Hajiloo, M. (2023). The Effect of Mix Design Method on Performance of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents: Superpave versus Balanced Mix Design. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01931>

EKLER



Ek.1-Reçete

										RAP'teki bitüm miktarı Wa = 4.6 , Wb = 4.4									

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Yalova’da tamamladı. 2016 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Ulaştırma Mühendisliği Bölümünden 2021 yılında mezun oldu. 2022 yılında aynı üniversitede Ulaştırma ve Lojistik Mühendisliği bölümünde öğrenimine başladı. 2023 yılından beri Yalova’da bulunan Hicri Ercili Tersanesinde Proje Mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Fenerci, K., & Abut, Y. (2025, May). Asfalt geri dönüşümünde elektromanyetik ısıtma yönteminin etkinliği ve uygulama potansiyeli. In *20th International European Conference on Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences (2025 World Square Root Year)* (pp. 268–276). İstanbul, Türkiye. ISBN: 979-8-89695-083-7.

DİĞER YAYIN VE ESERLER

Fenerci, K., Erdoğan, M. C., & Abut, Y. (2023). The economic potentials of reclaimed asphalt pavements (RAP) in urban road infrastructure: A case study of Yalova city. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 3(2), 205-218. <https://doi.org/10.29228/JIENS.70524>

Abut, Y., Ceyhan Erdoğan, M., Çelik, M., & **Fenerci, K.** (2024, September 11). Enhancing SMA drainage performance with lime and reclaimed asphalt using Taguchi optimization. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Scientific and Innovative Studies (ICSIS 2024)* (pp. 685–690). Konya, Türkiye. ISBN: 978-625-6314-33-7.

Abut, Y. (Yürütücü), Çelik, M., Ceyhan Erdoğan, M., & **Fenerci, K.** (2023–2024). Taş mastik asfalt karışımlarında geri dönüştürülmüş asfalt ve sönmüş kireç kullanımının araştırılması (Proje No: 2023/AP/0003) [Bilimsel Araştırma Projesi, Yalova Üniversitesi - Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi].