

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK ATIK KATKILI POLİMER BETONLARIN
GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ İLE AGRESİF ÇÖZELTİLERE
KARŞI DİRENCİNİN İNCELENMESİ

Merve AYDIN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Halit Alperen BULUT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2024

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRONİK ATIK KATKILI POLİMER BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ İLE AGRESİF ÇÖZELTİLERE KARŞI DİRENCİNİN İNCELENMESİ

Merve AYDIN

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Halit Alperen BULUT

Bu çalışma, polimer bağlayıcılar ile plastik kökene sahip elektronik atıkların (e-atık) aderansının/yapışmasının daha etkili ve güçlü olacağı, dolayısıyla bu atıkların polimer betonların geçirimsizlik özellikleri ile agresif çözeltilere karşı direncine etkisinin olumlu olacağı hipotezinin araştırılması amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla polimer betonda agrega olarak kullanılan kuvars agregası ve çakılın yerine %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında e-atıklar yer almıştır. Doymamış polyeater reçinenin bağlayıcı olarak kullanıldığı çalışmada, polimer betonların kılcal su emme, hızlı klor geçirimsizliği ile asit ve sülfat atağına karşı davranışındaki ortaya çıkan değişimler 7, 28 ve 90 gün sonunda değerlendirilmiştir. Ayrıca bu betonların birim ağırlık, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV) ve dinamik elastisite modülü deneyleri de gerçekleştirilerek kıyaslamalar yapılmıştır. E-atığın agrega olarak değerlendirilmesi sonucunda hafif polimer betonlar üretilebileceği ortaya çıkmıştır. Kontrol betonundan sonra en yüksek basınç dayanımları, 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla 59,05 MPa, 64,5 MPa ve 73,05 MPa olacak şekilde %3 e-atık kullanılan polimer betonlardan elde edilmiştir. UPV açısından e-atıklı polimer beton kalitesinin önemli ölçüde etkilenmeyip iyi kalitede olacağı sonucuna varılmıştır. Kür süresinin farklı e-atık katkı polimer betonların dinamik elastisite modülü değerleri üzerinde olumlu etkisi olmuştur. E-atığın özellikle %9 oranına kadar kullanımı, 90 gün sonunda 0'a çok yakın kılcal su emme katsayı değerlerine sahip polimer betonlar üretilebileceğini göstermiştir. Hızlı klor geçirimsizliği sonuçları ihmal edilebilir seviyede düşük çıkmıştır. E-atıklar %3, %6 ve %9 oranlarında agrega olarak polimer betonda kullanıldığında asit ve sülfata karşı yüksek dirençli betonlar üretilebilmiştir. Çalışmanın hipotezi, kapsamlı deneyler sonucunda doğrulanmıştır.

2024, 94 sayfa

Anahtar Kelimeler: Asit atağı, E-atık, Hızlı klor geçirimsizliği, Kılcal su emme, Polimer beton, Sülfat atağı.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE PERMEABILITY PROPERTIES AND RESISTANCE TO AGGRESSIVE SOLUTIONS OF ELECTRONIC WASTE ADDED POLYMER CONCRETES

Merve AYDIN

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Halit Alperen BULUT

This study was conducted to investigate the hypothesis that the adhesion of polymer binders and plastic origin electronic wastes (e-waste) will be more effective and stronger, and therefore the effect of these wastes on the permeability properties of polymer concretes and their resistance against aggressive solutions will be positive. For this purpose, quartz aggregate and gravel used as aggregate in polymer concrete were replaced with e-waste at 0%, 3%, 6%, 9%, 12% and 15%. In the study where unsaturated polyester resin was used as a binder, the changes in the capillary water absorption, rapid chloride permeability and the behavior of polymer concretes with e-waste aggregates against acid and sulfate attack were evaluated after 7, 28 and 90 days. Unit weight, compressive strength, ultrasonic pulse velocity (UPV) and dynamic modulus of elasticity tests were also carried out and comparisons were made. It was revealed that lightweight polymer concretes can be produced by using e-waste as aggregate. After the control concrete, the highest compressive strengths were obtained from polymer concretes using 3% e-waste as 59,05 MPa, 64,5 MPa and 73,05 MPa for 7, 28 and 90 days, respectively. It was concluded that the quality of polymer concrete with e-waste would not be significantly affected in terms of UPV and would be of good quality. Curing time had a positive effect on the dynamic modulus of elasticity values of different e-waste admixed polymer concretes. The use of e-waste, especially up to 9%, showed that polymer concretes with capillary water absorption coefficient values very close to 0 after 90 days can be produced. Rapid chloride permeability results were negligibly low. The use of e-waste as aggregate in polymer concrete at 3%, 6% and 9% of e-waste, in particular, produced concretes with high resistance to acid and sulfate. The hypothesis of the study was confirmed by extensive experiments.

