

“

# İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE ATIK MALZEMELERİN KULLANIMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

*Aralık 2024*

EDİTÖR

DOÇ. DR. BERİVAN YILMAZER POLAT

”

**Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana**

**Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi**

**Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2024**

**ISBN • 978-625-5955-29-6**

**© copyright**

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

**Serüven Yayınevi / Serüven Publishing**

**Türkiye Adres / Turkey Address:** Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

**Telefon / Phone:** 05437675765

**web:** www.seruvenyayinevi.com

**e-mail:** seruvenyayinevi@gmail.com

**Baskı & Cilt / Printing & Volume**

Sertifika / Certificate No: 47083

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE  
ATIK MALZEMELERİN  
KULLANIMI VE  
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

EDİTÖR

DOÇ. DR. BERİVAN YILMAZER POLAT



## Önsöz

Dünya nüfusunun hızla büyümesi, şehirleşme ve endüstrileşme, modern çağın en büyük sorunlarından biri, belki de en önemlisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu büyük soruna çare üretmek, geleceğin dünyasının daha yaşanabilir olması adına tüm insanlık için adeta bir mücadele halini almıştır. Bu mücadelede, atık malzemelerin geri dönüştürülmesi ya da doğrudan yeniden kullanımı, günümüzde ülkelerin en önemli stratejik planları arasında yer almaktadır. İnşaat sektörü ise ulaşım, barınma ve benzeri gereksinimler için beton ya da polimer kompozitler içeren malzemelerle kirlilikte önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, atıkların yeniden kullanımı yoluyla geri dönüşüm mücadelesine destek verilmesi, çevresel sürdürülebilirlik ve bundan elde edilecek ekonomik fayda bakımından oldukça önemli çalışma konuları arasında yer almaktadır.

Sürdürülebilirlik açısından, atıkların inşaat mühendisliğinde kullanımı ile doğal kaynaklar korunurken oluşan atıkların depolanması ve çevresel ayak izi gibi pek çok olumsuzluk da ortadan kaldırılmaktadır. Bu noktada, inşaat sektöründe geri dönüştürülmüş beton başta olmak üzere polimer içerikli ürünler, camlar, metaller gibi pek çok malzeme geri dönüştürülebilir; çevresel kirlenmeyi azaltmak için sürdürülebilir malzemeler ya da yöntemler kullanılabilir.

Bu kitap, bu alana değerli katkılarını sunan araştırmacıların, inşaat sektöründeki çevresel sorunlara spesifik olarak verdiği cevapları içeren bir dizi araştırmadan oluşmaktadır. Böylece hem akademik hem de sektörel paydaşlara bu alandaki çalışmaların içeriği ve geldiği aşama hakkında bilgiler sunmayı amaçlamakta hem de yeni nesil ürünlerin keşfi için fikirlere ilham olma hedefini taşımaktadır.

Bu vesileyle, kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm araştırmacılara ve yazarlara katkılarından dolayı teşekkür ederim.

**Editör**

**Doç. Dr. Berivan YILMAZER POLAT**



# İÇİNDEKİLER

## Bölüm 1

### KOMPOZİT MALZEMELERDEN YEŞİL BETONA: ATIK MALZEME KULLANIMINDA PUZOLANLARIN POTANSİYELİ

*Berivan YILMAZER POLAT*..... 1

## Bölüm 2

### MADEN ATIKLARINDAN SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPI MALZEMELERİNE: GEOPOLİMER HARÇLARIN POTANSİYELİ

*Yavuz Selim AKSÜT*..... 13

*Yusuf KAYA*..... 13

*Onur DOĞAN*..... 13

*Kadir SÜNNETÇİ*..... 13

## Bölüm 3

### YOL YAPIMINDA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ASFALT (RAP): TEKNOLOJİLER, ZORLUKLAR VE GELECEKTEKİ POTANSİYELLER

*Ersoy KABADAYI*..... 25

## Bölüm 4

### POLİETİLEN VE PROPİLEN HOMOPOLİMER MODİFİYELİ ASFALT BAĞLAYICILAR: REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ..... 45

*Mustafa AKPOLAT*..... 45

*Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU*..... 45

*Merve Gülfer BOZDEMİR*..... 45

## Bölüm 5

### ATIK YAĞLARIN ASFALT KAPLAMALARDA KULLANIMI: SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, PERFORMANS VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

*Ersoy KABADAYI*..... 63

*Erman ÇAVDAR*..... 63

*Neslihan ŞAHAN*..... 63





# Bölüm 1

## KOMPOZİT MALZEMELERDEN YEŞİL BETONA: ATIK MALZEME KULLANIMINDA PUZOLANLARIN POTANSİYELİ

*Berivan YILMAZER POLAT<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ABD, Tunceli, Türkiye  
bpolat@munzur.edu.tr

## Giriş

21. yüzyılın gittikçe kirlenen dünyasında geri dönüştürülmüş ya da sürdürülebilir malzeme kullanımı her alanda olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da oldukça önem kazanmaya başlamıştır. Bu değişime paralel olarak teknolojik gelişmelerin katkısıyla ortaya çıkan kompozit malzemeler ile birlikte bir yandan geleneksel malzemeler geri dönüştürülürken, diğer yandan onlara ilave edilen yeni malzemelerle bu atık malzemelerin dezavantajları ortadan kaldırılabilir. Böylece sadece çevresel kirliliği ortadan kaldırmayıp, aynı zamanda daha üstün nitelikli yeni malzemeler de üretilebilmektedir. Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip malzemelerin kombinasyonu ile üretilir ve dayanıklılık, daha az karbon ayak izi ve daha uygun maliyet gibi çeşitli avantajlar sağlar. Tüm bu dikkat çekici özelliklerinden dolayı günümüzde de çeşitli araştırmalara konu olmaya devam etmektedir.

Literatürde bu alandaki en popüler araştırma konularından birisi de çimentoya ihtiyaç duymadan beton üreterek çevre kirliliğinin azaltılmasıdır. İçinde yaşadığımız çağın en büyük kirleticilerden biri olarak bilinen betonlar, birden fazla içeriğin bir araya gelmesiyle oluşturdukları kararlı ve dayanıklı yapılarıyla kompozit malzemeler sınıfında yer alır. Ancak çimento, agrega, kum ve su birleşiminden oluşan geleneksel betonlar, çimento üretiminden kaynaklanan çevresel dezavantajlarından dolayı, giderek yerini yeşil beton olarak da bilinen geopolimer betonlara, daha genel bir ifadeyle polimer betonlara bırakmaktadır.

Geopolimer betonlar, içeriğinde çimento bulundurmayan, böylece çimento üretim aşamasında ortaya çıkabilecek tüm çevresel etkileri ortadan kaldıran yeni nesil yapı malzemeleridir. Geopolimer betonlar, geleneksel betonlardan farklı olarak çimento yerine çeşitli killerin ya da yoğun oranda silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bulduran bileşenleri içeren puzolanik özellikteki atıkların, çeşitli aktivatörler yardımıyla aktive edilmesi sonucu meydana gelirler.

Mevcutta beton endüstrisinde puzolanlar, tamamlayıcı çimentolu malzeme olarak betonun üretim aşamasında karışıma eklenerek betonun bazı özelliklerinin iyileştirmesi noktasında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Puzolanların Portland çimentosuna kısmen ikame edilmesi ile ek klinkerasyona gerek kalmayabilir ve bu da  $\text{CO}_2$  emisyonlarında önemli bir azalmaya neden olur. Ayrıca, endüstriyel üretimin yan ürünlerinin kullanılması da sağlanır. Ancak beton ikame oranı oldukça sınırlıdır, bu da çimento üretimine bağımlılığın devam etmesine neden olur.

Ayrıca, puzolanlar yüksek dayanımlı beton üretiminde de kullanılır.

Geleneksel beton üretimine benzer şekilde, özellikle yüksek SiO<sub>2</sub> içeriğine sahip olanlar, çimento yerine kullanılan puzolanik malzemeler yüksek puzolanik aktivite indeksi (PAI) sağlar (Davraz, Ceylan, Topçu, & Uygunoğlu, 2018). Ancak puzolanların bu şekilde kullanımında da puzolanlar matris olarak kullanılmazlar ve yine çimentoya bağımlılık devam eder. Bu bağımlılığı ortadan kaldıracak bir alternatif olarak geopolimer betonlar, bilim dünyasında kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve yeşil beton olarak da bilinen ve uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü vb. gibi atık puzolanlar içeren yeni nesil bir beton türü olarak kabul edilmiştir (Yılmaz Polat, 2023). Ayrıca geleneksel betona kıyasla daha iyi kimyasal ve fiziksel özellikler sergilemesi onu geleneksel betona karşı daha da avantajlı kılar (Erol, Al-mashhadani, Aygörmez, & Niş, 2023).

### YEŞİL BETON OLARAK GEOPOLİMER BETONLAR

Geopolimer harçların en bilinen özelliklerinden biri, çevredeki etkileridir. Geopolimer betonlar bağlayıcı olarak puzolan olarak adlandırılan ve alüminosilikat mineralleri içeren endüstriyel yan ürünlerden yapay puzolan adı verilen ürünler (uçucu kül, kömür gangi, silis dumanı, cüruf) kullanılarak üretilir. Bu süreç, sadece endüstriyel katı atıkların geri dönüşümünü sağlamakla kalmaz, aynı zamanda atık miktarının etkili bir şekilde azaltılmasını da sağlar.

Bir diğer önemli özellik ise geopolimer harçların yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği dayanımıdır. Bu tür harçlar, yüksek ısıya dayanıklı olduğundan, alevlenme riskine karşı koruyucu özellikler barındırır. Ayrıca, kimyasal etkilere karşı gösterdiği direnç, geopolimerlerin endüstriyel uygulamalarda ve bazı çevre koşullarında tercih edilmesini sağlar. Yüksek sıcaklık dayanımı, geopolimerlerin başlıca avantajlarından biridir. Geleneksel harçlar, yüksek ısıya maruz kaldığında genellikle deformasyona uğrar ve dayanıklılığını kaybeder. Ancak geopolimerler, 1000°C'ye kadar sıcaklıklara dayanabilirler, bu da onları yangına dayanıklı yapılar ve yüksek sıcaklık gerektiren sanayi tesisleri için ideal bir seçenek haline getirir. Geopolimer harçlar ayrıca, suya karşı da dayanıklı olup, suya maruz kalan yapılarda uzun süreli dayanıklılık sağlar. Bu özellik, onları özellikle deniz suyu veya nemli ortamlar gibi zorlu koşullarda kullanıma uygun hale getirir. Ayrıca, geopolimerlerin kimyasal dayanıklılık özelliği de dikkat çekicidir; asidik ve alkali çözeltilere karşı dirençli olmaları, onları ağır sanayi yapıları ve kimyasal tesisler için tercih edilen malzemeler yapar. Geopolimerler, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta alkali aktivatör çözeltilinde çözülmüş alüminosilikat malzemelerin geopolimerizasyonu ile sentezlenir ve amorf bir faz ve üç boyutlu silikoalüminat ağ yapısı oluşturur ( Raijiwala vd, 2011). Bu dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yüksek olmasını sağlar.

Bununla birlikte, geopolimer harçlarının bazı dezavantajları da vardır. Üretim maliyetleri yüksektir. Bu sebeple geleneksel malzemelere göre daha pahalı olabilmektedir. Ayrıca, üretim sürecinde daha teknik bilgi gerekmektedir. Uygulayıcıların bu harçları kullanmadan önce özel eğitimler almaları gerekebilir. Bu da başta yatırım maliyetini arttırabilen önemli sebeplerden biridir. Geopolimer harçların üretimi için uçucu kül, cüruf gibi endüstriyel atıkların bulunması gerekir. Bu malzemelerin bulunabilirliği bölgeden bölgeye değişebilir ve malzemelerin kalitesi açısından da bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilir. Harçların üretimi sırasında kullanılan sodyum hidroksit gibi tehlikeli alkali çözeltiler dikkatli kullanılmalıdır. Aksi takdirde tehlikeye yol açılabilir. Geopolimer harçlar düşük sıcaklıkta sertleşme süreci yavaşlayabilir, bu sebeple sıcaklık kontrolü her zaman gereklidir. Henüz portlant çimentosu kadar yaygın olmayan geopolimer harçların bazı ülkelerde uygulama zorlukları yaşanabilir.

Sonuç olarak, geopolimer harçlar, çevre dostu ve dayanıklı özellikleri ile geleneksel inşaat malzemelerine önemli bir alternatif sunmaktadır. Yangın dayanımı, kimyasal ve suya karşı gösterdiği direnç gibi özellikler, onları özellikle endüstriyel ve yüksek performans gerektiren yapılar için uygun hale getirmektedir. Geopolimer harçların kullanımı, sürdürülebilir inşaat uygulamalarının yaygınlaşması ve çevreye duyarlı projelerin artmasıyla birlikte daha da artacaktır.

### **Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler**

#### **Aktivatörler:**

Geopolimer harç üretimi için kullanılan alkali aktivatörler içeriğinde alkali metal içeren kimyasal bileşikleridir. Bu aktivatörler, silika ve alüminyum oksit içeren bileşenlerle reaksiyona girmesiyle geopolimerik bağ meydana getirir. En çok kullanılan alkali aktivatörler şunlardır; Sodyum Hidroksit (NaOH), Potasyum Hidroksit (KOH), Sodyum Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve Potasyum Silikat ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ).

#### **Silika Kaynakları (Silika ve Alüminyum Oksit)**

Geopolimer harçların ana bileşeninde silika ( $\text{SiO}_2$ ) alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bulunmaktadır. Bu bileşikler yüksek sıcaklık ile birlikte alkali aktivatör ile reaksiyona girmesi sonucu geopolimerizasyon gerçekleşir. Silika ve alüminyum oksit doğal minerallerden elde edilir. Doğal silika ve alüminyum bileşeninden puzolanik malzeme elde edilir. Bu malzeme geopolimer harç üretiminde oldukça sık kullanılır. Puzolalar iki kategori de incelenebilir. Yapay puzolanlar ve doğal puzolanlar. Doğal puzolanlar, volkanik kökenli tortul kayalardan oluşur ve başlangıcından sonra az veya çok değişmiştir. Payroklastik kayalar, doğal olarak bulunan puzolanlar olarak bilinir. Kırıntı taşlar ve farklı orjinli maddeler olarak kategori-

ze edilmektedir. Serbest kireç içeriğinin %4'den fazla olmaması gerekir. Örneğin volkanik küller, kaya tuzu veya diğer doğal mineraller puzolan kaynağıdır.

Yapay puzolanlar ise silis dumanı, genişletilmiş kil, tuğla ve kiremit unu, yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel üretimden ortaya çıkan ikincil ürünlerdir. Bunlardan bazıları direkt olarak kullanılırken, diğerleri ise öğütülmek suretiyle kullanılabilir. Geopolimer betondaki kimyasal yapıyı oluşturan bir diğer önemli bileşen metalik alüminyum oksittir. Bazı endüstriyel atıklarda yüksek miktarda bulunur, özellikle kömür külü, silika ve alüminyum oksit kaynağı olarak sıklıkla kullanılır

Bu atıkların kullanımını hem ekonomik hem de çevresel açıdan oldukça etkili ve faydalıdır. Tarihte Ön Asya ve Eski Mısır'da, yapılarda bağlayıcı olarak kullanılmak üzere, tuğla tozu pişirilerek ile kireç karıştırılarak bir tür yapay puzolan benzeri malzeme elde edilmiştir. Osmanlılar, bu bağlayıcıyı geliştirerek horasan olarak bilinen harcı üretmiş ve yapılarda uzun dönemler kullanmışlardır. Puzolanlar tek başlarına çok az bağlayıcı olsa da, bir bağlayıcı ile birlikte kullanıldıklarında oldukça dayanıklıdır.

#### *Dolgu ve diğer malzemeler*

Geopolimer harçlarının üretiminde, dayanım, işlenebilirlik ve estetik özellikleri iyileştirmek için farklı dolgu maddeleri de eklenebilir. Bu dolgu malzemeleri, harcın özelliklerini değiştirebilir ve kullanıldığı yapıların ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir.

Kum ve diğer mineraller geopolimer harçlarında, geleneksel harçlarda olduğu gibi kum ve diğer mineraller kullanılabilir. Bu malzemeler, harcın kıvamını ayarlamak ve dayanıklılığını artırmak için eklenir. Perlit ve Vermikülit ısı yalıtımı sağlamak amacıyla perlit ve vermikülit gibi hafif dolgu malzemeleri kullanılabilir. Bu malzemeler, geopolimer harçlarının ısıya karşı dayanıklılığını artırabilir. Geopolimer harçlarında bazen polimerik katkıları da kullanılır. Bu, özellikle harcın elastikiyetini ve su geçirmezliğini artırmak için tercih edilir.

#### *Su ve Karıştırıcı Ajanlar*

Geopolimer harçlarının üretiminde su, kimyasal reaksiyonu başlatan ve malzemenin uygun kıvama gelmesini sağlayan önemli bir bileşendir. Bunun yanı sıra, bazı özel karıştırıcılar da kullanılabilir. Su alkali aktivatör ile silika ve alüminyum bileşenlerinin birleşmesini sağlar ve karışım da verimliliği etki eder. Karıştırıcı ajanlar ve katkı maddeleri, geopolimer harçlarında işlenebilirliği artırmak veya özel özellikler kazandırmak için, özellikle viskoziteyi düzenlemek amacıyla bazı katkı maddeleri veya emülgatörler eklenebilir.

## Puzolanların Geopolimer Betonda Kullanımı, Atık Malzemeler Ve Geri Dönüşüm

Geopolimer betonların üretiminde, çevresel faydaları artırmak için atık malzemeler kullanılabilir. Bu malzemeler, geopolimerlerin hem maliyetini düşürür hem de çevreye olan etkisini azaltır. Yaygın kullanılan atık malzemeler arasında şunlar yer alır. Kömür külü, kömür santrallerinden elde edilen kömür külü, silika ve alüminyum oksit kaynağı olarak geopolimer üretiminde kullanılabilir. Bu malzeme, hem maliyetleri azaltır hem de endüstriyel atıkların geri dönüşümünü sağlar. Endüstriyel atıklar Metal endüstrilerinden, inşaat sektöründen veya diğer endüstrilerden elde edilen atıklar (örneğin, çelik üretiminden çıkan döküm atıkları) da geopolimer harç üretiminde kullanılabilir. Bu tür atıkların geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir fayda sağlar.

Geopolimer beton üretiminde farklı puzolan çeşitleri kullanılabilir. Aşağıda en yaygın kullanılan puzolan çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir.

### PUZOLAN ÇEŞİTLERİ

Puzolanlar, ortamda aktivatör yoksa suyla karıştırıldığında kendiliğinden sertleşmeyen ancak beton gibi kompozit bir yapıya üstün özellikler kazandırmak için çimento gibi CH bazlı bir bağlayıcıyla kullanılabilen malzemelerdir. Beton üretiminde hem ekonomik hem de çevresel olarak çimentoya alternatif olarak kullanılırlar. Genellikle betonun mukavemetini ve dayanıklılığını artırmak ve betonun kimyasal etkilere karşı performansını iyileştirmek gibi olumlu etkileri vardır. (Hamada, Abed, Beddu, Humada, & Majdi, 2023).

Geopolimer beton üretiminde yaygın kullanılan ve yapay puzolanlar olarak adlandırılan atık malzemeler genel olarak 2 sınıfta incelenebilirler.

· **Kömür atıkları:** Kömür santrallerinden elde edilen kömür külü, silika ve alüminyum oksit kaynağı olarak geopolimer üretiminde kullanılabilir. Bu malzeme, hem maliyetleri azaltır hem de endüstriyel atıkların geri dönüşümünü sağlar.

· **Endüstriyel atıklar:** Metal endüstrilerinden, inşaat sektöründen veya diğer endüstrilerden elde edilen atıklar (örneğin, çelik üretiminden çıkan döküm atıkları) da geopolimer harç üretiminde kullanılabilir. Bu tür atıkların geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir fayda sağlar.

Geopolimer harç üretiminde bağlayıcı olarak yaygın olarak kullanılan atık puzolanlar şu şekilde özetlenebilir.

- **Uçucu kül:** Kömürün yanması sırasında ortaya çıkan, silika ve alümina içeren ince tozlu bir yan üründür. Bu ürün silisli ve alüminatlı yapısı nedeniyle geopolimer harç üretiminde kullanılır. Uçucu kül alkali aktivatörlerle reaksiyona girerek geopolimer yapıların oluşmasını sağlar. Bu reaksiyon geopolimer harcın sertleşmesinde ve dayanıklılığının sağlanmasında önemli rol oynar.

- **Yüksek fırın cürufu:** Yüksek fırınlarda demir cevheri ve diğer hammaddelerin eritilmesi sırasında oluşur. Cüruf sıvı halde ağır metal ve mineraller içerir. Soğutulduktan sonra toz haline gelir ve alkali aktivasyon için kullanıldığında geopolimer harçların üretiminde önemli rol oynar. Sürdürülebilirlik açısından önemli atık malzemedir. Yüksek sıcaklığa karşı direnci ve kimyasal dayanıklılığı arttırabilir.

- **Silis dumanı:** Silis kumunun fırınlanması ya da silisyum metalinin üretimi sırasında oluşur. Silis dumanı, silika (SiO<sub>2</sub>) içeren toz malzemedir. Silis dumanı çok küçük partikül boyutuna sahiptir. Yüksek reaktif silika içermesi geopolimer harçlarda dayanıklılığın artmasını sağlar ve güçlü bağlar oluşturur.

- **Pirinç kabuğu külü:** Pirinçlerin kabuklarının yakılması sonucu ortaya çıkar. Pirinç kabuğu külü silika, alümina ve potasyum oksit bileşenlerini içerir ve alkali aktivasyon için gerekli olan silika kaynağını sağlar. Bu geopolimerizasyon reaksiyonu için önemlidir. Reaksiyondaki bu kimyasal bağlar mekanik dayanımı sağlayan önemli faktördür.

- **Kırmızı çamur:** Alüminyum üretimi sırasında elde edilen atık malzemedir. Yüksek miktarda alümina, silika ve diğer mineralleri içerir. Geopolimer harçlarda alümina ve silika kaynağı olarak kullanılabilir. Geopolimerizasyon reaksiyonlarında harçların kimyasal dayanıklılığını artırır.

Bunlar en yaygın kullanılan puzolanlar olup, bunların dışında dip külü, palmye yağı yakıt külü, volkanik kül, yüksek kalsiyumlu uçucu kül, atık kâğıt çamuru külü, öğütülmüş granül fırın cürufu, hava soğutmalı cüruf, çelik cürufu, ferrokrom cürufu, metakaolin, kaolin, zemin perlit, silika atığı gibi farklı puzolanlarda kullanılabilir.

