

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI MALZEMESİ BİLİM DALI**

**ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN BETONDA KULLANIMI VE
ÇEVRE DOSTU BETONLARINARAŞTIRILMASI VE
GELİŞTİRİLMESİ**

Giray TOK

**Danışman
Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK**

MANİSA-2025

GİRAY
TOK

ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN BETONDA KULLANIMI VE ÇEVRE DOSTU
BETONLARIN ARAŞTIRILMASI VE GELİŞTİRİLMESİ

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Giray TOK



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Giray TOK
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:
Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

Endüstriyel atık, sanayi ve imalat süreçleri sırasında ortaya çıkan yan ürünler, kullanılmayan malzemeler, üretim artıkları ve çeşitli kimyasal maddelerden oluşan atıklardır. Bu atıklar, üretim faaliyetlerinin türüne bağlı olarak çok çeşitli şekillerde ortaya çıkabilir ve genellikle çevresel, sağlık ve güvenlik açısından yönetilmesi gereken önemli sorunlar doğurabilir. Endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması, hammadde maliyetlerini düşürebilir ve ekonomik değer yaratabilir. Örneğin, geri dönüştürülmüş veya yeniden kullanılmış reçineler ile beton üretimi yapılarak ekonomik ve güvenli çevre dostu yapılar inşa edilebilir.

Günümüz beton teknolojisinde, endüstriyel olan ya da endüstriyel olmayan atık ya da atıl malzemelerin mineral ve kimyasal katkı maddeleri ile birlikte kullanılmasıyla, basınç dayanımı ve dayanıklılıktan ödün vermeden beton imali yapılabilmektedir. Bu çalışmada rüzgar enerjisi endüstrisinde kullanılan epoksi reçine atıkların betonda kullanılabilirliği değerlendirilecektir. Çalışma neticesinde olumlu sonuçlar alınması, atıkların çevresel yüklerini azaltmak ve betonun performansını iyileştirmek için umut verici bir yaklaşımdır. Bu tür uygulamalar, sürdürülebilir inşaat ve yeşil bina uygulamalarının önemli bir parçasını oluşturarak, gelecekte daha çevre dostu ve ekonomik yapılar inşa edilmesine katkıda bulunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel atık, beton, epoksi reçine, geri dönüşüm, çevre dostu

2025, 57 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Giray TOK

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Civil Engineering**

**Supervisor:
Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK**

Industrial waste consists of by-products, unused materials, production residues and various chemical substances generated during industrial and manufacturing processes. These wastes can emerge in a wide variety of forms depending on the type of production activity and often pose significant challenges in terms of environmental impact, health, and safety that must be properly managed. Recycling and reusing industrial waste can reduce raw material costs and create economic value. For instance, using recycled or reused resins in concrete production can enable the construction of economical, safe, and environmentally friendly structures.

In modern concrete technology, it is possible to produce concrete without compromising compressive strength and durability by incorporating industrial or non-industrial waste or surplus materials along with mineral and chemical additives. This study will evaluate the usability of epoxy resin waste –commonly used in the wind energy industry - in concrete. If positive results are obtained, it would represent a promising approach to reducing the environmental burden of waste and improving concrete performance. Such applications are an essential part of sustainable construction and green building practices contributing to the development of more environmentally friendly and cost-effective structures in the future.

Keywords: Industrial waste, concrete, epoxy resin, recycling, environmentally friendly

2025,57 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tezli yüksek lisans eğitim ve öğretimim boyunca başta çağdaş ve kaliteli yaklaşımı ile hizmet sunan Manisa Celal Bayar Üniversitesi'ne, yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK' e, tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerini paylaşan Sayın Arş. Gör. Dilan ÇANKAL' a, bu süreçte her zaman yanımda olduklarını hissettiğim çok değerli aileme ve hiçbir zaman bana desteğini esirgemeyen özel insan eşime ve çocuklarıma, yanımda olan değerli dönem arkadaşım Sayın Ferhad ELELE' ye teşekkürü bir borç bilirim.



Giray TOK
Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Santigrat Derece
mm	Milimetre
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
WWEA	Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği
CEFIC	Avrupa Kimya Endüstrisi Konseyi
CEM I	Portland Çimentosu
Ca(OH)₂	Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
FRP	Lif Takviyeli Polimer
KMnO₄	Potasyum Permanganat
CTP	Cam elyaf takviyeli plastikler
EuCIA	Avrupa Kompozit Endüstrisi Birliği
AER	Atık Epoksi Reçine
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
UPV	Ultrases Geçiş Hızı
TS EN	Türk Standardı Avrupa Normu
LOI	Kızdırma Kaybı

ŞEKİLLERDİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. Potasyum permanganatın hidrolizi.....	28
Şekil 2. Çimento.....	32
Şekil 3. Kum.....	32
Şekil 4. Kumun granülometri eğrisi	33
Şekil 5.Sertleşmiş atık epoksi reçine.....	34
Şekil 6. Atık epoksi reçinenin rendelenmesi	34
Şekil 7. Rendelenmiş atık epoksi reçine numunesi	35
Şekil 8. Öğütücü cihaz	35
Şekil 9. Öğütülmüş atık epoksi reçine numunesi	36
Şekil 10. Potasyum permanganat çözeltisi.....	36
Şekil 11. Hazırlanan kuru harç karışımı	38
Şekil 12. Çimento harçlarının suda kürlenmesi	38
Şekil 13. Taze harcın yayılma tablası testi.....	39
Şekil 14. Eğilme deneyi cihazı.....	40
Şekil 15. Ağırlıkça su emme deneyi.....	42
Şekil 16. Asit deneyinden bir görüntü.....	42
Şekil 17. Yüksek sıcaklık fırını	43
Şekil 18. Yayılma deneyi sonuçları.....	45
Şekil 19. Islak birim hacim ağırlık deneyi sonuçları.....	46
Şekil 20. Kuru birim hacim ağırlık deneyi sonuçları	47
Şekil 21. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları.....	48
Şekil 22. Basınç dayanımı değerleri.....	48
Şekil 23. Ağırlıkça su emme değerleri	49
Şekil 24. Asit deneyi sonuçları.....	50
Şekil 25. Yüksek sıcaklık deneyi sonuçları.....	51

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1. Çimentonun kimyasal içeriği	31
Tablo 2. Çimento harcı karışım oranları	37



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLolar DİZİNİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
GİRİŞ.....	12

BİRİNCİ BÖLÜM

1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	16
1.1. Kompozit Atıkların Betonda Kullanımı.....	16
1.2. Kompozit Malzemeler ve Kullanım Alanları.....	16
1.2.1. Termoset ve Termoplastik Reçineler ve Kimyasal Yeniden Kazanım Metodları.....	17
1.2.2. Termal Yeniden Kazanım Metodları	18
1.2.3. Biyolojik Yeniden Kazanım Metotları	19
1.2.4. Mekanik Yeniden Kazanım Metotları.....	20
1.3. Termoset Reçine Atıklarının Fonksiyonel Yüzey Dönüşümü	23
1.3.1. Fiziksel Yöntemler.....	23
1.3.2. Kimyasal Yöntemler	24
1.4. Termoset Reçine Atıkları ile Üretilen Betonların Sürdürülebilirlik Kapsamında Değerlendirilmesi.....	29
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı	29
2. MATERYAL VE YÖNTEM	31
2.1. Kullanılan Malzemeler	31
2.1.1. Çimento	31
2.1.2. Agregası	32
2.1.3. Su	33
2.1.4. Atık Epoksi Reçine (AER).....	33
2.1.5. Potasyum Permanganat (KMnO ₄).....	36
2.2. Yöntem	37

2.2.1. Çimento Harç Karışımlarının Hazırlanması.....	37
2.2.2. Çimento Harç Deneyleri	39
2.2.2.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	39
2.2.2.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi	39
2.2.2.3. Eğilme Dayanımı Deneyi	40
2.2.2.4. Basınç Dayanımı Deneyi.....	41
2.2.2.5. Ağırlıkça Su Emme Deneyi	41
2.2.2.6. Asit Deneyi	42
2.2.2.7. Yüksek Sıcaklık Deneyi	43
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
3.1. Yayılma Tablası Deneyi Sonuçları.....	44
3.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları	45
3.3. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları	47
3.4. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	48
3.5. Ağırlıkça Su Emme Deneyi Sonuçları	49
3.6. Asit Deneyi Sonuçları.....	50
3.7. Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları.....	51
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	52
KAYNAKÇA	53

GİRİŞ

Son yüzyılda bilim insanları ve mühendisler alaşımlama, ısıtma işlem, sertleştirme, kaplama gibi çeşitli işlemlerle malzeme özelliklerini büyük ölçüde geliştirmeyi başarmışlardır. Bunun için malzemelerin içyapılarının ve buna bağlı özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Doğru işlemlerden geçirilmiş uygun özelliklere sahip malzemenin doğru yerde kullanılması, imal edilen elemanların fonksiyonunu uzun süre boyunca, etkin şekilde ve sorunsuz olarak gerçekleştirmesini sağlar. Böylece kullanım yerine ve amacına en uygun malzemenin belirlenmesi ve üretilmesi mümkün olmuştur. Malzeme bilimi, malzemelerin yapıları ile özellikleri arasındaki ilişkinin ortaya konmasıyla ilgilenir. Böylece, malzemeye yeni/daha iyi özellikler kazandırmak üzere malzeme yapısının tasarlanması ile ilgilenen malzeme mühendisliğine temel oluşturur.

Yeni malzemelerin üretilmesi ve atık malzemelerin yeni nesil yapı malzemeleri olarak kullanılmasının önemi son yıllarda artmıştır. Artan nüfusla birlikte tüketimin de artması sonucunda oluşan katı atıklar, teknik ve sağlık yönüyle koşullara uygun bir şekilde bertaraf edilmedikleri zaman hava, su ve toprak kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı katı atıkların çevreye en az zarar verecek şekilde bertarafını sağlayacak yöntemlerin kullanılması gerekmektedir (Karagözoğlu vd. 2009).

Endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması, hammadde maliyetlerini düşürebilir ve ekonomik değer yaratabilir. Örneğin, geri dönüştürülmüş veya yeniden kullanılmış reçineler ile beton üretimi yapılarak ekonomik ve güvenli çevre dostu yapılar inşa edilebilir.

Türkiye’de yaygın bir atık ithalatı süreci yürüdüğü görülmektedir. Atık ithalatına ilişkin 2020/3 Sayılı Çevrenin Korunması Yönünden Kontrol Altında Tutulan Atıkların İthalat Denetimi Tebliği (Ürün Güvenliği ve Denetimi) 27.12.2019 tarih ve 30991 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Tebliğ hükümleri ile 2872 sayılı Çevre Kanunu ve ilgili yönetmelikler doğrultusunda 2019/18 sayılı Atık İthalatı Uygulama Genelgesi hazırlanmış ve 01.01.2020 tarihinde uygulamaya konmuştur. Atıkların ithalatı Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na belirlenecek usul ve esaslar çerçevesinde, Çevrenin Korunması Yönünden Kontrol Altında Tutulan Atıkların İthalat Denetimi Tebliği EK-1 Listesi’nde yer alan atıkların geri kazanımını yapmak üzere Çevre, Şehircilik ve İklim

Değişikliği Bakanlığı veya ilgili Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nden Geçici Faaliyet Belgesi veya Çevre İzin ve Lisans Belgesi almış olan sanayiciler tarafından yapılabilmektedir (Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü, 2023).

Küresel rüzgâr enerjisi piyasası, teknolojik yenilikler ve ölçek ekonomisi sayesinde son 10 yılda kapasitesinin neredeyse dört katına çıkmıştır. Dünya çapındaki tüm rüzgâr tesislerinin toplam kapasitesi şu anda 744 GW' a ulaşmıştır (WWEA, 2021). Karasal Rüzgâr Türbinlerinin Hizmetten Çıkarılması Endüstrisi Kılavuzu'na göre, Avrupa'da toplamda 34.000 türbin 15 yaşında veya daha eskidir (Wind Europe, 2020). Türkiye'de ise özellikle son yıllarda gerçekleştirilen yatırımlar sayesinde rüzgâr enerjisinin toplam kurulu gücü 9.305 MW' a ulaşmış ve toplam ulusal elektrik üretimindeki payı %8'i geçmiştir. Ülkemizde halen işletmede olan 239 adet santralde toplam 3.591 adet rüzgâr türbini bulunmaktadır (TÜREB, 2021). Mevcut kurulu güç açısından öne çıkan ilk dört il sırasıyla İzmir (1.798 MW), Balıkesir (1.220 MW), Çanakkale (751 MW) ve Manisa'dır (717 MW).

Mevcut durumda dünyada olduğu gibi ülkemizde de türbin kanadı atıkları çok büyük oranda atık depolama sahalarına gönderilmekte ve ekonomik değere dönüştürülememektedir. Dünyada rüzgâr türbin atıklarının yönetimi için sürdürülebilir, ticari ölçekte başarı örneği olabilecek çalışmalar oldukça yeni ve çok sınırlı sayıdadır. Rüzgâr enerjisi kurulumundaki hızlı artış nedeniyle, rüzgâr türbin kompozit atık miktarının da gelecekte oldukça artması beklenmektedir. Bu nedenle türbin kanat atıklarının değerlendirilerek ekonomiye kazandırılmasına yönelik çalışmaların tüm dünyada hızlanacağı bir döneme girilmektedir. Rüzgâr kanadında kullanılan kompozit malzeme miktarı MW başına 12 ile 15 ton arasındadır. 2019 yılında 185 bin ton olan rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanan toplam kompozit atık miktarının, 2039'da yaklaşık 8,8 milyon tona ulaşması beklenmektedir ve bu durum geri dönüşüm ihtiyacını daha da artırmaktadır (Future Bridge, 2020).

Rüzgâr türbin kanat atık malzemelerinin inşaat sektöründe de kullanılabileceği ifade edilmektedir. Burada önemli olan, parametre tane boyutudur. İnşaat malzemesi olarak kullanımında kısa lifler tercih edilmektedir. Cam elyaf malzemesinin maliyeti yüksek olduğu için asfalt malzemesi olarak tercih edilmese de üretilen asfaltın performansını geliştirme potansiyeli bulunmaktadır.

