

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



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI MALZEMESİBİLİM DALI**

**ENDÜSTRİYEL REÇİNE ATIKLARIN BETONDA AGREGA
OLARAK KULLANIMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR BETON
ÜRETİMİ VE GELİŞTİRİLMESİ**

Ferhad ELELE

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

MANİSA-2025

**FERHAD
ELELE**

**ENDÜSTRİYEL REÇİNE ATIKLARIN BETONDA AGREGA OLARAK
KULLANIMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR BETON ÜRETİMİ VE GEL**

2

025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü EğitimEnstitüsü 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.

Ferhad ELELE



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ferhad ELELE
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:
Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

İleri mühendislik uygulamalarında, özellikle rüzgâr türbini kanatlarında yaygın olarak kullanılan lif takviyeli polimer (FRP) kompozitlerin üretim ve kullanım miktarlarının artması, başta epoksi esaslı malzemeler olmak üzere, kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan büyük miktarda kompozit atığı beraberinde getirmiştir. Epoksi reçinelerin yüksek derecede çapraz bağlı termoset yapıları, bu malzemelerin yeniden eritilmesini veya yeniden şekillendirilmesini mümkün kılmamakta ve bu durum geri dönüşüm süreçlerini önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Mekanik geri dönüşüm, atığın fiziksel olarak küçültülerek çimento esaslı kompozitlerde toz veya kısa lif formunda yeniden kullanılmasını sağlayan, düşük enerji tüketimli ve çevre dostu bir yöntemdir.

Bu çalışmada, rüzgâr türbini kanadı üretiminde oluşan epoksi reçine atıklarının çimento harçlarında ince agrega olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Mekanik olarak öğütülen epoksi atıkları, çimento matrisi ile aderansı artırmak amacıyla silan esaslı yüzey modifikasyonuna tabi tutulmuş ve ince agrega yerine kütlece %1, %4, %7 ve %10 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen harçlarda yoğunluk, yayılma özellikleri, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme davranışı, ultrases geçiş hızı (UGH), alkali silika reaksiyonu (ASR) direnci ve yüksek sıcaklık altındaki performans özellikleri deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Deney sonuçları, epoksi atığı ikamesi arttıkça harçların işlenebilirliğinin, birim hacim ağırlığının ve mekanik dayanımının azaldığını gösterirken, düşük ikame oranlarında (%1-4) kayıpların sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, silan modifikasyonu su emmeyi kısmen iyileştirmiş, yüksek sıcaklık davranışı referans numuneye benzer kalmış ve epoksi atığı ASR genleşmelerini baskılamıştır. Sonuç olarak, epoksi reçine atığının %1-4 oranında ince agrega yerine kullanımı, mekanik geri dönüşüm ve yüzey modifikasyonu ile birleştiğinde, çimento esaslı malzemelerde sürdürülebilir ve teknik kullanım potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Epoksi reçine atığı, sürdürülebilirlik, çimento harcı, mekanik dayanım, durabilite

2025, 56 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Ferhad ELELE

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

Supervisor: Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

The increasing production and consumption of fiber-reinforced polymer (FRP) composites, widely used in advanced engineering applications, particularly in wind turbine blades, have led to the generation of substantial quantities of end-of-life composite waste, predominantly epoxy-based materials. The highly cross-linked thermoset structure of epoxy resins precludes their remelting or reshaping, a factor that significantly complicates recycling processes. Mechanical recycling is a low-energy and environmentally friendly method that enables the physical size reduction of the waste for subsequent reuse in cement-based composites, typically in powder or short-fiber form.

This study investigated the potential of utilizing epoxy resin waste, generated during wind turbine blade manufacturing, as a fine aggregate replacement in cement mortars. Mechanically ground epoxy waste was subjected to silane-based surface modification to enhance its adhesion with the cement matrix and was used to replace fine aggregate by mass at ratios of 1%, 4%, 7%, and 10%. The produced mortars were experimentally evaluated for density, flow properties, flexural strength, compressive strength, water absorption behavior, ultrasonic pulse velocity (UPV), alkali-silica reaction (ASR) resistance, and performance characteristics under high temperatures.

The experimental results indicate that increasing the substitution ratio of epoxy waste led to a decrease in the workability, unit weight, and mechanical strength of the mortars. Conversely, losses were found to be limited at low substitution ratios (1–4%). Furthermore, silane modification partially improved water absorption, high-temperature performance remained similar to that of the reference specimen, and the epoxy waste exhibited a suppressive effect on ASR expansions. Consequently, the utilization of epoxy resin waste as a fine aggregate replacement at a 1–4% ratio, when combined with mechanical recycling and surface modification, significantly enhances its potential for sustainable and technical incorporation into cementitious building materials.

Keywords: Epoxy resin waste, sustainability, cement mortar, mechanical strength, durability

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tezli yüksek lisans eğitim ve öğretimim boyunca, 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 teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmam süresince laboratuvarındaki bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Sayın Arş. Gör. Dilan ÇANKAL'a çalışmaya verdiği katkılardan dolayı teşekkür ederim. Her zaman yanımda olduklarını bildiğim, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili tüm arkadaşlarıma, süreç boyunca desteğini hissettiğim değerli dönem arkadaşım Sayın Giray TOK'a ve her daim varlıklarıyla bana güç veren kıymetli aileme ve tez yazım sürecinde kaybettiğim babam Mak. Müh. SkenderELELE'ye teşekkür ederim.



Ferhad ELELE
Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Santigrat Derece
Cm	Santimetre
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
CEM I	Portland Çimentosu (Tip I)
Ca(OH)₂	Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
FRP	Lif Takviyeli Polimer
APTS	3-Aminopropiltrimetoksisilan
GPTMS	3-Glicidiloksipropiltrimetoksisilan
MPTMS	3-Metakriloksipropiltrimetoksisilan
ERA	Epoksi Reçine Atığı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
UGH	Ultrases Geçiş Hızı
ASR	AlkaliSilika Reaksiyonu
TS EN	Türk Standardı Avrupa Normu
LOI	Kızdırma Kaybı

ŞEKİLLERDİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. Silanın yoğunlaşma mekanizması (H. Feng et al., 2016).....	20
Şekil 2. Kumun granülometri eğrisi	24
Şekil 3. Sertleşmiş epoksi reçine atığının rendelenme işlemi	25
Şekil 4. Rendelenmiş epoksi reçine atığı	26
Şekil 5. Öğütücü cihaz	26
Şekil 6. Öğütülmüş epoksi reçine atık.....	27
Şekil 7. Asidik çözelti hazırlığı	29
Şekil 8. Silan bağlayıcı ajan ilavesi.....	29
Şekil 9. Epoksi reçine atığının hazırlanan silane çözeltisinde karıştırılması .	30
Şekil 10. Epoksi reçine atığının kurutulma işlemi	30
Şekil 11. Yayılma Tablası Deneyi.....	32
Şekil 12. Çimento harçlarının suda kürlenmesi	32
Şekil 13. Taze çimento harcının birim hacim ağırlık değerinin belirlenmesi	33
Şekil 14. Basınç dayanımı deneyi	34
Şekil 15. Ultrases geçiş hızı deneyi.....	35
Şekil 16. Eğilme dayanımı deneyi.....	36
Şekil 17. Yüksek sıcaklık deney cihazı	38
Şekil 18. Alkali silika reaksiyonu deneyi.....	39
Şekil 19. Numunelerin boy değişimlerinin ölçülmesi	40
Şekil 20. Çimento harçlarının yayılma çapı değerleri.....	41
Şekil 21. Islak birim hacim ağırlık değerleri.....	42
Şekil 22. Kuru birim hacim ağırlık değerleri	43
Şekil 23. Basınç dayanımı değerleri.....	44
Şekil 24. Ultrases geçiş hızı değerleri	45
Şekil 25. Eğilme dayanımı değerleri	46
Şekil 26. Ağırlıkça su emme değerleri	47
Şekil 27. Yüksek sıcaklık deney sonuçları.....	48
Şekil 28. Alkali silika reaksiyonu deneyi sonuçları	49

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1. Çimentonun kimyasal içeriği	24
Tablo 2. Karışım oranları	31



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLolar DİZİNİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
GİRİŞ.....	9

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ	9
1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	11
1.1. Betonda Endüstriyel Atık Kullanımı.....	11
1.2. Termoset Reçine Esaslı Atıklarının Geri Dönüşümü.....	12
1.2.1. Kimyasal Geri Dönüşüm Yöntemleri	12
1.2.2. Termal Geri Dönüşüm Yöntemleri.....	13
1.2.3. Biyolojik Geri Dönüşüm Yöntemleri.....	13
1.2.4. Mekanik Geri Dönüşüm Yöntemleri	14
1.3. Termoset Reçine Esaslı Atıklarının Betonda Kullanımı	14
1.4. Termoset Reçine Esaslı Atıklarının Yüzey Modifikasyonu.....	17
1.4.1. Fiziksel Yöntemler.....	17
1.4.2. Kimyasal Yöntemler	18
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı	22
2. MATERYAL VE YÖNTEM	23
2.1. Kullanılan Malzemeler	23
2.1.1. Çimento	23
2.1.2. Agregası	24
2.1.3. Su	25
2.1.4. Epoksi Reçine Atığı.....	25
2.1.5. 3-aminopropiltrimetoksisilan (APTS).....	27
2.1.6. Etanol (C ₂ H ₅ OH) çözültisi.....	27

2.1.7. Asetik asit (CH_3COOH).....	27
2.2. Yöntem	28
2.2.1. Epoksi Reçine Atığının Yüzey Modifikasyon İşlemleri	28
2.2.2. Çimento Harç Karışımlarının Hazırlanması.....	31
2.2.2.1. Taze Harç Deneyleri	31
2.2.3. Sertleşmiş Çimento Harç Deneyleri.....	33
2.2.3.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi	33
2.2.3.2. Basınç Dayanımı Deneyi	34
2.2.3.3. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.....	34
2.2.3.4. Eğilme Dayanımı Deneyi	35
2.2.3.5. Ağırlıkça Su Emme Deneyi	36
2.2.3.6. Yüksek Sıcaklık Deneyi	37
2.2.3.7. Alkali Silika Reaksiyonu Deneyi.....	38
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
3.1. Taze Harç Deney Sonuçları.....	40
3.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları.....	42
3.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları.....	42
3.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	43
3.2.3. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları	44
3.2.4. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	45
3.2.5. Ağırlıkça Su Emme Deneyi Sonuçları	46
3.2.6. Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları.....	47
3.2.7. Alkali Silika Reaksiyonu Deneyi Sonuçları	49
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKÇA	51

GİRİŞ

Son yıllarda ileri mühendislik uygulamalarında hafiflik, yüksek mekanik performans, uzun ömür ve korozyon direnci gibi özelliklerin önem kazanmasıyla birlikte lif takviyeli kompozit sanayisi büyük bir ivme kazanmıştır. Başta enerji, havacılık, uzay ve otomotiv sektörleri olmak üzere pek çok alanda bu malzemeler, yüksek boyutsal kararlılıkları, üstün mekanik özellikleri ve zorlu çevresel koşullara karşı dirençleri sayesinde yapısal eleman olarak tercih edilmektedir. Özellikle rüzgâr türbini kanatları, uçak gövdeleri, çeşitli kanat yapıları ve iç kabin donanımları gibi kritik bileşenlerde yaygın olarak kullanılan lif takviyeli polimer (FRP) kompozitler, sağladıkları performans avantajları nedeniyle dünya genelinde üretim ve kullanım miktarlarında önemli bir artışa neden olmuştur. Ancak bu hızlı büyüme ciddi miktarda üretim fazlası ve kullanım ömrü sona ermiş kompozit atığıyla birlikte çevresel sorunu da beraberinde getirmiştir. Teknik özellikler ve çalıştığı ortama bağlı olarak rüzgâr türbini kanatlarının ömrü yaklaşık 20 yıl olduğundan önünde bulundurulduğunda, özellikle enerji sektöründe epoksikompozit atıklarının yıllar içinde önemli miktarlara ulaştığı bilinmektedir (Beauson et al., 2022). Artan çevresel farkındalık, döngüsel ekonomi ilkeleri ve doğal kaynakların korunmasına yönelik politikalar doğrultusunda, bu tür atıkların alternatif kullanım alanlarında değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Kompozit malzemeler genel olarak polimer esaslı bir matris ile lif, parçacık ya da diğer takviye elemanlarının bir araya gelmesiyle oluşur. Termoplastik reçineler (örneğin polietilen, polipropilen) bazı uygulamalarda tercih edilse de yüksek performans gerektiren durumlarda genellikle termoset reçineler kullanılmaktadır. Epoksi, doymamış poliester, vinil ester, fenolik reçine, poliüretan gibi termoset reçineler kimyasal kararlılıkları ve mekanik dayanımları nedeniyle yaygın biçimde tercih edilmektedir. Ancak bu reçineler, geri dönüşüm açısından büyük zorluklar barındırmaktadır. Çapraz bağlı moleküler yapıları nedeniyle ısıtıldıklarında yeniden şekillendirilemez ve geleneksel termoplastiklerden farklı olarak eritilerek geri kazanılamazlar. Bu durum, epoksi esaslı kompozit atıkları geri dönüştürülmesi en zor malzeme gruplarından biri hâline getirmekte ve genellikle depolama sahalarında biriktirilmelerine veya atık bertaraf tesislerinde yakıt olarak kullanılmasına neden olmaktadır.