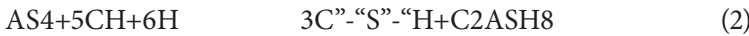
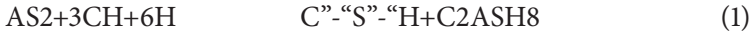
## PUZOLANIK AKTIVITE INDEKSI

Puzolanlar içeriğinde bileşikler halindeki Al ve Si bazlı oksitlere ek olarak, daha az miktarda demir, magnezyum vb. oksit bileşenleri de içerirler. Kireç, alümin ve silikanın reaksiyonuyla oluşan bu kimyasal işleme puzolan aktivitesi denir. Puzolanlar, volkanik kaya grubuna ait zeolit, dolomit, andezit kuvars vb. gibi aktif-inaktif mineraller içeren kil ve kireç taşının öğütülmesiyle ve yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül gibi atık malzemelerden elde edilebilir (J.A. Becerra-Duitama, 2022)

(Kim, 2021).

Puzolanlardaki elementleri belirlemek için 2 farklı yaygın test yöntemi vardır (Uçar, 2021). Bunlardan biri olan endüktif olarak eşleşmiş plazma kütle spektrometrisi (ICP-MS), genellikle çevresel örneklerdeki metalleri tanımlamak için kullanılır (Bazilio & Weinrich, 2012). Çok çeşitli matrislerde farklı minerallerin ve elementlerin belirlenmesi için kullanılan bir diğer test yöntemi ise Endüktif Olarak Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometrisi (ICP-OES) yöntemidir. ICP OES’de, sıvı örnekler radyofrekans (RF) ile argon plazmasına enjekte edilir. Katı örnekler asitle veya ekstraksiyonla etkileşime girer. Bu nedenle analitler çözeltiliye dahil edilir. Örnek bir aerosol, çözeltinin merkezi kanalına yönlendirilir. Aerosol, endüktif olarak eşleşmiş plazma (ICP) ısıısıyla yaklaşık 10.000 K’lık bir sıcaklıkta buharlaşır. Analiz edilecek elementlerin serbest atomları gaz haline getirilir. Plazma içindeki çarpışmalı uyarılma, atomları uyarılmış durumlara yükseltir. Bir içbükey ayna veya mercekle, ICP tarafından yayılan fotonların bir kısmını toplar. Bu odaklanmış görüntü, belirli bir dalga boyunda bir monokromatör kullanılarak cihazın giriş açıklığında ICP’nin bir görüntüsünü göstermektedir. (Batsala, Chandu, Sakala, Nama, & Domatoti, 2012) (Aceto, Abollino, Bruzzoniti, & Mentast, 2002)

Puzolanların incelik modülü, performansındaki en önemli faktördür, incelik modülü arttıkça puzolanik aktivite artar (Seco, ve diğerleri, 2012). Bu artış, doğrudan betonun mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini, özellikle de geçirgenliğiyle doğrudan ilişkili olan kimyasal etkilere karşı direncini etkiler. Aşağıda puzolanların reaksiyon mekanizması için önerilen 2 denklem bulunmaktadır (Alejandra, Monica, Alberto, & Edgardo, 2013).



Puzolandan gelen silisyum oksit bazlı mineral H<sub>2</sub>O ile birleştiğinde, kalsiyum hidroksit iyonlarıyla reaksiyona girerek bağlayıcı olan kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) jelleri oluşturur. Bu bağlanma indeksine puzolanik aktivite (PA) adı verilir. PA’nın oluşturma kapasitesi, yani puzolanların C-S-H oluşturma kapasitesine bağlanma kapasitesi denir. PA, puzolanın fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ve bağlanma oranı ile ilgilidir (Walker & Pavia, 2011). Fiziksel olarak, yüzey alanı ve özellikleri, gözeneklilik, su/bağlayıcı oranı, kütleme koşulları; kimyasal olarak, puzolan ve çimentolu malzemenin bağlanma (reaksiyon) oranı (varsa), SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplam miktarı; mineralojik olarak, reaktif silika içeriği ve kireç/puzolan oranı puzolanik aktivite indeksini (PAI) doğrudan etkiler. (ASTM C 125, 1994), (Mboya, 2017). PAI’ye ek olarak, bu oranlar betonun priz süresi, mukavemeti ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.



PAI, puzolanın bağlayıcı ile reaksiyona girme kapasitesini kısaca ölçer ve puzolanın betonda etkili bir şekilde kullanılıp kullanılmayacağını tahmin edilmesini sağlar. Bu anlamda çok önemli olan bu indeks genellikle yüzde olarak gösterilir. Endeks değeri ne kadar yüksekse, puzolanik aktivite de o kadar yüksektir. PAI'yi ölçmek için çok çeşitli test teknikleri vardır. Bunlar genellikle iki gruba ayrılabilir: Doğrudan ve dolaylı ölçüm yöntemleri (Donatello, Tyrer, & Cheeseman, 2010).

- Doğrudan yöntemler: Kimyasal titrasyon (Frattini test), XRD ve TGA)
- Dolaylı yöntemler (Güç aktivite indeksi- SAI, elektriksel iletkenlik, iletim kalorimetrisi)

Bu testler çoğunlukla betonun hidratlanması için gerekli reaksiyonlar sırasında açığa çıkan CH<sub>4</sub> tüketiminin ölçülmesi mantığına dayanmaktadır. Frattini testi ise standardizasyona en yakın test tekniği olup, puzolanların kimyasal özellikleri ile puzolanların alümin içeriğini çok hassas bir şekilde ölçebilmektedir. (Rahhal & Talero, Calorimetry of Portland cement with silica fume, diatomite and quartz additions, 2009). Bu tip testlerde, su/b oranı sabit tutulabilirken matris/puzolan oranı değiştirilebilir veya aynı sabit kıvamda su oranı ve puzolan oranı değiştirilebilir (Rahhal, Talero, & Gálvez-Moreno, Calorimetry of Portland cement with silica fume, diatomite and quartz additions, 2009). Harçların basınç dayanımı olarak ölçülen puzolanik aktivite ile kildeki killi mineral içeriği arasında iyi bir korelasyon olduğunu bildirmiş ve bu da puzolanların 28 günlük beton basınç dayanımlarına katkıda bulunduğunu göstermektedir (Tironi, Monica, Alberto, & Edgardo, 2013). Bu test teknikleri arasında SAI, numunelerin 7 günlük, 28 günlük veya 90 günlük basınç dayanımlarını karşılaştırarak PAI'nin dolaylı bir tahminini sağlamak için sıklıkla kullanılır (Agarwal, 2006).

Puzolanik aktivite indeksi kütle kaybına göre de hesaplanabilir. Kalibre edilmiş bir ölçüm kabı kullanılarak belirli miktarda karışım alınır. Bu karışım kalibre edilmiş bir terazide tartılır. Karışımın çimento ile reaksiyona girmesine izin vermek için su eklenir. Bu adım genellikle belirli bir süre sıcaklık ve nem kontrolü altında gerçekleştirilir. Aktivasyon işleminden sonra numune belirli bir süre kürlenir. Kürlenme süresi genellikle birkaç günü içerir. Aktivasyon ve kürlenme işlemleri tamamlandıktan sonra numune tekrar tartılır ve aşağıdaki formüle göre hesaplanır (ASTM C 618, 2023):

$$PAI (\%) = \frac{\text{Aktivasyondan Önce Karışımın Tartılan Kütlesi} - \text{Aktivasyondan Sonra Karışımın Tartılan Kütle}}{\text{Aktivasyon Öncesi Karışımın Tartılan Kütlesi}} \quad (3)$$

*Aktivasyondan Önce Karışımın Tartılan Kütlesi – Aktivasyondan Sonra Karışımın Tartılan Kütle*

*Aktivasyon Öncesi Karışımın Tartılan Kütlesi*

Literatürde beton üzerine çok sayıda optimizasyon veya tahmin çalışması bulunmaktadır. Özellikle makine öğrenmesi yardımıyla basınç dayanımının bulunmasına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu yolla puzolanların optimum oranlarda kullanımı ve yaygınlaşması günden güne artmaktadır.

## SONUÇLAR

Sonuç olarak puzolanlar, yapı sektöründe atıkların değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik ve ekonomik etki parametreleri kapsamında kilit bir role sahiptir. Özellikle yapay kaynaklardan elde edilen bu malzemeler, hem geopolimer betonlarda yüksek oranda kullanılarak atık yönetimi anlamında etkin olarak kullanılabilen, hem de betonun performansını iyileştirmektedir. Portland çimentosuna alternatif olarak kullanılabilen potansiyeli karbon emisyonlarının düşürülmesi ve endüstriyel atıkların değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüz teknolojisi ve araştırmalar günden güne artan bilimsel gelişmeler sayesinde, bir atık malzeme olarak yapay puzolanların özelliklerinin daha derinlemesine analiz edilmesini sağlamıştır. Gelecekte, puzolanların yeni ürünlerle birlikte piyasaya sunulması sayesinde çimento üretimi ortadan kalkarak, çevresel kirlilik ve ekonomik sürdürülebilirlik anlamında büyük bir sorun ortadan kalkmış olacaktır.

Diğer yandan atık puzolanların kullanımıyla hazırlanan geopolimer betonlar, alkali aktif betonlar ya da bir diğer adıyla yeşil betonlar, çimento yerine yapay puzolanların kullanıldığı, üretim süreci çok daha az enerji gerektiren ve üretim esnasında CO<sub>2</sub> salınımına neden olmayan malzeme ve yöntemlerin avantajları nedeniyle sürdürülebilir inşaat malzemeleri olarak anılmaktadır ve hızlanan teknolojik ilerlemelerle birlikte çok yakın zamanda atık puzolanlar sürdürülebilir yeni nesil yapı malzemeleri olarak günlük yaşamda yerini alacaktır.

## KAYNAKÇA

- Aceto, M., Abollino, O., Bruzzoniti, M., & Mentast, M. (2002). 'Determination of Metals in Wine with Atomic Spectroscopy (Flame-AAS, GF-AAS and ICP-AES): A Review. *Food Addit. Contam.*, 19(2), 161-166.
- Agarwal, S. (2006). Pozzolan activity of various siliceous materials. 36(9), 1735-1739. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.025>.
- Ahmad, M., Rashid, K., Tariq, Z., & Ju, M. (2021). Utilization of a novel artificial intelligence technique (ANFIS) to predict the compressive strength of fly ash-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.*, 301(124251). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124251>.
- Alejandra, T., Monica, A., Alberto, N., & Edgardo, F. (2013). Assessment of pozzolan activity of different calcined clays. *Cem. and Conc.Comp.*, 37, 319-327. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002>.
- ASTM C 125. (1994). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 618. (2023). Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. U.S.: ASTM International.
- Bazilio, A., & Weinrich, J. (2012). Bazilio, A., and J. Weinrich. "Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICPMS)." *Principles of Instrumental Analysis* 12. 1-11.
- Batsala, M., Chandu, B., Sakala, B., Nama, S., & Domatoti, S. (2012). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). *Int J Res Pharm Che*, 2(3), 671-680.
- Davraz, M., Ceylan, H., Topçu, İ., & Uygunoğlu, T. (2018). Pozzolan activity of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete. *Constr. and Build. Mat.*, 165, 494-503. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.043>.
- Donatello, S., Tyrer, M., & Cheeseman, C. (2010). Comparison of test methods to assess pozzolan activity. *Cem Concr Compos*, 32(2), 121-127.
- Erol, F., Al-mashhadani, M., Aygörmmez, Y., & Niş, A. (2023). Effect of ceramic waste powder content and sodium hydroxide molarity on the residual mechanical strength of alkali-activated mortars. *Materials Chemistry and Physics*, 309. doi:[10.1016/j.matchemphys.2023.128403](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128403).
- Hamada, H., Abed, F., Beddu, S., Humada, A., & Majdi, A. (2023). Effect of Volcanic Ash and Natural Pozzolan on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review . *Case Studies in Construction Materials*, 19(e02425). doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02425>.

- J.A. Becerra-Duitama, D. R.-A. (2022). Pozzolans: a review. *Eng. Appl. Sci. Res.*, 49(495-504).
- Kim, I. (2021). Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash. *Case Stud Constr Mater.*, 15:(e00630).
- Mboya, H. K. (2017). Measurement of pozzolanic activity index of scoria pumice, and rice husk ash as potential supplementary cementitious materials for portland cement. *Adv. Civil Eng*, 1(13). doi:<https://doi.org/10.1155/2017/6952645>.
- Rahhal, V., & Talero, R. (2009). Calorimetry of Portland cement with silica fume, diatomite and quartz additions. *Constr Build Mater.*, 23(11), 3367-3374.
- Saadat, M., & Bayat, M. (2019). Prediction of the unconfined compressive strength of stabilised soil by adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) and non-linear regression (NLR) . *Geomech. Geoeng*, 17(1), 80-91. doi:<https://doi.org/10.1080/17486025.2019>.
- Salehi, M., Bayat, M., Saadat, M., & Nasri, M. (2022). Prediction of unconfined compressive strength and California bearing capacity of cement- or lime-pozzolan-stabilised soil admixed with crushed stone waste. *Geomech. Geoeng*, 1(12). doi:<https://doi.org/10.1080/17486025.2022.2040606>.
- Seco, A., Ramirez, F., Miquelz, L., Umereta, P., Garcia, B., & Prieto, E. (2012). Types of waste for the production of pozzolanic materials-a review. . G. X. KY (Dü.) içinde, *Industrial waste* (s. 141-50.). London: IntechOpen.
- Tironi, A., Monica, A., Alberto, N., & Edgardo, F. (2013). Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cement and Concrete Composites*, 37(319-327).
- Uçar, H. (2021). Bor Endüstri atıklarında Bazı Elementlerin ICP-MS Yöntemiyle Tayini ve Mikroyapısal Özelliklerinin Araştırılması. Batman: Batman University, Graduate Edu. İns.
- Varol, E., Benzer, D., & Özcan, N. (2023). An adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) model to predict the pozzolanic activity of natural pozzolans. 31(2). doi:<https://doi.org/10.12989/cac.2023.31.2.085>.
- Walker, R., & Pavia, S. (2011). Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes. *Mater. Struct*, 44, 1139-1150. doi:<https://doi.org/10.1617/s11527-010-9689-2>.
- Wassim, B., Majdi, F., & Moncef, L. (2020). Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: Critical review. 260(119889). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119889>.
- Yılmazzer Polat, B. (2023). The influence of microwave curing on the strength of silica fumeadded fly ash-based geopolymer mortars. *J Sustain Const Mater Technol.*, 8(3), 207-215.

# Bölüm 2

## MADEN ATIKLARINDAN SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPI MALZEMELERİNE: GEOPOLİMER HARÇLARIN POTANSİYELİ

*Yavuz Selim AKSÜT<sup>1</sup>*

*Yusuf KAYA<sup>2</sup>*

*Onur DOĞAN<sup>3</sup>*

*Kadir SÜNNETÇİ<sup>4</sup>*

1 Gümüşhane Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, ORCID: 0000-0002-4568-3605

2 Gümüşhane Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, ORCID: 0000-0002-5985-353X

3 Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, ORCID: 0000-0001-8231-9872

4 Gümüşhane Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, ORCID: 0000-0002-2964-7284

## Giriş

Bu kitap bölümü, endüstriyel maden atıklarının geopolimer harç üretiminde kullanılarak beton endüstrisine çevresel ve ekonomik katkı sağlama potansiyelini ele almaktadır. Çimento üretiminin neden olduğu yüksek karbon emisyonu ve enerji tüketimi gibi çevresel sorunlar, sürdürülebilir bağlayıcı malzemelere olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda, cüruf, uçucu kül ve diğer maden atıkları gibi alüminosilikat içeriği yüksek malzemelerin alkali aktivasyon yöntemiyle geri dönüştürülmesi hem çevre dostu hem de dayanıklı yapı malzemelerinin üretimine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, geopolimer malzemelerin tanımı, kimyasal reaksiyon mekanizmaları ve avantajları detaylandırılmıştır. Ayrıca, cüruf ve uçucu kül gibi maden atıklarının geopolimer harçlarda bağlayıcı ve dolgu malzemesi olarak kullanımı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, bu malzemelerin yüksek mekanik dayanım, düşük geçirgenlik ve sülfat direnci gibi üstün performans özellikleri sunduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, maden atıklarının geopolimer harçlarda değerlendirilmesi, beton endüstrisinde çevresel sürdürülebilirliği artırırken atık depolama sorunlarını ve çimento üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltmaktadır. Gelecekte, bu teknolojinin daha yaygın hale gelmesi için maliyet optimizasyonu ve geniş ölçekli uygulamalara yönelik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

## GEOPOLİMER MALZEMELER

Yapı endüstrisine girdiği günden bu yana en çok kullanılan bağlayıcı yapı malzemesi kuşkusuz çimentodur. Çimento üretimi için kullanılan hammaddelerin çoğunlukla yerel kaynaklardan kolayca temin edilebilmesi, üretim sürecindeki nispeten düşük nitelikli ve maliyetli işçi profili ile beton üretimindeki pratik özelliği gibi etkenler dikkate alındığında gelecekte de kolay kolay vazgeçilebilecek bir yapı malzemesi olmadığı görülmektedir. Ancak, bu avantajlarının yanı sıra pek çok dezavantajı da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi yüksek CO<sub>2</sub> salınımı ve yüksek enerji maliyetidir. Sadece 1 m<sup>3</sup> beton üretebilmek için atmosfere 400 kg CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmektedir (Meyer, 2009; Provis ve Van Deventer, 2014). Bunun yanı sıra çimento üretimi endüstrisinde kullanılan enerji, diğer endüstrilerde tüketilen toplam enerjinin %12-15 arasını kapsamaktadır (Madloul vd., 2011). Bu gibi etkenler, çimento dışında daha çevreci ve sürdürülebilir bir bağlayıcı ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Endüstriyel maden atıkları, üretim endüstrileri için faydasız oldukları için atılan, endüstriler tarafından bol miktarda üretilen malzemelerdir. Beton üretiminde atık malzemelerin kullanılması, geri dönüşüm, ekonomiklik ve çevre kirliliğini azaltma gibi birçok avantajı nedeniyle önem-

lidir. Bu malzemeler, betonda çimentoya alternatif bağlayıcı olarak veya doğal agrega yerine kullanılarak geri dönüştürülecektir. İşte bu noktada geopolimer beton üretimi, atıkların geri dönüşümde kullanılmasında ön plana çıkmaktadır. Literatüre bakıldığında, geopolimer betonlarda cüruf ve uçucu kül yaygın olarak kullanılmaktadır (Bellum vd., 2024; Ojha ve Aggarwal, 2022; Yazıcı ve Karagöl, 2022; Waqas vd., 2021).

Yapısında alüminosilikat içeren doğal ve/veya yapay malzemelerin bir aktivatör ile tepkimesi sonucu çimentosuz olarak “geopolimer” adı verilen yeni bir beton üretilmesine yönelik çalışmalar her geçen gün artarak devam etmektedir (Zhang vd., 2020; Luga, 2015). Bu sebeple, uçucu kül, taban külü ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) gibi yapısında  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve  $CaO$  içeren amorf malzemelerden alkali aktivatörler ( $NaOH$ ,  $KOH$ ,  $Na_2SiO_3$  ve  $K_2SiO_3$ ) kullanılarak çimento harici bir bağlayıcı üretmek mümkün olmuştur. Alkali aktivasyon yöntemi ile üretilen betonlar, geleneksel betonlara göre yüksek mekanik özellik, düşük enerji giderleri, düşük zararlı gaz salınımları ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  vb.) ve çevrenin daha az tahribatı gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, büyük ölçülerde atık malzemelerin kullanılmasıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama sorunları önemli ölçülerde azalmaktadır (Aydın, 2010).

Alkali aktivatör kullanılarak üretilen geopolimer betonların geleneksel betonlara göre kuruma büzülmesi değerleri daha düşük, donatı ile aderansları ve çevresel şartlara karşı dayanıklılıkları ise daha yüksektir (Glukhovsky, 1980). Amorf yapıya sahip ÖYFC'nin betonda kullanımının yaygınlaşması ile endüstriyel bir atık maddenin geri dönüşüme kazandırılarak ekonomiye ve çevre sağlığının korunmasına katkıda bulunulabilecektir (Sharma vd., 2021; Topçu ve Canbaz, 2005). Doğal bir atık olarak maden ocağı atığının (MA) kullanımıyla ilgili bilgi sınırlı olarak bulunmaktadır. Bu çalışma, maden atıklarının geopolimer harçlarda kullanımı üzerine odaklanmaktadır.

### **Geopolimerlerin Tanımı ve Tarihçesi**

Geopolimerler, alüminosilikat malzemelerin alkali aktivatörlerle kimyasal reaksiyonlarından elde edilen bağlayıcılardır. İlk kez 1970'lerde Joseph Davidovits tarafından geliştirilmiştir (Davidovits, 2011). Çimento bazlı bağlayıcılara alternatif olarak kabul edilir ve sürdürülebilir yapı malzemesi üretiminde önemli bir rol oynar.

### **Kimyasal Yapısı ve Reaksiyon Mekanizması**

Temel kimyasal bileşenler: Alüminyum (Al) ve silisyum (Si) içeren malzemeler (uçucu kül, cüruf gibi).

### **Reaksiyon mekanizması:**

- Alkali aktivasyon: NaOH veya KOH gibi alkali çözeltiler ile Si ve Al'ın çözündürülmesi.
- Polikondenzasyon: Çözeltiden Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarının oluşumu.

Sonuç: İnorganik polimer (geopolimer) matrisi.

Elde edilen bağlayıcı, çimento hidrasyonundan farklı bir kimyasal yapıya sahiptir.

### **Geopolimerlerin Avantajları**

Düşük karbon ayak izi:

- Portland çimentosuna kıyasla %80'e kadar daha düşük karbon emisyonu.

Endüstriyel atıkların kullanımı:

- Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, madencilik atıkları gibi atıkların yeniden değerlendirilmesi.

Yüksek dayanıklılık:

- Sülfat direnci, yüksek sıcaklık stabilitesi ve düşük geçirgenlik.

Kimyasal esneklik:

- Farklı malzemeler ve aktivatörlerle özelleştirilebilir.

### **Geopolimerlerin Beton Endüstrisindeki Kullanımı**

Uygulama Alanları:

- İnşaat sektöründe sürdürülebilir bağlayıcı olarak kullanılır.
- Betonarme yapılar, döşemeler, prekast elemanlar ve zemin stabilizasyonunda tercih edilir.

Performans Özellikleri:

- Yüksek mekanik dayanım (basınç, çekme ve eğilme dayanımı).
- Uzun ömür ve çevresel etkilere karşı direnç.

Zorluklar:

- Alkali aktivatör maliyeti.
- Üretim sürecinde karışım tasarımının karmaşıklığı.