Yaklaşık 20 yıllık kullanım ömrüne sahip rüzgâr türbin kanatlarının zorlu iklim koşullarında sağlam kalabilmeleri için hafif ve dayanıklı malzemelerden üretilmeleri yıllar içinde bir zorunluluk haline gelmiştir. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemetleri, düşük ağırlıkları, tasarım esneklikleri, elektrik yalıtımı, paslanmazlık ve aşınmazlık gibi önemli özellikleri sayesinde pek çok sektörde kullanım alanına sahiptir. Kompozit ürünler, reçineler, termoset/termoplastik malzemeler, cam elyaf ve karbon elyaf gibi farklı hammadde gruplarının bir araya getirilmesi ile oluşan yapılardır. Bu nedenle türbin kanatları cam elyaf ve termoset reçineler başta olmak üzere farklı hammaddelerin birleştirilmesiyle kompozit olarak üretilmektedir. Malzeme özellikleri sayesinde kompozit ürünlerin kullanımı ve üretimi dünyada olduğu gibi Türkiye’de de hızla artmaktadır (Kompozit Sanayicileri Derneği, 2020).

Öte yandan, kimyasal özellikleri nedeniyle kompozit kanatların geri dönüşümü teknik olarak oldukça zordur ve geri dönüşüm süreçleri ticari olarak maliyet-etkin olmaktan uzaktır. Cam elyaf takviyeli plastikler (CTP) olarak anılan bu malzemeler genellikle ısıyla sertleşen plastiklerden (polyester veya epoksi reçine) ve cam elyaflardan oluşan yapılardır. Bu kompozit malzemeler üretim esnasında sertleştikten sonra tekrar termal olarak ayrıştırılmaları veya eritilmeleri mümkün olamamaktadır. Dolayısıyla, dünyada son yıllarda kompozit kanatların ve bu kanatların üretimi esnasında ortaya çıkan benzer yapıdaki kompozit atıkların geri dönüşümü konusunda Ar-Ge faaliyetleri yürütülmektedir.

Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği (WindEurope), Avrupa Kimya Endüstrisi Konseyi (CEFIC) ve Avrupa Kompozit Endüstrisi Birliği’nin (EuCIA) yayınladığı “Rüzgâr Türbini Kanadı Döngüsellliği” raporuna göre, rüzgâr türbini kanatlarını geri dönüştürmek için farklı teknoloji hazırlık seviyelerinde (TRL 4 ile 9 arasında) çeşitli alternatif teknolojiler vardır fakat henüz hepsi ticari ölçekte mevcut değildir ve maliyet-etkin bir çözüm sunmaktan uzaktır. Bu alternatif teknolojiler, mekanik öğütme, termal (piroliz, akışkan yatak), termo-kimyasal (solvoliz) veya elektro-mekanik (yüksek voltajlı darbe parçalanması) işlemler veya bu işlemlerin kombinasyonlarıdır. Bahsi geçen yöntemlerin elyaf kalitesine (uzunluk, mukavemet, sertlik özellikleri) çeşitli olumsuz etkileri olabildiği için, geri dönüştürülmüş elyafların kullanım alanları konusunda da daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca, aynı rapora göre, günümüzde kompozit atıkların geri dönüşümü için en yaygın teknoloji çimento endüstrisinde yakıt kaynağı olarak

kullanımıdır. Artan atık miktarıyla başa çıkabilmek için yakıt olarak kullanım olanaklarının yaygınlaştırılması gerektiği ifade edilmektedir (Wind Europe, 2020).

Rüzgar enerjisi endüstrisinde kullanılan kompozit atıkların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve ekonomik yarar sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu, çevre dostu teknolojilerin ve üretim yöntemlerinin benimsenmesini, atıkların geri dönüştürülmesini ve yeniden kullanılmasını teşvik edecektir.

Atık malzemelerin değerlendirilebileceği yeni alanlar ve yöntemler oluşturmak bilim dünyasının önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Atık maddeler çeşitli yöntemler kullanılarak tüketilmeye çalışılmaktadır. Doğal kaynakların sınırlı olması, geri dönüşüm uygulamalarının özellikle inşaat sektöründe potansiyel bir hammadde kaynağı olarak kullanılması alternatifini ortaya çıkarmıştır (Demirel vd., 2017).

Teknolojideki gelişmeye paralel olarak çok hızlı bir şekilde dünya üzerindeki kaynaklar tükenmektedir. Beton, sudan sonra dünyada en fazla tüketilen malzeme durumundadır (Karakule vd., 2005). Betonun bu kadar fazla tüketilmesindeki en büyük etken emsallerine göre daha ekonomik olmasıdır. Örneğin; beton, çelikten 20 kat daha az enerji ile üretilebilmektedir. (Gönen vd., 2012)

Eski türbin kanatlarının geri dönüştürülmesinin rüzgâr sanayi için yakın gelecekte öncelikli konulardan birisi olacağı görülmektedir. Çimento sektörü dışında, rüzgâr türbin atıklarının kırıldıktan sonra çeşitli ürünlerde, örneğin betonda ve asfaltta kullanılabilirdiği, dolgu malzemesi olarak değerlendirilebildiği de bilinmektedir.

Bu nedenle, uygulamaların yalnızca çimento sektöründe ek yakıt olarak kullanımıyla kalmayacağı yukarıda bahsedilen alternatif teknolojilerin de yoğun olarak araştırılacağı ve uygulamaya konacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmada yapı malzemesi olarak kullanılan betona; kimi zaman agrega olarak kimi zaman da bağlayıcı olarak katılan klasik malzemelerin dışında, endüstriyel atık malzemelerin katılıp katılamayacağının literatürden araştırılması ve reçine atıkların inşaat sektörü yapı malzemelerinden birisi olan betonda kullanılmasının, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine ne denli etki edeceği değerlendirilerek, dayanımından ödün vermeden çevre dostu beton imal edilmesi

amaçlanmaktadır. Böylece doğa dostu, çevreci ve güvenli yapılar inşa edilmesine katkı sağlanabilecektir.

1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kompozit Atıkların Betonda Kullanımı

Günümüzde hızla artan kompozit esaslı malzeme tüketimiyle birlikte bu ürünlerin atıkları da çevresel sorun haline gelmiştir. Özellikle termoset reçineler ve cam elyaf gibi takviyelerle üretilmiş kompozit atıklar, doğada çözünmeyen yapıları nedeniyle bertarafı zor olan atık türleri arasında yer almaktadır.

Kompozit atıkların beton gibi kompozit yapı malzemelerinde yeniden kullanımı hem atık miktarını azaltma hem de inşaat sektöründe sürdürülebilirlik sağlama açısından önemlidir.

Kompozit atıklar, iki veya daha fazla farklı malzemenin (örneğin plastik + cam elyaf, reçine + karbon elyaf) bir araya getirilmesiyle oluşan, ayrıştırılması güç ve geri dönüştürülmesi zor olan malzemelerdir.

Bu tür atıklar hafiflik, yüksek kimyasal direnç, düşük su emme oranı, lifli olanlarında yüksek elastisite modülü gibi yapısal özelliklerinden ötürü beton üretiminde alternatif malzeme olarak kullanılabilir.

Çekme dayanımı artırmak ve çatlak kontrolünü sağlamak için öğütülerek lif şeklinde betona eklenebilir. Hafif beton uygulamalarında, granül formda agrega yerine ikame edilebilir. Dolgu katkısı olarak da toz halde sınırlı oranda çimento yerine kullanılabilir.

Böylece atıkların geri kazanımı, doğal malzeme tüketiminde azalma ve hafif yapı elemanlarının üretilmesi gibi sonuçlara ulaşılması ile etkin atık yönetimi ve doğal kaynakların korunması sağlanacaktır (Ali vd, 2021).

1.2. Kompozit Malzemeler ve Kullanım Alanları

Kompozit malzeme denilince genel olarak, birbirinden farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip birden çok malzemenin bir araya gelmesi ile ortaya bambaşka özelliklere sahip olan yeni bir malzemenin çıkması anlaşılmaktadır. Her kompozit malzemede genellikle iki tip madde bulunur; matris ve takviye malzemesi

olarak adlandırılan bu malzemelerde takviye malzemesi taşıyıcı görev üstlenir ve etrafında bulunan matris faz ise onu bir arada tutmaya ve desteklemeye yarar.

Günümüzde kompozit malzemeye en bilinen ve en çok kullanılan örnek olarak betonarme verilebilir. Çimento, kum ve agregadan (kırmataş) meydana gelen malzeme (matris), çelik çubuklar (takviye) ile desteklenir. Bir diğer tanınmış kompozit malzeme ise kerpiçtir. Çamur ve samanın karıştırılması ile oluşturulan bu malzeme oldukça eskiden beri bilinen belki de insanlık tarihinin en eski yapı malzemesidir ve halen Türkiye'de de kırsal kesimlerde kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişimiyle birlikte, oldukça dinamik bir yapıya sahip olan kompozit malzemeler, maliyetlerin düşürülmesi, verimliliğin artırılması veya ürüne ilişkin sorunlara çözüm getirilmesine imkan tanınması sayesinde çok çeşitli iş alanlarında artan bir kullanıma sahip olmaktadır. Kompozit malzemeler sağladıkları avantajlarla taşımacılık, tüketim malları, inşaat, iş aletleri ve malzemeleri, uzay/savunma gibi sektörlerdeki gelişmeler açısından yaratıcı bir fırsat oluşturmaktadır.

1.2.1. Termoset ve Termoplastik Reçineler ve Kimyasal Yeniden Kazanım Metodları

Kompozit malzemeler plastik malzeme sınıfından ürünlerdir. Ancak bütün plastikler kompozit değildir. Günümüzde plastik malzemelerin büyük çoğunluğu saf plastik reçineler kullanılarak kalıplanmaktadır. Oyuncaklar, dekoratif amaçlı ürünler, ev eşyaları ve benzeri birçok plastik son ürün uygulamasında ürünlerin işlevselliği için saf haldeki plastik reçinenin mukavemeti yeterli olmaktadır.

Mühendislik termoplastikleri, maliyetleri saf reçinelere göre daha fazla olmakla beraber daha yüksek “Yük Altında Deformasyon” sıcaklığı (HDT) gibi üstün performans değerlerini sağlayabilirler. İlave bir mukavemet değerine gerek duyulduğunda, plastikler genel olarak lif haline getirilmiş takviye malzemeleriyle istenilen mukavemet değerini karşılayacak şekilde takviye edilirler.

Herhangi bir termoset veya termoplastik reçine takviye edildiği zaman “kompozit” olarak adlandırılmaktadır. Plastiklerin büyük bir çoğunluğu ve hemen hemen takviyesiz plastiklerin tamamı termoplastiktir. Termoplastik malzemeler ısıtıldığında yumuşar ve yarı akışkan haldeyken yeniden şekillendirilebilir. Daha sonra yeniden farklı bir ürün elde edilmek istenirse, termoplastik malzemenin

yeniden ısıtılması ve kalıplanması mümkündür. Takviyeli plastiklerin büyük çoğunluğu termoset yapıdadır. Termoset reçineler genellikle sıvı haldedirler. Kalıplama sırasında meydana gelen kimyasal ve egzotermik (ısıveren) reaksiyonlar sonucunda termoset reçineler sertleşmektedir. Genellikle termoset reaksiyonlar geri dönüşümlü değildir. Termoplastiklerin aksine bir kez şekillendiklerinde bir daha yeniden şekillendirilemezler.

Termoset reçineler uygun malzemeler ile takviye edildiğinde (cam, karbon, aramid liflerinden oluşan elyaflar veya dokunmuş kumaşlar bunlara örnek olarak verilebilir) ağırlıklarına oranla teknolojinin geliştirdiği en dayanıklı malzemeler arasında yer almaktadır. Kompozit sektöründe kullanılan en yaygın termoset reçineler; doymamış polyesterler, epoksiler, vinilesterler, poliüretanlar ve fenoliklerdir.

Kimyasal yeniden kazanım, termoset polimerlerin zincirlerini daha küçük moleküllere ayırarak geri dönüştürülmesini sağlar; ancak özellikle epoksi gibi dayanıklı polimerler için bu yöntemler ekonomik, çevresel ve teknik zorluklar içerir. Bu yöntemler arasında doymamış polyesterler için kullanılan ve transesterifikasyon reaksiyonu ile zinciri kıran glikoliz, su ile parçalama esasına dayanan hidroliz (epoksiler için verimsiz), yüksek sıcaklık ve basınç altında çözücülerle çalışan solvoliz ve süperkritik akışkanlar (enerji tüketimi yüksek) ve güçlü oksitleyicilerle çalışan oksidatif parçalama (toksik yan ürünler) bulunur. Bu kimyasal süreçler sonucunda elde edilen monomerler, yeni polimerlerin üretiminde ham madde olarak kullanılabilirken, reçinenin yapısal özelliklerindeki bozulmalar nedeniyle doğrudan yeniden kullanımı genellikle mümkün değildir.

1.2.2. Termal Yeniden Kazanım Metodları

Termoset polimerlerin geri dönüşümü için kimyasal yöntemlerin yanı sıra mikrodalga işlemi ve piroliz gibi farklı teknikler de kullanılır. Mikrodalga işlemi, epoksi veya poliüretan gibi malzemelerin yapısını daha gözenekli hale getirerek bozunmayı hızlandırırken, özellikle kalın parçalarda homojen ısı dağılımını sağlamakta zorlanır.

Piroliz (ısıl bozunma) ise, termoset reçinelerin oksijensiz ortamda 400–800 °C arasında ısıtılmasıyla sıvı ve gaz fazlarına ayrıştırılmasına dayanır. Ancak bu yöntem yüksek enerji tüketimi ve karmaşık gaz arıtma sistemleri gerektirir.