Epoksi bazlı kompozit atıkların değerlendirilmesine yönelik geri kazanım yöntemleri temel olarak mekanik, kimyasal ve termal işlemler olarak sınıflandırılmaktadır. Kimyasal ve termal dönüşüm teknikleri, reçine yapısını moleküler düzeyde parçalayarak elyafların geri kazanımını mümkün kılmakta ancak yüksek enerji ihtiyacı, maliyet ve proses karmaşıklığı gibi sınırlamalar içermektedir. Bu nedenle, daha basit ve ekonomik olması sebebiyle mekanik geri dönüşüm ön plana çıkmaktadır. Epoksi esaslı kompozit atıkların mekanik olarak öğütülerek çimento esaslı yapı malzemelerinde ince agrega veya dolgu malzemesi olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar artmaktadır(Raj et al., 2024). Bu yaklaşım hem atık miktarının azaltılması hem de doğal kum gibi geleneksel agrega kaynaklarının kullanımının sınırlandırılması açısından sürdürülebilir bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Epoksi reçine atıklarının öğütülerek çimento esaslı kompozitlerde agrega yerine kullanılmasıyoğunluğu azaltarakdayanım özelliklerini iyileştirebilmektedir. Ancak, atık kullanım oranı arttıkça dayanım özelliklerinde düşüş gözlenebilmekte, bu da optimum kullanım miktarının dikkatle belirlenmesini gerektirmektedir.Bu atıkların mekanik olarak dönüştürülerek kullanımında epoksi reçine yüzeyinin çimento matrisi ile bağlantısını kuvvetlendirmek için çeşitli yüzey iyileştirme yöntemlerinin uygulanması mümkündür. Bu yöntemler, kompozit atığın yüzeyinde kimyasal veya fiziksel modifikasyonlar yoluyla bağlanma kapasitesini artırmayı ve nihai beton performansını iyileştirmeyi hedeflemektedir. Böylece hem atıkların geri kazanımı hem de sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi yönünde önemli bir adım atılmış olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, rüzgâr türbin kanatlarının üretiminde ortaya çıkankürlenmişepoksi reçine atığı, İzmir Menemen Organize Sanayi Bölgesinde üretici bir fabrikadan temin edilmiştir. Atık malzeme fiziksel olarak uygun boyutlara indirgenmiş, ardından çimento matrisi ile etkileşimini artırmak amacıyla yüzey iyileştirme işlemlerine tabi tutulmuştur. Yüzeyi modifiye edilen epoksi reçine atığı, çimento harçlarında ince agreganın yerine kütlece %1, %4, %7 ve %10 oranlarında ikame edilmiştir. Hazırlanan bu çimento harçlarının yoğunluk ve yayılma gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik performansı, su emme, ultrases geçiş hızı (UGH) ve alkali silika reaksiyonu (ASR) direnci gibi

durabilite davranışları ve yüksek sıcaklık altındaki direnci gibi termal özellikleri deneysel bir çalışma ile detaylı olarak araştırılmıştır.

1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Betonda Endüstriyel Atık Kullanımı

İnşaat sektöründe, özellikle çimento harcı ve beton gibi çimento esaslı malzemelerin üretiminde kum ve kırmataş gibi çok fazla miktarda doğal agrega tüketilmektedir. Beton yapımı için gereken agrega talebi, pek çok bölgede nehir kumu ve ocak taşı gibi doğal kaynakların aşırı ve kontrolsüz biçimde çıkarılmasına yol açmıştır. Son yıllarda yoğun kum ocakçılığı ve nehir kumu kullanımına bağlı olarak nitelikli agrega kaynakları giderek tükenmekte, ince agrega temininde zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu bağlamda, endüstriyel atıkların betonda agrega olarak kullanımı giderek daha fazla ilgi görmektedir. Geri dönüşüm stratejileri, bir yandan atık malzemelerin depolama veya yakma yoluyla çevreye vereceği zararları azaltmayı, diğer yandan agrega çıkarmanın çevresel maliyetlerini düşürmeyi hedeflemektedir. Thorneycroft et al. (2018), atık plastik kullanarak doğal kumu kısmen ikame etmenin, küresel ölçekte yılda yaklaşık 820 milyon ton kum kullanımının önüne geçebileceği öngörülmüştür. Bu, betonun dayanımında bir miktar azalma pahasına elde edilen önemli bir çevresel kazançtır. Betonun mekanik performansında kayıplar gözlenirse de sürdürülebilirlik ve kaynak koruma açısından belirgin avantajlar sağlanır. Nitekim literatürde atık plastik, lastik parçacıkları ve lif takviyeli polimer kompozit katılmış betonlarda, zayıf matris-agrega arayüzü ve polimer agreganın daha düşük rijitliği nedeniyle genellikle basınç dayanım düşüşleri rapor edilmiştir (Revilla-Cuesta et al., 2024). Bununla birlikte, bu tür betonların yoğunluklarının düşük olması ve plastik malzemelerin esnek yapıları sayesinde darbe dayanımı ve çekme tokluğunda iyileşmeler gözlenmiştir (AamirGour et al., 2020). Benzer biçimde, kompozit esaslı büyük ölçekli atıklar arasında yer alan rüzgâr türbini kanatlarının mekanik olarak parçalanarak çimento esaslı karışımlarda ince agrega veya katkı malzemesi olarak kullanımı da son yıllarda dikkat çeken bir başka sürdürülebilir uygulamadır. Bu malzemeler, uygun tane boyutuna indirgendikten sonra doğrudan karışıma dahil edilerek doğal agreganın kısmen ikamesine olanak sağlamakta; aynı zamanda lifli yapıları sayesinde matrisle mekanik kenetlenmeyi artırarak bazı durumlarda dayanım ve tokluk özelliklerini iyileştirebilmektedir (Jasińska&Dutkiewicz, 2025). Sonuç olarak, inşaat sektöründe

agrega talebine çözüm olarak endüstriyel atıkların kullanımı hem atık yönetimi sorununa çare olmakta hem de doğal agrega kaynaklarının korunmasına katkı sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda, bu tür plastik katkılı betonların düşük ve orta dayanım gerektiren uygulamalarda başarıyla kullanılabileceği önerilmektedir (Dhanalakshmi et al., 2025; Manso-Morato et al., 2025).

1.2. Termoset Reçine Esaslı Atıklarının Geri Dönüşümü

Termoset reçineler, yüksek derecede çapraz bağlı polimerik yapıya sahip, ısıya ve çözücülere karşı dayanıklı, kimyasal olarak kararlı polimer malzemelerdir. Bu çapraz bağlı yapı, termosetler intermoplastiklerin aksine ısıtıldıklarında erimelerini veya yeniden şekillendirilmelerini imkânsız kılar. Sertleşme reaksiyonları tamamlandıktan sonra yapısal olarak katılaştıran bu reçineler, yüksek sıcaklıklarda yalnızca bozunma veya karbonizasyon gösterir, bu da onları birçok ileri mühendislik uygulaması için ideal kılmaktadır. Bu atıklar genellikle düzenli depolama alanlarına gömülmekte veya yakılmaktadır. Ancak her iki yöntem de çevreye olumsuz etkiler bırakmakta, gömülen termoset esaslı atıklar doğada çözünmeden kalırken yakma işlemi toksik gaz salınımına ve enerji israfına yol açmaktadır. Bu nedenle, epoksi ve benzeri termoset reçine esaslı atıklar için sürdürülebilir geri dönüşüm çözümleri geliştirmek bir ihtiyaçtır. Bu zorluklara rağmen, çevresel kaygılar ve sürdürülebilir üretim ihtiyacı doğrultusunda glikoliz, hidroliz, solvoliz ve piroliz gibi çeşitli kimyasal, fiziksel, termal ve biyolojik geri dönüşüm yöntemleri geliştirilmiştir (Kazemi et al., 2021)

1.2.1. Kimyasal Geri Dönüşüm Yöntemleri

Kimyasal geri dönüşüm, termoset polimer zincirlerini daha küçük moleküllere ayırarak yeniden değerlendirme imkânı sunar. Bu yöntemler, özellikle epoksi gibi dirençli yapıya sahip polimerlerin parçalanmasında potansiyel sunmakla birlikte, pratik uygulamada ekonomik, çevresel ve teknik bazı sınırlamalar taşır (Morici & Dintcheva, 2022).

Glikoliz: Doymamış polyester reçinelerin geri dönüşümünde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, türevleri ile polimer zincirlerinde transesterifikasyon reaksiyonları gerçekleştirilerek malzemeyi düşük molekül ağırlıklı bileşenlere ayırır.

Hidroliz: Polimer yapısını su kullanarak kimyasal olarak parçalama prensibine dayanır. Asidik, bazık ya da nötr ortamda uygulanabilir. Ancak epoksi gibi çapraz bağlı termosetler için verimi düşüktür.

Solvolizvesüperkritikakışkanlar:Bu yöntem, özellikle metanol veya su gibi çözücülerle yüksek sıcaklık ve basınç altında uygulanmaktadır. Çevre dostu kabul edilse de enerji tüketimi oldukça yüksektir.

Oksidatifparçalamaveasitleyikim: Güçlü oksitleyiciler (örneğin nitrik asit) ile termoset yapıdaki reçineler parçalanabilir. Ancak bu tür işlemler toksik yan ürünler oluşturabilmekte ve iş sağlığı açısından tehlikeli olabilmektedir.

Termoset reçine esaslı lifli kompozitlerin kimyasal geri dönüşüm yöntemi sonucunda elde edilen lifler, genellikle orijinal bileşenlerine yakın saflıkta olduğu için yüksek kaliteli sayılırlar. Özellikle karbon elyaflar, kimyasal geri kazanım sonrasında mekanik özelliklerinin büyük kısmını korur ve yeniden yüksek performanslı kompozitlerde kullanılabilir. Cam elyaflar için ise kimyasal yöntemler reçineyi çözerek elyafları bütün halde ortaya çıkarsa da, cam elyafların kendisi yüksek sıcaklık ve kimyasalların etkisiyle bir miktar mukavemet kaybedebilir (Zhang et al., 2021a).

1.2.2. Termal Geri Dönüşüm Yöntemleri

Termal geri dönüşüm, yüksek sıcaklıklarda ısı işlemi ile malzemenin parçalanmasını veya yakıt olarak değerlendirilmesini kapsar.

Mikrodalgaişlem:Epoksi veyapoliüretangibitermosetlerin yapısını dahagözenekli hale getirerek bozunmasını hızlandırmak için kullanılır. Ancak özellikle kalın parçalar için homojen ısı işlemi sağlamak güçtür.

Piroliz (Isıl bozunma):Termoset reçineler, oksijensiz ortamda 400–800 °C arasında ısıtılarak sıvı ve gaz fazlarına ayrıştırılır. Ancak bu yöntem yüksek enerji tüketimi ve karmaşık gaz arıtma sistemleri gerektirmektedir.

1.2.3. Biyolojik Geri Dönüşüm Yöntemleri

Termoset reçinelerin biyolojik geri dönüşümü, polimer yapının mikroorganizmalar veya enzimler aracılığıyla parçalanma işlemidir.

Mikrobiyalparçalama: Bazı mikroorganizmalar, termoset reçinelerdeki bağları kırabilir. Bu

türişlemler düşük enerji tüketimiyle çevre dostudur, ancak reaksiyon süresi uzundur. Bu yöntem ile genel olarak sadece yüzeysel bozunma görülebilen büyük ölçekli uygulamaları için henüz yetersizdir.

1.2.4. Mekanik Geri Dönüşüm Yöntemleri

Mekanik geri dönüşüm, termoset esaslı atıkların fiziksel işlemlerle küçültülmesi ve yeniden kullanımını hedefleyen en basit ve uygulanabilir yöntemdir. Bu yöntem kimyasal işlem gerektirmediği için düşük enerji tüketimli, çevre dostu ve üretim süreçlerine kolayca entegre edilebilir. Mekanik yöntemlerin avantajı, kimyasal işlem gerektirmemesi ve nispeten düşük enerji tüketimiyle hızlı bir şekilde atık hacmini azaltmasıdır (Shuaib & Mativenga, 2016). Nitekim, yapılan bir çalışmada, mekanik öğütme işleminin enerji ihtiyacının yalnızca $\sim 0.1\text{--}4.8$ MJ/kg atık olduğu, bunun termal yöntemlerden (24–30 MJ/kg) ve özellikle kimyasal yöntemlerden (21–91 MJ/kg) çok daha düşük olduğu bildirilmektedir (Liu et al., 2025). Mekanik geri dönüşümün önemli bir dezavantajı geri kazanılan malzemenin özelliklerinin genellikle düşük performanslı olmasıdır. Öğütülen termoset esaslı atıklar, orijinal uzun ve sürekli elyaflar yerine kısa lif parçaları veya reçine ağırlıklı toz halinde olduğundan, yeni ürünlere katıldığında mekanik özelliklerde bir düşüşe yol açar. Bu nedenle bu malzemeler daha çok dolgu veya ikincil katkı olarak değerlendirilmektedir (Khalid et al., 2022).

1.3. Termoset Reçine Esaslı Atıklarının Betonda Kullanımı

Termoset kompozit atıklarının değerlendirildiği geleneksel bir yaklaşımla yakma işlemi ile malzeme yakıt olarak kullanıp enerji elde etmektir. Bu kapsamda, doğrudan atık enerji tesislerinde yakma ve çimento fırınlarında birlikte yakma yöntemleri öne çıkmaktadır. Organik reçine içeriği yüksek olan termoset kompozitler, bu süreçte ısı enerjisi üreterek fosil yakıt tüketimini azaltabilmektedir. Ancak, bu yöntemler kompozit içerisindeki elyafların fiziksel bütünlüğünü bozmakta ve malzemenin döngüsel kullanımını engellemektedir. Ayrıca yakma işlemi sonucu ortaya çıkan gaz ve uçucu organik bileşikler gibi emisyonlar çevresel açıdan olumsuz etkiler yaratmaktadır. Kül kalıntıları ise genellikle sadece dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle, yakma gibi geleneksel yöntemlerin yerine, hem enerji hem de malzeme geri kazanımını mümkün kılan alternatif dönüşüm stratejileri gün geçtikçe daha fazla

zlaönemkazanmaktadır. Bu stratejilerarasındabiröncekibölümdeanlatılankimyasal, termal, biyolojikvemekanikgeridönüşümyöntemleriöneçıkkmaktadır.

Termosetkompozitlerinkimyasalvetermalgeridönüşümü, özelliklekarbonelyafgibideğerlibileşenlerinfizikselvekimyasalbütünlüğünükoruyarak gerikazanımınaodaklanmaktadır. Özelliklepirolizvesolvolizgibikimyasalyöntemlerön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler, yüksekteknolojiyesahipyapısaluygulamalardageridönüştürülmüşelyafkullanımınımkünkılmaktaveböyleceçevreselyükünazaltılmasınıyanısıraekonomikkazanım da sağlamaktadır. Mekanikgeridönüşüm, düşükenerjigereksinimiveişlemkolaylığıylaçevreselveekonomikaçıdanavantajlarsunmaktadır. Özellikle cam elyaftakviyelitermosetkompozitatıklarınöğütülerekçimentoesaslımalzemelerekatkımaddeolarakkullanımı, literatürdeyaygınolarakealealmaktadır. Bu türatıklartozveyakısaelyaformunagetirilerekbetonkarışımlarınadâhiledilebilmekte, böylecedayanımpersormansiveçatlakkontrolüaçasındanolumluetkilergözlemlenmektedir. (Asokan et al., 2010)yürüttüğübirçalışmada, GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) tozlarınınbelirlioranlardabetonkarışımınakatılmasıyla hem basınçdayanımındaartışsağlandığı hem de çimentokullanımmiktarınınazaldığıraporedilmiştir.

Termoset esaslı atıkların mekanikgeridönüşümsonrasındabeton gibi çimento esaslı kompozitlerdeagregaolarakkullanımı, hem atıkbertarafınınönlenmesi hem de doğlagregatüketimininazaltılmasıyönündenönemlidir.