### **Cüruf ve Uçucu Kül ile Geopolimer Üretimi**

Cüruf Bazlı Geopolimerler:



- Yüksek kalsiyum içeriği nedeniyle hızlı priz süresi ve yüksek dayanım sağlar.

- Çimentolu matrislere daha çok benzeyen bir yapı oluşturur.

Uçucu Kül Bazlı Geopolimerler:

- Düşük kalsiyum içeriği nedeniyle yavaş reaksiyon süreci ve yüksek kimyasal dayanıklılık.

- Karışımlarda genellikle cüruf ile birleştirilerek mekanik özellikler iyileştirilir.

### **Geopolimerlerin Çevresel ve Ekonomik Katkıları**

- Çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması.

- Maden atıklarının bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi.

- Atık depolama alanlarının çevreye etkisinin en aza indirilmesi.

### **MADEN ATIKLARININ ÖZELLİKLERİ**

#### **Maden Atıklarının Tanımı ve Sınıflandırılması**

Maden Atıkları Nedir?

- Madencilik faaliyetleri sonucunda çıkarılan cevherin işlenmesi sırasında ortaya çıkan yan ürünlerdir.

- Genellikle düşük ekonomik değere sahiptir, ancak belirli proseslerden geçirildiklerinde endüstriyel geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılabilirler.

Sınıflandırma:

- **Cevher Atıkları:** Metal madenciliği sonucunda kalan artıklar.

- **Cüruf:** Demir-çelik üretiminde yüksek fırınlardan çıkan yan ürünler.

- **Kömür Atıkları:** Kömür yıkama ve işleme sırasında oluşan artıklar.

- **Diğer Atıklar:** Taş tozu, kuvars kumu ve diğer mineral artıklar.

#### **Kullanılan Maden Atık Türleri**

Yüksek Fırın Cürufu (Slag):

- Metalurjik işlemlerin bir yan ürünü.

- Yüksek kalsiyum, silisyum ve alüminyum içerir.

- Geopolimerlerde reaktivitesi yüksektir, mekanik dayanımı artırır.

Uçucu Kül (Fly Ash):

- Termik santrallerde kömürün yakılması sırasında oluşur.
- Düşük kalsiyum içeriği sayesinde uzun süreli dayanıklılık sağlar.

Bakır Cürufu (Copper Slag):

- Bakır üretiminde yan ürün olarak elde edilir.
- Yoğunluk ve sertlik özellikleri nedeniyle beton karışımlarında agrega olarak kullanılabilir.

Boksit Atıkları (Red Mud):

- Alüminyum üretiminden kalan yüksek alkaliniteye sahip atıklardır.
- Alüminyum ve silisyum içeriği nedeniyle geopolimer üretimine uygundur.

### **Maden Atıklarının Fiziksel Özellikleri**

Tane Boyutu ve Geometri:

- Uçucu kül genellikle küresel partiküllerden oluşurken, cüruf düzensiz şekilli taneler içerir.
- Tane boyutları, bağlayıcının işlenebilirliği ve reaktivitesi üzerinde doğrudan etkilidir.

Yoğunluk:

Maden atıkları genellikle Portland çimentosundan daha yüksek yoğunluğa sahiptir.

Hidrolik ve Pozolanik Özellikler:

- Cüruf gibi bazı atıklar hidrolik bağlayıcılık özellikleri gösterebilir.
- Uçucu kül ise pozolanik reaktiviteye sahiptir.

### **Maden Atıklarının Kimyasal Özellikleri**

Kimyasal Bileşim:

Yüksek Fırın Cürufu:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriği yüksektir.

Uçucu Kül:  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı yüksektir; bazen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içerir.

Bakır Cürufu: Demir oksit ve silika ağırlıklıdır.

Boksit Atıkları:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içerir.

Reaktivite:

Alüminosilikat içeriği yüksek olan maden atıkları, alkali aktivatörlerle reaksiyona girebilir.

### **Maden Atıklarının Geopolimer Üretimindeki Rolü**

Bağlayıcı Olarak Kullanım:

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül, bağlayıcı olarak geopolimer karışımlarında tercih edilir.

Agrega veya Dolgu Malzemesi:

Bakır cürufu ve taş tozu gibi atıklar, beton karışımlarında agregaların yerine kullanılabilir.

Mikro Yapısal Katkılar:

Atıkların mineral yapısı, geopolimerlerin gözenek yapısını ve mikro yapısal özelliklerini iyileştirebilir.

### **Maden Atıklarının İşlenmesi ve Hazırlanması**

Kurulama ve Öğütme:

Nem içeriği yüksek atıklar kurutulmalı ve belirli bir tane boyutuna öğütülmelidir.

Kimyasal Aktivasyon:

Atıklar, reaktiviteyi artırmak için alkali aktivatörlerle ön işlemden geçirilebilir.

Karışım Optimizasyonu:

Farklı atık türleri ve oranları, geopolimer özelliklerine uygun şekilde ayarlanmalıdır.

### **Çevresel ve Ekonomik Avantajlar**

- Atıkların yeniden kullanımı, çevresel etkileri ve atık bertaraf maliyetlerini azaltır.
- Madencilik alanlarının rehabilitasyonuna katkı sağlar.
- Endüstriyel atıkların beton üretiminde yeniden değerlendirilmesi, daha düşük maliyetli ve sürdürülebilir yapı malzemeleri üretimini destekler.

## **DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **DeneySEL Çalışmaların Amacı**

- Maden atıklarının geopolimer harçlarda kullanılması durumunda, mekanik dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek.
- Çeşitli maden atıklarının (cüruf, uçucu kül, bakır cürufu vb.) geopolimer matrislerdeki performansını karşılaştırmak.
- Geopolimer harçların çevresel avantajlarını ve endüstriyel uygulama potansiyelini ortaya koymak.

### **Malzeme ve Yöntemler**

#### **Kullanılan Malzemeler**

##### **Bağlayıcılar:**

- Uçucu kül (Düşük kalsiyum içeriği ile).
- Yüksek fırın cürufu (CaO içeriği yüksek).

##### **Alkali Aktivasyon:**

Sodyum hidroksit (NaOH): Farklı molaritelerde (örneğin, 8M, 10M).

Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ): Aktivasyonun optimize edilmesi için kullanılır.

##### **Agrega:**

- Doğal kum veya madencilik kaynaklı taş tozu.

##### **Katkı Maddeleri:**

· Süper akışkanlaştırıcılar veya diğer kimyasal katkıları, işlenebilirliği artırmak için kullanılabilir.

### **Numune Hazırlama**

#### **Karışım Tasarımı:**

· Cüruf ve uçucu kül oranlarının belirlenmesi (örneğin, %50 cüruf, %50 uçucu kül).

- Alkali aktivatör miktarının (sıvı/katı oranı) optimize edilmesi.

#### **Karıştırma ve Döküm:**

- Malzemelerin karıştırılması ve standart kalıplara dökülmesi.

#### **Kür Koşulları:**

- Farklı sıcaklıklarda kürlenme (örneğin, 25°C, 60°C).

- Nemli ve sıcak ortamlarda 7, 28 veya 90 günlük kür süreleri.

### **Mekanik Testler**

*Basınç Dayanımı Testi (ASTM C109/C109M):* Belirli günlerde (7, 28, 90 gün) standart küp veya silindir numunelerde basınç dayanımı ölçümü.

Beklenen Sonuçlar:

- Cüruf içeriği yüksek olan karışımlar, daha yüksek erken basınç dayanımı sağlayabilir.
- Uçucu kül içeren numunelerde uzun vadeli dayanım artışı gözlemlenir.

*Eğilme Dayanımı Testi (ASTM C78):* Harç numunelerinin eğilme dayanımı ölçülür.

Beklenen Sonuçlar:

Cüruf ve uçucu kül kombinasyonları, kırılma direncini artırabilir.

*Çekme Dayanımı Testi:* Doğrudan veya dolaylı yöntemlerle çekme dayanımı testi yapılır.

### **Dayanıklılık Testleri**

*Sülfat Direnci Testi (ASTM C1012):* Numuneler 5% ve 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerine daldırılarak sülfat etkisine karşı dayanıklılıkları ölçülür.

Beklenen Sonuçlar:

- Geopolimer harçların sülfat etkisine karşı Portland çimentosuna göre daha dirençli olduğu gösterilebilir.

*Karbonlaşma Testi:* Harç numuneleri, CO<sub>2</sub> içeren ortamda karbonlaşma direnci açısından değerlendirilir.

*Su Emme ve Geçirgenlik Testleri:* Geopolimerlerin su emme ve geçirgenlik özellikleri incelenir.

Beklenen Sonuçlar:

- Daha düşük su emme kapasitesi ve geçirgenlik, geopolimerlerin dayanıklılık avantajını ortaya koyabilir.

### **Mikroyapı Analizleri**

SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizleri

- Geopolimer matrisin mikro yapısının ve gözenek yapısının incelenmesi.
- C-S-H ve N-A-S-H jel oluşumları.

### XRD (X-Ray Difraksiyon) Analizleri

- Kristal yapı analizi.
- Aktive edilen bağlayıcı fazların belirlenmesi.

### FTIR (Fourier Dönüşümlü Infrared Spektroskopisi)

- Geopolimer matrisin kimyasal bağ yapılarını analiz etme.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Maden atıklarının geopolimer harçlarda kullanımı, hem çevresel sürdürülebilirliği artırma hem de ekonomik faydalar sağlama açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Deneysel çalışmalar, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi maden atıklarının, geopolimer bağlayıcıların mekanik dayanımı ve dayanıklılık özelliklerini olumlu etkilediğini göstermiştir. Özellikle sülfat direnci, düşük geçirgenlik ve uzun ömür gibi avantajlar, bu harçları agresif çevresel koşullar için ideal bir seçenek haline getirmiştir.

### Geopolimer Harçların Beton Endüstrisindeki Rolü

- Geopolimer harçlar, geleneksel Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılabilir ve karbon emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilir.
- Maden atıklarıyla üretilen bu harçlar, madencilik alanlarında atık depolama ihtiyacını azaltırken ekonomik geri dönüşüm çözümleri sunar.
- Özellikle altyapı projelerinde (köprü, yol kaplamaları, dayanıklı yapı elemanları) kullanım potansiyeli yüksektir.

### Gelecek Çalışmalar İçin Öngörüler

#### Mekanik ve Çevresel Performans:

- Geopolimer harçların daha geniş bir malzeme ve çevresel test serisi ile değerlendirilmesi.

#### Endüstriyel Maliyet Analizleri:

- Geopolimer üretim maliyetlerinin azaltılması ve rekabet gücünün artırılması için ekonomik analizlerin yapılması.

#### Yapay Zeka ve Modelleme:

- Geopolimer harç karışımlarını optimize etmek için yapay zeka tabanlı modelleme ve simülasyon çalışmalarına odaklanılması.

## KAYNAKÇA

- ASTM C78/C78M-22.** Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C109/C109M-23.** Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, USA, 4(2): 1-6.
- ASTM C1012/C1012M-24.** Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, USA, 4(1): 1-9.
- Aydın, S. , 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 317.
- Bellum, R.R., Reddy, K.H.K., Reddy, G.C. *et al.* Influence of steel slag on strength and microstructural characteristics of fly ash-based geopolymer concrete. *Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des.* 7, 5499–5514 (2024). <https://doi.org/10.1007/s41939-024-00541-0>
- Davidovits, J. (2011). Geopolymer Chemistry and Applications, third ed. Institute of Geopolymere.
- Glukhovskiy, V.D., Rostovskaja, G.S., Rumyna, G.V. 1980. High Strength Slag-Alkaline Cements. 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 164-168.
- Luga, E., “Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Özellikleri”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (2015).
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S. and Rahim, N. A. “A critical review on energy use and savings in the cement industries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4), 2042–2060, (2011).
- Meyer C., “The greening of the concrete industry”, *Cement and Concrete Composites*, 31 (8), 601-605, (2009).
- Ojha, A., Aggarwal, P. Fly Ash Based Geopolymer Concrete: a Comprehensive Review. *Silicon* 14, 2453–2472 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01044-0>
- Provis, J. L. ve Van Deventer, J. S. J. “Alkali activated materials”, *Rilem Tc 224*, (2014).

- Sharma A, Basumatary N, Singh P, Kapoor K, Singh SP, 2021. Potential of geopolymer concrete as substitution for conventional concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2214-7853: 1-7.
- Topçu, B. ve Canbaz, M., 2005, Yüksek fırın cürufunun beton üretiminde değerlendirilmesi, *Akdeniz \_nsaat Haber*, 3, 38-41.
- Waqas, R. M., Butt, F., Zhu, X., Jiang, T., & Tufail, R. F. (2021). A Comprehensive Study on the Factors Affecting the Workability and Mechanical Properties of Ambient Cured Fly Ash and Slag Based Geopolymer Concrete. *Applied Sciences*, 11(18), 8722. <https://doi.org/10.3390/app11188722>
- Yazıcı N, Karagöl F, 2022. Uçucu Kül Esaslı ve Cüruf Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(3): 1592 - 1606
- Zhang P, Gao Z, Wang J, Guo J, Hu S, Ling Y, 2020. Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 270: 1-10.



# Bölüm 3

## YOL YAPIMINDA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ASFALT (RAP): TEKNOLOJİLER, ZORLUKLAR VE GELECEKTEKİ POTANSİYELLER

*Ersoy KABADAYI*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Giresun Üniversitesi Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun, ersoy.kabadayi@giresun.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4062-3117

## Giriş

Asfalt geri dönüşümü, modern yol yapım ve bakım çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Günümüzde yolların onarımı ve yeniden inşası sırasında, mevcut asfalt kaplamalar sıklıkla kazınarak veya çıkarılarak geri dönüştürülmektedir. Bu süreçte geri kazanılmış asfalt kaplaması (RAP), yol yapımında kullanılan ana malzemenin yerini almakta, böylece yeni asfalt üretiminde kullanılacak doğal kaynakların korunmasına yardımcı olmaktadır (Hu vd., 2012). Asfalt geri dönüşümü, ekonomik ve çevresel avantajlar sunarak sürdürülebilir bir altyapı oluşturulmasına katkıda bulunur. Bu süreçte asfaltın ana bileşenleri olan bağlayıcılar ve agregalar yeniden kullanılarak, yeni asfalt üretiminde kullanılan yeni malzeme miktarı azaltılır.

### Asfalt Geri Dönüşümüne Genel Bakış

Geri dönüşüm işlemi iki ana yöntemle gerçekleştirilir: sıcak karışım asfalt (HMA) ve soğuk karışım asfalt (CMA). Sıcak karışım geri dönüşümde asfalt malzemesi ısıtılarak tekrar kullanılırken, soğuk karışım geri dönüşümde malzeme oda sıcaklığında işlenir (Tarsi vd., 2020). Her iki yöntemin de kendine özgü avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Örneğin, sıcak karışım geri dönüşüm yüksek dayanıklılık sağlarken, enerji tüketimi ve karbon emisyonu daha yüksektir. Buna karşılık, soğuk karışım geri dönüşüm çevresel açıdan daha dost canlısıdır ancak performans açısından daha fazla inceleme gerektirir.

### Geri Kazanılmış Asfalt Kaplaması (RAP)

RAP, mevcut asfalt kaplamalarının kazınması veya çıkarılması sonucu elde edilen malzemelerdir. Bu malzemeler, asfalt kaplamalarının yaşlanmış bağlayıcılarını ve agrega bileşenlerini içerir. Geri dönüştürülmüş asfalt, yeni yol yapımında ve asfalt karışımlarında kullanılan ana bileşenler haline getirilebilir. Asfalt karışımında kullanılan RAP oranı, yolun performansını etkileyecek önemli bir faktördür. Yüksek miktarda RAP kullanımı, maliyetleri düşürürken, bağlayıcı madde kalitesini de etkileyebilir (Cui Ming vd., 2023).

RAP'nin kullanımı sadece maliyet tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına da katkıda bulunur. Örneğin, ABD'de her yıl üretilen yaklaşık 100 milyon ton RAP malzemesi, asfalt kaplamalarının yeniden yapımında kullanılmaktadır (Rout vd., 2023). Bu durum, çevresel açıdan bakıldığında, hem malzeme israfını azaltmakta hem de çöplüklere gitmesi gereken malzeme miktarını düşürmektedir.



Şekil 1. a) Kaplamanın Makina (Freze) ile kazınması b) Kazınmış Asfalt

Şekil 2. Mobil Kırıcıda Kaplamanın Boyutunun Küçültülmesi

### **Yol Yapımında Sürdürülebilirliğin Önemi**

Sürdürülebilirlik, günümüzün yol yapım ve bakım stratejilerinde kritik bir öneme sahiptir. Doğal kaynakların hızla tükenmesi ve çevresel etkilerin artması, altyapı projelerinde daha sürdürülebilir yöntemlerin benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Asfalt geri dönüşümü, bu çerçevede oldukça önemli bir yere sahiptir. Geri kazanılmış asfalt kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük faydalar sağlamaktadır. İlk olarak, geri dönüştürülmüş asfalt, doğal agrega ve bağlayıcı madde kullanımını azaltarak yeni kaynaklara olan talebi azaltır (Tarsi vd., 2020). İkinci olarak, geri dönüştürülmüş asfaltın kullanımı, inşaat atıklarını azaltmakta ve depolama sahalarında biriken malzeme miktarını düşürmektedir.

RAP kullanımını aynı zamanda enerji tasarrufu sağlar. Yeni asfalt karışımları üretmek için ihtiyaç duyulan enerji miktarı, geri kazanılmış asfalt kullanımıyla birlikte önemli ölçüde azalır. Sıcak karışım geri dönüşümde enerji tüketimi yüksek olmasına rağmen, soğuk karışım teknikleri enerji tüketimini daha da düşürmektedir (Magar vd., 2022). Sürdürülebilirlik, sadece çevresel faydaları değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliği de içermektedir. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarının kullanılması, yerel iş gücünün ve altyapının korunmasına katkı sağlayarak sosyal sürdürülebilirlik hedeflerini de destekler.

## **Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kullanımının Amaçları (Ekonomik ve Çevresel)**

Geri dönüştürülmüş asfalt kullanımının en önemli iki amacı ekonomik tasarruf ve çevresel korumadır. Ekonomik açıdan bakıldığında, geri dönüştürülmüş asfalt kullanımı, özellikle yol yapımında maliyetleri ciddi şekilde düşürür. Bu maliyet düşüşü, yeni malzemelerin kullanılmasına olan ihtiyacın azalması ve işçilik maliyetlerinin azalması ile sağlanır. Aynı zamanda, geri dönüştürülmüş asfaltın kullanımı, yeni malzemeler için ihtiyaç duyulan taşımacılık maliyetlerini de düşürmektedir (Hussain & Yanjun, 2013).

Çevresel açıdan bakıldığında, RAP kullanımı, doğal kaynakların korunmasına ve atık malzemelerin azaltılmasına doğrudan katkıda bulunur. Asfalt geri dönüşümü, fosil yakıtların daha az kullanılması ve dolayısıyla karbon ayak izinin düşürülmesi anlamına gelir. Özellikle sıcak karışım asfalt üretimi sırasında kullanılan enerji miktarı önemli oranda azalarak, atmosfere salınan sera gazı miktarının düşmesine katkı sağlar (Pradyumna vd., 2013). Ayrıca, geri dönüştürülmüş asfalt kullanımı, yol kaplama projelerinde ortaya çıkan atık malzemelerin depolama sahalarına gönderilmesini de önler.

Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş asfalt kullanımı, hem maliyetlerin düşürülmesi hem de çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından büyük bir öneme sahiptir. Yol yapımında geri kazanılmış asfalt kaplamalarının kullanılması, ekonomik faydaların yanı sıra çevresel koruma sağlamaya devam etmektedir.

### **GERİ KAZANILMIŞ ASFALT KAPLAMASI (RAP) TEKNOLOJİLERİ**

RAP kullanımı, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük avantajlar sağlar. Bu bölümde, sıcak ve soğuk karışım geri dönüşüm yöntemleri, yerinde geri dönüşüm ve merkezi tesislerde geri dönüşüm süreçleri ile çok döngülü geri dönüşümün fizibilitesi ele alınacaktır.

#### **Sıcak Karışım Geri Dönüşüm Yöntemleri**

Sıcak karışım geri dönüşüm yöntemi, geri kazanılmış asfalt kaplamalarının yeniden kullanılmasında en yaygın tercih edilen teknolojilerden biridir. Bu yöntemde, geri dönüştürülen asfalt yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak yeni asfalt karışımlarına entegre edilir. Genellikle %20 ile %50 oranında RAP, sıcak karışımlarda kullanılmaktadır. Bu oran, performans gereksinimlerine göre artırılabilir veya azaltılabilir (Hussain & Yanjun, 2013). Sıcak karışımın ana avantajları, malzemenin yüksek dayanıklılık göstermesi ve yol yüzeyinin uzun ömürlü olmasıdır. Bu süreçte kullanılan yüksek sıcaklıklar, geri kazanılmış asfaltın eski bağlayıcılarını yeniden aktive ederek yeni karışımlarla homojen bir şekilde karışmasını sağlar.

Sıcak karışım asfalt teknolojisi, özellikle aşınmaya karşı dayanıklılık ve yoğun trafik gerektiren otoyollarda sıklıkla tercih edilir. Aynı zamanda, enerji tüketimi ve karbon salınımı gibi çevresel etkileri minimize etmek için yenileyici katkıları da eklenir (Cui Ming vd., 2023). Ancak bu yöntem, diğer geri dönüşüm yöntemlerine kıyasla daha fazla enerji tüketimi ve karbon emisyonuna neden olabilir, bu da çevresel sürdürülebilirlik açısından bir dezavantaj olarak kabul edilir.

### **Soğuk Karışım Geri Dönüşüm Yöntemleri**

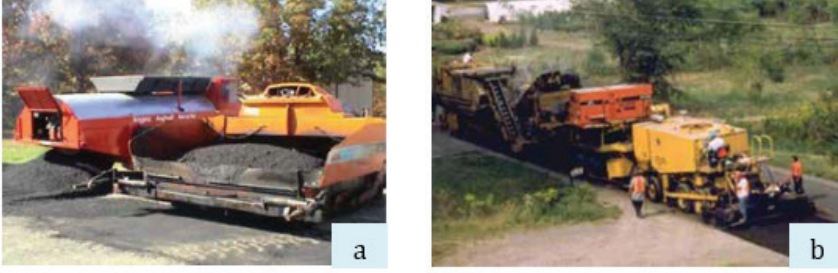
Soğuk karışım geri dönüşüm yöntemleri, geri kazanılmış asfalt malzemesinin oda sıcaklığında işlenmesini içerir. Bu yöntem, özellikle düşük enerji tüketimi ve karbon ayak izinin azaltılması açısından avantajlıdır. Soğuk karışımında, geri kazanılmış asfalt, soğuk bağlayıcılar veya emülsiyonlar ile karıştırılarak yeniden işlenir. Bu teknik, özellikle yerel yollar ve daha az trafiğe maruz kalan bölgelerde yaygındır çünkü soğuk karışımların sertleşme süreleri daha uzundur ve genellikle dayanıklılık açısından sıcak karışımlara göre daha az performans gösterir (Pouranian & Shishebor, 2019).