1.2.3. Biyolojik Yeniden Kazanım Metotları

Biyolojik yeniden kazanım metotları, çevre dostu, enerji tasarruflu ve sürdürülebilir teknolojiler arasında yer almakta olup, atık materyallerden değerli bileşiklerin geri kazanılmasında mikroorganizmaların veya biyolojik bileşenlerin kullanıldığı yöntemlerdir. Bu yöntemler, özellikle ağır metaller, organik kirleticiler ve endüstriyel atıkların arıtılması ve geri dönüştürülmesinde etkili alternatifler sunmaktadır. Kimyasal veya fiziksel yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetli ve ekosistem üzerinde daha az zararlı olan bu metotlar, çevresel yönetim stratejilerinde giderek daha fazla tercih edilmektedir (Gadd, 2009; Jain vd. 2016).

Biyolös, metal içeren katı atıklardaki metallerin mikroorganizmalar aracılığıyla çözünür hale getirilmesi sürecidir. Bu yöntemde, genellikle demir ve kükürt oksitleyici bakteriler kullanılarak, metaller sıvı faza transfer edilir. *Acidithiobacillus ferrooxidans* ve *Leptospirillum ferrooxidans* gibi mikroorganizmalar, özellikle sülfidik cevherlerden bakır, altın, çinko ve nikel gibi metallerin geri kazanılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Rawlings, 2002). Biyolös, düşük tenörlü cevherlerin değerlendirilmesinde ekonomik bir çözüm sunmakta ve geleneksel madencilik uygulamalarına çevreci bir alternatif oluşturmaktadır.

Biyosorpsiyon, canlı ya da ölü mikroorganizmaların hücre yüzeylerinde bulunan fonksiyonel gruplar aracılığıyla ağır metallerin ve diğer kirleticilerin adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırılması işlemidir. Bu yöntem, özellikle endüstriyel atık sularında bulunan kurşun, kadmiyum, cıva ve krom gibi toksik elementlerin gideriminde oldukça etkilidir. Algler, bakteriler, mantarlar ve mayalar gibi çeşitli biyokütleler, yüksek yüzey alanları ve metal bağlayıcı özellikleri sayesinde sorbent materyal olarak kullanılmaktadır (Volesky, 2007). Biyosorpsiyonun hızlı, ekonomik ve geri dönüştürülebilir olması, bu yöntemin uygulama potansiyelini artırmaktadır.

Biyoprosesler, organik atıkların mikroorganizmalar veya enzimler aracılığıyla değerli ürünlere dönüştürülmesini amaçlayan biyoteknolojik süreçleri kapsamaktadır. Bu süreçler sayesinde, tarımsal veya kentsel organik atıklardan biyogaz, biyoplastik, enzim, organik asit gibi çeşitli ürünler elde edilebilmektedir. Aerobik kompostlama ve anaerobik fermentasyon, biyoproseslerin en yaygın örnekleri arasında yer almakta olup, hem atık miktarının azaltılmasını hem de enerji geri kazanımını mümkün kılmaktadır (Kumar, 2021).

Biyoremediasyon, kirlenmiş çevresel ortamların (toprak, su, hava) mikroorganizmalar aracılığıyla temizlenmesini sağlayan doğal bir arıtım yöntemidir. Bu süreçte, mikroorganizmalar kirleticileri metabolize ederek daha az zararlı ya da zararsız bileşiklere dönüştürür. Her ne kadar doğrudan materyal geri kazanımı sağlamasa dabioremediasyon, yeniden kullanım için uygun hale getirilen ortamların iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Vidali, 2001). Bu bağlamda, çevresel rehabilitasyon projelerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Son yıllarda gelişmekte olan mikrobiyal elektrokimyasal sistemler (MES), atık sulardan hem enerji hem de değerli maddelerin geri kazanılmasına olanak sağlayan yenilikçi biyoteknolojik uygulamalardır. Mikrobiyal yakıt hücreleri (MFC) ve mikrobiyal elektroliz hücreleri (MEC), bu sistemlerin başlıca örnekleri arasında yer almaktadır. Bu teknolojiler, organik bileşikleri parçalayarak elektrik üretimi sağlarken, aynı zamanda su arıtımı ve değerli kimyasalların üretimi için de kullanılmaktadır (Logan vd., 2006).

Bazı mikroorganizmalar, çapraz bağlı termoset reçinelerde bulunan kimyasal bağları parçalayabilme kapasitesine sahiptir. Bu biyolojik bozunma süreçleri, düşük enerji gereksinimleri ve çevreye duyarlı yapıları sayesinde sürdürülebilir atık yönetimi açısından önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Gebremariam vd., 2023). Bununla birlikte, bu tür biyolojik işlemler genellikle uzun süreli reaksiyonlar gerektirir ve bozunma çoğunlukla yüzeyle sınırlı kalmaktadır (Elsacker vd., 2020). Ayrıca, mevcut biyobozunur yaklaşımlar, endüstriyel ölçekte termoset esaslı kompozitlerin geri dönüşümü için henüz yeterli verimliliği sağlayamamaktadır (Ragaert vd., 2017). Bu durum, biyolojik yöntemlerin büyük ölçekli uygulamalara entegrasyonunda teknolojik ve ekonomik zorlukların aşılması gerektiğini göstermektedir.

1.2.4. Mekanik Yeniden Kazanım Metotları

Mekanik yeniden kazanım metotları, atık malzemelerin fiziksel işlemler yoluyla yeniden kullanılabilir hammaddeye dönüştürülmesini esas alan geleneksel ve yaygın bir geri dönüşüm yaklaşımıdır. Bu yöntemler, özellikle termoplastik polimerler ve polimer matrisli kompozit malzemeler gibi yapısal bozulmaya duyarlı olmayan atıklar için uygundur. Kimyasal yapıyı değiştirmeden, atığın fiziksel

boyutları küçültülerek veya ayrıştırılarak yeniden üretim süreçlerine entegre edilmesi sağlanır. (Hopewell vd., 2009).

Toplama ve ayırma adımı ile atık malzemelerin uygun şekilde sınıflandırılması ve kontaminasyonun en aza indirilmesi amacıyla manuel veya otomatik ayırma işlemleri gerçekleştirilir. Boyut Küçültme adımı ile malzemeler kırma, öğütme veya parçalama gibi işlemlerle fiziksel olarak küçültülerek işlenebilir hale getirilir. Yıkama ve temizleme adımı ile yüzeydeki kirleticiler uzaklaştırılarak ürün kalitesi artırılır. Ekstrüzyon ve granülasyon adımı ile temizlenen malzemeler ısıtılarak ekstrüzyon yoluyla eritilir ve granül haline getirilerek yeniden üretime uygun hale getirilir (Al-Salem vd., 2009).

Mekanik geri dönüşüm, kimyasal ve biyolojik yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetli ve hızlıdır. Enerji tüketimi nispeten düşüktür ve işlem sonrasında doğrudan üretimde kullanılabilecek hammadde elde edilebilir. Ancak her geri dönüşüm döngüsünde polimerlerin yapısal bütünlüğünde ve mekanik özelliklerinde belirli düzeyde bozulmalar meydana gelir (Singh vd., 2017). Ayrıca, çok katmanlı veya heterojen yapıya sahip malzemelerin işlenmesi, mekanik yöntemler için zorluk teşkil etmektedir.

Mekanik geri dönüşüm; plastik ambalaj atıkları, otomotiv parçaları, inşaat sektörü atıkları ve elektronik atıklar gibi çok çeşitli malzeme gruplarının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle polietilen (PE), polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET) gibi yaygın plastik türlerinin geri kazanımında etkin bir yöntemdir (PlasticsEurope, 2023).

Son yıllarda, termoset esaslı kompozit atıkların geri dönüşümünde fiziksel yöntemlerle küçültülerek agrega veya dolgu malzemesi olarak yeniden kullanımı ön plana çıkmaktadır. Mekanik kırma ve öğütme gibi fiziksel işlemler, kimyasal işleme gerek duymamaları ve çevresel olarak ikincil kirlilik oluşturmamaları nedeniyle çevre dostu ve uygulanabilir yöntemler arasında yer almaktadır (Tittarelli vd., 2010). Bu yöntemler, özellikle geri dönüştürülemeyen termoset atıkların (örneğin epoksi esaslı kompozitler) beton gibi inşaat malzemelerinde değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Epoksi reçinenin beton üretiminde kullanımı, tamamen yeni bir yaklaşım değildir. Literatürde genellikle epoksi reçinenin sıvı formda katkı maddesi olarak

beton karışımlarına eklendiği çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmada farklı olarak, epoksi esaslı kompozit atıklar doğrudan fiziksel olarak öğütülmüş ve herhangi bir kimyasal işleme tabi tutulmadan agrega olarak değerlendirilmiştir. Bu uygulama, hem katı atık yönetimi açısından sürdürülebilir bir yöntem sunmakta hem de beton üretiminde doğal kaynak kullanımını azaltmayı hedeflemektedir.

Termoset esaslı atıklar, inert yapıda olmaları nedeniyle alkali-silika reaksiyonuna girmemekte ve bu sayede betonun genleşme kaynaklı bozulmalarına karşı direnç kazandırmaktadır. Tittarelli ve Moriconi tarafından yapılan bir çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) atıklarının toz haline getirilerek beton karışımında kullanılması durumunda, bu tür zararlı kimyasal reaksiyonların oluşmadığı tespit edilmiştir (Tittarelli vd., 2010).

Ancak, polimer bazlı agregaların beton içinde kullanılmasında en kritik husus, agrega ile çimento matrisi arasındaki ara yüzey etkileşimidir. Polimer atıklar, genellikle hidrofobik yüzey özelliklerine sahip oldukları için taze beton karışımında yüzeylerinin suyu itmesi, çimento hamurunun bu parçacıklar etrafında yeterince hidratasyon gerçekleştirmesini engellemektedir. Bu durum, çimento matrisi ile agrega arasında zayıf bir geçiş zone (interfacial transition zone, ITZ) oluşmasına yol açmakta, bu da mekanik dayanım üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır (Zhu vd., 2021). Nitekim birçok çalışma, atık plastik ve termoset esaslı agregaların betonun basınç ve eğilme dayanımlarında azalmaya neden olduğunu ve bunun büyük ölçüde zayıf aderans ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, literatürde epoksi ve benzeri termoset esaslı atıkların uygun işlenme ve oranlarda kullanılması durumunda beton performansını kabul edilebilir düzeyde koruyabildiğine dair umut verici bulgular mevcuttur. Bir çalışmada, melamin-formaldehit (MF) esaslı üretim atıklarını hem toz hem de granül formda, nehir kumu yerine hafif beton üretiminde ince agrega olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, özellikle toz formda kullanılan MF atığının, çimento hamuru ile daha homojen bir bağ kurduğu ve daha iyi bir paketlenme sağladığı için mekanik dayanımı artırdığı görülmüştür. Ayrıca, MF atığının yüksek su emme kapasitesi nedeniyle karışımların su emme oranlarında artış gözlenmiştir. SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) analizleri, toz formdaki MF parçacıklarının çimento matrisiyle daha iyi bir aderans sağladığını göstermiştir.

Epoksi esaslı atıkların beton karışımında ince agrega yerine kullanımı üzerine yapılan güncel bir çalışmada, He ve arkadaşları (He vd., 2023), cam elyaf takviyeli epoksi plaka üretiminden kalan hurda parçaları fiziksel olarak öğütürük üç farklı tane boyutuna ayırmış (0–4 mm, 4–9 mm ve >9 mm) ve bu malzemeleri %5, %10 ve %15 hacimsel oranlarda beton karışımına katmıştır. Araştırmanın bulgularına göre, epoksi atık agreganın kullanımı, betonun birim hacim ağırlığını azaltırken, işlenebilirliği (slump değeri) artırmıştır. Mekanik performans açısından en iyi sonuçlar, %10 oranında ve 4–9 mm fraksiyondaki atık agreganın kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Bu oran ve fraksiyonda, betonun hem basınç dayanımı hem de yarma çekme dayanımı artış göstermiştir. Ancak %15 gibi daha yüksek ikame oranlarında bu iyileştirici etkinin azaldığı, hatta bazı durumlarda dayanımda düşüşler yaşandığı gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, epoksi esaslı kompozit atıkların beton üretiminde belirli oranlarda ve uygun granülometrik özelliklerde kullanıldığında, mekanik dayanımı koruyabildiğini ve hatta belirli koşullarda artırabildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu uygulama hem çevresel açıdan katı atık yükünü azaltmakta hem de doğal kaynakların tüketimini sınırlandırarak sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

1.3. Termoset Reçine Atıklarının Fonksiyonel Yüzey Dönüşümü

Çimento esaslı yapılarda termoset reçine atıklarının verimli biçimde değerlendirilebilmesi, öncelikle bu malzemeler ile bağlayıcı arasındaki aderans sorunlarının giderilmesine bağlıdır. Bu amaçla, yüzey karakteristiklerini geliştirmeye yönelik çeşitli modifikasyon yöntemleri ortaya konmuştur. Kimyasal veya fiziksel işlemlerle atık polimerlerin yüzeyinin aktifleştirilmesi, çimento, asfalt gibi inorganik bağlayıcılarla daha güçlü bir kenetlenme sağlayarak kullanım performansını artırabilmektedir.

1.3.1. Fiziksel Yöntemler

Kimyasal reaksiyon oluşturmada, yalnızca fiziksel etkilerle polimer yüzey özelliklerini değiştiren yöntemler, yüksek enerjili ışınım tekniklerine dayanmaktadır. Bu teknikler, polimerin atomik yapısını ve pürüzlülüğünü değiştirerek bağlayıcı matris ile aderansı artırır. Literatürde en yaygın olarak plazma işlemleri, gamma radyasyon ve mikrodalga uygulamaları öne çıkmaktadır.

Plazma işlemleri, polimer yüzeyinin yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilmesiyle hidrofilik grupların oluşmasını ve pürüzlülüğün artmasını sağlar. Bu durum, yüzeyin ıslanabilirliğini ve çimento ile kenetlenmesini güçlendirir. Gamma radyasyonu, polimer zincirlerinde kopma ve kısmi oksidasyon yoluyla düşük molekül ağırlıklı bir yüzey tabakası oluşturur. Böylece su tutma ve bağlayıcı ile etkileşim kapasitesi artar. Mikrodalga uygulamaları, termoset atıkların iç yapısında lokal ısınma ve kısmi ağ kırılması meydana getirir. Özellikle kauçuk atıklarda devulkanizasyon ve yapısal gevşetme amacıyla kullanılabilir.