(Chaitongrat&Siwadamrongpong, 2018), melamin-formaldehit (MF) atığı granül ve toz olarak iki farklı fiziksel formda nehir kumunun %15, %25 ve %35 oranlarında kütlece ikame olarak kullanmıştır. Granül MF atığı kullanılan örneklerde toz MF atığı kullanılanlara göre dayanım değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 25% oranında MF tozu kullanılan karışımlarda düşük basınç dayanımları gözlenirse de bu değerin ASTM C129-11 standardına göre yük taşıyıcı olmayan hafif betonlar için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, MF tozunun daha iyi paketlenme özelliği ve çimento hamuruyla daha homojen bir bağ oluşturmasıyla açıklanmıştır. SEM analizleri de MF atığının özellikle toz formunun, çimento matrisiyle daha iyi bir aderans sağladığını ve bu durumun mekanik dayanımı

artırdığını göstermiştir. (He et al., 2023), cam elyaf takviyeli epoksi plaka atıklarını öğütürerek 0–4 mm, 4–9 mm ve >9 mm boyutlarında sınıflandırmış ve %5, %10, %15 hacim oranlarında ince agrega yerine betona katmıştır. Epoksi atık eklenmesi birim ağırlığı düşürüp slump değerini artırmış; %5–10 oranlarında, özellikle 4–9 mm fraksiyonunda, basınç ve çekme dayanımı en yüksek seviyeye ulaşmıştır. %15 ikame oranında ise dayanımlar azalmıştır. Çalışma, atık epoksinin %5–10 oranlarında beton performansını koruyarak doğal kum kullanımını azaltabileceğini göstermektedir. (Panyakapo&Panyakapo, 2008), melamin atıklarının hafif beton yoğunluğunu belirgin şekilde azalttığını ve yüksek oranlarda zayıf aderansın basınç dayanımını düşürdüğünü bildirmiştir. Uygun dozajlarda ise yaklaşık 1400 kg/m³ kuru yoğunluk elde edilmiş ve basınç dayanımı ASTM C129 Tip II'nin yük taşıyıcı olmayan hafif beton gerekliliklerini karşılamıştır. Ayrıca, çalışmalarında düşük yoğunluklu melamin atıklarının betonun ısı yalıtım potansiyelini artırdığını da belirtmişlerdir. Termoset atıkların inert yapısı göz önünde bulundurulduğunda, bu tür malzemelerin çimento esaslı kompozitlerindurabilitesine katkı sağlaması beklenen bir durumdur. Bununla birlikte, alkali-silika reaksiyonuna girmemeleri, zararlı genleşme reaksiyonlarının önlenmesine de yardımcı olmaktadır. Nitekim,(Tittarelli&Moriconi, 2010), toz haline getirilmiş GFRP atıklarının betonda alkali-silika reaksiyonuna neden olmadığını ortaya koymuştur.

Termoset esaslı atıkların beton gibi çimento esaslı kompozitlerde içindeki davranışında en kritik mesele, matris-agrega arayüzeyindekiaderans problemidir. Epoksi ve benzeri polimerik atık parçacıkları hidrofobik yüzeye sahip olduğundan, taze beton karışımında yüzeyleri suyu iterek çimento hamurunun bu parçacık etrafında düzgün hidrasyonunu engeller. Sonuç olarak polimer agregalar ile çimento matrisi arasında zayıf bir geçiş zonu oluşur ve yük aktarımı etkin olamaz. Birçok araştırma, doğal agrega yerine atık termoset esaslı konulmasının betonun basınç ve eğilme dayanımlarında azalmaya neden olduğunu, bunun da büyük ölçüde bu zayıf aderansa bağlandığını rapor etmektedir (Baturkin et al., 2021; Zhang et al., 2021b). Bu nedenle, termoset esaslı atıkların çimento matrisine uyumunu artırmak için arayüzey özelliklerinin iyileştirilmesi kritik önem taşır. Bu amaçla, yüzey iyileştirme teknikleri geliştirilmiş ve polimer parçacıkların hidrofobik karakterini azaltarak çimento hamuru ile daha güçlü bağlar oluşturması hedeflenmiştir. Farklı yüzey modifikasyon teknikleri ile polimer yüzeyini fonksiyonel gruplarla

zenginleştirerek hidrasyon ürünlerinin arayüzeyde daha iyi tutunmasını sağlar. Bu yaklaşımlar, zayıf geçiş zonunu güçlendirmeye ve mekanik dayanım kayıplarını minimize etmeye yönelik en yaygın çözümler olarak öne çıkmaktadır (Wang et al., 2024).

1.4. Termoset Reçine Esaslı Atıklarının Yüzey Modifikasyonu

Termoset reçine atıkların çimento bazlı sistemlerde etkin şekilde kullanılabilmesi için adersans probleminin çözülmesi gerekmektedir. Yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi için çeşitli yüzey modifikasyon teknikleri geliştirilmiştir. Atık polimer malzemelerin yüzeylerinin kimyasal veya fiziksel işlemlerle aktif hale getirilerek çimento gibi inorganik bağlayıcılarla daha iyi kenetlenmesinin sağlanabilmektedir.

1.4.1. Fiziksel Yöntemler

Herhangi bir kimyasal reaksiyona girmeksizin polimer yüzeyini fiziksel etkilerle değiştirmeyi hedefler. En tür modifikasyonlar, yüksek enerjili ışınım kullanarak polimer yüzeyinin atomik yapısını ve pürüzlülüğünü değiştirerek atığın matrisle daha iyi bağ kurmasını sağlar. Bu kapsamda plazma işlemleri, gamma (γ) radyasyon ve mikrodalga uygulamaları literatürde geniş yer bulmuştur.

Plazma ile yüzey işleme: Polimer yüzeyi, plazma içinde yüksek enerjili iyonlarla bombardımana tutulur. Bu işlem sırasında yüzeyde hidrofilik gruplar oluşur ve pürüzlülük artar. Bu, çimento hamuru ile ıslanabilirliği ve adersansı iyileştirir.

Gamma(γ)radyasyonu: Polimer zincirlerinde kopmalara yol açarak yüzeyde daha düşük molekül ağırlıklı, kısmen okside olmuş bir tabaka meydana getirir. Bu işlemler sonucunda polimer atık parçacığının suyu çekebilme ve çimento ile ıslanabilme kabiliyeti artırılır.

Mikrodalga uygulaması: Termoset atıkların iç yapısında lokal ısınma yaratarak kısmi ağ kırılması sağlar. Özellikle lastik atıklarda devulkanizasyon veya yapısal gevşetme için kullanılabilir.

Fiziksel yöntemlerin saha uygulamasında bazı önemli sınırlamaları vardır. Plazma ile modifikasyon, laboratuvar ölçeğinde etkin olsa da büyük hacimli inşaat projelerinde uygulanması zor, özel ekipman gerektiren bir yöntemdir. Plazma işleminin etkinliği; süre, sıcaklık, basınç, gaz türü ve debisi gibi birçok parametreye

bağlı olduğundan saha uygulamalarında kontrolü zordur. Ayrıca plazmayla aktiflenen yüzey, zamanla etkinliğini yitirebilir. Yani işlem sonrası oluşan polar yüzey grupları bir süre sonra eski hidrofobik haline dönebilmektedir(Thibodeaux et al., 2021). Gamma radyasyonu da uygulamada bazı pratik zorluklar içerir. Termoset atıkları yeterince modifiye edebilmek için oldukça yüksek dozlarda ve en az 24 saat gibi uzun süreli ışınlamalar gerekir. Bu düzeyde bir radyasyon dozu, güvenlik sınırlarının çok üzerinde olduğu için özel radyasyon tesisleri gerektirir ve yanlış uygulama durumunda ciddi sağlık riskleri oluşabilir(GonzálezNiño et al., 2023). Mikrodalga uygulaması ise mikrodalga enerjisi malzeme hacmine nüfuz ederek hızlı ısınma sağlayabilmekte, ancak kalın malzemelerde homojen etki yaratmada ve metal içeriği varsa kıvılcım riski ortaya çıkabilmektedir(Hrdlička et al., 2025).

1.4.2. Kimyasal Yöntemler

Atık polimerlerin yüzey kimyasını değiştirmeyi amaçlayan bu yöntemler, malzeme yüzeyini çeşitli kimyasal reaktiflerle işleme tabi tutarak yüzey enerjisini, ıslanabilirliğini ve farklı matris sistemleriyle bağ kurma potansiyelini artırmayı hedefler. Özellikle çaprazbağlı ve kimyasal olarak inert yapıya sahip epoksireçineler gibi termoset atıklar üzerinde etkili olan bu teknikler, yüzeyde yeni fonksiyonel grupların oluşturulması ve yüzey topografyasının değiştirilmesi yoluyla arayüz etkileşimlerini güçlendirir.

Asit/Baz işlemi: Polimer yüzeyi alkali (örneğin sodyum hidroksit) veya asidik (örneğin hidroklorik asit, sülfürik asit) çözeltilerle işleme tabi tutulur. Amaç, polimerin yüzeyindeki hidrokarbon esaslı kontaminantların giderilmesi, hidrofilik (suya yakın) grupların kazandırılması ve polimer matrislerle etkileşimin artırılmasıdır. İşlem sonrası yüzeyde hidroksil, karbonil ve karboksil gruplarının oluşması sağlanır. Yüzeyde $-OH$ (hidroksil) veya $-COOH$ gibi grupların oluşturulması, hidrofobik polimeri daha hidrofilik hale getirir.

Oksidatif işlem: Bu yöntemde, yüzeyine hidrojen peroksit (H_2O_2), potasyum permanganat ($KMnO_4$) gibi oksitleyici ajanlar uygulanır. Bu ajanlar, yüzeyi kimyasal olarak parçalayarak yeni fonksiyonel grupların oluşmasına neden olur. Sonuç olarak, yüzeyin polaritesi artar, yüzey enerjisi yükselir ve bağ kurma kapasitesi gelişir.

Graftlama (Graftpolimerizasyon):Yüzeye başka bir polimer zincirinin kimyasal olarak bağlanması esasına dayanır. Genellikle styren, metil metakrilat gibi monomerler graftlanarak yeni yüzey işlevleri kazandırılır.

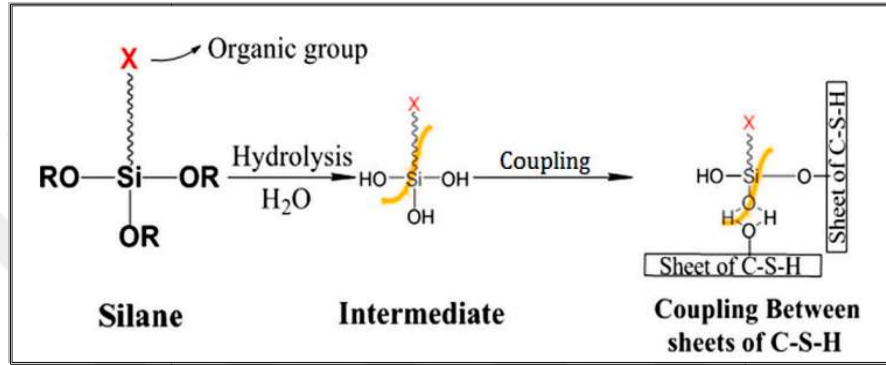
Devulkanizasyon yöntemi:Kükürtlü çapraz bağlara sahip polimerlerde (ör. lastik ve kauçuk) uygulanır. Çapraz bağların çözülmesiyle yüzey esnekliği ve reaktivitesi artırılır.

Silan bağlayıcı ajanlarla işlem: Silan bağlayıcı ajanlar (silanecoupling agents, SCA), organik (örneğin polimer) ve inorganik (örneğin cam, çimento, mineral) malzemeler arasında kimyasal köprü oluşturmak amacıyla kullanılan özel bileşiklerdir. Tipik olarak genel formülleri $(RO)_3-Si-R'-X$ şeklindedir. RO hidrolize olabilen alkoksi gruplar, R' ise genellikle metilen gibi kısa bir alkilen zinciri ve X organik fonksiyonel grubu temsil eder. Bu yapının özelliği, molekülün bir ucunda inorganik yüzeylere bağlanabilecek kısımlar, diğer ucunda ise organik malzemelerle etkileşebilecek fonksiyonel grup bulunmasıdır (Teng et al., 2025).

Silanların işlev mekanizması, alkoksi grupların nem varlığında hidrolize uğrayarak silanol ($Si-OH$) gruplarına dönüşmesine dayanır. Oluşan silanol grupları, inorganik yüzeylerdeki hidroksil ($-OH$) grupları ile kondenzasyon reaksiyonuna girerek yüzeye kovalent olarak bağlanır ve dayanıklı siloksan ($Si-O-Si$) bağları oluşturur. Eşzamanlı olarak, silan molekülünün organik uca sahip X grubu, hedeflenen organik fazla (örneğin bir polimer matrisi veya reçine) kimyasal reaksiyonlar veya güçlü etkileşimler yapabilir. Bu çift yönlü reaktivite sayesinde silanlar, bir köprü molekül gibi davranarak inorganik ve organik bileşenler arasında aderansı artırır (Xie et al., 2021a). Bu mekanizma sayesinde inorganik-organik arayüzey özellikleri iyileşerek dayanım ve dayanıklılık artar. Nitekim bu ajanlar başta epoksi reçineler olmak üzere birçok kompozit malzeme, kaplama ve yapıştırıcı sistemlerinde inorganik katkı ile organik reçine arasındaki bağlanmayı geliştirmek için kullanılmaktadır (Shen et al., 2023).

Çimento esaslı malzemelerde silan uygulamasında, silan molekülleri önce hidrasyon ürünlerinin yüzeyini sararak erken yaşta kimyasal reaksiyonları birmiktari yavaşlatabilir. Ancak daha sonra silanların polikondenzasyon ürünleri $Ca(OH)_2$ (portlandit) ile reaksiyona girerek Şekil 1'de görüldüğü gibi matris içinde $C-S-H$

benzer bir yapıyı oluşturur. Bunun sonucunda zamanla porozite azalır, hidrasyon derecesi mukavemet gelişimiyle ilişir (H. Feng et al., 2016). Chen et al. (2020b), SEM görüntüleri ile silan bağlayıcı ajanı lavesinin çimento hamurunun ilk birkaç saatte hidrasyonunun yüzeyde jelimsi bir tabaka oluşturarak geciktirdiğini, EDS analizleri ile ise 28 gün sonundaki polimerleşmiş silanın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girip silisyumun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalleri üzerinde bulunduğunu ve bu etkileşimin matrisi yoğunlaştırdığını ortaya koymuştur.