Soğuk karışımın bir diğer avantajı ise, sıcak karışıma göre daha düşük maliyetli olmasıdır. Ayrıca, enerji tüketimi ve hava kirliliği emisyonları açısından önemli ölçüde daha çevre dostu bir yöntem olarak kabul edilir. Ancak, performans açısından bazı sınırlamaları vardır; özellikle yoğun trafik yüküne maruz kalan yollar için daha düşük mukavemet sunabilir (Rout vd., 2023).

### **Yerinde Geri Dönüşüm ve Merkezi Tesislerde Geri Dönüşüm**

Yerinde geri dönüşüm, geri kazanılmış asfalt kaplamasının doğrudan mevcut yol yüzeyinde işlenmesi anlamına gelir. Bu yöntem, malzemenin taşınmasına gerek kalmadan yerinde geri dönüştürülmesine olanak tanır ve bu sayede hem enerji tasarrufu sağlanır hem de çevresel etkiler en aza indirilir. Yerinde geri dönüşüm sırasında malzeme kazınarak çıkarılır, yenileyici maddeler eklenerek işlenir ve hemen ardından tekrar yol yüzeyine serilir. Bu yöntem özellikle kırsal ve düşük trafik yoğunluğuna sahip bölgelerde kullanılır (Tarsi vd., 2020).

Merkezi tesislerde geri dönüşüm ise, geri kazanılmış asfaltın bir geri dönüşüm tesisine taşınarak burada işlenmesini içerir. Merkezi tesislerde, geri dönüştürülmüş asfalt daha yüksek kalite kontrolü ile işlenebilir ve daha homojen bir karışım elde edilir. Bu süreç genellikle büyük yol yapım projelerinde ve yüksek kaliteli malzeme gerektiren otoyollarda tercih edilir. Merkezi tesislerin kullanımı, büyük ölçekli projelerde daha ekonomik olabilir, ancak malzemenin taşınması sırasında enerji tüketimi artabilir (Pradyumna vd., 2013).



Şekil 3. a) Sıcak yerinde geri dönüşüm b) Soğuk geri dönüşüm

### Çok Döngülü Geri Dönüşümün Fizibilitesi

Çok döngülü geri dönüşüm, asfaltın birden fazla kez geri dönüştürülmesini ifade eder. Bu süreçte geri dönüştürülmüş asfalt malzemesi tekrar ve tekrar kullanılır, bu da uzun vadede önemli ekonomik ve çevresel faydalar sağlar. Ancak, çok döngülü geri dönüşümde asfaltın performansının her geri dönüşüm döngüsünde bir miktar azalabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Her geri dönüşüm döngüsünde malzemenin bağlayıcı özelliklerinde bir kayıp yaşanır ve bu da yenileyici katkıların kullanımını gerektirir (Magar vd., 2022).

Çok döngülü geri dönüşümün fizibilitesi, kullanılan yenileyicilerin etkinliğine ve geri dönüştürülen asfaltın başlangıçtaki kalitesine bağlıdır. Yüksek kaliteli yenileyici katkıları kullanarak malzemenin bağlayıcı özellikleri her döngüde yeniden kazanılabilir ve bu da asfaltın ömrünü uzatabilir. Ayrıca, bu süreç, doğal kaynakların korunması ve atık miktarının azaltılması açısından büyük avantajlar sağlar.

Sonuç olarak, RAP teknolojileri, yol yapımında sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynar. Sıcak ve soğuk karışım yöntemleri, yerinde ve merkezi tesislerde geri dönüşüm ve çok döngülü geri dönüşüm, asfaltın tekrar kullanımı ile hem çevresel hem de ekonomik faydalar sunar.

### KARIŞIM TASARIMI VE GERİ DÖNÜŞÜM SÜREÇLERİ

#### Geri Kazanılmış Asfaltın Karışım Tasarımı

Geri kazanılmış asfalt kaplaması (RAP) içeren karışımların tasarımı, hem mekanik hem de çevresel performans açısından büyük önem taşır. RAP, yeniden kullanılabilir malzemelerin bir araya getirilmesiyle, daha sürdürülebilir asfalt karışımları elde edilmesine olanak sağlar. Bununla birlikte, karışım tasarımında, RAP'in içeriği, kullanılan bağlayıcılar ve geri dönüştürülmüş asfaltın mevcut durumu gibi birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmalar, RAP'in karışım oranı arttıkça, kari-

şımın performansının değiştiğini göstermektedir. Özellikle, daha yüksek oranda RAP kullanıldığında, asfaltın dayanıklılığı ve esnekliği azalabilir. Bu nedenle, optimal bir karışım tasarımı, hem yeni hem de geri dönüştürülmüş malzemelerin doğru bir şekilde harmanlanmasını gerektirir (Behnood, 2019)

RAP kullanımı için doğru bağlayıcı ve agregata bileşenlerinin seçilmesi, karışımın performansını doğrudan etkileyen önemli unsurlardır. Geri dönüştürülmüş malzemenin homojen bir şekilde yeni malzemelerle birleşmesi ve istenen mekanik özelliklerin elde edilmesi için karışım tasarımı dikkatle yapılmalıdır (Dony vd., 2013a).

### **Bağlayıcı ve Agregata Özelliklerinin İncelenmesi**

Bağlayıcı ve agregalar, asfalt karışımlarının mekanik performansını belirleyen en önemli unsurlardır. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplamasında, bağlayıcı malzemenin yaşlanmış olması, performans üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Bağlayıcılar yaşlandıkça, asfaltın esnekliği azalır ve çatlama riski artar. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş asfalt kaplamasının bağlayıcı özelliklerinin yeniden incelenmesi ve uygun yenileyici maddelerle iyileştirilmesi gerekmektedir (Kaseer vd., 2019).

Agregata özelliklerinin incelenmesi de karışımın dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir. Geri kazanılmış asfaltın içerdiği agregalar, yeni agregata malzemeleri ile harmanlandığında, agregaların boyut dağılımı, sertlik ve diğer fiziksel özellikler dikkatle incelenmelidir. Özellikle, geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarında, agregaların homojen dağılımı, karışımın uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır (Doh vd., 2008).

### **Yenileyici Katkılar ve Yenileme Mekanizması**

Yenileyici maddeler, geri kazanılmış asfalt kaplamasındaki yaşlanmış bağlayıcıların mekanik ve viskoelastik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Yenileyiciler, asfaltın esnekliğini ve çatlama direncini artırarak karışımın performansını iyileştirir. Yapılan araştırmalar, çeşitli yenileyici maddelerin, geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarında yaşlanmış bağlayıcıların özelliklerini başarılı bir şekilde geri kazandırabileceğini göstermiştir. Örneğin, bitkisel yağlar, atık yağlar ve diğer organik bazlı yenileyiciler, asfaltın esnekliğini ve dayanıklılığını artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Pasetto vd., 2021).

Yenileyici maddelerin doğru miktarda kullanılması, karışımın kısa ve uzun vadeli performansı açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, kullanılan yenileyicilerin etkili olabilmesi için karışımın homojen bir şekilde harmanlanması gerekmektedir. Bu süreçte, karışım tasarımında kullanılan yenileyici madde miktarının optimum seviyede olması, karışımın mekanik özelliklerinin korunmasını sağlar (Kaseer vd., 2020).

## **Geri Dönüşümde Kullanılan İnovatif Malzemeler ve Ekipmanlar**

Geri kazanılmış asfalt kaplamasının geri dönüştürülmesi sürecinde kullanılan malzemeler ve ekipmanlar, karışımın kalitesini doğrudan etkiler. Yenilikçi teknolojiler ve malzemeler, geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının performansını artırmak için sürekli olarak geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Örneğin, atık yağlar, geri dönüştürülmüş lastik ve biyolojik bazlı yenileyiciler, geri kazanılmış asfaltın mekanik özelliklerini iyileştiren malzemeler arasında yer alır. Ayrıca, modern ekipmanlar, geri dönüştürülmüş malzemelerin daha homojen bir şekilde harmanlanmasını sağlayarak karışım kalitesini artırır (Bilema vd., 2021).

Geri dönüşümde kullanılan inovatif ekipmanlar, geri kazanılmış asfaltın yerinde geri dönüşümünü kolaylaştırarak süreçleri hızlandırır. Bu ekipmanlar, malzemenin taşınmasını ve işlenmesini en aza indirerek hem enerji tasarrufu sağlar hem de çevresel etkiyi azaltır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş asfaltın geri kazanım sürecinde, malzemenin kalitesini artırmak için yeni nesil bağlayıcılar ve yenileyici maddeler kullanılır (Zaumanis vd., 2016).

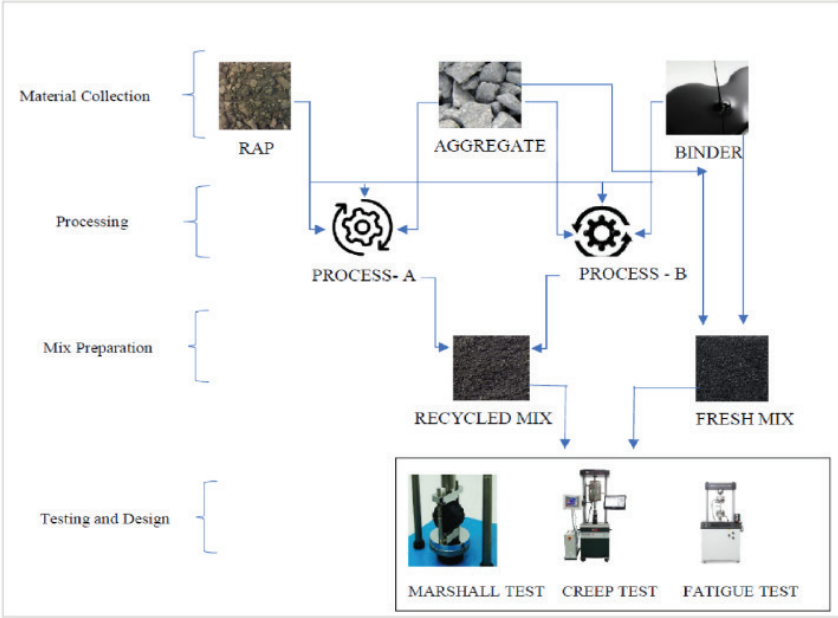
Sonuç olarak, geri kazanılmış asfalt kaplamasının karışım tasarımı, bağlayıcı ve agrega özelliklerinin iyileştirilmesi, yenileyici maddeler ve inovatif ekipmanların kullanımı ile optimize edilebilir. Bu süreçler, yol yapımında daha sürdürülebilir ve ekonomik çözümler sunarak, çevresel etkileri en aza indirir ve malzeme maliyetlerini düşürür.

## **GERİ DÖNÜŞÜMDE KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR**

### **Geri Kazanılmış Asfaltın Karışım Tasarımı**

Geri kazanılmış asfalt (RAP) içeren karışımlarda yaşlanmış bağlayıcılar, yeni bağlayıcılarla homojen bir şekilde karışmadığında harmanlama verimliliği düşebilir. Bu durum, karışımın performansını ve dayanıklılığını olumsuz etkileyebilir. Bağlayıcı uyumsuzluğu, özellikle yüksek oranda RAP kullanıldığında belirgin hale gelir. Bu zorlukları aşmak için, bazı çalışmalar bağlayıcıların viskozitesini ayarlamak amacıyla yumuşatıcı ve yenileyici katkıların kullanılmasını önermektedir (Bajaj vd., 2020). Ayrıca, farklı bağlayıcı ve yenileyici katkıların harmanlama üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışmalar, fiziksel ve kimyasal uyum sağlayacak kombinasyonların kullanılmasını önermektedir (Cao vd., 2020).





Şekil 4. RAP için karışım tasarım süreci.

### Yaşlanmış Bağlayıcının Etkileri ve Kalite Kontrolü

RAP içeren asfalt karışımları, özellikle yaşlanmış bağlayıcıların sertleşmesi ve kırılğan hale gelmesi nedeniyle kalite kontrolü zor bir hale gelir. Yaşlanmış bağlayıcı, karışımın çatlama direncini azaltarak yol yüzeyinin ömrünü kısaltabilir. Yaşlanmış bağlayıcıların fiziksel ve kimyasal özelliklerini analiz etmek için kullanılan yöntemler, yaşlanmanın etkilerini anlamada kritik öneme sahiptir (Kou vd., 2017). Ayrıca, laboratuvar ortamında hızlandırılmış yaşlanma testleri yaparak uzun vadeli performans tahminleri de geliştirilmektedir (Mollenhauer vd., 2010).

### Geri Dönüşüm Oranları ve Performans Sorunları

Yüksek oranlarda geri dönüşüm malzemesi kullanımı, karışımın sertleşmesine ve çatlama direncinin azalmasına neden olabilir. Özellikle %30 ve üzeri geri dönüşüm oranları, karışımın esnekliğini ve çatlama direncini etkileyerek performans sorunlarına yol açabilir (Dony vd., 2013b). Bu performans sorunlarının üstesinden gelmek için, geri dönüştürülmüş malzemeye uygun bağlayıcı oranının dikkatlice ayarlanması önemlidir. Çalışmalar, yüksek RAP oranları için daha fazla bağlayıcı kullanımı veya daha yumuşak bağlayıcılar ile harmanlamanın faydalı olabileceğini göstermektedir (Haddadi vd., 2019).



## GERİ KAZANILMIŞ ASFALT KAPLAMASININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

### Mukavemet, Dayanıklılık ve Mikro Yapı Özellikleri

Gerri kazanılmış asfalt kaplaması (RAP) kullanılan asfalt karışımlarının mukavemet, dayanıklılık ve mikro yapı özellikleri, karışımın uzun ömürlü performansını etkileyen en kritik faktörlerden biridir. RAP karışımlarında, bağlayıcı oksidasyonu ve agregaların mikro yapısal değişiklikleri mukavemeti doğrudan etkiler. Örneğin, yaşlanmış asfalt bağlayıcıları karbonil ve sülfoksit gruplarında artış gösterirken, bu durum karışımın çatlama direncini azaltabilir (Poulikakos vd., 2014). Ayrıca, RAP içeren karışımların sertlik modülü daha yüksektir, bu da özellikle yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığı artırır ancak çatlama riskini de yükseltebilir.

### Gerri Kazanılmış Asfalt Kullanılan Karışımların Uzun Dönem Performansı

RAP karışımlarının uzun dönem performansı, özellikle suya dayanıklılık ve aşınma direnci açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Uzun dönem dayanıklılık testleri, mevsimsel sıcaklık ve nem değişimlerinin, RAP karışımlarının mukavemet ve sertlik özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir (Goldoni vd., 2022). Alkali ile aktive edilmiş uçucu kül stabilizatörü kullanılan RAP karışımları, 365 gün boyunca %32'ye varan dayanıklılık seviyelerine ulaşarak, zemin stabilizasyon gereksinimlerini karşılayabilecek niteliktedir. Örneğin, ABD'deki deneysel çalışmalar, 75% RAP içeren karışımların uzun dönem performans açısından başarılı sonuçlar verdiğini, ancak stabilizasyon malzemelerinin dayanıklılık açısından kritik rol oynadığını göstermiştir (Puppala vd., 2017).

### Yüzey, Temel ve Alt Temel Katmanlarındaki Uygulamalar

RAP, yüzey kaplama katmanlarında yüksek dayanıklılık sunarken, temel ve alt temel katmanlarda kullanıldığında farklı stabilizasyon yöntemleriyle daha iyi performans sergiler. Uygulama yerine göre performans gösteren bu karışımlar, yüzeyde aşınma direncini artırırken temel katmanda mukavemet sağlar. Örneğin, Hindistan'da yapılan bir çalışmada, uçucu kül ile stabilizasyon uygulaması ile elde edilen RAP karışımları, özellikle yüzey ve temel katmanlarında başarıyla uygulanmıştır. RAP stabilizasyonu için kullanılan uçucu kül ve diğer bağlayıcıların, özellikle yoğun trafiğe maruz kalan yüzey kaplamalarında yüksek performans sağladığı görülmektedir (Avirneni vd., 2016).

Gerri kazanılmış asfalt kaplamalarının performans değerlendirilmesi, mukavemet, mikro yapı ve dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra yüzey ve temel katmanlardaki farklı uygulamalarına göre optimize edilebilir. RAP karışımlarının uzun ömürlü performansı, doğru stabilizasyon teknikleri

ve çevresel koşullara uygun tasarımlarla iyileştirilebilir.

## **ÇEVRESEL VE EKONOMİK DEĞERLENDİRME**

### **Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) Yaklaşımları**

Yaşam Döngüsü Analizi (LCA), geri kazanılmış asfalt kaplaması (RAP) kullanımının çevresel etkilerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. LCA, asfalt kaplamanın ham madde temininden geri dönüşüm aşamasına kadar tüm süreci kapsayarak enerji tüketimini, sera gazı emisyonlarını ve doğal kaynak tüketimini analiz eder. Örneğin, yüksek oranlarda RAP kullanımı, ham asfalt karışımlara göre %16 enerji tasarrufu ve %20 karbon emisyonu azalımı sağlayabilir (Chou & Lee, 2015). LCA, bu tür analizlerle sürdürülebilir asfalt karışımları tasarımında karar vericilere rehberlik eder ve daha az çevresel etki oluşturan alternatiflerin belirlenmesini sağlar.

### **Ayak İzi ve Enerji Tasarrufu**

RAP kullanımı, karbon ayak izini azaltmada ve enerji tasarrufu sağlamada büyük bir potansiyele sahiptir. RAP'in üretim süreci sırasında kullanılan ham asfaltın miktarının azalması, hem enerji tüketimini düşürür hem de karbon salınımını önemli ölçüde azaltır. Örneğin, %50 RAP içeren karışımların, %10-15 oranında enerji ve su tüketiminde azalma sağladığı görülmüştür (Giani vd., 2015). Karbon ayak izi ve enerji tüketimini daha da azaltmak için sıcak karışım asfalt yerine, daha düşük sıcaklıklarda üretilen ılık karışım asfalt gibi teknolojiler de tercih edilebilir. Bu teknolojilerle birlikte, yüksek oranlarda RAP kullanımı, çevresel etkiyi daha da azaltır (Bizarro vd., 2021).

### **Maliyet Etkinliği ve Doğal Kaynakların Korunması**

RAP'in asfalt karışımlarında kullanımı, maliyet etkinliğinin yanı sıra doğal kaynakların korunmasını sağlar. Ham asfalt yerine geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, malzeme maliyetlerini %14 oranında azaltabilir (Rafiq vd., 2021). RAP kullanımının artması, doğal kaynakların korunmasına ve yol yapımında maliyet etkinliğine katkıda bulunur. Özellikle yüksek trafik yoğunluğuna sahip bölgelerde, RAP ile yapılan asfalt kaplamalar, daha az bakım gerektirir, bu da maliyetlerin daha da azalmasını sağlar (Hong & Prozzi, 2018).

Sonuç olarak, geri kazanılmış asfalt kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet tasarrufu sağlamak açısından asfalt kaplama endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Yaşam Döngüsü Analizi ile karbon ayak izini ve enerji tüketimini azaltan bu uygulamalar, yol altyapısının sürdürülebilirliğine katkıda bulunarak doğal kaynakların korunmasına destek olur.

## GELECEK POTANSİYELİ DEĞERLENDİRME

### Yenilikçi Teknolojiler ve Gelecekteki Fırsatlar

Geri kazanılmış asfalt kaplamasının (RAP) sürdürülebilir kullanımında, yenilikçi teknolojiler kilit rol oynar. Özellikle son yıllarda, asfalt karışımlarında karbon ayak izini azaltmayı hedefleyen teknolojiler geliştirilmiştir. Örneğin, düşük sıcaklıkta karıştırılan asfalt (Warm Mix Asphalt - WMA) teknolojisi, hem enerji tüketimini azaltmakta hem de çevresel etkileri minimize etmektedir (Anthonissen J, 2015). Bununla birlikte, bitüm stabilize malzemeler, bitkisel bazlı katkıları ve geri dönüştürülmüş plastik ile modifiye edilmiş asfalt gibi yeni bileşenler de asfaltın dayanıklılığını artırarak kullanım süresini uzatmaktadır (Perucca vd., 2022).

### Sürdürülebilir Yol Yapımında Geri Dönüşüm Stratejileri

Sürdürülebilir yol yapımı için geri dönüşüm stratejileri, çevresel ve ekonomik açıdan önemlidir. Örneğin, yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) analizleriyle geri dönüştürülmüş asfaltın çevresel etkileri ölçülerek sürdürülebilir bir yaklaşım benimsenmektedir (Condurat & Ioniță, 2018). Bu stratejiler, doğal kaynakların daha az tüketilmesi ve sera gazı emisyonlarının azalması gibi faydalar sağlar. Avrupa'da yapılan çalışmalarda, geri dönüştürülmüş asfaltın yeniden kullanım oranını artırmak için karbon salınımını azaltmayı hedefleyen kamu ihaleleri uygulamaya konmuştur. Bu stratejiler, çevresel etkinin azaldığını ve maliyetlerin düştüğünü gösteren başarılı bir yaklaşımdır (Lima vd., 2021).

### Politika ve Uygulama Yönlendirmeleri

Geri dönüştürülmüş asfalt kullanımı için politika ve uygulama yönergeleri, sürdürülebilirliği teşvik etmek için oluşturulmaktadır. Örneğin, Avrupa'daki çevre odaklı kamu ihale sistemleri, düşük karbon salımlı yöntemleri destekleyen düzenlemeleri kapsamaktadır (Mantalovas & Mino, 2019). Amerika Birleşik Devletleri'nde ise, altyapı projelerinde RAP kullanımını artırmayı amaçlayan ulusal ve eyalet bazında düzenlemeler hayata geçirilmiştir. Bu politikalar, yüksek oranda geri dönüşümlü asfalt kullanımını destekleyerek çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği teşvik etmektedir.

Geri kazanılmış asfalt kaplamasının gelecekteki potansiyeli, yenilikçi teknolojiler, sürdürülebilir yol yapımı stratejileri ve çevre dostu politikalarla desteklenmektedir. Bu unsurlar, çevresel etkinin azaltılması ve ekonomik fayda sağlamada kritik rol oynar.