Fiziksel yöntemlerin saha uygulamaları çeşitli kısıtlar barındırır. Plazma işlemleri, laboratuvar ölçeğinde etkili olmakla birlikte, büyük hacimli uygulamalarda yüksek ekipman ihtiyacı ve süreç parametrelerinin kontrol güçlüğü nedeniyle sınırlıdır. Ayrıca işlemlerle kazandırılan yüzey özellikleri zamanla azalabilir. Gamma radyasyonu, yüksek doz ve uzun süreli ışınlama gerektirdiğinden güvenlik ve tesis altyapısı açısından zorluk taşır. Mikrodalga yönteminde ise kalın numunelerde homojen ısınma sağlamak güç olup, metal içeriği bulunduğu kırılcım riski ortaya çıkabilir.

1.3.2. Kimyasal Yöntemler

Atık polimerlerin yüzey kimyasını değiştirmeye yönelik yöntemler, polimerin çeşitli kimyasallarla reaksiyona sokularak yüzey enerjisinin, ıslanabilirliğinin ve çimento matrisiyle aderans kapasitesinin artırılmasını amaçlar. Bu teknikler, özellikle çapraz bağlı ve inert yapıya sahip epoksi reçineler gibi termoset atıklarda yüksek etkililik göstermektedir.

Asit/baz işlemleri, polimer yüzeyinin alkali veya asidik çözeltilerle muamele edilmesine dayanır. Bu işlem, yüzeydeki hidrokarbon bazlı kirleticileri giderir, hidrofilik fonksiyonel gruplar kazandırır ve bağlayıcı matrislerle kimyasal etkileşimi güçlendirir. Böylece hidrofobik karakterdeki polimer, daha hidrofilik hale gelerek çimento hamuruyla daha iyi kenetlenir.

Örneğin, geri kazanılmış lastik parçacıklarının derişik sülfürik asitle işlenmesi, yüzey pürüzlülüğünü ve ıslanabilirliğini artırmış; bu durum, lastik katkılı betonun taze karışım kıvamını iyileştirerek basınç dayanımında artış sağlamıştır. Ancak, aynı çalışmada NaOH, etanol, akrilik asit, polietilen glikol (PEG) ve hidrojen

peroksit gibi diğer kimyasal işlemlerin, kauçuklu beton üzerinde ya sınırlı etki gösterdiği ya da taze betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilediği rapor edilmiştir.

Oksidatif yüzey işlemleri, polimer atıkların yüzeylerine güçlü oksitleyici ajanlar (örn. H_2O_2 - hidrojen peroksit, $KMnO_4$ - potasyum permanganat) uygulanarak yüzey zincirlerinde selektif bozulma ve fonksiyonel grup oluşumunu sağlamayı amaçlar. Amaç, yüzeyin polaritesini ve yüzey enerjisini artırmak; böylece inorganik bağlayıcılarla (çimento, asfalt) fizikokimyasal etkileşimi ve mekanik aderansı güçlendirmektir.

Oksitleyici ajanlar, polimer zincirlerinin yüzey bölgelerinde C-C ve C-H bağlarını parçalar; bu kopma reaksiyonları kısmi oksidasyona yol açar. Kopma ve oksidasyon sonrası yüzeyde -OH (hidroksil), C=O (karbonil), -COOH (karboksil) gibi oksijenli fonksiyonel gruplar oluşur. Bu fonksiyonel gruplar hem hidrofilik karakter kazandırır hem de çimento hamurundaki $Ca(OH)_2$, silikat fazları veya asfalttaki polar bileşenlerle hidrojen bağları / iyonik etkileşimler kurabilir. Ayrıca yüzeyde hafif etching (aşındırma) oluşabilir; bunun sonucu pürüzlülük artışı ile mekanik kilitlenme (mekanik aderans) da desteklenir.

$KMnO_4$ güçlü bir oksitleyicidir; organik yüzeylerde MnO_4^- iyonu organik bağları okside ederken Mn(IV) oksit (MnO_2) veya düşük değerlikli mangan bileşikleri şeklinde tortu bırakabilir. Bu tortu yüzeyde katalitik veya renk değişikliği yaratabilir; bu yüzden işleme sonrası nötralizasyon ve yıkama adımları (ör. su ile yıkama, sonra seyreltilmiş oksalat veya bisüfit çözeltileriyle Mn giderimi) sıklıkla gereklidir.

Graflama, bir polimer yüzeyine farklı monomer zincirlerinin kimyasal olarak bağlanması yoluyla yeni fonksiyonel özellikler kazandırılmasını sağlar.

Devulkanizasyon yöntemi, kükürtlü çapraz bağlara sahip polimerlerde (ör. CR) bu bağların çözülmesiyle yüzeyin esnekliğini ve reaktivitesini artırır.

Her iki yöntemin etkinliği, yüzeyde önceden mevcut fiziksel kusurların varlığıyla artar; bu nedenle mekanik öğütme sonrası uygulanan kimyasal işlemler, bağlayıcı ile yüzey arasındaki etkileşimi önemli ölçüde güçlendirir.

Potasyum Permanganat ($KMnO_4$) bağlayıcı ajanlarla işlem, polimer yüzeylerinin kimyasal olarak aktif hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir yöntemdir. $KMnO_4$ ile yapılan işlemler, yüzeyde yeni fonksiyonel grupların

oluşmasını sağlayarak yüzey enerjisini ve polaritesini artırır. Bu sayede, özellikle inert ve hidrofobik yapıya sahip termoset reçine atıkları gibi malzemelerin çimento veya diğer inorganik bağlayıcılarla olan aderansı önemli ölçüde geliştirilir.

Uygulama sırasında KMnO_4 , polimer yüzeyindeki hidrokarbon bağlarını parçalayarak karbonil (C=O), karboksil ($-\text{COOH}$) ve hidroksil ($-\text{OH}$) gibi oksitlenmiş fonksiyonel grupların oluşumunu tetikler. Bu kimyasal dönüşümler, bağlayıcı ajanlarla malzeme yüzeyinin daha güçlü ve kalıcı etkileşimler kurmasını sağlar. Özellikle beton, asfalt gibi çimento bazlı sistemlerde kullanılan atık polimerlerin yüzeylerinin KMnO_4 ile yüzey iyileştirmesi hem malzeme dayanıklılığını artırmak hem de karışımın işlenebilirliğini iyileştirmek için etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Ayrıca, KMnO_4 ile yapılan oksidatif işlemler, yüzeydeki pürüzlülüğü artırarak mekanik kilitlenme etkisini de destekler. Böylece hem kimyasal hem de fiziksel bağlanma mekanizmaları güçlendirilmiş olur. Bu yöntem, bağlayıcı ajanların polimer atıklar üzerindeki performansını optimize etmek için tercih edilen çevre dostu ve ekonomik bir yüzey modifikasyon tekniğidir.

Uygulama genellikle asidik ortamda (pH 2–3) ve kontrollü sıcaklıkta gerçekleştirilir. KMnO_4 çözeltisine maruz kalan polimer yüzeyi hem kimyasal yapısında değişiklikler geçirir hem de yüzey pürüzlülüğü artar. Artan pürüzlülük, mekanik kilitlenme etkisini güçlendirerek bağlayıcının yüzeye tutunmasını destekler. Bu sayede, özellikle termoset reçineler gibi düşük yüzey enerjisine sahip malzemelerin aderansı önemli oranda iyileştirilir.

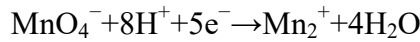
KMnO_4 ile birçok farklı atık yüzeyinin iyileştirilmesi mümkündür. Geri dönüştürülmüş kauçuk parçacıkları KMnO_4 çözeltisinde oksidasyona tabi tutulduğunda, yüzeylerinde hidrofilik gruplar artar ve su temas açısı düşer. Böylece kauçuklu betonun işlenebilirliği ve mekanik dayanımı belirgin şekilde yükselir. Epoksi yüzeyleri KMnO_4 ile ön işleminden geçirilerek, yapışma dayanımı artırılır; bu da kaplama ve laminasyon uygulamalarında daha sağlam bağlanma sağlar. Polietilen ve polipropilen gibi düşük enerji yüzeyli termoplastikler, KMnO_4 ile modifiye edilerek yapışma özellikleri iyileştirilmekte ve kompozit malzeme üretiminde performans artışı sağlanmaktadır.

KMnO₄ ile yüzey modifikasyonu çevre dostu, nispeten düşük maliyetli ve laboratuvar ile endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir yöntemdir. Ancak işlem parametrelerinin (dozaj, sıcaklık, işlem süresi, pH) dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir; aksi halde yüzey aşırı okside olabilir ve mekanik dayanıklılık olumsuz etkilenebilir. Ayrıca, yüksek konsantrasyonlarda KMnO₄ kullanımı çevresel ve güvenlik riskleri taşıdığından uygun arıtma ve önlemlerle desteklenmelidir.

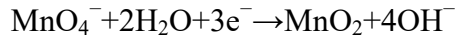
Sonuç olarak, KMnO₄ ile oksidatif yüzey modifikasyonu, termoset polimer atıklarının çimento bazlı ve diğer inorganik bağlayıcılarla olan aderansını artırmak için etkin bir yöntem olup, sürdürülebilir malzeme geri kazanımı ve performans iyileştirmesi açısından önem taşımaktadır.

KMnO₄ hidrolizi, potasyum permanganat su içinde çözündüğünde, oksitleyici MnO₄⁻ iyonları açığa çıkar. Bu iyonlar kısmi olarak MnO₂ (mangan dioksit) ve diğer Mn oksit türlerine indirgenebilir. Aynı zamanda ortamda hidroksil (OH⁻) grupları ve oksijen radikalleri (O•, OH•) oluşabilir. KMnO₄ ve türevleri polimer yüzeyinde oksidatif reaksiyonlar gerçekleştirir. Yüzeyde –OH, –COOH, –C=O gibi fonksiyonel gruplar oluşturulur. Oluşan hidrofilik yüzey grupları, C-S-H jel yapısındaki kalsiyum iyonları (Ca²⁺) ve silikat yapı ile kimyasal bağlar oluşturur. Böylece bağlayıcı ile polimer atık arasında güçlü kimyasal ve fiziksel etkileşim sağlanır. Ancak, hidroliz (suyun bir bileşiği parçalaması) denklemi, ortamın pH seviyesine göre farklılık gösterir. Potasyum permanganatın hidroliz denklemleri aşağıdaki gibidir.

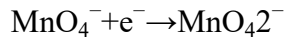
- **Asidik Ortamda:** Permanganatıyonu (MnO₄⁻) indirgenerek renksiz mangan (II) iyonuna (Mn²⁺) dönüşür.



- **Nötr veya Zayıf Bazik Ortamda:** Permanganatıyonu (MnO₄⁻) indirgenerek kahverengi bir katı olan mangan dioksit (MnO₂) oluşturur.



- **Kuvvetli Bazik Ortamda:** Permanganatıyonu (MnO₄⁻) yeşil renkli manganat iyonuna (MnO₄²⁻) dönüşür.



C–H bağının kendisi bir hidroliz tepkimesine girmez. Hidroliz, genellikle esterler, amidler veya glikozitler gibi bileşiklerin suyla tepkimeye girerek

parçalanmasıdır. Ancak potasyum permanganat, organik moleküllerdeki C-H bağlarını oksidasyon yoluyla parçalayabilir.

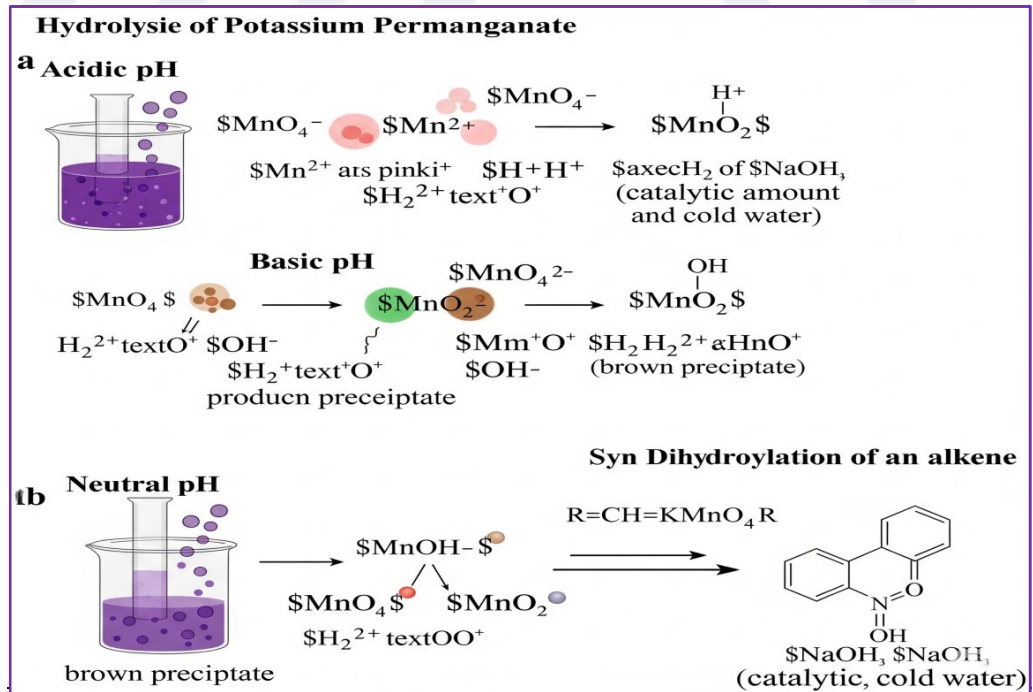
Potasyum permanganat ile gerçekleşen bu oksidasyon tepkimesi, genellikle alkenlerin (C=C çift bağı içeren bileşikler) hidroksilasyonunda (iki hidroksil grubu eklenmesi) kullanılır ve buna sin dihidroksilasyon denir. Bu reaksiyon, bir siklik manganat ester ara ürünü üzerinden gerçekleşir.