2024, 94 Pages

Keywords: Acid attack, E-waste, Polymer concrete, Rapid chloride permeability, Sorptivity, Sulfate attack.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimdeki çalışmalar boyunca sabır ve hoşgörüsünü eksik etmeyen, bilgi birikim ve tecrübesiyle bana yol gösteren, beni yönlendiren ve bu tez çalışması boyunca desteğini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Halit Alperen BULUT’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışması sırasında sağladığı katkılar için Fen Bilimleri Enstitüsü’ne ve çalışmaya katkıda bulunan herkese teşekkür ederim.

Merve AYDIN

Nisan, 2024



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. KURAMSAL TEMELLER.....	8
3.1. Polimer Malzemeler ve Tarihi Gelişim Süreci	8
3.2. Polimerlerin Sınıflandırılması.....	9
3.2.1. Termoplastikler.....	9
3.2.2. Termosetler.....	10
3.3. Polimer Malzemelerin Diğer Bileşenleri	10
3.3.1. Solventler.....	11
3.3.2. Plastifiyanlar.....	11
3.3.3. Stabilizanlar.....	11
3.4. Dolgu Maddeleri	11
3.5. Pigmentler	12
3.6. Katkı Maddeleri	12
3.7. Polimerlerin Genel Özellikleri	13
3.8. Polimer Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	13
3.9. Polimerlerin İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanımı.....	14
3.9.1. Polimer emdirilmiş beton (polymer impregnated concrete: pııc).....	14
3.9.2. Polimer ile modifiye edilmiş beton (polymer modified concrete: PMC).....	15
3.9.3. Polimer beton (polymer concrete: PC).....	16
3.10. Reçineler	16
3.10.1. Reçine plastik yapışma direnci.....	18
3.10.2. Reçine agrega yapışma direnci.....	20

3.11. Atık Tanımı ve Elektronik Atıklar	22
3.12. Elektronik Atıkların Zararları	25
3.13. Türkiye’de Elektronik Atıklar ve Dönüşüm	27
3.13.1. Toplama süreci.....	28
3.13.2. Biriktirme süreci.....	29
3.13.3. Taşıma süreci.....	29
3.13.4. Depolanma süreci.....	29
3.14. Elektronik Atık Kapsamında Yasal Düzenlemeler	30
4.MATERYAL YÖNTEM	31
4.1.Materyal	31
4.1.1.Polimer.....	31
4.1.2. Agregalar.....	32
4.1.3. Elektronik atık (E-atık).....	34
4.1.4. Sertleştirici ve hızlandırıcı malzemeler.....	36
4.2. Yöntem.....	37
4.2.1 Parametreler ve beton karışım dizaynı.....	37
4.2.2. Polimer beton üretimi.....	38
4.2.3 Deneysel çalışmalar.....	39
5.ARAŞTIRMA BULGULARI.....	44
5.1. Birim Ağırlık.....	44
5.2. Basınç Dayanımı	45
5.3 Ultrases Geçiş Hızı (UPV).....	46
5.4. Dinamik Elastisite Modülü	48
5.5. Kılcal Su Emme	50
5.6. Hızlı Klor Geçirimsiliği.....	51
5.7. Asit Atağı	53
5.7.1 Asit atağına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları.....	53
5.7.2. Asit atağına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları.....	55
5.7.3. Asit atağına maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları.....	56
5.8 Sülfat Atağı	57

5.8.1 Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları.....	57
5.8.2 Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları.....	59
5.8.3 Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları.....	60
6. SONUÇLAR	62
KAYNAKÇA	64