## SONUÇLAR

Geri dönüştürülmüş asfalt kaplaması teknolojilerinin uygulanması, yol yapımında hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sağlamaktadır. RAP'in kullanımının sağladığı kaynak tasarrufu ve karbon emisyonlarındaki azalma, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Ayrıca, sıcak ve soğuk karışım, yerinde ve merkezi tesislerde geri dönüşüm ve çok döngülü geri dönüşüm uygulamaları, maliyetleri düşürmenin yanı sıra doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak, yaşlanmış bağlayıcıların yol performansına etkileri ve karışım tasarımıındaki bağlayıcı uyumu gibi teknik zorluklar halen çözülmeyi beklemektedir. Bu sorunlar, yeni bağlayıcı teknolojileri ve yenileyici katkıların kullanımı ile giderilebilir.

Yaşlanmış asfalt bağlayıcılarının yenileyici katkılarla performansının artırılması için daha fazla araştırma yapılmalıdır. Özellikle çok döngülü geri dönüşüm çalışmalarında, geri dönüştürülmüş asfaltın her geri dönüşüm döngüsünde performansını nasıl koruyacağına dair yeni stratejiler geliştirilmeli ve uzun vadeli kullanımda aşınma etkilerini azaltacak yöntemler keşfedilmelidir. Karbon ayak izi ve enerji tasarrufu analizlerinin sürdürülebilir yol yapımı politikalarının oluşturulmasında daha belirgin bir rol üstlenmesi sağlanmalıdır. Son olarak, farklı ülkelerdeki geri dönüşüm uygulamalarını göz önünde bulundurarak, RAP kullanımının yaygınlaşmasını teşvik eden uluslararası standartlar ve politika önerileri geliştirilmelidir.

## KAYNAKÇA

- Anthonissen J, D. (2015). Using carbon dioxide emissions as a criterion to award road construction projects: a pilot case in Flanders. *Journal of Cleaner Production*, 102, 96-102. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2592047>
- Avirneni, D., Peddinti, P. R. T., & Saride, S. (2016). Durability and long term performance of geopolymer stabilized reclaimed asphalt pavement base courses. *Construction and Building Materials*, 121, 198-209. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138227350>
- Bajaj, A., Martin, A. E., King, G. N., Glover, C. J., Kaseer, F., & Arámbula-Mercado, E. (2020). Evaluation and classification of recycling agents for asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 260, 119864. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:224986442>
- Behnood, A. (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 231, 171-182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>
- Bilema, M., Aman, M. Y., Hassan, N. A., Memon, Z. A., Omar, H. A., Yusoff, N. I. M., & Milad, A. (2021). Mechanical Performance of Reclaimed Asphalt Pavement Modified with Waste Frying Oil and Crumb Rubber. *Materials*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ma14112781>
- Bizarro, D. E. G., Steinmann, Z. J. N., Nieuwenhuijse, I., Keijzer, E., & Hauck, M. (2021). Potential Carbon Footprint Reduction for Reclaimed Asphalt Pavement Innovations: LCA Methodology, Best Available Technology, and Near-Future Reduction Potential. *Sustainability*, 13, 1382. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234053390>
- Cao, Z., Chen, M., Han, X., Wang, R., Yu, J., Xu, X., & Xue, L. (2020). Influence of characteristics of recycling agent on the early and long-term performance of regenerated SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 237, 117631. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213438339>
- Chou, C.-P., & Lee, N. (2015). Assessment of Life Cycle Energy Saving and Carbon Reduction of Using Reclaimed Asphalt Concrete. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109394635>
- Condurat, M., & Ioniță, G. (2018). The environmental performances of reclaimed asphalt and bituminous sand pavements for transition toward low carbon mobility. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 21, 50-62. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135437480>
- Cui Ming, N. G., ANIS AINA, RAMADHANSYAH PUTRA JAYA, & NICOLE LIEW SIAW ING. (2023). Analysis of Reclaimed Asphalt Pavement with

- Rejuvenating Materials. *CONSTRUCTION*, 3(1), 75-86. <https://doi.org/10.15282/construction.v3i1.8910>
- Doh, Y. S., Amirkhanian, S. N., & Kim, K. W. (2008). Analysis of unbalanced binder oxidation level in recycled asphalt mixture using GPC. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1253-1260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.026>
- Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., & Navaro, J. (2013a). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent. *Construction and Building Materials*, 41, 175-181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.031>
- Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., & Navaro, J. (2013b). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent. *Construction and Building Materials*, 41, 175-181. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135616390>
- Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources Conservation and Recycling*, 104, 224-238. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108741235>
- Goldoni, A., Pelissaro, D., Silveira, E., Prietto, P. D. M., & Rosa, F. (2022). Durability and mechanical long-term performance of reclaimed asphalt pavement stabilized by alkali-activation. *Soils and Rocks*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:254869529>
- Haddadi, S. S., Coleri, E., & Sreedhar, S. (2019). Strategies to improve performance of reclaimed asphalt pavement-recycled asphalt shingle mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 22, 201-212. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:140469875>
- Hong, F., & Prozzi, J. A. (2018). Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections. *Road Materials and Pavement Design*, 19, 1816-1831. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115779262>
- Hu, X., Nie, Y., Feng, Y., & Zheng, Q. (2012). Pavement Performance of Asphalt Surface Course Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Journal of Testing and Evaluation*, 40(7), 1-7. <https://doi.org/10.1520/JTE20120128>
- Hussain, A., & Yanjun, Q. (2013). Effect of Reclaimed Asphalt Pavement on the Properties of Asphalt Binders. *Procedia Engineering*, 54, 840-850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.077>



- Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G., Conti, C., & Canestrari, F. (2020). Investigating the “circular propensity” of road bio-binders: Effectiveness in hot recycling of reclaimed asphalt and recyclability potential. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120193. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213479546>
- Kaseer, F., Cucalon, L. G., Arámbula-Mercado, E., Martin, A. E., & Epps, J. A. (2020). Practical Tools for Optimizing Recycled Materials Content and Recycling Agent Dosage for Improved Short- and Long-Term Performance and Rejuvenated Binder Blends and Mixtures. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213732812>
- Kaseer, F., Martin, A. E., & Arámbula-Mercado, E. (2019). Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. *Construction and Building Materials*, 211, 974-987. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286>
- Kou, C.-H., Xiao, P., Kang, A., Mikhailenko, P., Baaj, H., & Wu, Z. (2017). Methods to Evaluate the Aging Grades of Reclaimed Asphalt Binder. *Applied Sciences*, 7, 1209. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3279999>
- Li, Q., Sun, G., Lu, Y., Meng, Y., Luo, S., & Gao, L. (2021). Effects of warm-mix asphalt technologies and modifiers on pavement performance of recycled asphalt binders. *Journal of Cleaner Production*, 282, 125435. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:230572499>
- Lima, M. S. S., Hajibabaei, M., Hesarkazzazi, S., Sitzenfrei, R., Buttgerit, A., Queiroz, C., Haritonovs, V., & Gschösser, F. (2021). Determining the Environmental Potentials of Urban Pavements by Applying the Cradle-to-Cradle LCA Approach for a Road Network of a Midscale German City. *Sustainability*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:244167965>
- Magar, S., Xiao, F., Singh, D., & Showkat, B. (2022). Applications of reclaimed asphalt pavement in India – A review. *Journal of Cleaner Production*, 335, 130221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130221>
- Mantalovas, K., & Mino, G. Di. (2019). The Sustainability of Reclaimed Asphalt as a Resource for Road Pavement Management through a Circular Economic Model. *Sustainability*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:159434058>
- Mollenhauer, K., Piérard, N., Tuar, M., Mouillet, V., & Gabet, T. (2010). Development and validation of a laboratory aging method for the accelerated simulation of reclaimed asphalt. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25, 631-636. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136616844>
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2021). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. *Journal of Traffic and Transportation*

Engineering (English Edition), 8(6), 1022-1035. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.12.007>

- Perucca, M., Capuano, L., Magatti, G., Rosa, F., & Mantecca, P. (2022). Environmental Performance of Road Asphalts Modified with End-of-Life Hard Plastics and Graphene: Strategies for Improving Sustainability Processes. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253136438>
- Poulikakos, L. D., dos Santos, S., Bueno, M., Kuentzel, S. L., Hugener, M., & Partl, M. N. (2014). Influence of short and long term aging on chemical, microstructural and macro-mechanical properties of recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 51, 414-423. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137402158>
- Pouranian, M. R., & Shishehbor, M. (2019). Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review. *Environments*, 6(6). <https://doi.org/10.3390/environments6060073>
- Pradyumna, T. A., Mittal, A., & Jain, P. K. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 1149-1157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.211>
- Puppala, A. J., Pedarla, A., Chittoori, B. C. S., Ganne, V. K., & Nazarian, S. (2017). Long-Term Durability Studies on Chemically Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material as a Base Layer for Pavements. *Transportation Research Record*, 2657, 1-9. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:114161696>
- Rafiq, W., Musarat, M. A., Altaf, M., Napiyah, M. Bin, Sutanto, M. H., Alaloul, W. S., Javed, M. F., & Mosavi, A. (2021). Life Cycle Cost Analysis Comparison of Hot Mix Asphalt and Reclaimed Asphalt Pavement: A Case Study. *Sustainability*, 13, 4411. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234856221>
- 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>
- Sarvanantha, A., & Mampearachchi, W. K. (2023). Quality Enhancement of Recycled Asphalt Product Using Warm Mix Asphalt Technology. 2023 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), 231-234. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266494520>
- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. *Materials*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/ma13184052>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2016). Towards production of 100% recycled asphalt. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136062355>

Zheludkevich, M., Serra, R., Montemor, M., Yasakau, K., Salvado, I. M., & Ferreira, M. (2005). Nanostructured sol-gel coatings doped with cerium nitrate as pre-treatments for AA2024-T3: corrosion protection performance. *Electrochimica Acta*, 51(2), 208–217. (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.03.081>).



# Bölüm 4

## POLİETİLEN VE PROPİLEN HOMOPOLİMER MODİFİYELİ ASFALT BAĞLAYICILAR: REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

*Mustafa Akpolat<sup>1</sup>*

*Muhammed Ertuğrul Çeloğlu<sup>2</sup>*

*Merve Gülfer Bozdemir<sup>3</sup>*

---

1 Doç. Dr., Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mustafaakpolat@munzur.edu.tr

2 Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, meceloglu@bingol.edu.tr

3 Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi yerine Erzurum Teknik Üniversitesi, merve.ozcan@erzurum.edu.tr

## GİRİŞ

Plastik malzemeler günlük hayatımızda büyük ölçüde mevcuttur ve neredeyse endüstrinin her dalında kullanılmaktadır (Datta ve Kopczyńska, 2016; Dwivedi, Mishra, Mondal, ve Srivastava, 2019). Plastik içecek kapları, şişeler, ev eşyaları, plastik saklama kapları, borular vb. gibi çeşitli ürünlerin üretiminde hammadde olarak kullanılırlar. Ancak bu ürünler zamanla atık malzeme haline gelmekte ve ciddi çevre sorunlarına neden olmaktadır (Behnood ve Modiri Gharehveran, 2019).

Son on yılda dünya çapında önemli ölçüde artan plastik tüketimi, bertaraf ve geri dönüştürmenin sınırlı alternatif yollarıyla ciddi çevre kirliliğine neden olduğu belirtilmektedir (Moore, 2008; Rahman, Mohajarani, ve Giustozzi, 2020).

Literatürde, farklı polietilen türleri arasında LLDPE'nin en yüksek yıllık büyüme oranını gösterdiği, ardından yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) olduğu bildirilmektedir (Kaminsky ve Fernandez, 2008).

Asfalt bağlayıcıların özelliklerinin iyileştirilmesi için polimerlerin kullanılması, plastik atık kullanımına kıyasla daha yüksek yol yapım maliyetlerine yol açabilir. Bu nedenle, son zamanlarda geri dönüştürülmüş plastik atıklar geniş çapta araştırılmaktadır. Ayrıca plastik atıkların ayrışmasının yarım asır veya daha fazla zaman alması nedeniyle uzun süreli çevre kirliliğine neden olduğu bilinmektedir (Teuten et al., 2009)(Thompson, Moore, vom Saal, ve Swan, 2009).

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yol uygulamaları için en önemli ve kapsamlı olarak çalışılan poliolefinik malzemelerdir (Behnood ve Modiri Gharehveran, 2019)(Liang et al., 2021). Son yıllarda araştırmacılar çabalarını, çevresel ve ekonomik faydaları nedeniyle saf polimerler yerine atık ve geri dönüştürülmüş polimerlerin (Z. Zhao, Xiao, ve Amirhanian, 2020)(Alghrafy, El-Badawy, ve Abd Alla, 2021), burada geri kazanılan polietilenin en çok kullanılan katkılardan biri olduğu ifade edilmektedir (Casey, McNally, Gibney, ve Gilchrist, 2008; Du, Jiang, Yuan, Xiao, ve Wang, 2020; Fang et al., 2013; Fang, Li, Zhang, ve Wang, 2008; Ho et al., 2006; Punith ve Veeraragavan, 2011; Zhang ve Hu, 2016).

Asfalt bağlayıcılara geri kazanılmış polietilenin eklenmesi, asfalt karışımlarının yüksek sıcaklık özellikleri, yorulma ömrü, düşük sıcaklıkta çatlama direnci ve su direnci gibi hizmet içi özelliklerini iyileştirebileceği belirtilmektedir. (Punith ve Veeraragavan, 2011)(Ibrahim, 2019)(Punith, Suresha, Raju, Bose, ve Veeraragavan, 2012)(Punith ve Veeraragavan, 2007).

Tekerlek izi, asfalt üstyapılarda en büyük sıkıntılardan biri olarak bilinmekte olup, son yıllarda asfalt üstyapıların tekerlek izi potansiyeli ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Sıcak iklimlerde ve asfalt kaplamaların ağır yüklere maruz kaldığı yerlerde asfalt kaplamanın üst katmanlarında biriken plastik deformasyon nedeniyle tekerlek izi oluşmaktadır.

Bu bozulma türünü, yolun uzunlamasına eksenini boyunca ve araç tekerlek yolundaki yoğunlaşma ve kayma deformasyonunun birleşiminden kaynaklandığı ileri sürülmektedir (Xu ve Huang, 2012). Çevresel koşullar (örn. sıcaklık, nem ve yaşlanma), araç hızı, tekerleğin temas basıncı ve bağlayıcı türü gibi diğer birçok faktör tekerlek izi oluşumuna katkıda bulunduğu belirtilmiştir (W. Zhao, Xiao, Amirkhanian, ve Putman, 2012).

Asfalt kaplamalarda tekerlek izi oluşumu hizmet ömrünü kısaltabileceği gibi otoyol kullanıcılarının güvenliğini tehlikeye atabilir. Bu bağlamda, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), asfalt bağlayıcıları modifiye etmek ve kalıcı deformasyonu azaltmak için kullanılabilen plastomerlerden biri olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Eweed, 2011; Moghadas Nejad, Gholami, Naderi, ve Rahi, 2015; Polacco, Stastna, Biondi, ve Zanzotto, 2006). Hisonghlo et al. (Hinislioğlu, Aras, ve Bayrak, 2005; Polacco, Berlincioni, Biondi, Stastna, ve Zanzotto, 2005) %2 HDPE katkı kullanımını ile kalıcı deformasyonların %34'e kadar azaltacağını belirtmişlerdir. Ayrıca Yeh ve ark. [31], HDPE ile modifiye edilmiş bağlayıcıların tekerlek izi potansiyelini ölçmek için Superpave parametresini ( $G^*/\sin\delta$ ) kullanmış ve asfalt bağlayıcının ağırlığına göre %5 polietilen eklenmesinin tekerlek izi parametresini önemli ölçüde artırdığını belirtmiştir.

Nejad ve ekibinin yaptığı çalışmada (Moghadas Nejad et al., 2015), saf bağlayıcıya %7'lik bir HDPE (ağırlıkça) eklenmesinin, kompleks modül değerlerini önemli ölçüde arttırdığı ve daha fazla tekerlek izi direnci ile sonuçlanan sünme uyumunu azalttığını belirtmişlerdir.

Düşük yoğunluklu polietilen ve öğütülmüş araç lastiği modifiyeli bağlayıcılar üzerine yapılan çalışmada katkıların bağlacının yüksek sıcaklık performansını arttırdığı ve asfalt endüstrisinde sürdürülebilirliği arttırabileceği belirtilmiştir (Duarte ve Faxina, 2021).

Bu kitap bölümünde atık malzeme olan plastiklerden düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen ve propilen homopolimer katkılarının asfalt bağlayıcının reolojik etkileri üzerine etkisi araştırılmıştır.

### **Materyal ve Metot**

#### *Materyal*

Bu çalışmada bağlayıcı içerisine %2 ve %4 oranında düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve propilen

homopolimer (PPH) katkıları ilave edilerek modifiye bağlayıcılar hazırlanmıştır. Çalışmada Batman TÜPRAŞ rafinesinden temin edilen B50/70 penetrasyon sınıfı asfalt bağlayıcı kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcının özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan bağlayıcı özellikleri

Özellikler	Standard	B 50/70
Penetrasyon (0,1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	51.25
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	52.2
Penetrasyon indeksi (PI)		-0.61
Özgül ağırlık		1.032
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	600
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	175

Modifiye bağlayıcılar proje kapsamında alınan ve Şekil 1’de görülen mekanik karıştırıcı ile 180 °C sıcaklıkta 1500 devir/dk’da 2 saat karıştırılarak hazırlanmıştır. Bağlayıcı kombinasyonu ve gösterimi Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Mekanik karıştırıcı

Tablo 2. Bağlayıcı kombinasyonu

Kullanılan katkı	Bağlayıcı ağırlığınca kullanılan katkı oranı (%)						
LDPE	0	2	4	0	0	0	0
HDPE	0	0	0	2	4	0	0
PPH	0	0	0	0	0	2	4
Gösterim	B	2L	4L	2H	4H	2P	4P



**Metot****Performans Seviyesi (PG)**

Superpave performans derecelendirmesi (PG), bir asfalt bağlayıcının özelliklerinin kullanıldığı koşullarla ilişkili olması gerektiği fikrine dayanmaktadır. Asfalt bağlayıcılar için bu, beklenen iklim koşullarının yanı sıra yaşlanma hususlarını da içermektedir. Bu nedenle, PG sistemi (eski penetrasyon ve viskozite derecelendirme sistemlerinde olduğu gibi) ortak bir test bataryası kullanır, ancak belirli bir asfalt bağlayıcının kullanım alanındaki belirli iklim koşullarına bağlı olan belirli sıcaklıklarda bu testleri geçmesi gerektiğini belirtmektedir. Bu nedenle, farklı iklim bölgelerinde kullanılan bir bağlayıcıların farklı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu kavram yeni olmamakla birlikte penetrasyon veya viskozite dereceli asfalt bağlayıcıların seçimi aynı mantığı izlemektedir. Ancak asfalt bağlayıcı özellikleri ve kullanım koşulları arasındaki ilişkiler Superpave PG sistemi ile daha eksiksiz ve daha kesin sonuç vermektedir (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, ve Kennedy, 1996). Bu çalışmada deney 10 rad/s de ve 58-82 °C sıcaklık aralığında (6 °C arttırılarak) ve şekil değiştirme kontrollü olarak yapılmıştır.

**Frekans Taraması**

Frekans taramaları genellikle tahribatsız deformasyon aralığında (Linear viscoelastic region-LVE) bir numunenin zamana bağlı davranışını tanımlama amacına hizmet eder. Yüksek frekanslar kısa zaman ölçeklerinde hızlı hareketi simüle etmek için kullanılırken, düşük frekanslar uzun zaman ölçeklerinde veya hareketsizken yavaş hareketi simüle eder. Uygulamada, frekans taramaları, polimerlerin davranışı ve iç yapısı ile dispersiyonların uzun vadeli kararlılığı hakkında bilgi toplamak için kanıtlanmış yöntemlerdir (Paar, 2016).

Frekans tarama testi Malvern DSR reometre cihazı ile yaşlanmamış bağlayıcılara 40-70 °C aralığında 10 °C sıcaklık artışı ile yapılmıştır. Deney, 25 mm paralel plaka ve 1 mm boşluk geometrisinde yapılmıştır. Test sırasında frekans, 0.1-100 rad/s aralığına ayarlanmıştır.

**Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR)**

MSCR deneyi, 25 mm plaka ve 1mm boşluk geometrisi kullanılarak 58 °C sıcaklıkta kısa dönem yaşlandırılmış saf ve modifiyeli bağlayıcılar üzerine yapılmıştır. Test, 20 döngü 0,1 kPa 10 döngü 3,2 kPa gerilme uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her döngü 1 sn kayma gerilmesi 9 sn geri dönmeden oluşmaktadır. 0,1 kPa kayma gerilimi lineer viskoelastik bölgedeki bir bağlayıcının davranışını karakterize ederken, 3,2 kPa gerilme seviyesi modifiye ve saf bağlayıcılar için lineer olmayan viskoelastik bölgedeki davranışı yansıtmaktadır.

Test sonucunda yüzde geri dönme (R) ve kalıcı sünme uyumu (Jnr) değerleri belirlenmektedir. Asfalt bağlayıcılar için ortalama yüzde geri dönme değerleri sırasıyla 0.1 kPa ( $R_{0.1}$ ) ve 3.2( $R_{3.2}$ ) kPa kayma gerilmeleri seviyesinde Denklem 1 ve 2'ye göre hesaplanmaktadır (AASHTO M332, 2015).

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [\varepsilon_r(0.1, N)]}{10} \quad (1)$$

$$R_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [\varepsilon_r(3.2, N)]}{10} \quad (2)$$

Burada  $\varepsilon_r(0.1, N)$  ve  $\varepsilon_r(3.2, N)$  N döngü sayısında sırasıyla 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesindeki yüzde geri dönme, N ise her bir gerilme seviyesindeki döngü sayısını ifade etmektedir.