Aşağıdaki şematik gösterim (Şekil 1), bir alkenin potasyum permanganat ile sin dihidroksilasyon tepkimesini ve siklik manganat ester ara ürününü açıklar:

Alken (C=C çift bağı) soğuk ve bazik potasyum permanganat çözeltisi ile reaksiyona girer.

Permanganat iyonu (MnO_4^-), çift bağı her iki karbonuna aynı anda, molekülün aynı tarafından bağlanır. Bu, siklik manganat ester adı verilen beş üyeli bir halka ara ürünü oluşturur.

Bu ara ürün, su (H_2O) varlığında hidrolize uğrayarak, çift bağı bulunduğu yere iki adet hidroksil (OH) grubu eklenmiş cis-diol ürününü ve mangan dioksit (MnO_2) çökeltisini oluşturur.



Şekil 1. Potasyum permanganatın hidrolizi

1.4. Termoset Reçine Atıkları ile Üretilen Betonların Sürdürülebilirlik Kapsamında Değerlendirilmesi

Potasyum permanganat (KMnO_4) ile iyileştirilmiş atık epoksi reçine taneciklerinin çimento harcı içinde kullanılması hem atık geri kazanımı hem de malzeme performans iyileştirmesi açısından ilginç bir araştırma konusudur.

Endüstride epoksi bazlı kompozitler ve kaplamalar yoğun kullanıldığından, üretim fazlası veya kullanım ömrü bitmiş epoksi malzemeler atık olarak ortaya çıkar. Bunlar genelde inert yapıda olduklarından doğrudan geri dönüşümleri zor olur.

KMnO_4 , güçlü bir oksitleyici olduğundan epoksi yüzeyinde hidroksil, karboksil gibi oksijenli fonksiyonel gruplar oluşturur. Bu yüzey aktivasyonu, atık taneciklerin çimento matrisindeki hidrasyon ürünleriyle (özellikle C-S-H jel ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$) daha iyi kimyasal bağ kurmasını sağlar. Ayrıca modifikasyon, partikülün yüzey pürüzlülüğünü artırarak mekanik aderansı güçlendirir.

Yüzey modifikasyonu sayesinde epoksi tanecikleri, agregaya benzer şekilde harçta yük taşımaya katkı sağlar. Bağ mukavemetinin artması, özellikle basınç dayanımı ve eğilme dayanımında iyileşme sağlayabilir.

Epoksi atıklarının su emme oranı düşük olduğu için, modifiye edilseler bile harcın su geçirimsizliğini artırabilir. Bu da donma-çözülme dayanımı ve kimyasal saldırılara karşı direnç kazandırır.

Epoksi atıkları genellikle düşük yoğunluktadır; bu da hafif çimento bazlı kompozit üretimine olanak verir. Sürdürülebilirlik açısından bakıldığında hem plastik bazlı atıkların geri kazanımı hem de doğal agreganın tüketiminin azaltılması sağlanır.

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Günümüzde artan sanayileşme ve inşaat faaliyetleri hem doğal kaynakların tüketimini hızlandırmakta hem de çevreye önemli miktarda katı atık yükü getirmektedir. Özellikle polimer esaslı malzemeler, kullanım ömürleri tamamlandığında biyolojik olarak kolayca bozunmadıkları için çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Epoksi reçineler, yüksek mekanik dayanım, kimyasal direnç ve yapışma özellikleri nedeniyle kaplamalar, yapıştırıcılar, kompozit malzemeler ve elektronik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu malzemelerin kullanım ömrü

sonunda ortaya çıkan atıklar, inert yapıları nedeniyle doğada uzun süre bozulmadan kalmakta ve geri dönüşümleri güçleşmektedir. Bu durum, epoksi atıklarının çevre dostu yöntemlerle yeniden değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, atıkların geri kazanılması ve alternatif hammaddeler olarak inşaat sektöründe değerlendirilmesi önem kazanmaktadır. Çimento bazlı malzemeler, yüksek üretim hacimleri sayesinde atık malzemelerin geri dönüştürülmesi için uygun bir ortam sunmaktadır. Çimento harcı ve beton, belirli oranlarda atık malzeme ikamesini tolere edebilmekte; bu sayede hem doğal agrega tüketimi azaltılmakta hem de atık bertarafına katkı sağlanmaktadır. Polimer esaslı atıkların çimento matrisine entegrasyonu ise malzemenin su geçirimsizlik, dayanıklılık ve bazı mekanik özelliklerini iyileştirebilmektedir.

Epoksi atıkları, termal, mekanik veya kimyasal yöntemlerle parçalanarak geri dönüştürülebilmektedir. Mekanik geri dönüşüm yöntemi, öğütme ve boyut küçültme işlemleri ile atığın yeniden hammadde olarak kullanılmasını sağlar. Ancak öğütülmüş epoksi partikülleri, yüzeylerinin inert olması nedeniyle çimento matrisine zayıf şekilde bağlanır. Bu durum, malzeme dayanımını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle yüzey modifikasyonu yöntemleri, epoksi partiküllerinin çimento matrisindeki bağlanma kapasitesini artırmak için kritik öneme sahiptir.

Potasyum permanganat (KMnO_4), güçlü bir oksidasyon ajanı olarak polimer yüzeylerinde hidroksil, karboksil gibi fonksiyonel gruplar oluşturabilmektedir. Bu fonksiyonelleşme sayesinde epoksi atık partiküllerinin yüzey enerjisi artar, pürüzlülük seviyesi yükselir ve çimento hidrasyon ürünleriyle (özellikle C-S-H jel ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalleri) daha güçlü fiziksel ve kimyasal bağlar oluşturulur. Bu bağlar, partiküllerin harç matrisinde homojen şekilde dağılmasını ve yük transferine katkısını artırır.

KMnO_4 ile modifiye edilmiş epoksi atıklarının çimento harcı içerisinde kullanılması basınç ve eğilme mukavemeti, su geçirimsizlik, donma-çözülme direnci gibi özelliklerde iyileşme potansiyeline sahiptir. Ayrıca epoksi atıkları düşük yoğunluklu olduklarından, hafif çimento esaslı kompozit üretiminde kullanılabilirler. Bununla birlikte, optimum kullanım oranı, partikül boyutu ve modifikasyon parametreleri gibi faktörler, malzemenin nihai performansını belirleyecektir. Bu çalışmanın temel amacı, potasyum permanganat ile iyileştirilmiş atık epoksi

taneciklerinin çimento harcı içerisindeki performansını inceleyerek hem atık yönetimine hem de çimento esaslı malzeme teknolojilerine katkı sağlamaktır. Çalışma, polimer esaslı endüstriyel atıkların yüksek hacimli inşaat malzemelerine entegre edilmesine yönelik sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Elde edilecek bulgular, çevre dostu malzeme geliştirme çalışmalarına ve döngüsel ekonomi hedeflerine katkıda bulunacaktır.

Kürlenmiş epoksi reçine atıkların toplanması, tane boyutu işlemleri ve yüzey iyileştirme çalışmalarının yapılması ile malzeme hazırlık işlemleri tamamlanmış olacaktır. Farklı oranlarda atık epoksi reçine içeren çimento harçlarının hazırlanması ile karışım tasarımı gerçekleştirilecektir. Daha sonra basınç dayanımı, eğilme dayanımı, porozite, su emme ve fiziksel, mekanik ve durabilite deneylerinin uygulanması ile deneysel çalışmalar sürdürülecektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Çimento

Çimento harcı üretiminde bağlayıcı olarak, kimyasal özellikleri Tablo 1’de sunulan ve bir çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu tercih edilmiştir. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3,12 g/cm³, Blaine inceliği ise 3650 cm²/g olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Çimentonun kimyasal içeriği

Bileşen	Değer (%)
CaO	63.4
SiO ₂	18.3
Al ₂ O ₃	5.7
Fe ₂ O ₃	5.3
MgO	1.3
Na ₂ O	0.78
SO ₃	3.6
Cl ⁻	0.07
LOI	1.5



Şekil 2. Çimento

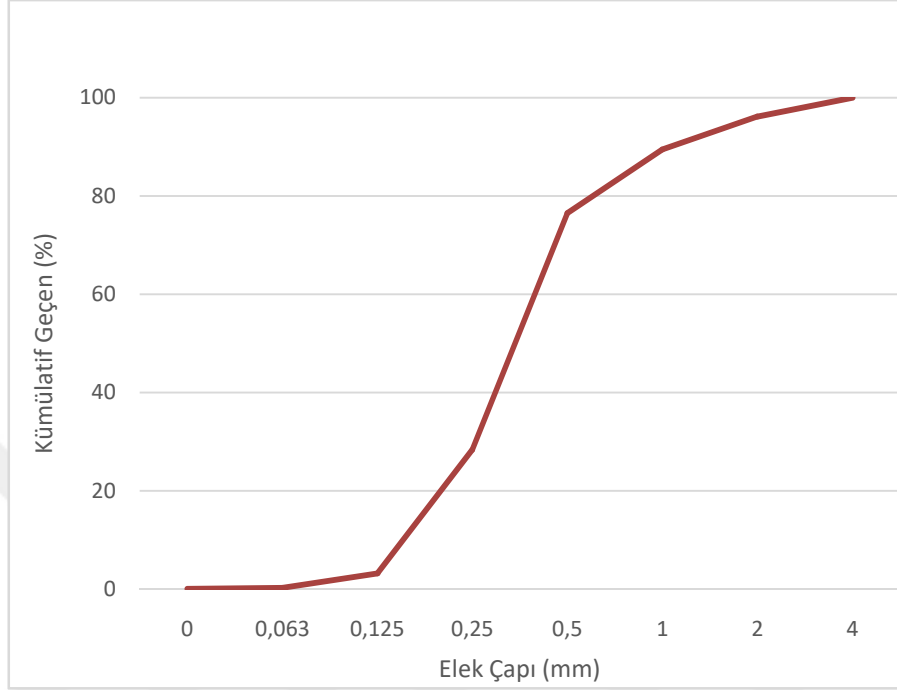
2.1.2. Agrega

Tez çalışmasında agrega olarak nehirten temin edilen kum kullanılmıştır.



Şekil 3. Kum

Birim hacim ağırlığı 1,65 g/cm³ olan ve 0-4 mm aralığında tane boyutuna sahip kumun, tane boyutu dağılımı TS EN 933-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen elek analizi ile belirlenmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4’de sunulmuştur.



Şekil 4. Kumun granülometri eğrisi

2.1.3. Su

Çimento harç karışımlarının hazırlanmasında şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Atık Epoksi Reçine (AER)

Çalışmada kullanılan atık epoksi reçine rüzgar gülü kanatları üretiminde kullanılamayacak duruma gelmiş bir atıktır. Bu atık sahada geri dönüşüm sahalarına atılmak üzere Şekil 5’te görüldüğü gibi kürlenmesi için bekletilmektedir. Kürlenme işlemi tamamlanan ve sertleşmiş atık epoksi reçineden alınan büyük parçalar elektrikli el rendesi aleti ile rendelenmiş halde Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 5.Sertleşmiş atık epoksi reçine



Şekil 6. Atık epoksi reçinenin rendelenmesi

Rendelenmiş atık epoksi reçinelerin morfolojisinin yatsı ve düzensiz tane boyutlarından oluştuğu görülmektedir. (Şekil 7)



Şekil 7. Rendelenmiş atık epoksi reçine numunesi

Daha uygun tane boyut ve dağılımı için Şekil 8’de görülen OSİMO marka bıçaklı öğütücü yardımıyla atık epoksi reçinelerin tane boyutu küçültülmüştür.



Şekil 8. Öğütücü cihaz

Öğütme sonrası elde edilen atık epoksi reçinenin yüzey alanı artmış ve harçta kullanıma daha uygun tane boyutlarına sahip hale gelmiştir. (Şekil 9)



Şekil 9. Öğütülmüş atık epoksi reçine numunesi

2.1.5. Potasyum Permanganat (KMnO_4)

Potasyum permanganat (KMnO_4), güçlü bir oksitleyici ajandır ve su içinde (H_2O) çözündüğünde potasyum (K^+) ve permanganat (MnO_4^-) iyonlarına ayrışır. Bu da yüzey iyileştirme yapmak için %5 (KMnO_4) çözeltisinin (Şekil 10) hazırlanmasında kullanılmıştır.



Şekil 10. Potasyum permanganat çözeltisi

2.2. Yöntem

Bu çalışmada kullanılan atık epoksi reçine, çimento harcında ince agrega yerine kullanılmadan önce belirli hazırlık aşamalarından geçirilmiştir. İlk olarak, rendelenip öğütülen epoksi atıkları, toz oluşumunu azaltmak ve olası uçucu bileşenleri uzaklaştırmak amacıyla saf su ile yıkanmıştır. Ardından, nemin giderilmesi ve yüzeye işlemiş olabilecek kirleticilerin uzaklaştırılması için 105 °C’de etüvde 24 saat süreyle kurutma işlemi uygulanmıştır.

Kurutma sonrasında elde edilen granül formdaki atık epoksi reçinelerin yüzey iyileştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin ardından, atık epoksi reçine belirlenen oranlarda ince agrega yerine ikame malzeme olarak çimento harcı karışımlarına dâhil edilmiştir. Üretilen çimento harçlarına birim hacim ağırlık, yayılma tablası, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ağırlıkça su emme, donma-çözülme dayanımı ve asit direnci deneyleri yapılmıştır.