Şekil 1. Silanın yoğunlaşma mekanizması (H. Feng et al., 2016)

Silan bağlayıcı ajanlarla yüzey modifikasyonu uygulamasında, genellikle su-alkol karışımından oluşan düşük derişimli bir çözelti hazırlanır. Bu çözelti, silan moleküllerinin hidrolize olabilmesi için belirli bir süre karıştırılarak tepkimeye bırakılır. Ardından, yüzey modifikasyonu yapılacak olan partiküller bu çözeltiye daldırılır ve silan moleküllerinin yüzeye adsorbe olması sağlanır. İşlem tamamlandıktan sonra partiküller çözeltiden çıkarılır, uygun bir yöntemle durulanır ve kontrollü bir sıcaklıkta kurutularak yüzey modifikasyonu sonlandırılır (Arkles, 2006b). (Xiang et al., 2020), atık lastik taneciklerini silan ile kaplamak için %2,5 konsantrasyonda etanol çözeltisinde 30 dakika boyunca karıştırarak tüm yüzeylerin temasını sağlamış ve sonrasında tanecikleri süzerek 63°C 'de 24 saat kurutmuştur. Bu işlem sonucunda taneciklerin üzerinde yoğun ve tekdüze bir silan filmi oluştuğu, kaplanan yüzeylerin artık daha yüksek bir yüzey alanına ve değişmiş kimyasal gruplara sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Silan bağlayıcıların türü ve kimyasal yapısı, yüzey modifikasyonunun etkinliğinde önemli rol oynar. Örneğin, 3-aminopropil trietoksisilan (APTS, ticari adıyla KH-550) molekülü NH_2 fonksiyonel grubuna sahip olup epoksi reçineleri gibi termoset polimerlerle kimyasal reaksiyon verebilmekte ve aynı zamanda çimento

matrisi ile yüksek polaritesi sayesinde kuvvetli etkileşimler geliştirebilmektedir (Švegl et al., 2008). Buna karşılık 3-glicidiloksipropil trimetoksisilan (GPTMS, ticari adıyla KH-560) yapısında bir epoksi halka bulundurur; bu epoksi grup uygun koşullarda açılarak polimer ağlarına kovalent olarak bağlanabilir veya kürlenmekte olan epoksi reçinesiyle reaksiyona girerek ara yüzeyde güçlü bir bağ oluşturabilir. Bir diğer yaygın ajan olan 3-metakriloksipropil trimetoksisilan (MPTMS, ticari adıyla KH-570), yapısında çift bağ (C=C) içeren bir organik fonksiyonel gruba sahiptir. Özellikle vinil ester veya doymamış polyester reçinelerde eş-polimerizasyonla kovalent bağlar kurabilmekte ve böylece kompozit malzemede üstün bağ dayanımı sağlamaktadır (Lamari et al., 2024).

B. Feng et al. (2022), APTS ve GPTMSilanlarının su geçirimsizlik ve dayanım üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Her iki silan da düşük dozajlarda kapiler su emilimini ve poroziteyi önemli ölçüde azaltarak suya karşı dayanımı artırmıştır. Aynı dozajda GPTMS, APTS'ye göre daha yüksek su iticilik ve mukavemet kazancı sağlamış; bu durum, GPTMS'nin daha uzun ve dallanmış organik zincirine bağlı olarak gelişen güçlü hidrofobik etki ve matrise bağlanma kapasitesine bağlanmıştır. Xie et al. (2021b)de farklı alkil zincir uzunluklarına sahip üç silanın çimento esaslı sistemlerdeki etkilerini incelemiş ve zincir yapısının performansta belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada kısa zincirli silanlarınhidratasyonu daha fazla geciktirdiği, uzun zincirli hidrofobiksilanların ise bu etkiyi azalttığı; ancak her iki tipin de uygun dozajlarda poroziteyi ve su alma oranını düşürerek dayanıklılığı artırdığı, yüksek miktarlarda ise basınç dayanımında azalma gözlenmiştir. Dolayısıyla, silan türlerinin ve zincir yapısının hem hidrofobiklik hem de mekanik performans üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir.

(Xu et al., 2024), atık rüzgâr türbini kanatlarından elde edilen cam elyafların yeniden kullanımı ele alınmış ve silan esaslı bağlayıcıların uygulanmasıyla geri kazanılan elyaf ile yeni reçine matrisi arasındaki arayüzey yapışmasının önemli ölçüde artırılabilceği vurgulanmıştır. Böyle bir iyileştirmenin, yeniden üretilen kompozit malzemelerin mukavemet ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini geliştirdiği belirtilmektedir. Tüm bu çalışmalar, geri dönüştürülen inorganik takviyelerin yeniden kullanımında yüzey işlem ajanlarının önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Mekanik öğütme ile oluşan yüzey kusurlarının, silan bazlı yüzey

modifikasyonu ile giderilmesi ise mantıklı bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, mekanik öğütme ile silan uygulamasının birlikte kullanılarak arayüzey performansına olası etkilerinin incelenmesi ve durabilite özelliklerinin araştırılması literatürde güncel bir konu olarak değerlendirilmektedir.

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, enerji sektöründe rüzgâr türbini kanatlarının yapımında kullanılan epoksiesaslıkompozit malzeme üretiminde oluşan lif içermeyen kürlenmişepoksireçine atıklarının çimento harçlarında ince agrega olarak değerlendirilmesini araştırmaktır. Bu bağlamda çalışmanın temel hedefleri aşağıda sunulmuştur:

Atık yönetimi ve sürdürülebilirlik:Kürlenmişepoksi reçine atıklarınınatık depolama sahalarına gönderilen miktarların azaltılması ve doğal kaynak kullanımının azaltılması.

Çevresel ve ekonomik fayda:Kullanılmayan epoksi atıklarının değerlendirilmesiyle karbon ayak izinin azaltılması, doğal agrega kullanımının sınırlandırılması ve endüstriyel atıklara yönelik çevreci veekonomik çözüm üretilmesi.

Çimento harcının performansı: Kürlenmişepoksi reçine atıkların ince agrega yerine kullanılması ile elde edilen çimento harçlarının fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi.

Mekanik geri dönüşüm yaklaşımı, kimyasal işlem veya yüksek sıcaklık gerektirmemesi nedeniyle daha düşük enerji tüketimiyle gerçekleştirilebilmekte ve üretim süreçlerine kolaylıkla entegre edilebilmektedir. Ancak bu yöntemin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Özellikle öğütme işlemi, kompozit yapıdaki elyafları ciddi oranda kısaltmakta ve yüzeylerinde reçine kalıntıları bırakmaktadır. Bu durum, elde edilen geri kazanılmış elyafın mekanik özelliklerinde önemli bir düşüşe yol açmaktadır. (Vega-Leal et al., 2024), mekanik yöntemle karbon elyaf takviyeli termosetkompozitlerin mekanik geri dönüşüm süreçlerinde göreceli olarak düşük enerji kullanımına rağmen, elde edilen malzemenin çekme dayanımında yarıya varan düşüşler meydana gelmektedir. Bu nedenle, öğütülmüş lif ve toz malzeme doğrudan yüksek dayanım gerektiren uygulamalar yerine daha çok dolgu ve düşük yük taşıyan bileşenlerde değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada önerilen yaklaşım ile k rlenmiş epoksi atıklar üretim sahasından temin edilerek  g t lecek ve yüzey iyileştirme işlemleri uygulanarak harç matrisi ile baē kurma potansiyeli artırılması hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilmesi planlanan başlıca aşamalar ařaēıda özetlenmiştir:

Malzeme hazırlık işlemleri:K rlenmiş epoksi reçine atıkların toplanması,tane boyutu işlemleri ve yüzey iyileştirme çalışmalarının yapılması.

Numune  retimi: Farklı oranlarda epoksi reçine atıēı içeren  imento harçlarının hazırlanması.

Deneysel  alışmalar: imento harçlarında epoksi reçine atıēının kullanımında çeşitli fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi.

Bu  alışma, geri dönüştürülmüş epoksi atıklarının  imento harçlarında performansını deēerlendirerek, bu tür atıkların yapı malzemelerine entegrasyonunun uygulanabilirliēini araştırmayı amaçlamaktadır. Geliştirilen bu yaklaşım, hem çevresel tehditlerin azaltılmasına katkı saēlamakta hem de yapı sektöründe ekonomik ve teknik açıdan uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan malzemeler,  imento harçlarının hazırlanması ve gerçekleştirilen deneylerin yapılışı detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Yöntem iki ana aşamada ele alınmıştır. İlk aşamada, epoksi reçine atıēın  imento harcında daha etkin bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla yüzey iyileştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise, yüzeyi modifiye edilmiş epoksi reçine atıklarının belirli oranlarda  imento harç karışımlarına dâhil edilmesiyle harç karışımlarının hazırlanışı, kalıplanması, kürlenmesi anlatılmıştır. Bölümün devamında numunelere uygulanan fiziksel, mekanik ve durabilite deneyleri açıklanmıştır.

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Çimento

Çimento harçlarının üretiminde baēlayıcı olarak Tablo 1’de kimyasal özellikleri verilen ve Manisa’da bulunan bir  imento fabrikasından temin edilen

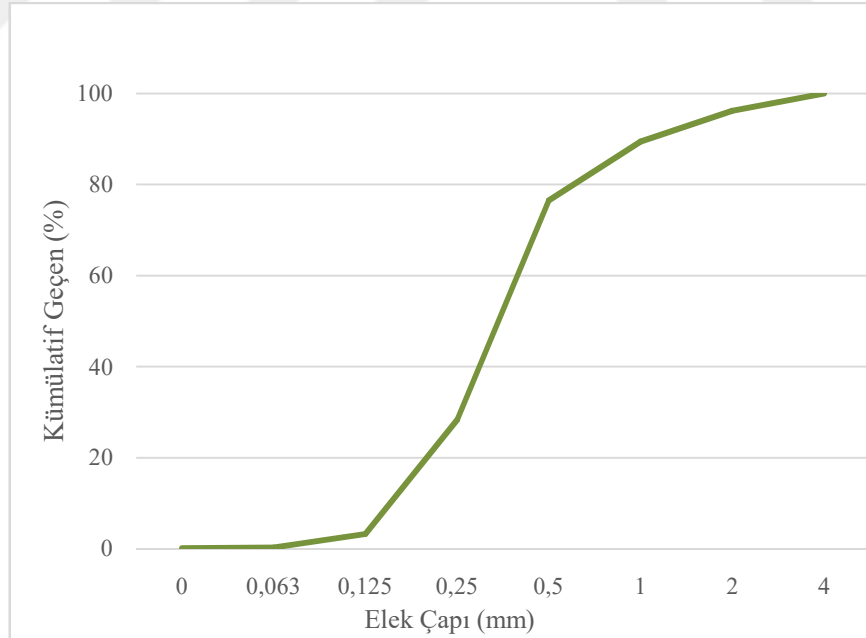
CEM I 42,5 R PortlandÇimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3,12 gr/cm³, blaine inceliği 3650 cm²/g değerindedir.

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

2.1.2. Agrega

Tez çalışmasında agrega olarak Manisa ili sınırları içinde yer alan bir ocaktan temin edilen doğal silis kumları ince agrega olarak kullanılmıştır. Kullanılan kumun birim hacim ağırlığı 1,65 g/cm³'tür. 0-4 mm arasında değişen tane boyutlarına sahip kumun tane boyutu dağılımının belirlenmesi için TS EN 933-1'e uygun olarak yapılan elek analizi sonuç Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kumun granülometri eğrisi

2.1.3. Su

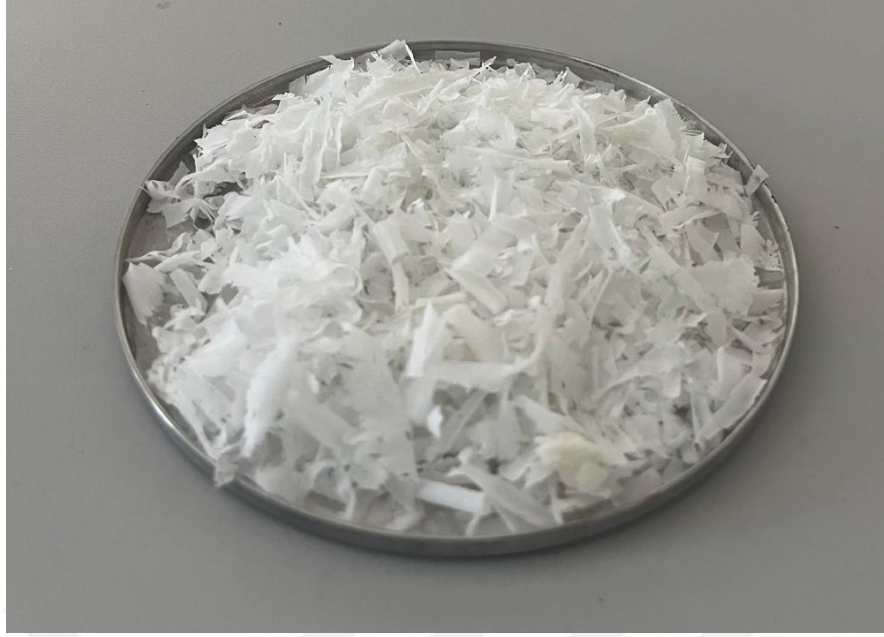
Çimento harç karışımlarının hazırlanmasında şebeke suyu kullanılmıştır. Sadece epoksi reçine atığının yüzey modifikasyon işlemlerinde deiyonize su kullanılmıştır.

2.1.4. Epoksi Reçine Atığı

Çalışmada kullanılan epoksi reçine esaslı kompozitlerin üretildiği İzmir Menemen Organize Sanayi Bölgesindeüzgâr türbini kanatları üreten bir fabrikada çeşitli nedenlerle kullanılamaz hâle gelmiş ve üretim dışı bırakılmış bir atıktır. Bu atık sahada geri dönüşüm sahalarına atılmak kürlenmesi için bekletilmektedir. Kürlenme işlemi tamamlanmış ve sertleşmiş epoksi reçine atığından alınan büyük parçalar, Şekil 3'te görüldüğü rendelenmişve işlem sonrası elde edilen malzeme iseŞekil 4'te görülmektedir.



Şekil 3. Sertleşmiş epoksi reçine atığının rendelenme işlemi



Şekil 4. Rendelenmiş epoksi reçine atığı

Rendelenmiş epoksi atıkları yatsı ve düzensiz tane boyutlarından oluşmaktadır. Daha uygun tane boyut ve dağılımı için Şekil 5’te görülen bıçaklı öğütücü yardımıyla epoksi reçine atıklarının tane boyutu küçültülmüştür. Şekil 6’da görüldüğü gibi öğütme sonrası elde edilen epoksi reçine atığının yüzey alanı artmış ve harçta ince agrega olarak kullanıma daha uygun tane boyutlarına sahip hale gelmiştir.