AASHTO M332 standardına göre yüzde geri dönme (R), derecelendirme parametresi olarak kullanılmamaktadır. Bu parametre bağlayıcıda katkı varlığının bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Jnr parametresinin ise performans seviyesi kriterlerine göre tekerlek izi direnci ile daha uyumlu olduğu belirtilmektedir (Wasage, Stastna, ve Zanzotto, 2011) (Behnood, Shah, McDaniel, Beeson, ve Olek, 2016). 0.1 kPa (Jnr0.1) ve 3.2 kPa (Jnr3.2) için kalıcı sünme uyumu değerlerinin hesaplanması Denklem 2 ve 4'de,  $Jnr_{diff}$  değerinin (maksimum değeri %75 olan 0.1 kPa ile 3.2 kPa gerilmesindeki kalıcı sünme uyumu arasındaki fark) hesaplanması ise Denklem 5'te verilmiştir.

$$Jnr_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [Jnr(0.1, N)]}{10} \quad (3)$$

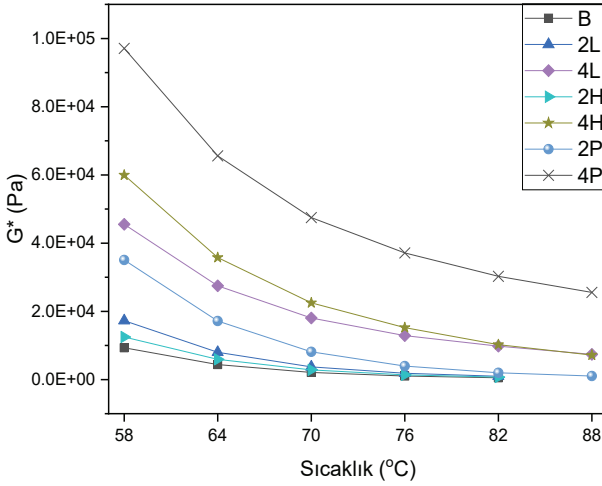
$$Jnr_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [Jnr(3.2, N)]}{10} \quad (4)$$

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1})}{Jnr_{0.1}} * 100 \leq 75 \quad (5)$$

## Bulgular ve Tartışma

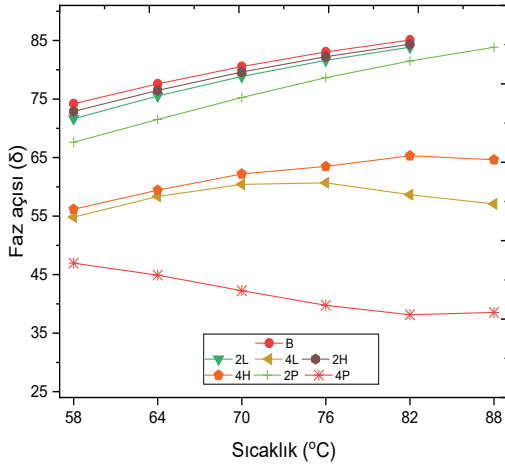
### Performans seviyesi (PG) test sonuçları

Şekil 2'de saf ve modifiye bağlayıcıların kompleks modül ( $G^*$ ) ve sıcaklık ilişkisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere katkı ilavesi ile bütün sıcaklıklarda  $G^*$  değerleri artmıştır. %2 oranında LDPE, HDPE ve PPH ilavesi ile 70 °C sıcaklıktaki  $G^*$  değerleri saf bağlayıcıya(B) göre sırasıyla 1.77, 1.36 ve 3.88 kat daha fazla kompleks modül değeri elde edilmiştir. Bu oran 76 °C sıcaklıkta sırasıyla 1.79, 1.35 ve 3.85 kat olmaktadır.



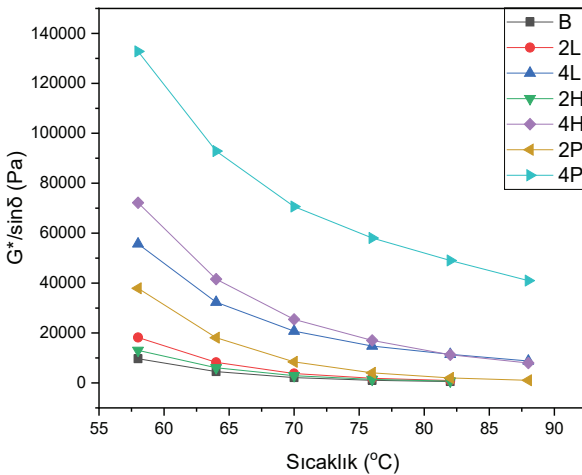
Şekil 2. Saf ve modifiye bağlayıcıların kompleks modül-sıcaklık ilişkisi

Şekil 3'te saf ve modifiye bağlayıcıların faz açısı ( $\delta$ ) ve sıcaklık ilişkisi verilmiştir. Şekle göre sıcaklık arttıkça %4 propilen katkıli bağlayıcı hariç faz açılarında artış meydana gelmiştir. En yüksek faz açısı değerlerini saf bağlayıcı verirken en düşük faz açısı değerlerini %4 PPH katkıli bağlayıcı vermiştir. Katkı ilavesi saf bağlayıcının faz açısı değerleri düşürülerek bağlayıcının daha esnek davranış sergilemesi sağlanmıştır. Ayrıca sıcaklık artışıyla faz açısında artış beklenirken %4 PPH katkıli bağlayıcının faz açısı düşmüştür. Buda propilen katkısının sıcaklık artışıyla bağlayıcının daha esnek davranış sergilemesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 3. Saf ve modifiye bağlayıcıların faz açısı-sıcaklık ilişkisi

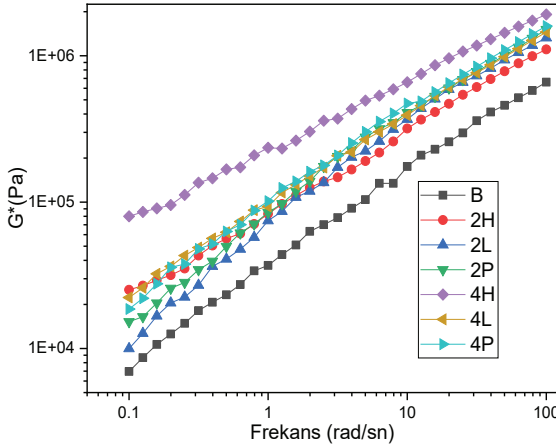
Saf ve modifiye bağlayıcıların tekerlek izi ve sıcaklık ilişkisi Şekil 4'te verilmiştir. Şekle göre katkı ilavesi ile saf bağlayıcının tekerlek izi parametresi artmıştır. En yüksek artışı %4 PPH katkısı sağlamıştır. %2 LDPE, %4 LDPE, %2 HDPE, %4 HDPE, %2 PPH ve %4 PPH katkılı bağlayıcılar 76 C'de saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1.80, 14.3, 1.36, 16.46, 3.90 ve 56.15 kat daha fazla tekerlek izi parametresi vermiştir. Buda bu bağlayıcılar ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların daha yüksek taşıt trafiğine cevap verebileceği ve tekerlek izi direncinin artacağına işaret etmektedir.



Şekil 4. Saf ve modifiye bağlayıcıların tekerlek izi-sıcaklık ilişkisi

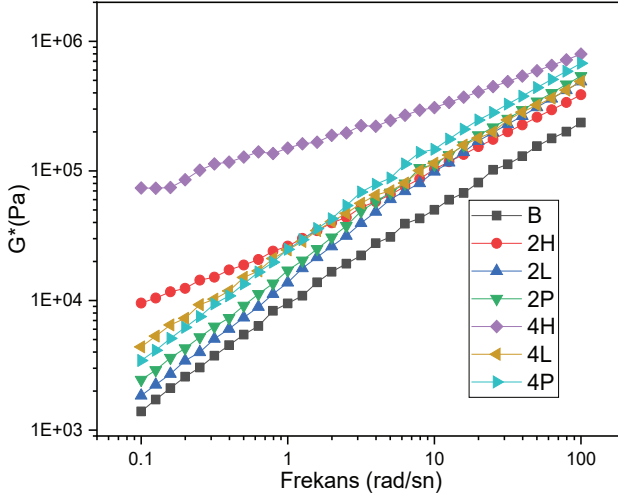
### Frekans taraması test sonuçları

Saf, düşük yoğunluklu polietilen katkı, yüksek yoğunluklu polietilen katkı ve propilen homopolimer katkıli bağlayıcıların 40, 50, 60 ve 70 °C'deki frekans taraması deneyinden elde edilen kompleks modül ( $G^*$ ) ve frekans değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 5, 6, 7 ve 8'de verilmiştir.



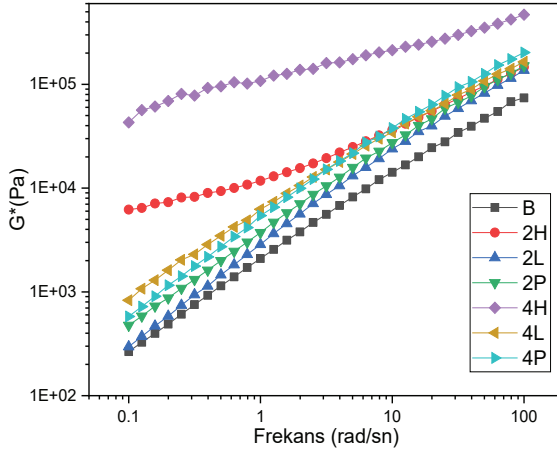
Şekil 5. Saf ve modifiye bağlayıcıların 40 °C'de kompleks modül ve frekans arasındaki ilişki

Şekil 5'te görüldüğü üzere bütün frekans değerlerinde en yüksek  $G^*$  değerini 4H bağlayıcısı en düşük  $G^*$  değerini ise saf bağlayıcı (B) vermiştir. Katkılar kendi içerisinde değerlendirildiğinde üç katkının da oranı arttıkça  $G^*$  değerinin arttığı görülmüştür. %4 HDPE bağlayıcı dışındaki diğer modifiye bağlayıcılar frekans değeri arttıkça  $G^*$  değerlerinin birbirine yakın değerler aldığı belirlenmiştir. 0.1 rad/s frekans hızında %4 HDPE katkıli bağlayıcı saf bağlayıcıya göre 11.49 kat daha fazla kompleks modül değeri vermiştir. Bu oran 10 rad/s frekans değerinde 3.76 kat iken 100 rad/s değerinde ise 2.90 kat olmaktadır.



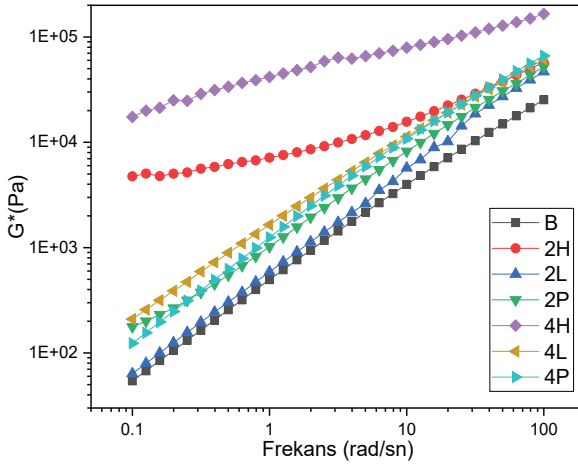
Şekil 6. Saf ve modifiye bağlayıcıların 50 °C'de kompleks modül ve frekans arasındaki ilişki

Şekil 6'da; en yüksek  $G^*$  değerleri, %4 HDPE katkılı bağlayıcı numuneleri için elde edilmiştir. Düşük frekanslarda 4H katkılı bağlayıcıdan sonra en yüksek  $G^*$  değerlerini 2H bağlayıcısı verirken yüksek frekanslarda ise 4P bağlayıcısı en yüksek  $G^*$  değerlerini vermektedir. Bu deney sıcaklığı için 4H bağlayıcısının  $G^*$  değerlerinde düşük frekanslarda diğer numunelere göre belirgin bir fark söz konusudur. 0.1 rad/s frekans hızında %4 HDPE katkılı bağlayıcı saf bağlayıcıya göre 53.08 kat daha fazla kompleks modül değeri vermiştir. Bu oran 10 rad/s frekans değerinde 6.14 kat iken 100 rad/s değerinde ise 3.37 kat olmaktadır.



Şekil 7. Saf ve modifiye bağlayıcıların 60 °C'de kompleks modül ve frekans arasındaki ilişki

Şekil 7 için  $G^*$  değerlerinde diğer numunelere göre 4H bağlayıcısının belirgin farkı dikkat çekmektedir. Bu deney sıcaklığı (60 °C) için 50 °C deney sonuçlarına benzer şekilde 4H bağlayıcısının  $G^*$  değerlerinde düşük frekanslarda diğer numunelere göre belirgin bir fark söz konusudur. Ayrıca bu deney sıcaklığında 2H numunelerinde de düşük frekanslarda diğer bağlayıcılara göre  $G^*$  değerlerinde bir ayrışım oluşmuştur ve yüksek frekans değerlerinde (yaklaşık 10 rad/s) 4H numunesi hariç diğer tüm numunelerde birbirine yakın  $G^*$  değerleri elde edilmiştir. 0.1 rad/s frekans hızında %4 HDPE katkılı bağlayıcı saf bağlayıcıya göre 161.47 kat daha fazla kompleks modül değeri vermiştir. Bu oran 10 rad/s frekans değerinde 15.04 kat iken 100 rad/s değerinde ise 6.33 kat olmaktadır.



Şekil 8. Saf ve modifiye bağlayıcıların 70 °C'de kompleks modül ve frekans arasındaki ilişki

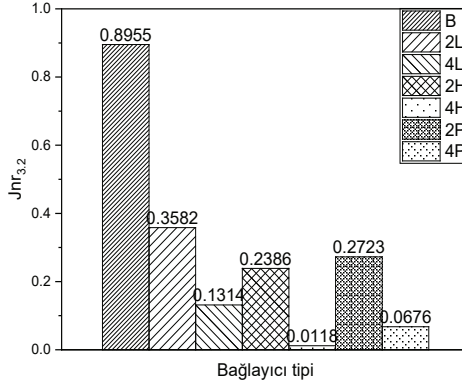
Şekil 8 için 4H bağlayıcısı diğer numunelere göre en yüksek  $G^*$  değerlerini vermiştir. Bu deney sıcaklığı (70 °C) için 50 °C ve 60 °C deney sonuçlarına göre 4H bağlayıcısının  $G^*$  değerlerinde düşük frekanslarda diğer numunelerden daha belirgin bir fark ortaya çıkmıştır. Ayrıca bu deney sıcaklığında 2H numunelerinde de düşük frekanslarda diğer bağlayıcılara göre  $G^*$  değerlerinde önemli bir fark söz konusudur. 4H numunesi hariç diğer tüm numunelerde yüksek frekans değerlerinde 50 °C ve 60 °C deney sonuçlarında olduğu gibi birbirine yakın  $G^*$  değerleri elde edilmiştir. Ancak bu değerler diğer deney sıcaklık sonuçlarına göre daha yüksek frekanslarda oluşmuştur ( $\geq 10$  rad/s). 0.1 rad/s frekans hızında %4 HDPE katkıli bağlayıcı saf bağlayıcıya göre 320.92 kat daha fazla kompleks modül değeri vermiştir. Bu oran 10 rad/s frekans değerinde 19.9 kat iken 100 rad/s değerinde ise 6.53 kat olmaktadır.

#### MSCR test sonuçları

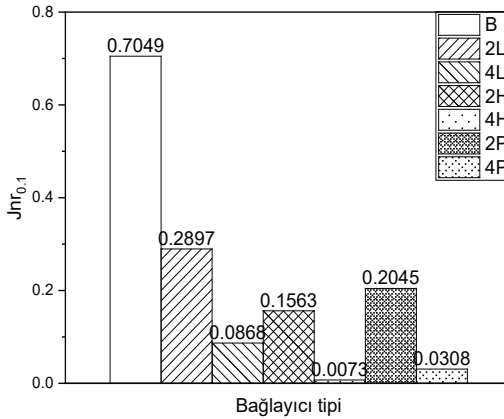
Şekil 9 ve 10'da saf ve modifiye bağlayıcıların 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyesindeki sünme uyumları (Jnr3.2 ve Jnr0.1) değerleri verilmiştir. Her iki şekilde de görüleceği üzere her iki gerilme seviyesinde katkıli bağlayıcıların Jnr değerlerinde saf bağlayıcıya göre önemli oranda düşüş görülmüştür. Bu düşüş 3.2 kPa gerilme seviyesinde 2L, 4L, 2H, 4H, 2P ve 4P bağlayıcıları için saf bağlayıcıya göre sırasıyla 2.5, 6.82, 3.75, 75.89, 3.29 ve 13.25 kat olmaktadır. 0.1 kPa gerilme seviyesi için ise 2L, 4L, 2H, 4H, 2P ve 4P bağlayıcıları için saf bağlayıcıya göre sırasıyla 2.43, 8.12, 4.51, 96.56,



3.45 ve 22.89 kattır. En iyi tekerlek izi direncini %4 HDPE katkıli bağlayıcı verirken en düşüğünü ise saf bağlayıcı vermiştir.

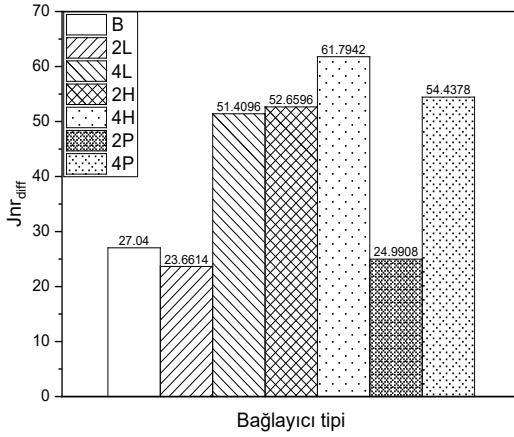


Şekil 9. 3.2 kPa gerilme seviyesindeki sünme uyumları



Şekil 10. 0.1 kPa gerilme seviyesindeki sünme uyumları

Şekil 11’de 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerindeki sünme uyumları oranları verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere gerilme artışından en fazla etkilenen bağlayıcı %4 HDPE katkıli bağlayıcı olmuştur. 4L, 2H ve 4P bağlayıcıları gerilme artışından benzer oranda etkilenmiştir. Gerilme artışından en az etkilenen bağlayıcılar ise %2 LDPE ve %2 propilen homopolimer katkıli bağlayıcılar olmuştur.



Şekil 11. 3.2 ve 0.1 kPa gerilme seviyelerindeki sünme uyumu oranları

## Sonuçlar

Çalışmada %2 ve %4 oranlarında LDPE, HDPE ve propilen homopolimer katkıların asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerine etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

(1) Performans seviyesi (PG) deney sonuçlarına göre en yüksek tekerlek izi direncini %4 propilen katkılı bağlayıcı vermiştir. Aynı zaman sıcaklık artışıyla propilen katkılı bağlayıcı daha esnek davranış sergilemiştir.

(2) Frekans analizi sonuçlarına göre ise bütün sıcaklıklarda en yüksek kompleks modül ( $G^*$ ) değerlerini %4 HDPE katkılı bağlayıcı verirken en düşük  $G^*$  değerlerini saf bağlayıcı vermiştir.

(3) Sıcaklık arttıkça yüksek yoğunluklu polietilenlerin (2H ve 4H) kompleks modülü diğer bağlayıcılardan olumlu yönde git gide ayrılmaktadır.

(4) MSCR deney sonuçlarına göre en iyi tekerlek izi direncini %4 HDPE katkılı bağlayıcı verirken en düşüğünü ise saf bağlayıcı vermiştir.

## Kaynaklar

- AASHTO. (2015). *AASHTO M332-Standard specification for Performance-Graded Asphalt Binder using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. Retrieved from USA.
- Alghrafi, Y. M., El-Badawy, S. M., ve Abd Alla, E.-S. M. (2021). Rheological and environmental evaluation of sulfur extended asphalt binders modified by high- and low-density polyethylene recycled waste. *Construction and Building Materials*, 307(September), 125008. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125008>
- Behnood, A., ve Modiri Gharehveran, M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766–791. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
- Behnood, A., Shah, A., McDaniel, R. S., Beeson, M., ve Olek, J. (2016). High-Temperature Properties of Asphalt Binders: Comparison of Multiple Stress Creep Recovery and Performance Grading Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2574(1), 131–143. Retrieved from <https://doi.org/10.3141/2574-15>
- Casey, D., McNally, C., Gibney, A., ve Gilchrist, M. D. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1167–1174. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.002>
- Datta, J., ve Koczyńska, P. (2016). From polymer waste to potential main industrial products: Actual state of recycling and recovering. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(10), 905–946. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1180227>
- Du, Z., Jiang, C., Yuan, J., Xiao, F., ve Wang, J. (2020). Low temperature performance characteristics of polyethylene modified asphalts – A review. *Construction and Building Materials*, 264, 120704. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120704>
- Duarte, G. M., ve Faxina, A. L. (2021). High-temperature rheological properties of asphalt binders modified with recycled low-density polyethylene and crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 298, 123852. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123852>
- Dwivedi, P., Mishra, P. K., Mondal, M. K., ve Srivastava, N. (2019). Non-biodegradable polymeric waste pyrolysis for energy recovery. *Heliyon*, 5(8), e02198. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02198>

- Eweed, K. M. (2011). Polymeric Additives Effect on Mechanical Properties for Bitumen Based Composites. *Engineering ve Technology Journal*, 29(12), 2501–2519.
- Fang, C., Li, T., Zhang, Z., ve Wang, X. (2008). Combined modification of asphalt by waste PE and rubber. *Polymer Composites*, 29(10), 1183–1187. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/pc.20424>
- Fang, C., Zhang, Y., Yu, Q., Zhou, X., Guo, D., Yu, R., ve Zhang, M. (2013). Preparation, Characterization and Hot Storage Stability of Asphalt Modified by Waste Polyethylene Packaging. *Journal of Materials Science ve Technology*, 29(5), 434–438. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.016>
- Hinislioğlu, S., Aras, H. N., ve Bayrak, O. Ü. (2005). Effects of high density polyethylene on the permanent deformation of asphalt concrete. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 12(5), 456–460.
- Ho, S., Church, R., Klassen, K., Law, B., MacLeod, D., ve Zanzotto, L. (2006). Study of recycled polyethylene materials as asphalt modifiers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(8), 968–981. Retrieved from <https://doi.org/10.1139/l06-044>
- Ibrahim, A.-H. A. (2019). Laboratory investigation of aged HDPE-modified asphalt mixes. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(4), 364–369. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0043-y>
- Kaminsky, W., ve Fernandez, M. (2008). New polymers by copolymerization of olefins with bio oil components. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110(9), 841–845. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/ejlt.200800029>
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Zhang, J., Jiang, H., ve Yao, Z. (2021). Comparison of rheological properties and compatibility of asphalt modified with various polyethylene. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(1), 11–20. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1575968>
- Moghadas Nejad, F., Gholami, M., Naderi, K., ve Rahi, M. (2015). Evaluation of rutting properties of high density polyethylene modified binders. *Materials and Structures*, 48(10), 3295–3305. Retrieved from <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0399-z>
- Moore, C. J. (2008). Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research*, 108(2), 131–139. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>
- Paar, A. (2016). Frequency sweeps. Retrieved from <https://wiki.anton-paar.com/en/frequency-sweeps/>

- Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J., ve Zanzotto, L. (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*, 41(12), 2831–2844. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034>
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., ve Zanzotto, L. (2006). Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts. *Current Opinion in Colloid ve Interface Science*, 11(4), 230–245. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2006.09.001>
- Punith, V. S., Suresha, S. N., Raju, S., Bose, S., ve Veeraragavan, A. (2012). Laboratory Investigation of Open-Graded Friction-Course Mixtures Containing Polymers and Cellulose Fibers. *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), 67–74. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000304](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000304)
- Punith, V. S., ve Veeraragavan, A. (2007). Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Polyethylene as Additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 500–507. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:6\(500\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(500))
- Punith, V. S., ve Veeraragavan, A. (2011). Behavior of Reclaimed Polyethylene Modified Asphalt Cement for Paving Purposes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 833–845. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000235](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000235)
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., ve Giustozzi, F. (2020). Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. *Materials*, 13(7), 1–20. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma13071495>
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D., ve Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials; Mixture Design and Construction* (2nd Editio). Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association.
- Teuten, E. L., Saquing, J. M., Knappe, D. R. U., Barlaz, M. A., Jonsson, S., Björn, A., ... Takada, H. (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2027–2045. Retrieved from <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0284>
- Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., ve Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166. Retrieved from <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>
- Wasage, T. L. J., Stastna, J., ve Zanzotto, L. (2011). Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(6), 561–568. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.573557>

- Xu, T., ve Huang, X. (2012). Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 28(1), 525–530. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.007>
- Zhang, F., ve Hu, C. (2016). The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(2), 729–741. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5198-4>
- Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S. N., ve Putman, B. J. (2012). Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 31, 265–272. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.101>
- Zhao, Z., Xiao, F., ve Amirkhanian, S. (2020). Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. *Waste Management*, 108, 78–105. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>

# Bölüm 5

## ATIK YAĞLARIN ASFALT KAPLAMALARDA KULLANIMI: SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, PERFORMANS VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

*Ersoy KABADAYI<sup>1</sup>*

*Erman ÇAVDAR<sup>2</sup>*

*Neslihan ŞAHAN<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Giresun Üniversitesi Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun, ersoy.kabadayi@giresun.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4062-3117

<sup>2</sup> Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, erman-cavdar@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0238-5245

<sup>3</sup> Arş. Gör., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, neslihan.sahan@ahievran.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3904-6527

## Giriş

Atık yağlar, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyen önemli bir geri dönüşüm kaynağı olarak asfalt kaplamalarda kullanılmaktadır. Özellikle atık motor yağı (WEO), yemeklik yağ (WCO) ve biyolojik yağlar, asfalt kaplamaların performansını artırmak, doğal kaynak tüketimini azaltmak ve çevresel zararları hafifletmek için etkili bir çözüm sunmaktadır (Zahoor vd., 2021). Atık yağlar, yaşlanmış asfalt bağlayıcıların kaybolan hafif bileşenlerini geri kazandırarak bağlayıcıların yeniden işlenmesini sağlamakta, düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirerek termal çatlama direncini artırmaktadır (Mehmood vd., 2024). Ancak, yüksek sıcaklık dayanımında oluşabilecek olumsuz etkiler, lignin, SBS ve lastik tozu gibi katkı maddeleriyle giderilmeye çalışılmıştır (Yan vd., 2022).