2.2.1. Çimento Harç Karışımlarının Hazırlanması

Yüzey modifikasyon işlemi tamamlanan atık epoksi reçine, çimento harçlarında kullanım için hazır hale getirilmiştir. Bu malzemenin çimento harcı özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla farklı ikame oranlarına sahip karışımlar oluşturulmuştur. Harç karışım oranları, TS EN 196-1 standardında belirtilen esaslar doğrultusunda belirlenmiştir. Karışımlar, kum yerine ağırlıkça %1, %4, %7, ve %11 oranlarında atık epoksi reçine ikame edilerek hazırlanmış ve bu oranlara göre adlandırılmıştır. Kontrol harcı ile tüm diğer karışımlar 0,50 su/çimento oranına sahip olacak şekilde üretilmiştir. Su/çimento oranı, hazırlanan tüm harçlar için aynı değere sahiptir. Tüm karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2.Çimento harcı karışım oranları

Set No	Set İsmi	Su (g)	Çimento (g)	Kum (g)	ERA (g)
1	REF	1500	3000	9000	0
2	AER-1	1500	3000	8910	90
3	AER-4	1500	3000	8640	360
4	AER-7	1500	3000	8370	630
5	AER-11	1500	3000	8010	990

Tüm malzemeler hassas terazide tartıldıktan sonra için görülen çimento harç mikseri kullanılarak homojen bir şekilde karışması sağlanmıştır. (Şekil 11)



Şekil 11. Hazırlanan kuru harç karışımı

Hazırlanan taze harç, 50×50×50 mm ve 40×40×160 mm boyutlarındaki önceden yağlanmış kalıplara sarsma tablası yardımıyla yerleştirilmiştir. Her bir deney seti için üç numune üretilmiştir. Kalıplara yerleştirilen harç numuneleri, 24 saatlik bekleme süresinin ardından kalıplardan çıkarılmış ve Şekil 12’te gösterildiği şekilde, (20 ± 2) °C sıcaklıkta kirece doymun su içerisinde kürlenerek deneyler için hazır duruma getirilmiştir.



Şekil 12. Çimento harçlarının suda kürlenmesi

2.2.2. Çimento Harç Deneyleri

2.2.2.1. Yayılma Tablası Deneyi

Taze halde olan çimento harçlarının işlenebilirliğini kontrol etmek için kalıplara yerleştirilmeden önce TS EN 1015-3'e uygun olarak taze harca yayılma tablası testi uygulanması Şekil 13'de görülmektedir.



Şekil 13. Taze harcın yayılma tablası testi

2.2.2.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Sertleşmiş beton numunenin yoğunluk değeri bulunurken TS EN 1015-10 standartlarına göre öncelikle hacmi (v , m^3) belirlenen numunelerin, etüv kuru ağırlığı ve suya doymun yüzey ağırlığı ölçülmüştür. Sertleşmiş betonun yoğunluk hesaplaması yapılırken sırası ile etüv kuru ağırlığının ve suya doymun yüzey ağırlığının hacim oranlaması ile hesaplanmıştır. Sertleşmiş betonun birim hacim kütlesi (kg/m^3) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$d = \frac{w}{v}$$

v =Numune hacmi (m^3)

w =Etüv kuru ağırlığı(kg)

d =Birim hacim ağırlık (kg)

2.2.2.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

Kalıplardan çıkarılan 40×40×160 mm boyutlarındaki prizma numuneler, 7, 28 ve 56 gün süreyle suda kürlenmiştir. Kür süresi sonunda, numunelerin eğilme dayanımı çimento harcı eğilme cihazı(Şekil 14) kullanılarak TS EN 1015-11 standardına uygun biçimde, üç noktadan yükleme yöntemiyle belirlenmiştir. Cihazın eğilme deney aparatı; aralarında 100 mm mesafe bulunan iki destek silindiri ile bir yükleme silindirinden oluşmaktadır. Numunelerin tam ortasına, 50 ± 10 N/sn hızla ve eşit şekilde çizgisel yük uygulanmış, kırılma anına kadar yükleme devam ettirilmiştir. Her bir seri için üç numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak eğilme dayanımı aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$f_e = \frac{3Fl}{2d_1d_2^2}$$

f_e =Eğilme dayanımı (N/mm²)

F= Kırılma yükü (N)

l= İki destek silindiri arasındaki mesafe (mm)

d_1 = Numunenin genişliği (mm)

d_2 = Numunenin yüksekliği (mm)



Şekil 14. Eğilme deneyi cihazı

2.2.2.4. Basınç Dayanımı Deneyi

Çimento harçlarının eksenel basınç altında kırılmaya karşı gösterdiği direnç, basınç dayanımı olarak tanımlanır. Bu çalışmada, 50×50×50 mm boyutlarındaki küp numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 ve 28 gün süreyle suda kürlenmiştir. Kür süresi sonunda, TS EN 1015-11 standardına uygun olarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yükleme hızı 1,5 kN/sn olarak ayarlanmıştır. Her karışım grubu için üç numunenin ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak basınç dayanımı hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{f_k}{A}$$

f_c = Basınç dayanımı (MPa)

f_k = Kırma yükü (kN)

A = Yüzey alanı (mm²)

2.2.2.5. Ağırlıkça Su Emme Deneyi

50×50×50 mm boyutlarındaki ve 28 günlük su kürünü tamamlamış küp numunelerin, TS EN 1015-10 standardına uygun olarak ağırlıkça su emme değerleri belirlenmiştir. Öncelikle tamamen kurutulan numunelerin kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra numuneler, ağırlıklarında değişim olmayana kadar suda bekletilmiş (Şekil 15) ve suya doymun hâlde iken ağırlıkları hassas terazi ile kaydedilmiştir. Kuru ve suya doymun ağırlıklar arasındaki fark dikkate alınarak ağırlıkça su emme değerleri hesaplanmıştır.

$$S_a = \frac{W_s - W_k}{W_k} \times 100\% \quad (2.4)$$

S_a = Ağırlıkça su emme oranı (%)

W_s = Suya doymun havadaki ağırlık

W_k = Etüv kurusu ağırlık



Şekil 15. Ağırlıkça su emme deneyi

2.2.2.6. Asit Deneyi

Çimento harçlarının asit dayanımını belirlemek amacıyla, ASTM C267-01 standardına uygun olarak %10'luk sülfirik asit (H_2SO_4) çözeltisi hazırlanmıştır. Numunelerin H_2SO_4 çözeltisine daldırılmadan önce ıslak ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra çimento harçları, deney süresi boyunca H_2SO_4 çözeltisinde (Şekil 16) bekletilmiştir. Süre sonunda numuneler çözeltiden çıkarılarak yüzeylerindeki fazla asit uzaklaştırılmış ve ağırlık ile basınç dayanımı kayıpları belirlenmiştir.



Şekil 16. Asit deneyinden bir görüntü

2.2.2.7. Yüksek Sıcaklık Deneyi

Çimento harçlarının yüksek sıcaklıklarda dayanımlarının tespit edilmesi amacıyla 400 °C ve 600 °C sıcaklık değerlerinde TS EN 1363-1'e uygun olarak yüksek sıcaklık deneyleri gerçekleştirilmiştir. 28 gün kür süresini tamamlayan 50x50x50 mm boyutlarına sahip küp ve 40x40x160 mm boyutlarına sahip prizmatik numuneler etüvde tamamen kurutularak ağırlıkları tespit edilmiştir. Sıcaklık artışı 10 °C/dak olarak ayarlanan fırına Şekil 16' de görülen cihaza yerleştirildikten sonra 3 saat boyunca belirtilen sıcaklıklarda bekletilmiştir. Ani sıcaklık değişimi ile termal şok yaşanmaması için 12 saat fırın içerisinde kapağı kapalı bir şekilde soğumaya bırakıldıktan sonra dışarıda da 12 saat bekletilmiştir. Fırından çıkartılan numuneler 24 saat boyunca normal koşullara gelmesi sağlandıktan sonra basınç dayanımları test edilmiştir. Elde edilen dayanım değerleri 28 gün su kürü sonrasında elde edilen basınç dayanımları ile kıyaslanarak yüzde kayıplar sunulmuştur.



Şekil 17. Yüksek sıcaklık fırını

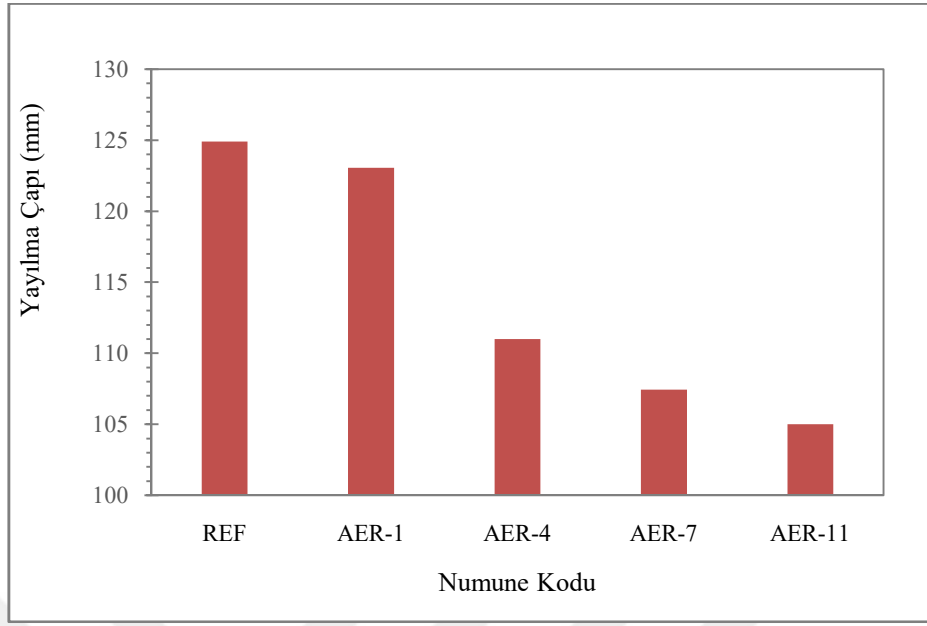
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yayılma Tablası Deneyi Sonuçları

Şekil 18 incelendiğinde, KMnO_4 kullanılarak hazırlanan ve farklı oranlarda atık epoksi reçine içeren AER serisi numunelerde yayılma çapı değerlerinin, referans numunesine (REF) kıyasla kademeli olarak azaldığı görülmektedir. REF numunesinde ölçülen yaklaşık 12,5 cm'lik yayılma çapı, AER-1 numunesinde hafif düşüş göstermiş; AER-4, AER-7 ve AER-11 numunelerinde ise bu azalma daha belirgin hale gelmiştir. Bu eğilim, katkı oranının artışıyla birlikte çimento harçlarının işlenebilirliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Atık epoksi reçinenin hidrofobik yapısı, karışım içindeki serbest suyun akışkanlık kazandırmak yerine partiküller etrafında tutulmasına neden olmakta ve böylece hamurun yayılma kabiliyeti sınırlanmaktadır. Ayrıca, epoksi parçacıklarının düzensiz şekli ve pürüzlü yüzey yapısı, matris içinde partiküller arası sürtünmeyi artırarak akışkanlığı olumsuz etkilemektedir.

Potasyum permanganatın oksidatif özelliği, çimento matrisi ve epoksi yüzeyleri üzerinde mikro düzeyde pürüzlülük artışına yol açarak, karışımın akış davranışını daha da sınırlandırabilmektedir. Katkı oranı arttıkça hem hidrofobik yüzey alanı genişlemekte hem de partikül-matris etkileşimleri artan koheziona neden olmaktadır.

Sonuç olarak, potasyum permanganat kullanımı ve artan atık epoksi reçine oranı birlikte değerlendirildiğinde, yayılma çapında gözlenen azalma; suyun kapiler hareketinin sınırlandırılması, partikül yüzey özellikleri ve matris içi sürtünmenin artmasıyla açıklanabilmektedir. Bu durum, yüksek katkı oranlarında işlenebilirliğin daha belirgin şekilde düştüğünü ortaya koymaktadır.



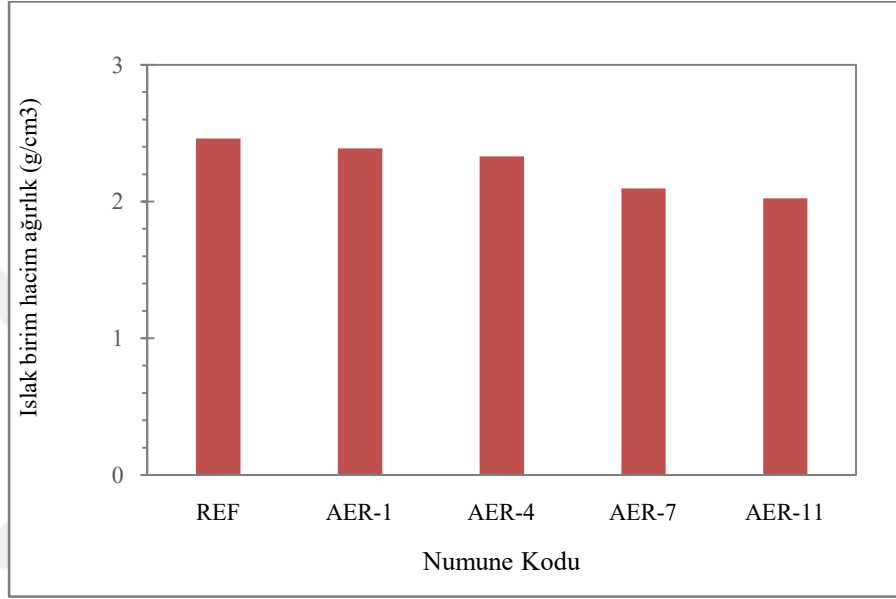
Şekil 18. Yayılma deneyi sonuçları

Yayılma çaplarındaki düşüşün temel nedeni, ince agrega yerine kullanılan atık epoksi reçinenin doğal agregalara göre çok daha düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Epoksi reçinenin pürüzsüz ve hidrofobik yüzeyi, çimento hamuru ile yeterli aderansı sağlayamamakta ve ara yüzeyde mikro boşluklar oluşturmaktadır. Yüzey modifikasyonu amacıyla uygulanan potasyum permanganat (KMnO_4) işlemi, reçine yüzeyini okside ederek mikro pürüzlülük ve oksijen bazlı fonksiyonel gruplar kazandırmakta, böylece matrise bağlanma potansiyelini artırmayı hedeflemektedir. Ancak bu işlem aynı zamanda reçine parçacıklarının yüzey yapısını değiştirerek gözenekliliği artırabilmekte ve hava boşluklarının matris içerisinde daha fazla hapsolmesine neden olmaktadır. Bu iki etki düşük yoğunluklu partikül kullanımı ve artan gözeneklilik birlikte değerlendirildiğinde, ikame oranı yükseldikçe birim hacim ağırlığının neden kademeli olarak azaldığı net bir şekilde anlaşılmaktadır.