Şekil 5. Öğütücü cihaz



Şekil 6. Öğütülmüş epoksireçine atık

2.1.5. 3-aminopropiltrimetoksisilan (APTS)

APTS, silan esaslı bir yüzey kaplama ajanıdır. Molekül yapısında yer alan $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ grubu, çimentonun yüzeyinde kondensasyona uğrayarak Si-O-Si bağları oluşturur. Diğer ucu olan $-\text{NH}_2$ grubu ise epoksireçine yüzeyine kimyasal olarak bağlanarak organik-inorganik ara fazda köprü görevi görür. Böylece epoksi-çimento arayüzünde daha kuvvetli bir bağlanma sağlanır. Kullanılan APTS, epoksi reçine atığının kütlesinin %1,5 olarak seçilmiştir.

2.1.6. Etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) çözeltisi

Silan ajanının çözünürlüğünü artırmak ve silanol oluşumu sırasında uygun reaksiyon ortamını sağlamak amacıyla %95 oranında etanol içeren bir çözelti hazırlanmıştır. Metanol gruplarının su ile reaksiyonu sonucu metoksi gruplarının yerini silanol ($-\text{SiOH}$) grupları alır. Silanol grupları, yüzeye hidrojen bağı ve sonrasında kovalent bağ kurma kapasitesine sahip olup, yüzeye tutunmayı kolaylaştırır.

2.1.7. Asetik asit (CH_3COOH)

APTS'nin hidroliz reaksiyonu için gerekli optimum pH aralığını (4.5–5.5) sağlamak amacıyla birkaç damla asetik asit eklenmiştir. Bu pH aralığı, APTS'nin stabil bir şekilde hidrolize uğraması ve etkin yüzey kaplaması yapması için kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

Bu çalışmada kullanılan epoksi reçine atığı çimento harcı içerisinde ince agrega olarak kullanılmadan önce belirli ön işlemlerden geçirilmiştir. Rendelenen ve öğütülen atıklar, tozuma ve uçucu bileşen içeriğini azaltmak amacıyla saf su ile yıkanmış, ardından 70 °C’de etüvde 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutma işlemi hem nem içeriğini azaltmak hem de epoksinin yüzeyine işlemiş olabilecek kirleticileri uzaklaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen granül formundaki epoksi atığının pürüzsüz yüzeyinden kaynaklı yaşanabilecek aderans problemini en aza indirmek amacıyla epoksi reçine atığına yüzey modifikasyon işlemi yapılmıştır. Daha sonraki aşamada epoksi reçine atığı, çimento harcı üretiminde ince agrega yerine belirli oranlarda ikame malzeme olarak kullanılmıştır. Epoksi reçine atığı ile elde edilen çimento harçlarının taze halde yayılma ve birim hacim ağırlık değerleri tespit edilmiştir. Sertleşmiş halde ise eğilme dayanımı, basınç dayanımı, UGH, kapiler ve ağırlıkça su emme ve yüksek sıcaklık deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Epoksi Reçine Atığının Yüzey Modifikasyon İşlemleri

Çözelti Hazırlığı: %95 etanol ve %5 saf su içeren 100 mL çözelti hazırlanmıştır. pH seviyesi asetik asit damlatılarak 4.5–5.5 aralığına ayarlanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Asidik çözelti hazırlığı

Silan Bağlayıcı Ajan İlavesi: Hazırlanan çözeltiye, öğütülmüş epoksi reçine miktarının %1,5 kadar APTS (100 g epoksiye 1,5 g APTS) ilave edilmiştir. Çözelti, 30dakika süreyle manyetik karıştırıcıda 1000 rpm hızında karıştırılmıştır (Şekil 8). Bu işlem, APTS'nin su içinde hidrolize uğrayarak aktif silanol formuna dönüşmesini sağlamıştır.



Şekil 8. Silan bağlayıcı ajan ilavesi

Epoksi Yüzeyinin İşlenmesi: Epoksi reçine atığı hazırlanan silan çözeltisine daldırılmış ve bu karışım 10 dakika daha Şekil 9’da gösterildiği gibi karıştırılmıştır. Bu sırada silanol grupları, epoksireçine yüzeyine adsorbe olarak kimyasal etkileşim başlatmıştır.



Şekil 9. Epoksi reçine atığının hazırlanan silane çözeltisinde karıştırılması

Kurutma ve Reaksiyonun Tamamlanması: Silan ile işlem görmüş epoksireçine atıklarının Şekil 10’da gösterilen 100°C sıcaklığa ayarlanmış etüvde 1 saat süreyle bekletilerek kurutulması sağlanmıştır. Bu aşamada yüzeyde Si–O–Si bağlarının oluşumu tamamlanmış, su ve etanol tamamen uzaklaştırılmıştır.



Şekil 10. Epoksi reçine atığının kurutulma işlemi

2.2.2. Çimento Harç Karışımlarının Hazırlanması

Epoksi reçine atığının yüzey modifikasyon işleminin tamamlanmasından sonra çimento harcında kullanıma hazır hale gelmiştir. Çimento harçlarında epoksi reçine atıklarının etkisini incelemek için farklı karışım oranları tasarlanmıştır. Epoksi reçine atıklarının kullanımından kaynaklanabilecek etkileri doğru bir şekilde incelemek için atık içermeyen ayrı bir karışım kontrol karışımı hazırlanmıştır. Çimento harç karışım oranları, TS EN 196-1'de belirtilen tasarım metodolojisine uygun olarak belirlenmiştir. Karışımlar içerdikleri epoksi reçine atığı oranına göre adlandırılmıştır. Kum yerine ağırlıkça %1, %4, %7 ve %10 oranında kame olarak epoksi reçine atığı kullanılmıştır. Kontrol karışımı, 0,53 su/çimento oranına sahiptir. Bu su/çimento oranı, hazırlanan tüm harçlar için aynı değere sahiptir. Karışımların yeterli işlenebilirliğini temin ederek homojen yerleşimi sağlamak amacıyla, tüm harç karışımlarında çimento kütlesinin %1,5'i oranında yüksek performanslı, melaminsülfonat esaslı bir süper akışkanlaştırıcı olan Sikament® FFN kullanılmıştır. Tüm karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Karışım oranları

Set No	Set İsmi	Set Açıklaması	Su (g)	Çimento (g)	Kum (g)	ERA (g)
1	ERA-0	%0 Epoksi Reçine Atığı	1600	3000	8250	0
2	ERA-1	%1 Epoksi Reçine Atığı	1600	3000	8175	75
3	ERA-4	%4 Epoksi Reçine Atığı	1600	3000	7950	300
4	ERA-7	%7 Epoksi Reçine Atığı	1600	3000	7725	525
5	ERA-10	%10 Epoksi Reçine Atığı	1600	3000	7500	750

2.2.2.1. Taze Harç Deneyleri

Taze halde olan çimento harçlarının işlenebilirliğini kontrol etmek için kalıplar yerleştirilmeden önce ASTM C230'a uygun olarak Şekil 11'de görüldüğü gibi taze harca yayılma tablası testi uygulanmıştır.



Şekil 11. Yayılma Tablası Deneyi

Taze harç daha sonra 50x50x50 mm, 40x40x160 mm ve 25x25x285 mm ölçülerinde önceden yağlanmış kalıplara sarsma tablası ile yerleştirilmiştir. Her bir deney için 3 adet numune hazırlanmıştır. Kalıba yerleştirilen çimento harçları 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak Şekil 12’de görüldüğü gibi (20±2) °C sıcaklıktaki kirece doygun suda kür işlemi tamamlanarak deneylere hazır hale gelmiştir.



Şekil 12. Çimento harçlarının suda kürlenmesi

Taze harcın birim hacim ağırlık değeri TS EN 1015-6'ya göre Şekil 13'te gösterilen hacmi ve ağırlığı bilinen kap içerisine sıkıştırılarak yerleştirilen harcın ağırlığının kabın hacmine bölünmesiyle (2.1) bağlantısı ile hesaplanmıştır.

$$d_t = \frac{w_2 - w_1}{v} \#(2.1)$$

d_t = Taze harcın birim hacim ağırlığı (kg/m³)

w_b = Boş kabın ağırlığı (kg)

w_d = Taze harç dolukabın ağırlığı (kg)

v = Kabın hacmi (m³)



Şekil 13. Taze çimento harcının birim hacim ağırlık değerinin belirlenmesi

2.2.3. Sertleşmiş Çimento Harç Deneyleri

2.2.3.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Sertleşmiş çimento harcının kuru birim hacim ağırlık değeri bulunurken TS EN 1015-10 standartlarına göre öncelikle 70 °C'ye ayarlanmış etüvde tamamen kurutulması sağlanmıştır. Etüv kurusu ağırlığı ölçülen numunenin hacme oranlanmasıyla hacim ağırlık değerleri (2.2) bağıntısıyla elde edilmiştir.

$$d_k = \frac{w_k}{v} \#(2.2)$$

v = Numunenin hacmi (m³)

w_k = Numunenin etüv kurusu ağırlığı (kg)

d_k = Numunenin kuru birim hacim ağırlığı (kg)

2.2.3.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı, çimento harçlarının eksenel yük altında kırılmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Kalıplardan çıkarılan 50x50x50 mm boyutlarına sahip küp numuneler 7 ve 28 boyunca suda kürlenmiştir. Kür süresi tamamlanan numunelerin basınç dayanımı Şekil 14'te gösterilen çimento harcı basınç cihazı ile TS EN 1015-11 standardına uygun olarak basınç cihazı aparatı yardımıyla belirlenmiştir. Yükleme hızı 1,5kN/sn olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı, (2.3) bağlantısı ile hesaplanmış ve 3 numuneden elde edilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilmiştir.

$$f_c = \frac{f_k}{A} \# (2.3)$$

f_c = Basınç dayanımı (MPa)

f_k = Kırma yükü (kN)

A = Yüzey alanı (mm²)



Şekil 14. Basınç dayanımı deneyi

2.2.3.3. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Tahribatsız deney yöntemlerinden biri olan UGH deneyi ile ses dalgalarının çimento harçlarının içerisindeki yayılma hızı tespit edilir. Kalıplardan çıkarılan

50x50x50 mm boyutlarına sahip küp numunelere basınç dayanım testi yapılmadan önce TS EN 12504-4 standardına göre UGH deneyi yapılır. Bu deneyde, numunenin karşılıklı yüzeylerine yerleştirilen iki prob arasında ses dalgasının ilerleme hızı Şekil 15'te gösterildiği gibi ölçülür. Yüzeyler arasındaki sesin daha homojen yayılması için problara öncesinde iletken bir jel sürülmüştür. UGH, (2.4) bağlantısı ile ses dalgasının aldığı yolun, yol aldığı zamana oranlanması ile hesaplanır ve 3 numuneden elde edilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilmiştir.

$$v = \frac{l}{t} \quad (2.4)$$

v = Ses dalgasının yayılma hızı (mm/μs)

l = Ses dalgasının yol aldığı mesafe (mm)

t = Ses dalgasının yol aldığı süre (μs)



Şekil 15. Ultrases geçiş hızı deneyi

2.2.3.4. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı, çimento harçlarının eğilmeye maruz kalması halinde kırılmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Kalıplardan çıkarılan 40x40x160 mm boyutlarına sahip prizma numuneler 7 ve 28 gün boyunca suda kürlenmiştir. Kür süresi tamamlanan numunelerin eğilme dayanımı Şekil 16'da gösterilen çimento harcı eğilme cihazı ile TS EN 1015-11 standardına uygun olarak 0,05 kN/sn yükleme hızıyla üç noktadan yüklenerek belirlenmiştir. Cihazın eğilme deney aparatı

aralarında 100 mm mesafe olan iki adet destek silindiri ve bir adet yükleme silindirinden oluşmaktadır. Numunenin tam ortasından olacak şekilde 50 ± 10 N/sn hızla eşit bir şekilde izgisel yük çimento harçları kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Çimento harçlarının eğilme dayanımı (2.5) bağlantısı ile hesaplanmış ve 3 numuneden elde edilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilmiştir.

$$f_e = \frac{3Fl}{2d_1d_2^2} \#(2.5)$$

f_e =Eğilme dayanımı (N/mm²)

F=Numunenin kırılma yükü (N)

l= İki destek silindiri arasındaki mesafe (mm)

d_1 = Numune genişliği (mm)

d_2 = Numune yüksekliği (mm)



Şekil 16. Eğilme dayanımı deneyi

2.2.3.5. Ağırlıkça Su Emme Deneyi

Su emme kapasitesi, çimento harçlarının suya karşı dayanıklılığı ve uzun dönem performansı açısından önemlidir. 50x50x50 mm boyutlarına sahip 28 gün su kürünü tamamlamış küp numunelerin TS EN 1015-10'a uygun olarak ağırlıkça su

emme değerleri hesaplanmıştır. Tamamen kurutulan numunelerin ağırlıkları lldkten sonra ağırlıkları artık değişmeye ne kadar suda bekletilmiş ve su emmiş ağırlıkları hassas terazi ile llmştr. Daha sonra ağırlıkça su emme değerleri (2.6) bağlantısı ile hesaplanmıştır.

$$S_a = \frac{W_s - W_k}{W_k} \times 100 \# (2.6)$$

S_a =Ağırlıka su emme oranı (%)

W_s =Suyadoygunhavadaki ağırlık

W_k = Etv kurusu ağırlık

2.2.3.6. Yksek Sıcaklık Deneyi

Çimento harçlarında yksek sıcaklık imento hamuru ve agrega arasındaki aderansı olumsuz etkileyerek dayanım kayıplarına sebep olmaktadır. Çimento harçlarında genelde yaklaşık 300 C sıcaklık değerlerinde belirgin şekilde zararlı etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, çalışma kapsamında yksek sıcaklık deneyleri 300 C den başlatılarak 500 C ve 700 C sıcaklık değerlerinde TS EN 1363-1'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

28 gün kr süresini tamamlayan 50x50x50 mm boyutlarına sahip küp numuneler etvde tamamen kurutulmuştur. Numuneler, sıcaklık artışı 7 C/dakolarak ayarlanan yksek sıcaklık fırınına şekil 17'değrlen sıcaklık fırınına yerleştirildikten sonra 2 saat boyunca belirtilen sıcaklıklarda bekletilmiştir. Ani sıcaklık değişimi ile termal çok yaşanmaması için 5 saat fırın içerisinde kapağı açık bir şekilde soğumaya bırakılmıştır. Fırından çıkartılan numuneler 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletildikten sonra basınç dayanımları hesaplanmıştır. Bu dayanımlar 28 gün su kr sonrasında elde edilen basınç dayanımları ile kıyaslanmıştır.