WCO'nun asfalt kaplamalarda yenileyici olarak kullanımı, geri dönüşüm sürecinde enerji tüketimini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda yorulmuş ve çatlama dayanımını da artırır (Xu vd., 2023). Ancak, bu tür atık yağların yüksek sıcaklıklardaki performansını artırmak için farklı modifikasyon yöntemleri üzerinde çalışmalar sürmektedir (Ahmed & Hossain, 2020). Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanılması, çevresel faydalar sunmanın yanı sıra karbon ayak izini azaltır ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı düşürür. Aynı zamanda, bu malzemelerin kullanımı, enerji tüketimini optimize ederek maliyetleri düşürür ve atık yağların çevreye zarar verme riskini ortadan kaldırır (Mehmood vd., 2024).

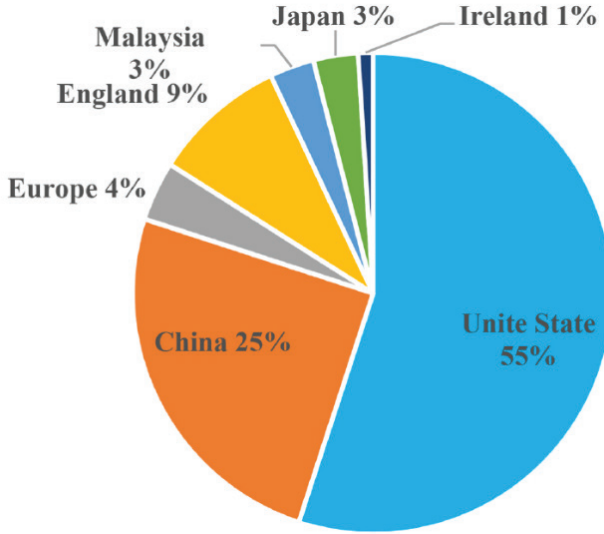
Atık yağların asfalt karışımlarında kullanılması, düşük sıcaklıklardaki performansı artırırken, işlenebilirlik ve esneklik açısından da avantajlar sağlar. Ancak, yüksek sıcaklıklardaki deformasyon risklerini azaltmak için modifikasyon stratejileri gerekmektedir (Ahmed & Hossain, 2020). Bu tür yenilikçi uygulamalar, asfalt kaplamaların performansını optimize etmek ve uzun ömürlü yapılar elde etmek için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir (Xu vd., 2023). Sonuç olarak, atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyele sahiptir ve daha fazla araştırma ile bu potansiyelin tam olarak ortaya çıkarılması mümkündür.

## Atık Yağların Geri Dönüşümdeki Rolü

Asfalt kaplamalar, yol altyapısının temelini oluştururken, sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Geleneksel asfalt bağlayıcılar, büyük ölçüde petrol türevlerinden elde edilir ve bu durum, hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilirlik sorunlarını beraberinde getirir. Petrol rezervlerinin azalması ve bu üretim süreçlerinin çevre üzerindeki olumsuz etkileri, asfalt kaplamalarda geri dönüşümlü ve yenilenebilir malzemelerin kullanılmasını bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu bağlamda, atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, hem çevresel



zararların azaltılmasında hem de dögüsel ekonomiye katkıda bulunulmasında kritik bir role sahiptir (Zahoor vd., 2021)

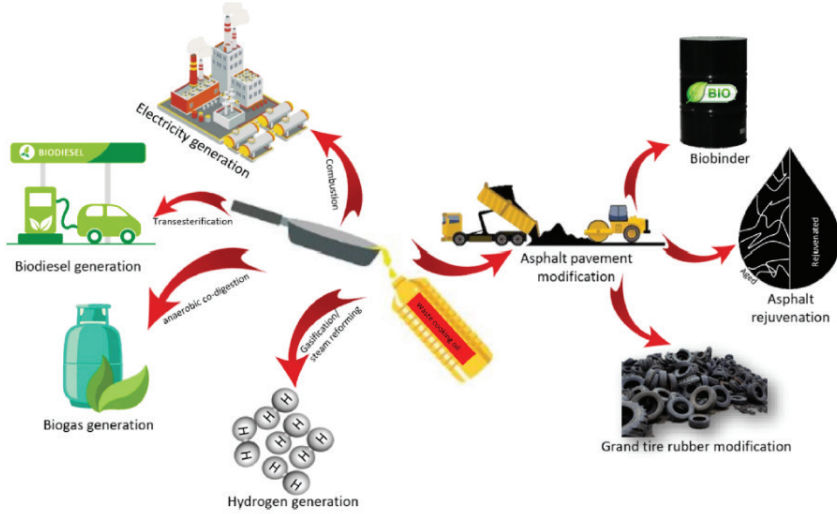


Şekil 1. Farklı ülkelerin atık yağ üretimine katkısı (Xu vd., 2023)

Atık motor yağları (WEO), yemeklik yağlar (WCO) ve biyolojik yağlar, asfalt bağlayıcılarda modifiye edici ve yenileyici malzemeler olarak kullanılabilir. Atık yağların asfalt kaplamalara entegrasyonu, bağlayıcının düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirerek termal çatlama ve yorgunluk direncini artırır. Örneğin, yapılan çalışmalar, WCO'nun asfalt bağlayıcıların viskozitesini azaltarak işlenebilirliği geliştirdiğini ve düşük sıcaklıklarda esneklik sağladığını göstermektedir. (Ahmed & Hossain, 2020; Xu vd., 2023) Ancak, bu tür atık yağların yüksek sıcaklık performansı üzerindeki olumsuz etkileri, dikkatle formüle edilmiş katkı maddeleri ile giderilmelidir. Örneğin, SBS ve lastik tozu gibi katkıları, asfalt kaplamaların hem dayanıklılığını artırmakta hem de yüksek sıcaklıklardaki deformasyon risklerini azaltmaktadır (Yan vd., 2022) Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Ayrıca, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltan bu uygulamalar, ekonomik açıdan da avantajlıdır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin asfalt karışımlarına dahil edilmesi, üretim maliyetlerini düşürmekte ve doğal kaynak kullanımını azaltmaktadır (Mehmood vd., 2024; Zahoor vd., 2021)

Sürdürülebilirlik açısından atık yağların asfalt kaplamalara entegrasyonu, dögüsel ekonominin bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Atık yağların doğru yönetimi ve asfalt üretim süreçlerine entegrasyonu, sadece ekonomik kazanç sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevre üzerin-

deki olumsuz etkileri azaltır. Literatürdeki bulgular, bu tür uygulamaların enerji tüketimini optimize ettiğini ve asfalt kaplamaların kullanım ömrünü uzattığını ortaya koymaktadır (Zhao vd., 2021).



Şekil 2. WCO'nun çeşitli uygulamaları (Xu vd., 2023)

Sonuç olarak, asfalt kaplamalarda atık yağların kullanımı, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak, bu malzemelerin asfalt bağlayıcı ve karışımları üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak ve optimize etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Geri dönüşümlü malzemelerin asfalt sektöründe daha geniş ölçekte benimsenmesi, kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayacak ve çevresel zararları azaltacaktır. Gelecekte yapılacak saha çalışmaları ve uzun dönem performans analizleri, bu uygulamanın etkinliğini ve sürdürülebilirliğini daha da artırabilir.

### Asfalt Kaplamalar ve Sürdürülebilirlik

Asfalt kaplamalar, ulaşım altyapısının temel unsurlarından biri olarak hem şehir içi hem de şehirlerarası yolların yapımında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Günümüzde, artan enerji ihtiyacı ve doğal kaynakların hızla tükenmesi, asfalt kaplamaların üretim ve kullanım süreçlerinde daha sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle asfalt üretiminde kullanılan bitüm gibi fosil yakıt bazlı bağlayıcılar, yüksek enerji tüketimi ve çevresel etkileri nedeniyle daha çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesine ihtiyaç duymaktadır (Zahoor vd., 2021)

Bu bağlamda, geri dönüştürülebilir malzemelerin asfalt karışımlarında kullanılması son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Atık yağların asfalt bağlayıcısı olarak yeniden kullanımı, hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır. Atık yağlar, genel olarak bitkisel yemeklik yağlar, motor yağları ve diğer endüstriyel yağlar gibi farklı kaynaklardan elde edilmektedir. Bu yağlar, kimyasal bileşimlerinin bitüme benzeyen özellikleri sayesinde asfalt bağlayıcılarının mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmede etkili bir şekilde kullanılabilir (Mehmood vd., 2024).

Özellikle atık yemeklik yağlar (Waste Cooking Oil - WCO), düşük sıcaklık çatlama direncini artırma potansiyeli nedeniyle asfalt karışımlarında dikkat çekici bir rejenere edici olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, WCO'nun asfaltın rutting (iz oluşumu) direncini olumsuz etkileyebileceği de belirtilmektedir. Bu olumsuzlukların önüne geçmek için polimer modifikasyonu gibi ek teknolojilerle WCO'nun performansı iyileştirilmektedir. Diğer yandan, atık motor yağları gibi endüstriyel yağlar da asfalt bağlayıcılarının reolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabilir (Çavdar vd., 2024)

Atık yağların asfalt üretiminde kullanılmasının en önemli avantajlarından biri, doğal kaynakların korunmasına ve geri dönüşüm süreçlerine katkı sağlamasıdır. Bu uygulama, enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliği destekler. Aynı zamanda, atık yönetimi süreçlerini kolaylaştırarak, geri dönüşüm maliyetlerini düşürür ve enerji verimliliğini artırır (Xu vd., 2023). Örneğin, atık yağların rejenere edici olarak kullanımı, geri dönüştürülmüş asfalt (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) karışımlarının özelliklerini iyileştirmek için yaygın bir yöntem haline gelmiştir. Bu süreç, yeni asfalt bağlayıcılarının kullanımını azaltarak maliyet tasarrufu sağlar ve döngüsel ekonomi ilkelerine hizmet eder.

Atık yağların asfalt karışımlarında kullanımı, birçok avantaj sunmasına rağmen, bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Örneğin, farklı kaynaklardan elde edilen atık yağların kimyasal bileşimindeki değişiklik, karışım özelliklerinin standartlaştırılmasını zorlaştırabilir. Ayrıca, atık yağların yüksek sıcaklıklarda yumuşama eğilimi göstermesi, asfaltın rutting direncini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, ek modifikasyon yöntemlerinin uygulanması ve saha testlerinin yapılması gerekmektedir (Girimuth Shashibhushanand Singh, 2024).

Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik avantajlar sağlama açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Gelecekteki çalışmalar, atık yağların asfalt bağlayıcılarına olan etkilerini daha detaylı analiz ederek, daha dayanıklı ve çevre dostu asfalt karışımları geliştirmeye odaklanmalıdır. Bu yaklaşım, enerji tüketimini azaltmanın yanı sıra, çevre üzerindeki olumsuz etkileri de en aza indire-

rek altyapı projelerinde sürdürülebilirliği artırabilir. Ayrıca, bu yenilikçi yöntemlerin yaygın saha uygulamaları ile desteklenmesi, bu teknolojilerin uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır (Mehmod vd., 2024).

## **ASFALT KAPLAMALARDA ATIK YAĞLARIN KULLANIMI**

### **Atık Yağ Türleri ve Kaynakları**

Atık yağlar, asfalt kaplamalarda sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği sağlayan yenilikçi bir katkı maddesi olarak dikkat çekmektedir. Farklı türdeki atık yağlar, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de asfalt kaplamaların performans özelliklerinin iyileştirilmesi açısından büyük potansiyel taşır. Genellikle yemeklik yağlar, motor yağları ve endüstriyel yağlar gibi kategorilere ayrılan atık yağların kullanımı, asfalt bağlayıcılarının modifikasyonunda önemli bir rol oynamaktadır

### **Bitkisel Atık Yağlar**

Bitkisel atık yağlar, genellikle restoranlar ve gıda üretim tesislerinden toplanan yemeklik yağların geri dönüştürülmesiyle elde edilir. Bu tür yağlar, asfalt bağlayıcılarının viskozitesini düşürerek düşük sıcaklık dayanımını artırır. Örneğin, atık yemeklik yağlar ile modifiye edilen asfalt karışımları, çatlama direncini artırma ve karbon ayak izini azaltma potansiyeline sahiptir (Zahoor vd., 2021). Ancak bu tür yağların yüksek sıcaklıklarda rutting direncini olumsuz etkileyebileceği bilinmektedir.

### **Motor Yağları**

Atık motor yağları, otomotiv servislerinden ve sanayi atıklarından toplanır. Bu yağlar, asfalt bağlayıcılarının reolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir. Örneğin, rejenere edici etkisiyle asfalt karışımlarının sertliğini azaltan motor yağları, uzun ömürlü kaplama malzemeleri elde edilmesine olanak tanır. Bununla birlikte, motor yağlarının içeriğindeki ağır metallerin çevresel etkileri dikkate alınmalı ve uygun rafine süreçleri uygulanmalıdır (Afridi vd., 2024).

### **Endüstriyel Yağlar**

Endüstriyel atık yağlar, genellikle makinelerden ve üretim tesislerinden kaynaklanan yağların geri dönüşümünden elde edilir. Bu tür yağlar, asfalt bağlayıcılarının modifikasyonu için uygun viskozite düşürücü özelliklere sahiptir. Ayrıca, bu yağların geri dönüşümü, enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir (Qiao vd., 2024)

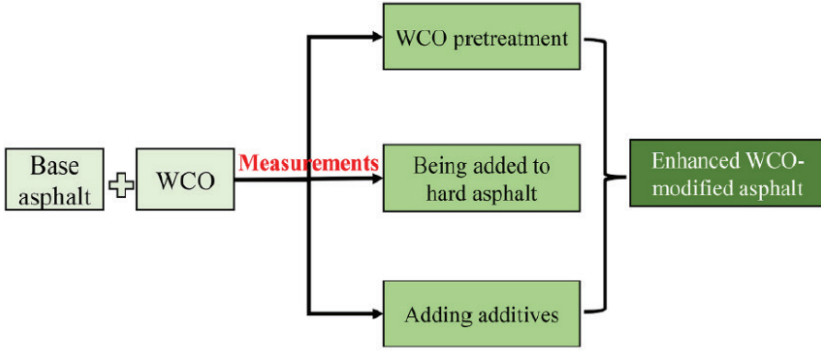
### **Kaynak Yönetimi ve Geri Dönüşüm Süreçleri**

Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, etkili bir atık yönetimi sistemi gerektirir. Yemeklik yağlar genellikle restoranlardan toplanırken,

motor ve endüstriyel yağlar araç bakım servislerinden ve sanayi tesislerinden elde edilir. Bu yağların geri dönüşüm süreçleri, çevresel kirliliği azaltmanın yanı sıra doğal kaynakların korunmasına da katkıda bulunur (Tileuberdi vd., 2024; Yousefi vd., 2024)

### Atık Yağların Asfalt Bağlayıcı ile Uyum Süreçleri

Atık yağların asfalt bağlayıcılarıyla uyumluluğu, asfalt kaplamalarının dayanıklılığı ve performansı üzerinde doğrudan etkili olan kritik bir konudur. Bu süreçte, atık yağların kimyasal bileşimi, asfalt bağlayıcılarıyla fiziksel ve kimyasal etkileşimleri belirleyici rol oynar. Araştırmalar, farklı kaynaklardan elde edilen atık yağların, özellikle bitkisel yağlar ve motor yağlarının, asfalt bağlayıcılarının özelliklerini iyileştirebildiğini göstermektedir (Xu et al., 2023).



Şekil 3. WCO ile modifiye edilmiş asfaltın performansını artırmaya yönelik ölçümler

Atık yağların asfalt bağlayıcılarla uyumluluğu, çoğunlukla kimyasal yapılarının bitümle olan benzerliğine dayanır. Özellikle atık yemeklik yağlar (Waste Cooking Oil - WCO), asfalt bağlayıcısının düşük sıcaklıkta çatlama direncini artırırken, viskozitesini düşürerek işlenebilirliği iyileştirir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda asfaltın deformasyona karşı direncini düşürebileceği için, WCO'nun kullanımı sırasında ek modifikasyon yöntemleri gereklidir. Motor yağları ise yüksek kayganlık ve düşük uçuculuk özellikleri sayesinde asfalt bağlayıcılarının sertliğini azaltır ve esnekliğini artırır. Ancak, bu yağların içeriğindeki bazı ağır metaller ve diğer yabancı maddeler, uygun arıtma ve modifikasyon gerektirir (Jwaida vd., 2024)

Atık yağlar, moleküler düzeyde bağlayıcı matrisine nüfuz ederek, bağlayıcının yaşlanma sürecini yavaşlatabilir. Örneğin, biyolojik kökenli yağlar ve motor yağları, asfalt bağlayıcılarına nüfuz ederek asfaltın uzun vadeli dayanıklılığını artırmaktadır (Itoua & Sun, 2024). Atık yağların as-

falt bağlayıcılarına eklenmesi, asfaltın termal stabilitesini ve viskoelastik özelliklerini etkiler. Örneğin, bitkisel yağlarla yapılan modifikasyonlar, bağlayıcının düşük sıcaklık çatlama performansını iyileştirirken, yüksek sıcaklık stabilitesinde zorluklara neden olabilir. Bu durum, polimer katkıları veya diğer modifikasyon teknikleriyle giderilmektedir (Obukhova vd., 2024).

### **Atık Yağların Asfalt Kaplama Özelliklerine Etkisi**

Atık yağların asfalt kaplama özellikleri üzerindeki etkisi, asfaltın dayanıklılığı, performansı ve sürdürülebilirliği açısından önemli bir araştırma konusudur (Yousefi vd., 2024). Atık motor yağı, yemeklik yağ ve diğer türdeki yağların asfalt bağlayıcılarına entegrasyonu, mekanik ve reolojik özelliklerin geliştirilmesi açısından büyük bir potansiyel taşır. Bu etkiler, asfalt kaplamaların işlenebilirliğini, düşük sıcaklık direncini ve yorgunluk performansını artırırken aynı zamanda üretim maliyetlerini düşürmektedir.

Atık motor yağlarının asfalt kaplamalara entegrasyonu, asfalt bağlayıcılarının sertliğini azaltarak daha esnek ve dayanıklı bir yapı sağlar. Bu esneklik, asfalt kaplamaların çatlama ve yorgunluk performansını iyileştirerek uzun ömürlü bir yapı oluşmasına katkı sağlar. Ayrıca, motor yağlarının asfalt bağlayıcısının viskozitesini düşürmesi, düşük sıcaklık performansını artırarak asfaltın daha homojen bir şekilde dağılmasını kolaylaştırır (Mehmood vd., 2024).

Atık yemeklik yağlar ise düşük sıcaklık dayanımını artırmada oldukça etkilidir ve asfaltın düşük sıcaklıklarda çatlama direncini güçlendirebilir. Bu tür yağların asfalt bağlayıcılarındaki reolojik özellikleri geliştirdiği, viskoziteyi düşürerek işlenebilirliği artırdığı belirlenmiştir (Rai vd., 2024). Ancak, yüksek sıcaklıklardaki rutting direncinin korunması için yemeklik yağlarla modifiye edilmiş asfalt karışımlarının uygun şekilde tasarlanması gereklidir. Özellikle motor yağlarının rejenere edici etkisi, geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarında (RAP) kullanılarak doğal kaynak kullanımını azaltır ve sürdürülebilir inşaat malzemelerinin oluşturulmasına olanak tanır (Obukhova vd., 2024). Kimyasal stabilitenin sağlanması, bu tür asfaltların daha uzun ömürlü olmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunur.