3.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları

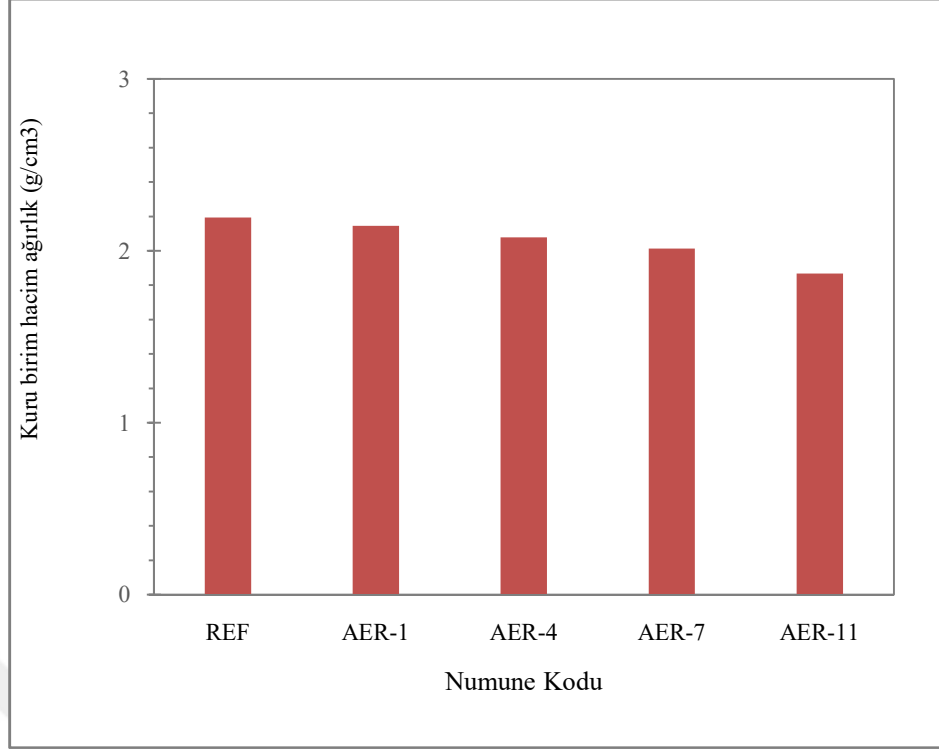
Referans (REF) numunesinin ıslak birim hacim değişim grafiği Şekil 20’de görülmektedir. Atık epoksi reçine ikame oranı arttıkça (kum yerine atık epoksi reçine konuldukça), ıslak birim hacim ağırlığı sürekli olarak azalmaktadır. Referans numunesinden AER-11 numunesine geçişte yoğunluğun yaklaşık % 17,8 oranında azaldığı gözlenmektedir. Bu azalmanın nedeni, kullanılan atık epoksi reçine

malzemenin kumdan daha düşük bir yoğunluğa sahip olmasıdır. Kumun ağırlıkça düşük yoğunluklu bir malzeme (epoksi reçine) ile ikame edilmesi, harcın toplam birim hacim ağırlığını doğrudan düşürür. Ayrıca, yüzey modifikasyon işlemi veya epoksi partiküllerinin düzensiz şekli, harç içinde ekstra hava boşluklarının (gözeneklerin) oluşmasına da katkıda bulunmuş olabilir, bu da yoğunluk azalmasını destekler. Bu durum, malzemenin taşınabilirliğini, ısı yalıtım kapasitesini ve yapılara getireceği yükü olumlu yönde etkileyecektir.



Şekil 19. Islak birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

Referans (REF) numunesinin kuru birim hacim değişim grafiği Şekil 20’de görülmektedir. Grafikte, atık epoksi reçine ikame oranı arttıkça (kum yerine reçine konuldukça), harçların kuru birim hacim ağırlığının sürekli olarak azaldığını görülmektedir. Bu azalma, daha önce ıslak birim hacim ağırlığı yorumu ile paralellik göstermektedir. Islak ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki fark, malzemenin su doygunluğu veya su emme kapasitesi ile ilişkili olduğundan, reçine ikamesi arttıkça harç numunelerinin daha az su tuttuğunu veya hidrofobik (suyu iten) epoksi reçine sayesinde daha az su emdiği şeklinde yorumlanmıştır. Bu sonuçlara göre, epoksi reçine ikamesi harcı referans değerine göre hafifletmiştir. Bu durum, mekanik özellikleri de göz önünde tutmak kaydıyla, yapısal olmayan veya yalıtım amaçlı düşünülen uygulamalar için uygun görülebilir.



Şekil 20. Kuru birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

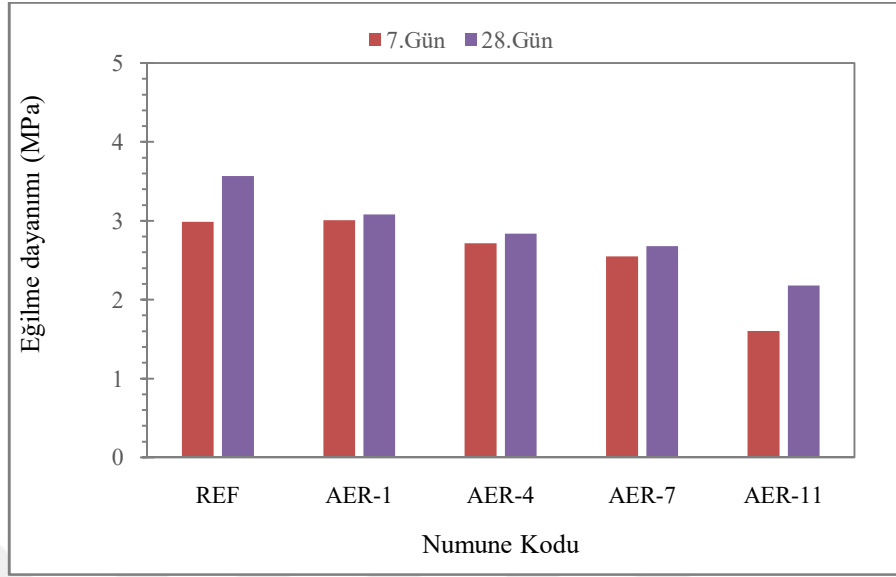
3.3. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Eğilme dayanımı deneyi sonucu elde edilen veriler ile oluşturulan grafik, atık epoksi reçine ikamesinin, çimento harçlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisini 7. Gün ve 28. Gün kürlenme sürelerine göre sonuçlarını göstermektedir. Atık epoksi reçine ikame oranı arttıkça, harçların 7. ve 28. gün eğilme dayanımlarının genel olarak azalmaktadır.

Atık epoksi reçine ile ikame, harcın kuru birim hacim ağırlığını düşürmüştür (yani harcı hafifletmiştir). Birim hacimdeki katı çimento hamuru miktarının azalması, yük taşıyan kesitin zayıflamasına neden olmuştur. Atık epoksi partikülleri, harç matrisi içinde gözenekliliği artırmış veya çimento hamuru ile iyi bağlanamayan zayıf ara yüzeyler oluşturmuş olabilir. Eğilme dayanımı, çatlak ilerlemesine karşı hassas olduğundan, bu zayıf ara yüzeyler yük altında hızlı çatlak oluşumuna yol açmış ve yapısal zaafiyet ortaya çıkmıştır.

Atık epoksi reçine, harcı hafifletme hedefine başarılı bir şekilde ulaşmıştır, ancak bu hafiflemenin bedeli, işlenebilirlikte düşüş ve özellikle %7 ve üzerindeki oranlarda mekanik dayanımda (eğilme) ciddi kayıplar olmuştur. Yüksek dayanım

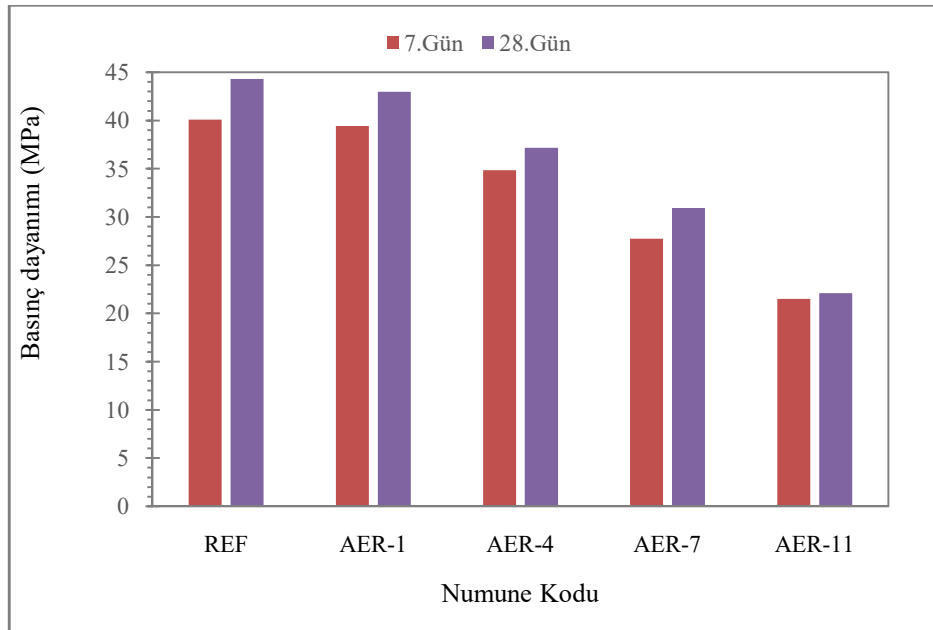
gerektirmeyen, hafif ve yalıtım özelliği ön planda olan uygulamalar için, %1 ile %4 arasındaki ikame oranları kabul edilebilir bir denge sağlayabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 21. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları

3.4. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Atık epoksi reçine ikamesinin, çimento harçlarının 7. Gün ve 28. gün kürlenme sürelerine göre basınç dayanımı değerleri gösteren grafik aşağıda görülmektedir.

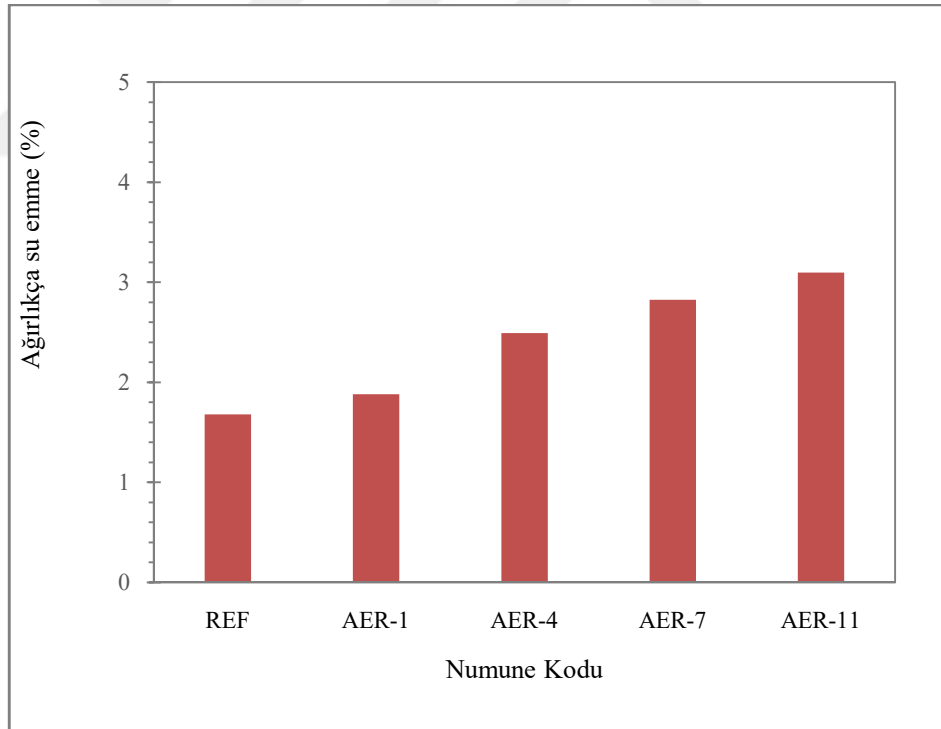


Şekil 22. Basınç dayanımı değerleri

Basınç dayanımı, daha önce incelenen Eğilme Dayanımı ile benzer bir eğilim göstermektedir: atık epoksi reçine ikame oranı arttıkça, harçların basınç dayanımı önemli ölçüde düşmekte olduğu görülmektedir. Dayanım düşüşü, önceki bulgularla tutarlıdır. Harç ikame ile hafiflemiştir. Birim hacimdeki yük taşıyan katı çimento hamuru ve kum miktarının azalması dayanımı düşürmüştür. Yapı malzemelerinde gözeneklilik arttıkça, basınç dayanımı düşme eğiliminde olduğundan, gözenekli yapı ve zayıf ara yüzey, hidrofobik (suyu sevmeyen) epoksi partikülleri ile hidrofilik (suyu seven) çimento hamuru arasındaki zayıf ara yüzey geçiş bölgesi (ITZ), harç matrisinde gerilme yığılmasına neden olarak dayanımı düşürmüştür.