Şekil 17. Yüksek sıcaklık deney cihazı

2.2.3.7. Alkali Silika Reaksiyonu Deneyi

Alkali silika reaksiyonuna bağlı genleşme, çimento esaslı kompozitlerde erken yaşta ortaya çıkabilen bir dayanıklılık problemidir. Agregada bulunan reaktif silikanın yüksek alkali ile etkileşime girmesi sonucunda oluşan jel ürünleri hacim artışına neden olmakta ve bu durum çatlak oluşumuna yol açmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında harç numunelerinin alkali silika reaksiyonuna karşı gösterdiği genleşme davranışı ASTM C1260 standardına uygun olarak değerlendirilmiştir.

Bu deneyde, farklı ikame oranlarına sahip harç karışımları hazırlanmıştır. Her bir karışım için üçer adet 25x25x285 mm boyutlarındaprizma numuneler üretilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler öncelikle 80 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış saf su içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Bu aşamanın sonunda numunelerin referans boy ölçümleri alınmıştır.

Deneyde kullanılacak alkalin çözelti, 1 litre saf su içerisinde 40 g %99 saflıkta NaOH çözündürülerek hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanan çözeltinin

içerisine yerleştirilmiştir ve kaplar 80 °C sıcaklıkta Şekil 18’de görüldüğü gibi deney süresi boyunca muhafaza edilmiştir.



Şekil 18. Alkali silika reaksiyonu deneyi

Numunelerin boy değişimleri 1, 3, 7, 14, 21 ve 28. günlerde çözeltilerden çıkarılarak Şekil 19’da görülen 0.001 mm hassasiyetli dijital komparatör ile ölçülmüştür. Ölçümler tamamlandıktan sonra tekrar çözelti içerisine yerleştirilmiştir. Elde edilen uzunluk değişimi verileri, farklı ikame oranlarının alkali silika reaksiyonu sonucu meydana gelen genleşme üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla değerlendirilmiştir.



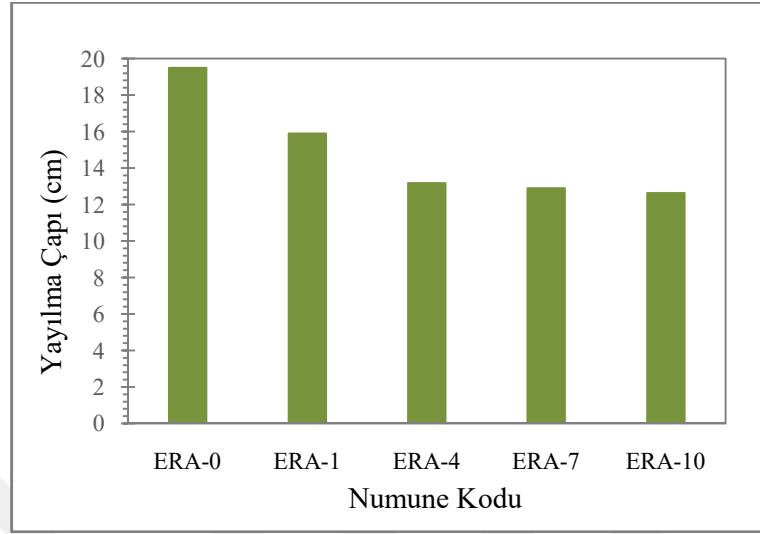
Şekil 19. Numunelerin boy değişimlerinin ölçülmesi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Taze Harç Deney Sonuçları

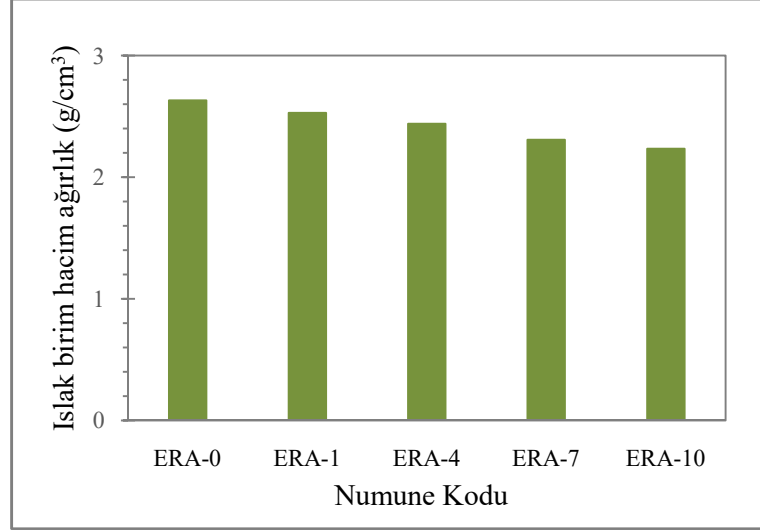
Epoksi reçine atığı ilavesinin çimento harcının yayılma çapında azalmaya sebep olduğu Şekil 20’de açıkça görülmektedir. ERA-0 numunesi 19,5 cm yayılma çapı ile en yüksek işlenebilirlik değerine sahipken, ERA-1 numunesinde bu değer 15,9 cm’ye önemli ölçüde düşmüştür. ERA-4 numunesinde yayılma çapı 13,2 cm, ERA-7 numunesinde 12,9 cm ve ERA-10 numunesinde ise 12,6 cm olarak ölçülmüştür. Bu düşüş eğilimi, epoksi reçine atığı miktarındaki artışın harçların işlenebilirliğini kademeli olarak azalttığını göstermektedir. Azalmanın başlıca nedenleri arasında epoksi reçine atıklarının hidrofobik yüzey özellikleri, düzensiz şekil ve pürüzlü yüzey morfolojileri ile doğal agregalara kıyasla farklı su tutma kapasiteleri yer almaktadır. Hidrofobik yapı, çimento hamurunun akışkanlığını sınırlandırarak yayılma çapının küçülmesine neden olmuştur. Epoksi reçine atığının düzensiz ve pürüzlü yüzey yapısı, hamurun parçacıklar etrafında daha fazla su tutmasına yol açarak serbest su miktarını azaltmaktadır. Ayrıca, epoksi reçine parçacıklarının çimento matrisi ile kimyasal bağ kurma kapasitesinin sınırlı olması,

taneler arası sürtünmeyi artırmakta ve bu durum karışımın kendi ağırlığı ile yayılma eğilimini engellemektedir.



Şekil 20. Çimento harçlarının yayılma çapı değerleri

Epoksi reçine atığı ilavesinin çimento harçlarının ıslak birim hacim ağırlığı üzerinde belirgin bir düşüşe yol açtığı Şekil 21’de görülmektedir. Kontrol karışımı $2,632 \text{ g/cm}^3$ ile en yüksek ıslak birim hacim ağırlığına sahipken atık epoksi reçinesi ilave edilen karışımlarda bu değer kademeli olarak azalmıştır. ERA-1 numunesinde yoğunluk $2,529 \text{ g/cm}^3$, ERA-4 numunesinde $2,440 \text{ g/cm}^3$, ERA-7 numunesinde $2,307 \text{ g/cm}^3$ ve en yüksek oran olan ERA-10 numunesinde ise $2,233 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Böylece ERA-0 ile ERA-10 numunesi arasında toplam $0,399 \text{ g/cm}^3$ azalma meydana gelmiştir. Bu azalma eğilimi, epoksi reçine atığı miktarının artmasıyla birlikte harçların yoğunluğunun kademeli olarak düştüğünü ortaya koymaktadır. Bu durumun başlıca nedenleri arasında epoksi reçine atıklarının özgül ağırlığının doğal agregalara kıyasla daha düşük olması ve karışım içinde daha fazla boşluk oluşmasına neden olması yer almaktadır.

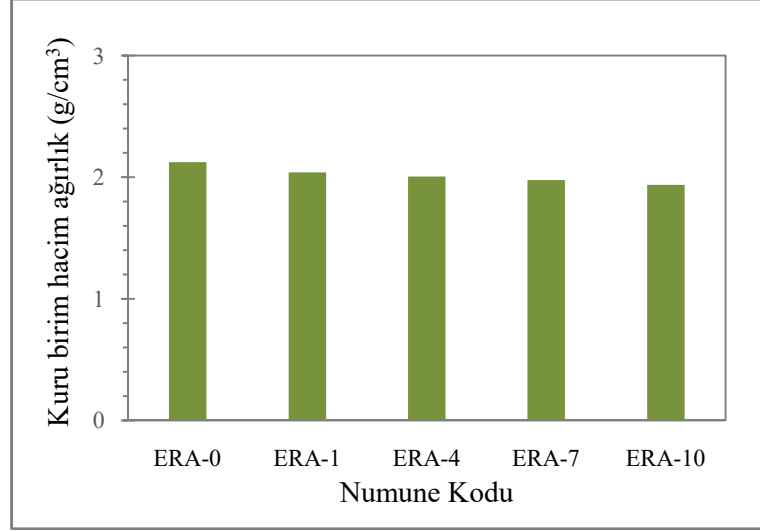


Şekil 21. Islak birim hacim ağırlık değerleri

3.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları

3.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Epoksi reçine atığı miktarındaki artış ile birlikte çimento harçlarının kuru birim hacim ağırlık değerlerinde meydana gelen azalma Şekil 22’de görülecektir. ERA-0 numunesinde $2,12 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenen kuru birim hacim ağırlık, ERA-1’de $2,04 \text{ g/cm}^3$ ’e, ERA-4’te $2,01 \text{ g/cm}^3$ ’e, ERA-7’de $1,98 \text{ g/cm}^3$ ’e ve ERA-10’da ise $1,94 \text{ g/cm}^3$ ’e düşecektir. Bu eğilim, yoğunluğu doğal agregaya ile karşılaştırıldığında daha düşük olan epoksi reçine atıklarının karışıma dâhil edilmesiyle toplam yoğunluğun azalmasından kaynaklanacaktır. Atık oranı arttıkça karışım içerisindeki boşluk hacmi yükselecek ve özellikle ERA-7 ile ERA-10 numunelerinde yoğunluktaki azalma daha belirgin hâle gelecektir. ERA-0 ile ERA-10 arasındaki $0,18 \text{ g/cm}^3$ fark, epoksi reçine atığının artan oranlarda kullanılmasının kuru birim hacim ağırlığı üzerinde belirgin bir etki oluşturacağını göstermektedir.

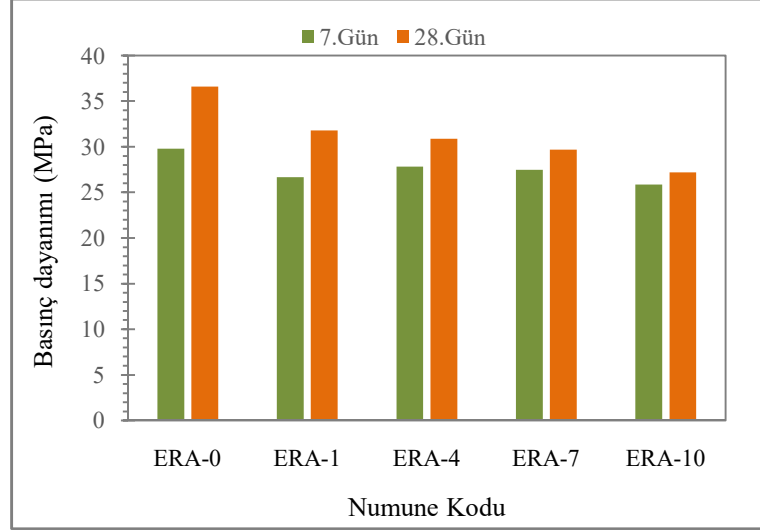


Şekil 22. Kuru birim hacim ağırlık değerleri

3.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Basınç dayanımı sonuçları, epoksi reçine atığının artan ikame oranlarıyla birlikte hem 7 gün hem de 28 gün elde edilen değerlerde düşüş eğilimi göstermiştir (Şekil 23). ERA-0 numunesi 7 gün kür sonunda 29,8 MPa dayanım sergilemiş ve 28 gün değeri 36,6 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, referans karışımın hidrasyon sürecinin normal gelişimini yansıtmaktadır. ERA-1 numunesinde 7 günlük dayanım 26,7 MPa, 28 günlük dayanım ise 31,8 MPa olarak ölçülmüştür. ERA-4 karışımında 7 günlük dayanım 27,8 MPa, 28 günlük dayanım ise 30,9 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu iki numunede dayanım gelişimi devam etmiş olsa da her iki aşamada da referans karışımın altında değerler elde edilmiştir.

ERA-7 numunesi 7 günlük sürede 27,5 MPa dayanım göstermiştir ve 28 günlük değeri 29,7 MPa olmuştur. En yüksek ikame oranına sahip ERA-10 karışımında 7 günlük dayanım 25,9 MPa, 28 günlük dayanım ise 27,2 MPa olarak belirlenmiştir. Yüksek oranlı ikamelerde dayanım değerlerinin belirgin şekilde düştüğü görülmüştür.

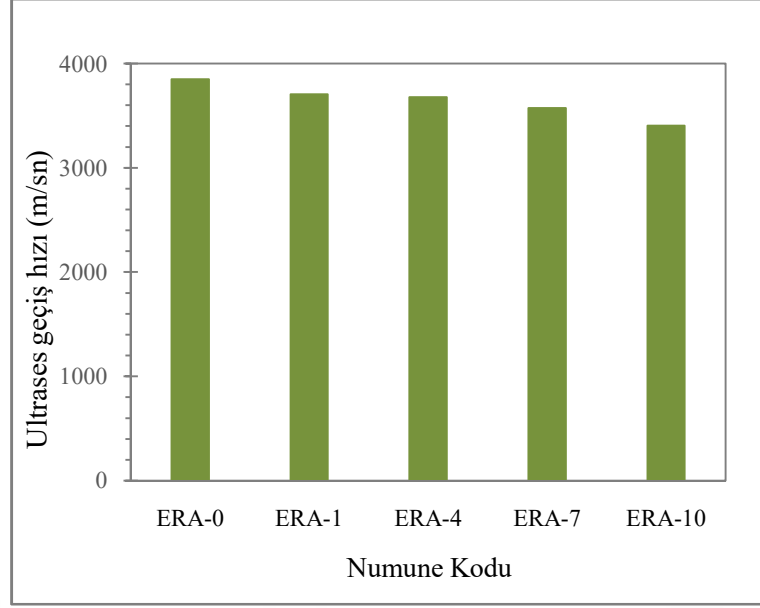


Şekil 23. Basınç dayanımı değerleri

Epoksi reçine atığının artan miktarda kullanımıyla matris içerisinde boşluk oluşumu ve zayıf bölgelerin arttığı anlaşılmıştır. Bu durum yük taşıma kapasitesinin sınırlanmasına neden olmuştur. İncelenen ikame oranları kapsamında belirgin bir dayanım artışı sağlanmamıştır ve yüksek oranlarda performans kaybı daha belirgindir.