Researchers	Type	Dosage	Physical properties				Rheological properties	
			Penetration	Softening Point	Ductility	Viscosity	High temperature	Low temperature
Li et al. (2021)	WEO	1,2,3,4,5	↑	↓	↑	↓	-	-
	WEO	2,4,6	↑40.91%	↓9.1%	↑83.3%	↓17.5%	-	-
Wang et al. (2018)	WEO	2,4,6,8,10	↑68.14%	↓16.3%	↑92.5%	↓4%	-	-
Al-Saffar et al. (2020)	WEO	2,4,6,8,10	↑	↓	↑	↓	-	-
Bai et al. (2020)	5W40 SN engine oil	4,8	↑	↓	↑	↓	↑Partially	↑
Kamaruddin et al. (2014)	SEA 10W40 WEO	15	-	-	-	-	↑	↑
Peng et al. (2020)	5W30 WEO	2,4,6,8	↑66.35%	↓15.3%	↑	-	-	-
Wu and Muthunathan (2018)	WEO	5,10	-	-	-	-	↓	↑
Qurashi and Swamy (2018)	WEO	2,4,6,8	-	↓	-	↓	Almost unchanged	-
Li, Haibin et al. (2019)	WEO	1,2,3,4,5	↑	↓	↑	↓	↓	↑
El-Shorbagy et al. (2019)	WEO	2,3,4,5,5,5,6	↑	↓	-	↓	↓	↑

Şekil 4. WEO ile geliştirilmiş asfaltın fiziksel ve reolojik özellikleri. (Li et al., 2022)

## ASFALT KAPLAMALARDA ATIK YAĞLARIN KULLANIMI

### Karışım Tasarımı ve Üretim Yöntemleri

Atık yağların asfalt üretim süreçlerine dahil edilmesi, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de maliyet etkinliği açısından yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Atık yağların asfalt bağlayıcılarında kullanımı, reolojik ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlar. Bu süreçte kullanılan karışım tasarım yöntemleri, asfaltın hem dayanıklılığını hem de işlenebilirliğini optimize etmeye yöneliktir.

Marshall yöntemi gibi geleneksel karışım tasarım yöntemleri, atık yağların asfalt bağlayıcılarında etkin bir şekilde kullanılmasını destekler. Bu yöntemle asfalt karışımlarında kullanılan bağlayıcının optimal oranları belirlenmekte ve yüksek performanslı kaplamalar oluşturulmaktadır. Özellikle, bitkisel yağların bağlayıcı özelliklerini geliştirmek için ılık karışım asfalt (WMA) teknolojisi kullanılarak enerji tüketimi azaltılmakta ve karbon emisyonları düşürülmektedir (Nunes vd., 2024)

Atık yağların asfalt üretiminde kullanımı, yüksek sıcaklık işlemleri gerektiren süreçlere uyum sağlayabilmesi için ön işleme ve rafinasyon gerektirir. Bununla birlikte, bu yağların uygun şekilde modifiye edilmesi, yüksek sıcaklıklarda deformasyon riskini en aza indirmek için önemlidir. Karışım tasarımı sırasında, atık yağların asfalt performansına etkileri dikkate alınarak, polimer katkıları veya diğer modifikasyonlarla desteklenen karışımlar üretilmektedir. Ayrıca, bu süreçlerde çevresel sürdürülebilirlik açısından enerji verimli üretim yöntemlerinin benimsenmesi önerilmektedir (Penki vd., 2024).

Sonuç olarak, atık yağların asfalt üretim süreçlerine entegrasyonu, çevresel etkilerin azaltılmasına ve ekonomik kazançların artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak bu süreçlerin optimize edilmesi ve saha

uygulamalarında doğrulanması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekte, bu yenilikçi yöntemlerin geniş ölçekte uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla daha kapsamlı test ve analizlerin yapılması gereklidir (Jakati & Kumar, 2024)

### **Saha Uygulamaları ve Başarı Örnekleri**

Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, laboratuvar çalışmaları kadar saha uygulamalarında da başarılı sonuçlar vermektedir. Özellikle asfalt bağlayıcılarının rejenere edilmesi ve yeniden kullanımı açısından atık yağların sağladığı faydalar, sürdürülebilir inşaat projelerine olan ilgiyi artırmıştır. Atık yağlarla modifiye edilen asfalt karışımları, hem mekanik özellikleri iyileştirmiş hem de çevresel faydalar sağlamıştır (Jwaida vd., 2024).

Birçok saha uygulaması, atık yağların asfalt bağlayıcısının düşük sıcaklık çatlama direncini artırdığı ve esnekliğini geliştirdiğini göstermiştir. Örneğin, Çin’de yapılan sıcak karışım asfalt (HMA) projelerinde atık motor yağlarının kullanımı, düşük sıcaklıklarda çatlamayı önlemiş ve deformasyon direncini artırmıştır (Yu vd., 2024). Ayrıca, ABD ve Avrupa’daki bazı saha uygulamaları, atık yemeklik yağlarla modifiye edilen asfaltın karbon emisyonlarını azalttığını ve asfalt üretim süreçlerinde enerji verimliliği sağladığını göstermiştir (Elshahat & Shafik, 2024).

Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) ve atık yağ kombinasyonları, saha testlerinde önemli başarılar elde etmiştir. Bu kombinasyon, asfaltın mekanik dayanımını artırırken, üretim maliyetlerini düşürmüş ve çevresel etkiyi azaltmıştır (Zhang vd., 2024). Örneğin, pothole (çukur) onarımlarında atık yemeklik yağlarla modifiye edilmiş karışımlar kullanılarak dayanıklılık ve maliyet etkinliği sağlanmıştır.

### **ASFALT KAPLAMALARDA ATIK YAĞ KULLANIMININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI**

#### **Çevresel ve Ekonomik Faydalar**

Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük fırsatlar sunmaktadır. Bu uygulama, doğal kaynak tüketimini azaltırken atık yönetimi problemlerine yenilikçi çözümler sunar. Atık motor yağları ve yemeklik yağlar gibi maddelerin asfalt üretim süreçlerine dahil edilmesi, kaplama performansını iyileştirirken karbon ayak izini de düşürmektedir (Rahman vd., 2020). Atık yağların kullanımıyla asfalt üretim süreçlerinde enerji tüketimi azaltılmakta ve üretim maliyetlerinde önemli düşüşler sağlanmaktadır. Özellikle yemeklik yağların asfalt bağlayıcılarında kullanılması, düşük sıcaklık dayanımını artırarak çatlama problemini azaltır ve asfaltın uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur (Elshahat & Shafik, 2024). Ayrıca, bu malzemelerin geri dönüşü-



mü, çevreye zarar verebilecek atıkların uygun bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.

Ekonomik açıdan, atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, özellikle geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) malzemeleriyle birleştirildiğinde, hammadde maliyetlerini düşürmekte ve üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirmektedir. Örneğin, Çin’de yapılan bir çalışma, geri dönüştürülmüş asfaltın atık motor yağları ile yenilenmesinin hem ekonomik kazançlar sağladığını hem de çevresel etkileri azalttığını göstermiştir (Al-Sabaei vd., 2020).

Çevresel faydalar, sadece karbon emisyonlarının azalması ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda atık yağların çöp sahalarına veya kanalizasyon sistemlerine boşaltılmasının önlenmesiyle su ve toprak kirliliğinin önüne geçilmektedir. Atık yağların doğru bir şekilde işlenmesi, çevre üzerindeki olumsuz etkileri önemli ölçüde azaltır ve döngüsel ekonomiyi destekler (Melaku vd., 2024).

Bununla birlikte, bu uygulamalar bazı zorluklarla da karşılaşmaktadır. Atık yağların kimyasal bileşimleri, asfalt bağlayıcılarının mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir ve bu durum, özel modifikasyon yöntemlerinin kullanılmasını gerektirir. Ancak bu zorluklar, yeni teknoloji ve süreçlerle kolayca aşılabilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, bu faydaların daha geniş ölçekte uygulanabilirliğini artırmaya ve çevresel etkileri optimize etmeye odaklanmalıdır (Tabatabaei vd., 2024).

Sonuç olarak, atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, hem çevresel hem de ekonomik faydaları nedeniyle büyük bir potansiyele sahiptir. Bu teknolojinin sürdürülebilir bir şekilde uygulanması, inşaat sektörü için yeni fırsatlar yaratırken çevresel koruma ve ekonomik kazançların bir arada elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

### **Yüksek Sıcaklık Dayanımındaki Zorluklar**

Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, sürdürülebilirlik ve ekonomik faydalar açısından birçok avantaj sağlarken, özellikle yüksek sıcaklık dayanımında belirgin zorluklar da ortaya çıkarmaktadır. Atık motor yağı ve yemeklik yağ gibi maddeler, asfaltın işlenebilirliğini artırabilirken, yüksek sıcaklık koşullarında deformasyon direnci üzerindeki etkileri dikkatle incelenmelidir (Mehmood vd., 2024a). Yüksek sıcaklıklarda, atık yağların asfalt bağlayıcılarla birleşimi viskoelastik özellikleri değiştirerek asfaltın dayanıklılığını azaltabilir. Özellikle yemeklik yağlar, asfaltın yüksek sıcaklık performansını düşürebilir ve deformasyona karşı dirençte zayıflık yaratabilir. Bu sorunlar, polimer modifikasyonları veya diğer katkı maddeleriyle giderilebilir (Kim vd., 2024).

Bir başka önemli zorluk ise termal oksidasyon kararlılığıdır. Atık

motor yağlarının asfalt bağlayıcılara eklenmesi, oksidasyon süreçlerini hızlandırabilir ve asfaltın yaşlanma performansını etkileyebilir. Atık yağların yüksek sıcaklık dayanımını artırmak için biyolojik kökenli yağlar ve sentetik polimer katkıların kullanımı gibi yenilikçi yöntemler geliştirilmektedir. Bu katkılar, asfaltın termal kararlılığını artırarak deformasyon direncini iyileştirebilir (J. Wang vd., 2024). Ayrıca, elastomerik modifikasyonlar, asfalt bağlayıcılardaki yüksek sıcaklık dayanımını artırmada etkili bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımında yüksek sıcaklık dayanımı önemli bir teknik zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak, bu zorluklar, yenilikçi malzeme modifikasyonları ve daha kapsamlı saha testleri ile aşılabılır. Gelecekteki araştırmalar, bu teknolojilerin daha geniş bir ölçekte uygulanabilirliğini sağlamayı hedeflemektedir. Bu, sadece asfalt kaplamalarının performansını artırmakla kalmayacak, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine de önemli katkılar sunacaktır.

### **Uzun Dönem Dayanıklılık ve Geliştirme Alanları**

Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, çevresel faydalar ve maliyet tasarrufları sağlarken, uzun dönem dayanıklılık açısından karmaşık bir tablo sunmaktadır. Bu tür uygulamalar, asfalt bağlayıcılarının performansını artırmak ve sürdürülebilir bir yaklaşım geliştirmek için önemli bir potansiyele sahiptir (Hu vd., 2023).

Atık motor yağları ve yemeklik yağların asfalt bağlayıcılarda kullanımı, kaplamanın düşük sıcaklıklardaki esnekliğini artırırken, uzun dönem oksidasyon süreçlerine karşı hassasiyetini artırabilir. Bu durum, asfaltın dayanıklılığını olumsuz etkileyebilir ve özel modifikasyonlar gerektirebilir (Rai vd., 2024). Atık yağlarla modifiye edilmiş asfalt kaplamaların yaşlanma performansı üzerinde yapılan saha çalışmaları, oksidasyonun asfaltın viskoelastik özelliklerini zayıflatabileceğini göstermektedir. Ancak, biyolojik kökenli yağlarla yapılan modifikasyonlar bu etkileri sınırlayabilir (Yan vd., 2022b). Uzun dönem dayanıklılığı artırmak için kullanılan yöntemlerden biri, polimer katkılarla desteklenen bağlayıcılardır. Bu modifikasyonlar, asfaltın çatlama direncini artırırken, deformasyon eğilimlerini azaltmaktadır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) malzemeleriyle yapılan kombinasyonlar, asfaltın mekanik özelliklerini geliştirerek uzun dönem dayanıklılığı artırmak için etkili bir yaklaşım sunmaktadır (Mohd Kamaruddin vd., 2014)

Geliştirme alanları arasında, atık yağların kimyasal bileşimlerinin daha iyi anlaşılması ve bağlayıcılarda kullanılan oranların optimize edilmesi bulunmaktadır. Özellikle, atık yemeklik yağların oksidasyon kararlılığını artıracak katkı maddelerinin geliştirilmesi, uzun vadeli performansı artırabilir. Ayrıca, mikrokapsüller gibi yeni teknolojiler, asfalt bağlayıcı-

larında kendiliğinden iyileşme özellikleri kazandırabilir ve dayanıklılık sorunlarını çözebilir (Y. Wang & Hao, 2021)

Sonuç olarak, atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik faydalar sunarken, uzun dönem dayanıklılık sorunlarına da dikkat çekmektedir. Bu alandaki ilerlemeler, sadece daha dayanıklı asfalt kaplamalar üretmekle kalmayacak, aynı zamanda sürdürülebilir inşaat teknolojilerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

## SONUÇLAR

Atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği artıran önemli bir yaklaşım olarak inşaat sektöründe dikkat çekmektedir. Bu uygulama, atık yağların geri dönüştürülmesiyle doğal kaynak tüketimini azaltmakta, karbon emisyonlarını düşürmekte ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Çalışmada ortaya konan bulgular, atık yağların asfalt bağlayıcılarının reolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirdiğini, düşük sıcaklık dayanımını artırdığını ve ekonomik maliyetleri düşürdüğünü göstermiştir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık dayanımındaki zorluklar, oksidasyon direnci ve uzun dönem dayanıklılık gibi teknik sorunlar, bu teknolojinin geniş çaplı uygulanabilirliğini sınırlamaktadır.

Gelecekte atık yağların asfalt kaplamalarda etkin bir şekilde kullanılması için bazı kritik adımlar önerilmektedir. İlk olarak, nanoteknoloji, biyokatalizörler ve kendini onaran asfalt teknolojileri gibi yenilikçi çözümlerin uygulanması, asfaltın performansını optimize etmek için kullanılmalıdır. İkinci olarak, saha testleri ve uzun vadeli performans analizleri artırılarak, farklı iklim ve trafik koşullarına uygun tasarımlar geliştirilmelidir. Ayrıca, atık yağların asfalt bağlayıcılarına entegrasyonunda ulusal ve uluslararası standartların geliştirilmesi gereklidir. Döngüsel ekonomi perspektifiyle, geri dönüştürülmüş asfalt malzemeleriyle atık yağların kombinasyonu teşvik edilmeli ve bu alanda kapsamlı Ar-Ge çalışmaları yürütülmelidir.

Sonuç olarak, atık yağların asfalt kaplamalarda kullanımı, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunacak büyük bir potansiyele sahiptir. Bu teknolojinin daha geniş çapta benimsenmesi, yenilikçi malzeme çözümleri ve optimize edilmiş üretim süreçleri ile mümkün olacaktır. Gelecekteki çalışmalar, bu uygulamaların hem altyapı sektöründe daha yaygın hale gelmesine hem de çevresel etkilerinin minimize edilmesine katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA

- Anthonissen J, D. (2015). Using carbon dioxide emissions as a criterion to award road construction projects: a pilot case in Flanders. *Journal of Cleaner Production*, 102, 96-102. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2592047>
- Avirneni, D., Peddinti, P. R. T., & Saride, S. (2016). Durability and long term performance of geopolymer stabilized reclaimed asphalt pavement base courses. *Construction and Building Materials*, 121, 198-209. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138227350>
- Bajaj, A., Martin, A. E., King, G. N., Glover, C. J., Kaseer, F., & Arámbula-Mercado, E. (2020). Evaluation and classification of recycling agents for asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 260, 119864. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:224986442>
- Behnood, A. (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 231, 171-182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>
- Bilema, M., Aman, M. Y., Hassan, N. A., Memon, Z. A., Omar, H. A., Yusoff, N. I. M., & Milad, A. (2021). Mechanical Performance of Reclaimed Asphalt Pavement Modified with Waste Frying Oil and Crumb Rubber. *Materials*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ma14112781>
- Bizarro, D. E. G., Steinmann, Z. J. N., Nieuwenhuijse, I., Keijzer, E., & Hauck, M. (2021). Potential Carbon Footprint Reduction for Reclaimed Asphalt Pavement Innovations: LCA Methodology, Best Available Technology, and Near-Future Reduction Potential. *Sustainability*, 13, 1382. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234053390>
- Cao, Z., Chen, M., Han, X., Wang, R., Yu, J., Xu, X., & Xue, L. (2020). Influence of characteristics of recycling agent on the early and long-term performance of regenerated SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 237, 117631. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213438339>
- Chou, C.-P., & Lee, N. (2015). Assessment of Life Cycle Energy Saving and Carbon Reduction of Using Reclaimed Asphalt Concrete. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109394635>
- Condurat, M., & Ioniță, G. (2018). The environmental performances of reclaimed asphalt and bituminous sand pavements for transition toward low carbon mobility. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 21, 50-62. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135437480>

- Cui Ming, N. G., ANIS AINA, RAMADHANSYAH PUTRA JAYA, & NICOLE LIEW SIAW ING. (2023). Analysis of Reclaimed Asphalt Pavement with Rejuvenating Materials. *CONSTRUCTION*, 3(1), 75-86. <https://doi.org/10.15282/construction.v3i1.8910>
- Doh, Y. S., Amirkhaniyan, S. N., & Kim, K. W. (2008). Analysis of unbalanced binder oxidation level in recycled asphalt mixture using GPC. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1253-1260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.026>
- Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., & Navaro, J. (2013a). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent. *Construction and Building Materials*, 41, 175-181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.031>
- Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., & Navaro, J. (2013b). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent. *Construction and Building Materials*, 41, 175-181. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135616390>
- Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources Conservation and Recycling*, 104, 224-238. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108741235>
- Goldoni, A., Pelissaro, D., Silveira, E., Prietto, P. D. M., & Rosa, F. (2022). Durability and mechanical long-term performance of reclaimed asphalt pavement stabilized by alkali-activation. *Soils and Rocks*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:254869529>
- Haddadi, S. S., Coleri, E., & Sreedhar, S. (2019). Strategies to improve performance of reclaimed asphalt pavement-recycled asphalt shingle mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 22, 201-212. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:140469875>
- Hong, F., & Prozzi, J. A. (2018). Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections. *Road Materials and Pavement Design*, 19, 1816-1831. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115779262>
- Hu, X., Nie, Y., Feng, Y., & Zheng, Q. (2012). Pavement Performance of Asphalt Surface Course Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Journal of Testing and Evaluation*, 40(7), 1-7. <https://doi.org/10.1520/JTE20120128>
- Hussain, A., & Yanjun, Q. (2013). Effect of Reclaimed Asphalt Pavement on the Properties of Asphalt Binders. *Procedia Engineering*, 54, 840-850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.077>

- Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G., Conti, C., & Canestrari, F. (2020). Investigating the “circular propensity” of road bio-binders: Effectiveness in hot recycling of reclaimed asphalt and recyclability potential. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120193. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213479546>
- Kaseer, F., Cucalon, L. G., Arámbula-Mercado, E., Martin, A. E., & Epps, J. A. (2020). Practical Tools for Optimizing Recycled Materials Content and Recycling Agent Dosage for Improved Short- and Long-Term Performance and Rejuvenated Binder Blends and Mixtures. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213732812>
- Kaseer, F., Martin, A. E., & Arámbula-Mercado, E. (2019). Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. *Construction and Building Materials*, 211, 974-987. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286>
- Kou, C.-H., Xiao, P., Kang, A., Mikhailenko, P., Baaj, H., & Wu, Z. (2017). Methods to Evaluate the Aging Grades of Reclaimed Asphalt Binder. *Applied Sciences*, 7, 1209. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3279999>
- Li, Q., Sun, G., Lu, Y., Meng, Y., Luo, S., & Gao, L. (2021). Effects of warm-mix asphalt technologies and modifiers on pavement performance of recycled asphalt binders. *Journal of Cleaner Production*, 282, 125435. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:230572499>
- Lima, M. S. S., Hajibabaei, M., Hesarkazzazi, S., Sitzenfrei, R., Buttgerit, A., Queiroz, C., Haritonovs, V., & Gschösser, F. (2021). Determining the Environmental Potentials of Urban Pavements by Applying the Cradle-to-Cradle LCA Approach for a Road Network of a Midscale German City. *Sustainability*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:244167965>
- Magar, S., Xiao, F., Singh, D., & Showkat, B. (2022). Applications of reclaimed asphalt pavement in India – A review. *Journal of Cleaner Production*, 335, 130221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130221>
- Mantalovas, K., & Mino, G. Di. (2019). The Sustainability of Reclaimed Asphalt as a Resource for Road Pavement Management through a Circular Economic Model. *Sustainability*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:159434058>
- Mollenhauer, K., Piérard, N., Tuar, M., Mouillet, V., & Gabet, T. (2010). Development and validation of a laboratory aging method for the accelerated simulation of reclaimed asphalt. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25, 631-636. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136616844>
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2021). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. *Journal of Traffic and Transportation*

Engineering (English Edition), 8(6), 1022-1035. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.12.007>

- Perucca, M., Capuano, L., Magatti, G., Rosa, F., & Mantecca, P. (2022). Environmental Performance of Road Asphalts Modified with End-of-Life Hard Plastics and Graphene: Strategies for Improving Sustainability Processes. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253136438>
- Poulikakos, L. D., dos Santos, S., Bueno, M., Kuentzel, S. L., Hugener, M., & Partl, M. N. (2014). Influence of short and long term aging on chemical, microstructural and macro-mechanical properties of recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 51, 414-423. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137402158>
- Pouranian, M. R., & Shishehbor, M. (2019). Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review. *Environments*, 6(6). <https://doi.org/10.3390/environments6060073>
- Pradyumna, T. A., Mittal, A., & Jain, P. K. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 1149-1157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.211>
- Puppala, A. J., Pedarla, A., Chittoori, B. C. S., Ganne, V. K., & Nazarian, S. (2017). Long-Term Durability Studies on Chemically Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material as a Base Layer for Pavements. *Transportation Research Record*, 2657, 1-9. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:114161696>
- Rafiq, W., Musarat, M. A., Altaf, M., Napiyah, M. Bin, Sutanto, M. H., Alaloul, W. S., Javed, M. F., & Mosavi, A. (2021). Life Cycle Cost Analysis Comparison of Hot Mix Asphalt and Reclaimed Asphalt Pavement: A Case Study. *Sustainability*, 13, 4411. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234856221>
- 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>
- Sarvanantha, A., & Mampearachchi, W. K. (2023). Quality Enhancement of Recycled Asphalt Product Using Warm Mix Asphalt Technology. 2023 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), 231-234. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266494520>
- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. *Materials*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/ma13184052>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2016). Towards production of 100% recycled asphalt. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136062355>

Zheludkevich, M., Serra, R., Montemor, M., Yasakau, K., Salvado, I. M., & Ferreira, M. (2005). Nanostructured sol-gel coatings doped with cerium nitrate as pre-treatments for AA2024-T3: corrosion protection performance. *Electrochimica Acta*, 51(2), 208–217.