3.5. Ağırlıkça Su Emme Deneyi Sonuçları

Atık epoksi reçine içeren AER serisi numunelerde ağırlıkça su emme değerlerinin (Şekil 23), atık epoksi reçine ikame oranı arttıkça harçların ağırlıkça su emme oranının referans numunesine (REF) kıyasla sürekli olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 23. Ağırlıkça su emme değerleri

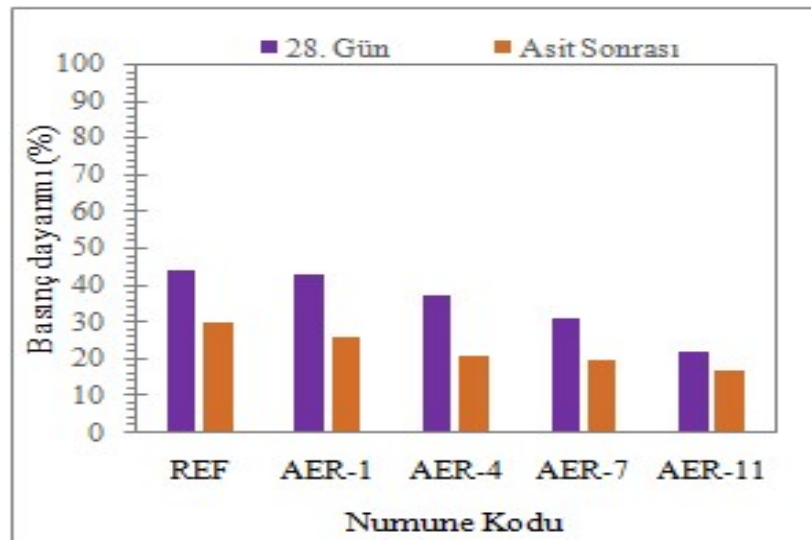
Su emme değerindeki artış harç matrisinde meydana gelen yapısal değişikliklerin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Bu artışın en büyük sebebi ikame edilen reçinenin (özellikle yüksek oranlarda) harç içinde daha fazla makro gözenek (hava boşluğu) veya birbirine bağlantılı kılcal gözenekler oluşturmasından

kaynaklandığı şeklinde yorumlanabilir. Daha gözenekli bir yapı, suyun daha kolay ve daha fazla miktarda emilmesine olanak tanır. Yüksek ikame oranlarında harcın işlenebilirliğinin azalması, harcın kalıp içinde iyi sıkıştırılamadığı ve bu nedenle çok sayıda büyük hava boşluğunun hapsedildiği anlamına gelir ki; bu hapsedilmiş boşluklar, suya erişim yolları oluşturarak su emmeyi artırır. Atık epoksi partiküllerinin etrafındaki zayıf ara yüzey geçiş bölgesi (ITZ), suyun harç matrisine daha kolay sızabileceği kılcal yollar yaratmış olması da sebepler arasındadır.

Sonuç olarak, atık epoksi reçine kullanımı, özellikle yüksek oranlarda ikamelerde, çimento harçlarının su emme kapasitesini artırmıştır. Bu durum durabilite açısından olumsuz bir etki sağlamaktadır.

3.6. Asit Deneyi Sonuçları

REF numunesinde belirli bir dayanım kaybı gözlenirken, AER-1 ve AER-4 ve AER-7 numunelerinde bu kayıp daha yüksek seviyeler çıkmıştır. Bu durum, düşük oranda epoksi ilavesinin asit etkisine karşı yeterli direnç sağlayamaması ve ara yüzey zayıflıkları oluşturarak asit penetrasyonunu kolaylaştırmasıyla ilişkili olabilir. AER-11 numunesinde dayanım kaybı azalmıştır. Yüksek epoksi oranlarının hidrofobik karakteri, asit çözeltisinin gözenek suyuna erişimini kısmen sınırlandırarak mekanik kaybı hafifletebilmektedir.



Şekil 24. Asit deneyi değerleri

Sonuçlar, düşük oranda epoksi ilavesinin asit etkisine karşı beklenen korumayı sağlamadığını, buna karşın yüksek oranlarda basınç dayanımı kaybında azalma eğilimi görüldüğünü ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, yüksek epoksi

oranlarında dahi mekanik kayıp tamamen önlenememekte, yalnızca etkisi sınırlı ölçüde azaltılabilmektedir. Bu durum, asit dayanımı açısından optimum katkı miktarının dikkatle belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

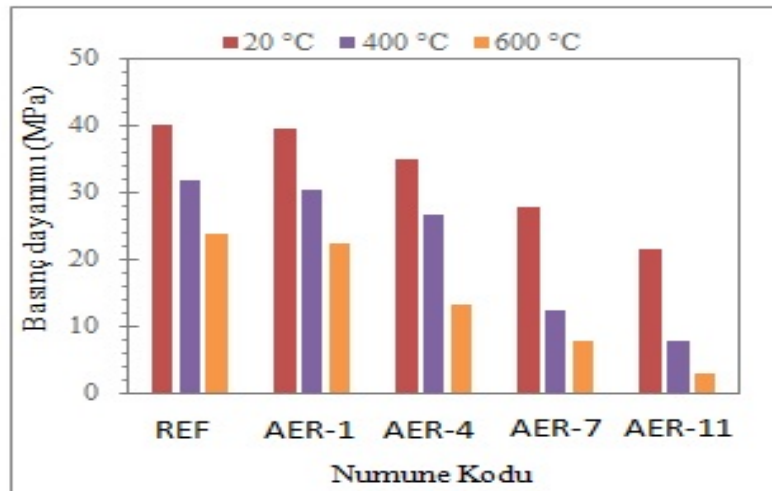
3.7. Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları

Atık epoksi reçine (AER) ikamesinin çimento harçlarının yüksek sıcaklıklarda altındaki basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 24’de görülmektedir. Numuneler, 20° C, (ortam sıcaklığı), 400° C ve 600° C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta test edilmiştir.

Tüm numunelerde, maruz kalınan sıcaklık arttıkça, basınç dayanımı belirgin bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, çimento bazlı malzemeler için beklenen bir durumdur. Yüksek sıcaklık, çimento hamurundaki C – S – H ve Ca(OH)₂ gibi hidrasyon ürünlerin dehidrasyonuna ve termal çatlaklara yol açtığından basınç dayanımındaki düşüş, sıcaklık artışıyla doğru orantı göstermektedir.

REF ve düşük ikame oranlarında dayanım kaybı yönetilebilir seviyelerdedir. Fakat ikame oranları arttıkça bozulma hızlanmaktadır. Zira harç içindeki epoksi reçine yüksek sıcaklıklarda erir ve yumuşar. Bu durum harç matrisi içinde büyük boşluklar ve gözenekler yaratır. Epoksi agrega taneciklerinin yerini aldığından, epoksi bozulma gösterdiğinde, harç matrisi de parçalanır.

Yapılan deneyler neticesinde, yüksek ikame oranında ve yüksek sıcaklıkta dayanımın büyük oranda düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 25. Yüksek sıcaklık deneyi değerleri

Sonuç itibari ile; düşük ikame oranları, normal şartlar altında oda sıcaklık mertebelerinde kabul edilebilir değerlerde olsa da, yüksek sıcaklıkta dayanım, ikame oranı artışları karşısında hızla düşmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında yüzey modifikasyonu yapılmış epoksi reçine atığının çimento harcında ince agrega olarak kullanımı incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Atık epoksi reçine ilavesi, çimento harçlarının su emme değerlerinde artma sağlamış ve basınç dayanımlarını belirli bir ikame oranına kadar artırmıştır. Ancak bu oran aşıldığında, basınç dayanımlarında düşüş eğilimi gözlenmiştir.

Epoksi reçine, hidrofobik (suyu iten) ve asitlere karşı yüksek dirençli bir polimerdir. Kumun yerine konulan reçine miktarı, harcın hacimce asit tarafından çözünebilir olan çimento hamuru kısmı azaltmış ve yüksek oranda ilave olunan polimer partikülleri, harcın yüzeyinde bir nevi koruyucu katman görevi görerek asit penetrasyonunu ve yüzey dökülmesini azaltmıştır.

Atık epoksi reçinenin çimento harçlarına yüksek oranda ilavesi, asit etkisine karşı direnci artırmıştır. Atık epoksi reçine ikamesi ile üretilen harçların, kimyasal aşınmanın yüksek olduğu (örneğin kanalizasyon sistemleri, kimyasal tesis zeminleri) yapısal olmayan veya orta derecede yüklü uygulamalar için potansiyel bir çözüm olabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu iyileşmeler, söz konusu malzemenin durabilite performansını geliştirme potansiyeline sahip olduğunu ve gelecekteki uygulamalar için umut vadettiğini göstermektedir.

Diğer taraftan, atık epoksi reçine ikamesi, yangın direnci açısından harç üzerinde ciddi bir olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yangın direncinin kritik olduğu herhangi bir yapısal veya yapısal olmayan uygulamada, yüksek oranda atık epoksi reçine ikamesi içeren harçların kullanılmaması gerektiği anlaşılmaktadır.

Tüm sonuçlar müştereken değerlendirildiğinde; yüzey modifikasyonu yapılmış epoksi reçine atığının çimento harcında ince agrega ikamesi olarak

kullanılması, atık yönetimine katkı sağlama ve harçları hafifletme hedeflerine başarılı bir şekilde ulaşmıştır.

Ancak bu ikame, harçların mekanik performansından ödün vermeyi gerektirmektedir.

En uygun kullanım senaryosu, harcın yapısal olmayan veya yük taşımayan uygulamalarda, çevresel koşullara bağlı olarak seçilen ikame oranına göre kullanılması şeklinde ortaya çıkmıştır.

Çalışma, polimerik atıkların çimento esaslı malzemelerde kullanılmasının yüksek sıcaklık dayanımını ve mekanik dayanımı olumsuz etkilediğini, ancak kimyasal dayanıklılığı artırma potansiyeli taşıdığını güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır.

Atık epoksi reçinenin çimento harçlarında iyileştirici bileşen olarak kullanılması, sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirme açısından dikkate değer bir potansiyel taşımaktadır. İnce agrega yerine bu atığın değerlendirilmesi, hem atık bertarafına yönelik çevresel yükü azaltmakta hem de harçların bazı mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirebilmektedir.

Atık epoksi reçinenin çimento harçlarında kullanımına yönelik gelecekteki araştırmalarda, bu yöntemin ekonomik açıdan uygulanabilirliği de ele alınabilir. Özellikle geniş ölçekli üretimlerde maliyet avantajı ve teknik uygulanabilirlik konularının incelenmesi, yöntemin sektör genelinde benimsenmesini destekleyebilir.

KAYNAKÇA

Ali, K. A. S., Faheem, A. A. M., Nesa, S. R., Mohamed, N. E., & Rahim, S. A. (2021). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124505>

Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>

Demirel, S., &Öz, H. Ö. (2017). Effect of waste materials on performance of self compacting concrete. KahramanmaraşSütçü İmam Üniversitesi Mühendislik BilimleriDergisi, 20(3), 40–48.

Elsacker, E., De Laet, L., Peeters, E., & Van Damme, D. (2020). Bio-based materials for sustainable building envelopes: A review. Materials, 13(3), 519. <https://doi.org/10.3390/ma13030519>

FutureBridge. (2020, Eylül 25). The future of wind blade recycling: Driving circularity to composites industry. <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-energy/the-future-of-wind-blade-recycling-driving-circularity-to-composites-industry/>

Gadd, G. M. (2009). Biosorption: Critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 84(1), 13–28.

Gebremariam, M. A., Hadgu, H. H., & Tesfaye, T. (2023). Biodegradation of thermoset plastics: Current knowledge, challenges, and future prospects. Journal of Environmental Management, 343, 118555. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118555>

He, P., Wang, J., Zhang, X., & Li, Q. (2023). Experimental study on using ground waste epoxy composite as fine aggregate in concrete. Journal of Cleaner Production, 407, 136967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136967>

Hopewell, J., Dvorak, R., &Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>

Jain, R., Shukla, M., Sharma, P., Sharma, R. K., & Sharma, M. (2016). Biosorption of heavy metals. Engineering in Life Sciences, 16(7), 604–612.

Karagözoğlu, M. B., ve ark. (2009). Katı atıkların yeniden kazanımı ve önemi. Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu-2009, (İstanbul, Türkiye), 1–8.

Karakule, F., & Akakın, T. (2005). Hazır beton sektörünün gelişimi. Deprem Sempozyumu, Kocaeli.

Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü, İzmir Kalkınma Ajansı. (2023). İzmir rüzgâr türbin kanadığı geri dönüşümü yol haritası. İzmir, 42 s.

Kompozit Sanayicileri Derneği. (2020). 2020 faaliyet raporu: Türkiye’de kompozit sektörü.

Kumar, M., Lin, J. G., & Lee, P. H. (2021). Bioconversion of organic wastes to bioenergy and value-added products: A review. Bioresource Technology, 337, 125395.

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science & Technology, 40(17), 5181–5192.

PlasticsEurope. (2023). Plastics – the facts 2023: An analysis of European plastics production, demand and waste data. <https://plasticseurope.org>

Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Management, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

Rawlings, D. E. (2002). Heavy metal mining using microbes. Annual Review of Microbiology, 56, 65–91.

Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. Composites Part B: Engineering, 115, 409–422. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>

Tittarelli, F., & Moriconi, G. (2010). Use of GFRP waste materials as concrete aggregates. *Composite Structures*, 92(9), 2066–2071.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.018>

TÜREB. (2021, Mayıs). Rüzgârenerjisantrali (RES) veritabanı.
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNmFmYWY0MTYtNjUyNS00NzQ1LWIwMTMtOTI5ZTNkM2FlYWlxIiwidCI6ImU5YzY0NjU4LWFlkMWQtNDUwOS1hODk0LTE2NWZhYjU2NjEyMyIsImMiOiI9>

Vidali, M. (2001). Bioremediation: An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172.

Volesky, B. (2007). Biosorption and me. *Water Research*, 41(18), 4017–4029.

Wind Europe. (2020, Kasım 20). Decommissioning of onshore wind turbines.
<https://windeurope.org/intelligence-platform/product/decommissioning-of-onshore-wind-turbines/>

World Wind Energy Association (WWEA). (2021, Mart 24). Worldwide wind capacity reaches 744 gigawatts – An unprecedented 93 gigawatts added in 2020.
<https://wwindea.org/worldwide-wind-capacity-reaches-744-gigawatts/>

Zhu, X., Li, Y., Chen, J., & Liu, Y. (2021). A review of the utilization of FRP waste in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 272, 121644.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121644>