3.2.3. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

Epoksi reçine atığı ikame oranı arttıkça UGH değerlerinde kademeli bir azalma olduğu Şekil 24’de görülmektedir. Epoksi reçine atıkları doğal agregaya kıyasla daha düşük elastisite modülüne ve daha zayıf bir arayüzey bağına sahiptir. Bu yapı çimento hamuru ile agrega arasındaki geçiş bölgesinde süreksizliklerin artmasına yol açmıştır. Arayüzeydeki bu zayıf bölgeler ultrases dalgalarının iletim hızını düşürmüştür. Öte yandan, ikame oranı yükseldikçe matris içinde toplam boşluk hacmi artmıştır. Düşük yoğunluklu ve düzensiz yüzeyli reçine parçacıkları karışım içerisinde tam sıkışma sağlayamamış ve bu durum dalga yayılımını sınırlayan mikro boşlukların oluşmasına neden olmuştur. Bu nedenle UGH değerlerindeki düşüş yapısal sürekliliğin zayıflaması ile uyumludur.



Şekil 24. Ultrases geçiş hızı değerleri

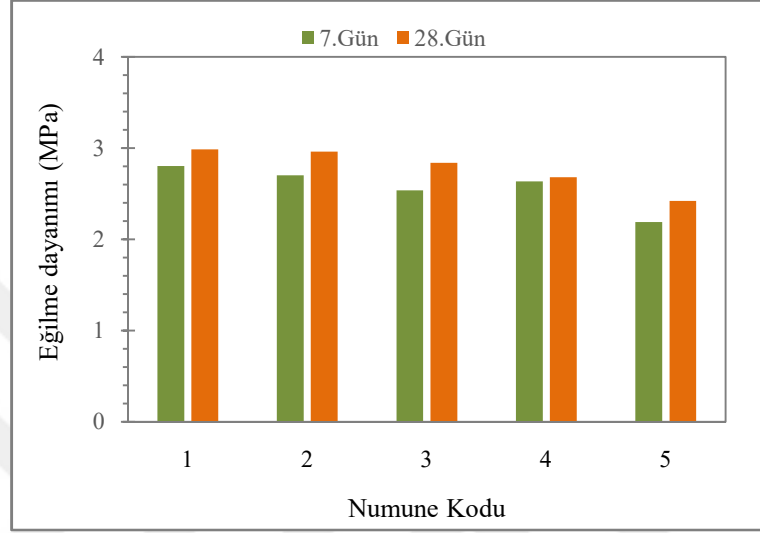
Basınç dayanımı testlerinde, epoksi reçine atığı ikame oranının artışına paralel olarak boşluk miktarındaki yükselişe bağlı bir azalma gözlemlenmiştir. Bu sonuç, UGH değerleri ile de tutarlıdır. ERA-0 numunesindeki daha az boşluk içeriği ve sesin katı ortamda daha hızlı yayılması ilkesi göz önüne alındığında, referans numunenin yüksek UGH değeri beklenen bir durumdur. UGH ve basınç dayanımı arasındaki paralel düşüş, malzemenin matris içi bütünlüğünün kaybının ve arayüzey kalitesindeki zayıflamanın hem mekanik hem de akustik davranışları doğrudan ve birlikte etkilediğini açıkça göstermektedir. Düşük ikame oranlarında UGH değerlerinin referans karışımına yakın kalması ise reçine tanelerinin matris yapısını belirgin biçimde bozmadığı durumlarda akustik iletimin kabul edilebilir düzeyde sürdüğünü ortaya koymuştur.

3.2.4. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Şekil 25’te verilen eğilme dayanımı sonuçları, epoksi reçine atığı ikame oranının artmasıyla birlikte hem 7 günlük hem de 28 günlük değerlerde düşüş eğilimi ortaya çıktığını göstermiştir. ERA-0 numunesinde 7 günlük eğilme dayanımı 2,80 MPa, 28 günlük dayanım ise 2,99 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler referans karışımın hidratasyon gelişimine bağlı olarak sınırlı bir artış gösterdiğini ortaya koymuştur.

ERA-1 numunesinde 7 günlük dayanım 2,70 MPa, 28 günlük dayanım ise 2,96 MPa olarak ölçülmüştür. ERA-4 karışımında 7 günlük değer 2,54 MPa olup 28

günlük dayanım 2,84 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu iki numunede dayanım artışı sürmüştür ancak değerler ERA-0'ın altında kalmıştır. ERA-7 numunesinde 7 günlük dayanım 2,64 MPa olarak belirlenmiş ve 28 günlük dayanım 2,68 MPa düzeyinde gerçekleşmiştir. En yüksek ikame oranına sahip ERA-10 numunesinde 7 günlük dayanım 2,19 MPa, 28 günlük dayanım ise 2,42 MPa olmuştur. Bu numunede eğilme dayanımındaki düşüş daha belirgin hale gelmiştir.



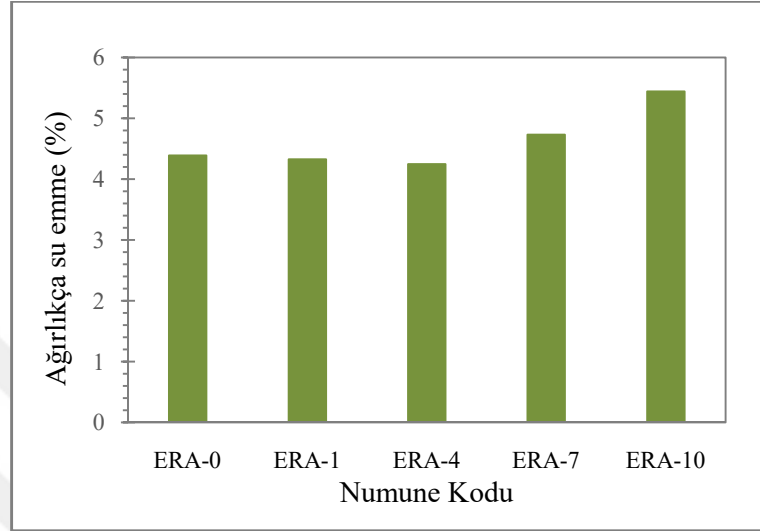
Şekil 25. Eğilme dayanımı değerleri

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde epoksi reçine atığının çimento matrisi ile tam uyum sağlayamaması ve matris-parçacık arayüzünde yeterli aderans gelişmemesi nedeniyle taşıyıcı sürekliliğin azaldığı anlaşılmıştır. Atık miktarı arttıkça boşluk oluşumu ve zayıf bölgelerin yaygınlaşması kırılma anındaki çatlak ilerlemesini kolaylaştırmıştır. Bu nedenle yüksek ikame oranlarında eğilme dayanımındaki kayıplar daha belirgin olmuştur.

3.2.5. Ağırlıkça Su Emme Deneyi Sonuçları

Şekil 26'da verilen ağırlıkça su emme sonuçları, epoksi reçine atığı ve silan katkısının birlikte kullanıldığı karışımlarda su emme davranışının ikame oranına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. ERA-0 numunesinde su emme değeri %4,39 olarak belirlenmiştir. ERA-1 ve ERA-4 numunelerinde su emme değerlerinin sırasıyla %4,32 ve %4,25 düzeyinde gerçekleşmesi, düşük oranlı epoksi reçine atığı ve silan uygulamasının matris içinde sınırlı bir su iticilik etkisi oluşturduğunu göstermiştir. Bu durum, silanın yüzeyde oluşturduğu ince tabaka sayesinde arayüzdeki nem geçişinin kısmen azaltılmasıyla ilişkilendirilebilir.

ERA-7 numunesinde su emme değeri %4,73'e yükselmiştir. Bu noktadan itibaren ikame oranının artmasıyla matris içerisindeki boşluk yapısının daha belirgin hale geldiği anlaşılmıştır. En yüksek ikame oranına sahip ERA-10 karışımında su emme değeri %5,44 olarak ölçülmüş ve su emme artışı daha belirgin biçimde ortaya çıkmıştır.



Şekil 26. Ağırlıkça su emme değerleri

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde düşük oranlı epoksi reçine atığı ve silan katkısının su emmesini bir miktar azaltabildiği, ancak ikame oranı yükseldikçe epoksi parçacıklarının matrisle tam bütünleşememesi ve boşluk miktarının artması nedeniyle su emmenin yeniden yükseldiği görülmüştür. Bu nedenle düşük oranlarda kısmi bir su iticilik etkisi sağlanmış olsa da yüksek oranlarda bu etkinin kaybolduğu ve su emmenin arttığı anlaşılmıştır.

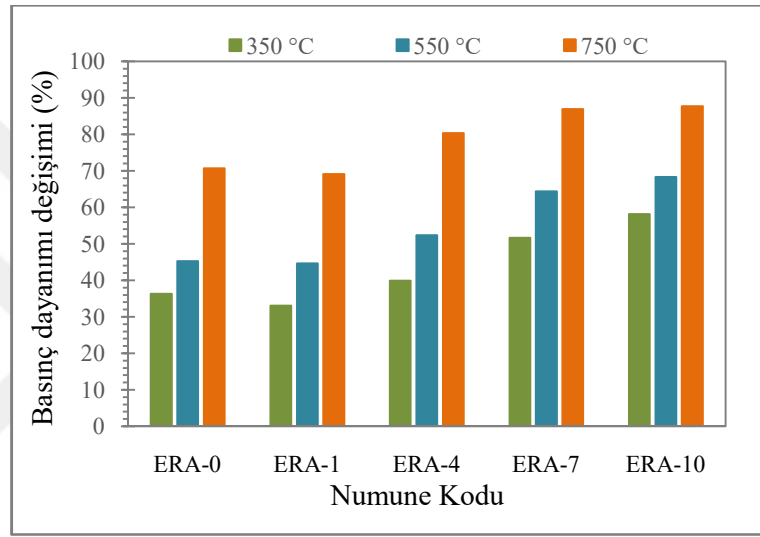
3.2.6. Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları

Şekil 27'de verilen basınç dayanımı değişimleri, sıcaklık arttıkça tüm numunelerde dayanım kaybının belirgin biçimde yükseldiğini göstermiştir. ERA-0 numunesinde dayanım değişimi 350 °C'de %36,3, 550 °C'de %45,3 ve 750 °C'de %70,7 olarak belirlenmiştir. Bu değerler referans karışımın sıcaklık etkisi altındaki beklenen davranışını ortaya koymaktadır.

ERA-1 numunesi 350 °C'de %33,0, 550 °C'de %44,6 ve 750 °C'de %69,1 dayanım değişimi göstermiştir. Bu sonuçlar, düşük oranda epoksi reçine atığı içeren harcın yüksek sıcaklık koşullarında referansla oldukça benzer bir performans sergilediğini göstermiştir. Düşük ikame oranında epoksi parçacıklarının matris

bütünlüğünü belirgin biçimde zayıflatmadığı ve sıcaklık etkisinin referansa yakın bir seviyede gerçekleştiği anlaşılmıştır.

ERA-4 numunesinde dayanım değişimi 350 °C’de %39,9, 550 °C’de %52,4 ve 750 °C’de %80,4 olarak ölçülmüştür. ERA-7 numunesi ise sırasıyla %51,7, %64,4 ve %86,9 değerlerine ulaşmıştır. En yüksek ikame oranına sahip ERA-10 karışımında dayanım değişimi 350 °C’de %58,1, 550 °C’de %68,3 ve 750 °C’de %87,7 olarak belirlenmiştir. Bu numunelerde sıcaklık arttıkça dayanım kayıpları daha belirgin hale gelmiştir.

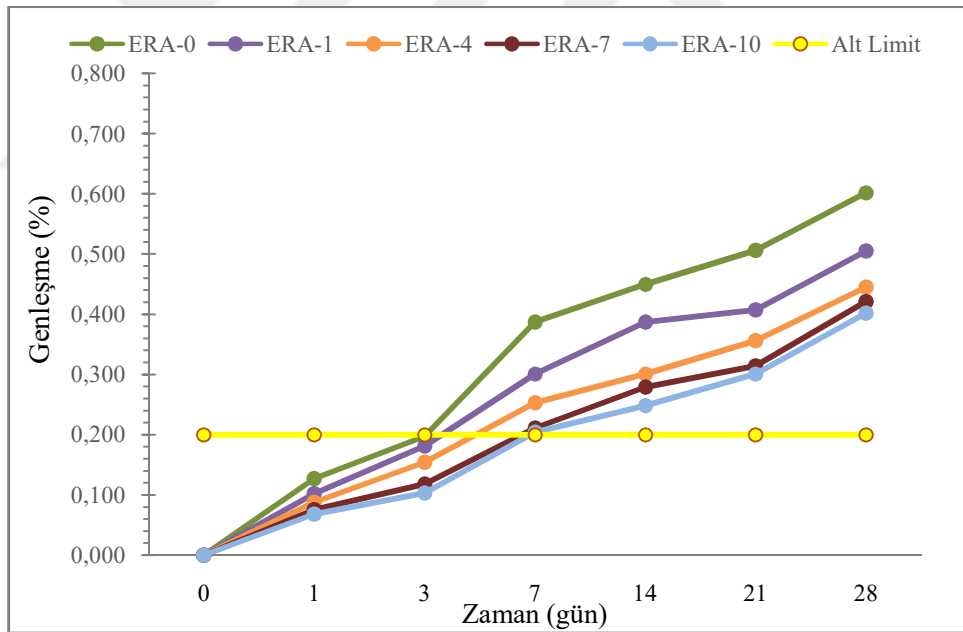


Şekil 27. Yüksek sıcaklık deney sonuçları

Düşük oranlı epoksi reçine atığının yüksek sıcaklık altında dayanım kaybını belirgin biçimde artırmadığı ve referans karışıma yakın bir davranış gösterdiği görülmüştür. Ancak ikame oranı yükseldikçe matris içerisindeki boşluk oluşumu artmıştır ve epoksi parçacıklarının çimento taşına kıyasla daha yüksek ısı genleşme katsayısına sahip olması nedeniyle sıcaklık etkisi altında parçacık çevresinde gerilme birikimi oluşmuştur. Termosetepoksilerin camsı geçiş sıcaklığına yakın aralıklarda yapısal kararsızlık göstermesi, arayüzdeaderans kaybını hızlandırmış ve mikroçatlakların gelişmesine zemin hazırlamıştır. Bu nedenle yüksek sıcaklık koşullarında ikame oranı arttıkça dayanım kaybı daha belirgin hale gelmiştir. Düşük oranlar yüksek sıcaklık uygulamalarında kabul edilebilir düzeyde bir performans sergilemiş, yüksek oranlarda ise epoksi parçacıklarının genleşme eğilimi ve zayıf arayüz etkisi nedeniyle dayanım kaybı hızla yükselmiştir.

3.2.7. Alkali Silika Reaksiyonu Deneyi Sonuçları

Tüm karışımların zamanla artan bir genleşme eğilimine sahip olduğu ve epoksi reçine ikame oranı yükseldikçe eğrilerin sistematik olarak aşağıya kaydığı Şekil 28’de görülmektedir. ASTM C1260 standardında potansiyel alkali silika reaktivitesi için esas alınan alt sınır değeri yaklaşık yüzde 0,20 olup grafikte bu değer yatay bir çizgi ile gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre 14. günde hiçbir karışımın genleşmesi bu sınırın altına düşmemiştir. Bu durum kullanılan agreganın yüksek reaktivite potansiyeline sahip olduğunu ve epoksi reçine ikamesinin genleşme miktarını azalttığı halde agregayı “zararsız” sınıfa indirmedığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte özellikle 21 ve 28 günlük yaşlarda epoksi oranı arttıkça genleşme değerlerinin belirgin biçimde düştüğü gözlenmiştir. Epoksi reçine atığının reaktif ince agregayı hacimsel olarak seyreltmesi ve matris içinde alkali ve nem taşınımını sınırlayan farklı bir faz oluşturması nedeniyle ASR kaynaklı genleşmeler üzerinde baskılayıcı bir etki yarattığı değerlendirilmiştir.



Şekil 28. Alkali silika reaksiyonu deneyi sonuçları

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, endüstriyel atıkepoksireçineparçacıklarınıninçimentoharçlarındadoğalinceagregayerinei kameedilmesinin tazevesertleşmişharçözellikleriüzerindeki etkilerincelenmiştir. Farklıkameoranlarındaüretilennumunelerüzerindegerçekleştirilenfiziksel,

mekanikvedurabilitedeneylerindeneldeedilensonuçlaraşağıdamaddelerhalindeözetlenmiştir:

- Epoksi reçineatığııkameoranınınartması, çimento harçlarının işlenebilirliğini sistematik olarak azaltmıştır. Bu durum, epoksitanelerin doğal agregayı yasladahapürüzlüvedüzensiz morfolojiyesahipolmasıyla tanelerarası sürtünmeyi artırması ve hidrofobik karakterininkarışım suyunun hareketini sınırlamasına bağlanmıştır. Ayrıca, atı koranının artmasıyla hem taze hem de sertleşmiş birim hacim ağırlık değerlerinde belirgin düşüşler kaydedilmiştir. Bu sonuç, epoksi reçineatığının özgül ağırlığının doğal agregada düşük olması sayesinde üretilen harçlarında hafif yapı elemanlarındaki kullanıma potansiyeli taşıdığını göstermektedir.

- Harç karışımlarına giren epoksi miktarının artmasıyla birlikte basınç ve eğilme dayanımlarında bir düşüş eğilimi olduğu ortaya koymuştur. Özellikle ERA-10 gibi yüksek kameoranlarında bu düşüş daha belirgindir. Dayanım kaybının temel nedeni; epoksi parçacıklarının çimento matrisi ile kimyasal bağ kurmak kapasitesinin sınırlı olması, matris-parçacık arayüzeyinde aderans zayıflığı oluşması ve karışım içindeki gözenekliliğin artmasıdır. Ancak, düşük kameoranlarında (ERA-1 ve ERA-4) elde edilen sonuçların referans numune daha yakın seyretmesi, taşıyıcı olmayanları için bu oranların kabul edilebilir sınırları içinde kaldığını göstermektedir.

- Silan katkısı ile birlikte kullanılan düşük kameoranlı epoksi kamelerinde referans numune kıyasla su emme değerlerindeki kısmi bir iyileşme gözlenmiştir. Bu durum, silanın yüzeyde oluşturduğu hidrofobik etki ve düşük kameorandaki epoksinin matrisi içerisindeki nem transferini sınırlaması ile açıklanmaktadır. Ancak kameoranı %7 ve üzerine çıktığında, artan boşluk yapısı ve zayıf arayüzeyler baskın hale gelerek su emme oranını tekrarı yükseltmiştir. Bu bulgu, optimum su iticilik performansı için kameoranının sınırlı tutulması gerektiğini göstermektedir.

- Yüksek sıcaklık etkisi altında tüm numunelerde dayanım kaybı yaşanmış olsa da, düşük kameoranlı epoksi içeren numuneler (ERA-1), referans betonuna benzer bir termal davranış sergilemiştir. İkameoranı arttıkça, epoksi parçacıklarının çimento taşına göre daha yüksek termal genleşme katsayısına sahip olması ve camsı geçiş sıcaklığı üzerindeki kararsız yapısının deniyle iç gerilmeler artmış, bu da dayanım kaybını hızlandırmıştır. Sonuçlar,

yangın riski yüksek bölgelerde kullanılacak harçlarda epoksi oranının minimum düzeyde tutulması gerektiğini işaret etmektedir.

- Epoksi reçine atığı kame oranının artırılması, harç çubuklarının engelem miktarını belirgin şekilde düşürmüştür. Bu olumlu etki, reaktif ince agreganın inert bir malzeme olan epoksi ile yer değiştirilmesi ve epoksi fazının alkali-nem taşıyımını fiziksel olarak engellemesi ile ilişkilendirilmiştir. Her ne kadar 14 günlük sonuçlar "tamamen zararsız" sınırının altına inmese de, epoksi atıklarının ASR kaynaklı engelemeleri baskılayıcı bir role sahip olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen tüm verilerin ışığında endüstriyel epoksi reçine atıklarının düşük oranlarda (%1 - %4) kullanılması durumunda, mekanik dayanımda toler edilebilir düşüşlerle birlikte daha hafif ve ASR riski azaltılmış kompozitler üretilbileceğinin sonucuna varılmıştır. Bu atıkların yapısal taşıyıcılığı yüksek elemanları yerinde dayanım beklentisinin daha düşük olduğu, ancak hafiflik, ısı yalıtım istenen alanlarda değerlendirilmesi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de teknik performans açısından uygun bir çözüm olacaktır. Gelecek çalışmalarda, matris ile epoksi arasındaki aderansı artıracak daha farklı yüzey modifikasyon yöntemlerini araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Aamir Gour, M., Kumar Sharma, S., Khadiyal, S., & Garg, N. (2020). Utilization of Plastic Wastes in Concrete: A Review. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, 11(5), 801–812. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.5.2020.084>
- Arkles, B. (2006a). Hydrophobicity, Hydrophilicity and Silanes. *Paint and Coatings Industry*, 22, 114.
- Arkles, B. (2006b). Hydrophobicity, Hydrophilicity and Silanes. *Paint and Coatings Industry*, 22, 114.
- Asokan, P., Osmani, M., & Price, A. (2010). Improvement of the mechanical properties of glass fiber reinforced plastic waste powder filled concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), 448–460. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.10.017>

- Baturkin, D., Hisseine, O. A., Masmoudi, R., Tagnit-Hamou, A., & Massicotte, L. (2021). Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105807>
- Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P., & Pagh Jensen, J. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111847. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111847>
- Chaitongrat, C., & Siwadamrongpong, S. (2018). Recycling of melamine formaldehyde waste as fine aggregate in lightweight concrete. *Songklanakar in Journal of Science and Technology*, 40, 39–45. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2018.25>
- Chen, B., Shao, H., Li, B., & Li, Z. (2020a). Influence of silane on hydration characteristics and mechanical properties of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 113, 103743. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103743>
- Chen, B., Shao, H., Li, B., & Li, Z. (2020b). Influence of silane on hydration characteristics and mechanical properties of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103743>
- Dhanalakshmi, K., Alex, A. G., Jose, P. A., & Kumar, R. D. (2025). Effect of Using Recycled E-Waste Plastic as Coarse Aggregate with Supplementary Nano-fills in Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00779-z>
- Feng, B., Liu, J., Chen, Y., Tan, X., Zhang, M., & Sun, Z. (2022). Properties and microstructure of self-waterproof metakaolin geopolymer with silane coupling agents. *Construction and Building Materials*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128045>
- Feng, H., Le, H. T. N., Wang, S., & Zhang, M. H. (2016). Effects of silanes and silane derivatives on cement hydration and mechanical properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 129, 48–60. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.11.004>
- González Niño, C., Vidal, J., Del Cerro, M., Royo-Pascual, L., Murillo-Ciordia, G., & Castell, P. (2023). Effect of Gamma Radiation on the Processability of New and Recycled PA-6 Polymers. *Polymers*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/polym15030613>
- He, P., Wang, C., Zhang, Q., Liu, J., & Lu, H. (2023). Performance of Concrete with Recycled Epoxy Plate Waste as a

- Partial Replacement for Fine Aggregates. *MATERIALE PLASTICE*, 1(60), 4254. <https://doi.org/10.37358/Mat.Plast.1964>
- Hrdlička, Z., Brejcha, J., Otruba, J., Skočilas, J., Štancl, J., Kadeřábková, A., Čadek, D., Krmela, J., & Krmelová, V. (2025). Microwave activation of ground tyre rubber and its application in off-road tyre tread formulation. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(1), 105. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01179-9>
- Jasińska, D., & Dutkiewicz, M. (2025). Waste Management of Wind Turbine Blades—A Review of Recycling Methods and Applications in Cementitious Composites. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 17, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su17030805>
- Kazemi, M., Faisal Kabir, S., & Fini, E. H. (2021). State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105776. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105776>
- Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Ahmed, W., & Arshad, H. (2022). Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 31, e00382. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2021.E00382>
- Lamari, B. A., Jochem, L. F., Gleize, P. J. P., Silvestro, L., Onghero, L., & Casagrande, C. A. (2024). Evaluation of Admixture Silane Added into Cementitious Pastes. *Materials*, 17(22). <https://doi.org/10.3390/ma17225403>
- Liu, T., Paraskevoulakos, C., Mughal, U. A., Tyurkay, A., Lushnikova, N., Song, H., Duyal, C., Karnick, S. T., Gauvin, F., & Lima, A. T. (2025). Mechanisms and applications of wind turbine blade waste in cementitious composites: A review. *Materials & Design*, 251, 113732. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2025.113732>
- Manso-Morato, J., Hurtado-Alonso, N., Revilla-Cuesta, V., & Ortega-López, V. (2025). Management of wind-turbine blade waste as high-content concrete addition: Mechanical performance evaluation and life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 373, 123995. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.123995>
- Morici, E., & Dintcheva, N. T. (2022). Recycling of Thermoset Materials and Thermoset-Based Composites: Challenge and Opportunity. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14194153>

- Panyakapo, P., & Panyakapo, M. (2008). Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. *Waste Management*, 28(9), 1581–1588. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2007.08.006>
- Raj, C. T. A., Rajesh, V., Mariappan, M. R. K., & Pitchaiya, S. (2024). Evaluation of the microstructural and mechanical properties of eco-friendly concrete reinforced with recycled wind turbine blades. *Revista Materia*, 29(3). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0208>
- Revilla-Cuesta, V., Faleschini, F., Pellegrino, C., Skaf, M., & Ortega-López, V. (2024). Water transport and porosity trends of concrete containing integral additions of raw-crushed wind-turbine blade. *Developments in the Built Environment*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100374>
- Shen, M. Y., Guo, Z. H., & Feng, W. T. (2023). A study on the characteristics and thermal properties of modified regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composite recycled from waste wind turbine blades. *Composites Part B: Engineering*, 264, 110878. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2023.110878>
- Shuaib, N. A., & Mativenga, P. T. (2016). Energy demand in mechanical recycling of glass fiber reinforced thermoset plastic composites. *Journal of Cleaner Production*, 120, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.070>
- Švegl, F., Šuput-Strupi, J., Škrlep, L., & Kalcher, K. (2008). The influence of aminosilanes on macroscopic properties of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 945–954. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.006>
- Teng, J., Chen, L., Liu, G., Cui, X., Cui, L., & Song, S. (2025). Effect of silanization on mechanical properties and microstructure of thin spray-on liners with different polymer-cement ratios. *Journal of Building Engineering*, 99, 111647. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.111647>
- Thibodeaux, N., Guerrero, D. E., Lopez, J. L., Bandelt, M. J., & Adams, M. P. (2021). Effect of Cold Plasma Treatment of Polymer Fibers on the Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *Fibers*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/fib9100062>
- Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., & Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>
- Tittarelli, F., & Moriconi, G. (2010). Use of GRP industrial by-products in cement based composites. *Cement and Concrete Composites*, 32(3), 219–225. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.11.005>

- Vega-Leal, C., Zárate-Pérez, C., Gomez-Culebro, V. A., Burelo, M., Franco-Urquiza, E. A., & Treviño-Quintanilla, C. D. (2024). Mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers. Part 1: influence of cutting speed on recycled particles and composites properties. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2324359>
- Wang, J., Wang, C., Ji, Y., Qie, R., Wang, D., & Liu, G. (2024). Mechanical Properties and Microscopic Study of Recycled Fibre Concrete Based on Wind Turbine Blades. *Materials*, 17(14). <https://doi.org/10.3390/ma17143565>
- Xiang, Y., Fan, H., & Liu, Z. (2020). Structural characteristics of silane-modified ground tyre rubber and high-temperature creep property of asphalt rubber. *Construction and Building Materials*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117600>
- Xie, M., Zhong, Y., Li, Z., Lei, F., & Jiang, Z. (2021a). Study on alkyl silane-incorporated cement composites: Hydration mechanism and mechanical properties effects. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104161. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104161>
- Xie, M., Zhong, Y., Li, Z., Lei, F., & Jiang, Z. (2021b). Study on alkyl silane-incorporated cement composites: Hydration mechanism and mechanical properties effects. *Cement and Concrete Composites*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104161>
- Xu, M. xin, Ji, H. wen, Wu, Y. chang, Meng, X. xi, Di, J. yi, Yang, J., & Lu, Q. (2024). Recovering glass fibers from waste wind turbine blades: Recycling methods, fiber properties, and potential utilization. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 202). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114690>
- Zhang, Y., Pontikes, Y., Lessard, L., & Willem van Vuure, A. (2021a). Recycling and valorization of glass fibre thermoset composite waste by cold incorporation into a sustainable inorganic polymer matrix. *Composites Part B: Engineering*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109120>
- Zhang, Y., Pontikes, Y., Lessard, L., & Willem van Vuure, A. (2021b). Recycling and valorization of glass fibre thermoset composite waste by cold incorporation into a sustainable inorganic polymer matrix. *Composites Part B: Engineering*, 223, 109120. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109120>