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Kategori başına üretilen e-atık	23
Şekil 3.2. E-atık olabilecek bazı teknolojik cihazlar	24
Şekil 3.3. E-atık örneği.....	25
Şekil 3.4. E-atığın dönüşüm süreci	30
Şekil 4.1. Karışımın tane büyüklüğü eğrisi.....	32
Şekil 4.2. Kuvars agregalarının elek analizi sonrası görselleri	33
Şekil 4.3. Kuvars agregasının SEM analiz görüntüsü.....	33
Şekil 4.4. E-atıkların elek analizi sonrası görselleri.....	35
Şekil 4.5. E-atıkların SEM analiz görüntüsü.....	36
Şekil 4.6. Polimer beton üretimini gösteren diyagram.....	39
Şekil 4.7. Basınç dayanımı deneyine ait uygulama görseli.....	40
Şekil 4.8. UPV deneyine ait uygulama görseli	41
Şekil 4.9. Asit ve sülfat atağı deneyine ait uygulama görseli	43
Şekil 5.1. Birim ağırlık sonuçları ile e-atık oranları arasındaki ilişki.....	44
Şekil 5.2. Beton yaşına göre basınç dayanımı – e-atık oranı arasındaki ilişki.....	46
Şekil 5.3. UPV değerlerinin e-atık oranına ve beton yaşına göre değişimi	47
Şekil 5.4. Dinamik elastisite modülü ile e-atık oranı ve beton yaşı arasındaki ilişki	49
Şekil 5.5. Polimer betonların kılcal su emmeleri ile e-atık oranları arasındaki ilişki	51
Şekil 5.6. Polimer betonların hızlı klor geçirimsizliği sonuçları.....	52
Şekil 5.7.1. Asit atağına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları	54
Şekil 5.7.2. Asit atağına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları.....	55
Şekil 5.7.3 90 gün boyunca asit atağına maruz kalan polimer betonların görselleri, a: Kontrol betonu (C/90), b: %3 e-atık içeren polimer beton (EW3/90), c: %12 e-atık içeren polimer beton (EW12/90), d: %15 e-atık içeren polimer beton (EW15/90).....	57
Şekil 5.8.1. Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları	58
Şekil 5.8.2. Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları	59

Şekil 5.8.3. 90 gün boyunca sülfat atağına maruz kalan polimer betonların görselleri, **a:** Kontrol betonu (C/90), **b:** %3 e-atık içeren polimer beton (EW3/90), **c:** %12 e-atık içeren polimer beton (EW12/90), **d:** %15 e-atık içeren polimer beton (EW15/90).61



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Polimer Betonların Tipik Özellikleri	16
Tablo 3.2. Epoksi Reçinenin Özellikleri	17
Tablo 3.3. Polyester reçinenin özellikleri	18
Tablo 3.4. Elektronik Atıklarda Bulunan Zararlı Materyaller.	27
Tablo 3.5. Bazı Metallerin Geri Kazanımıyla Elde Edilen Enerji Tasarrufu	28
Tablo 4.1. Doymamış Polyester Reçinenin Teknik Özellikleri.....	31
Tablo 4.2. Kuvars Agregasının Teknik Özellikleri.....	34
Tablo 4.3. Sertleştiricinin Teknik Özellikleri	36
Tablo 4.4. Hızlandırıcının Teknik Özellikleri.....	36
Tablo 4.5. Polimer Beton Karışım Dizaynı.....	38
Tablo 5.1. Hızlı Klorür İyonu Geçirimsizlik Sınıfları Ve Beton Grupları.....	53

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

<i>cm</i>	<i>Santimetre</i>
<i>g</i>	<i>Gram</i>
<i>GPa</i>	<i>Giga paskal</i>
<i>kg</i>	<i>Kilogram</i>
<i>kN</i>	<i>Kilonewton</i>
<i>m</i>	<i>Metre</i>
<i>mm</i>	<i>Milimetr</i>
<i>MPa</i>	<i>Mega paskal</i>
<i>°C</i>	<i>Derece</i>

Kısaltmalar

AEEE	Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar
E-atık	Elektronik Atık
E-plastik	Elektronik Plastik Atık
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
PC	Polimer Beton
PIC	Polimer Emdirilmiş Beton
PMC	Polimer ile Modifiye Edilmiş Beton
PPC	Polyester Polimer Betonu
UP	Doymamış Polyester
UPV	Ultrases Geçiş Hızı

1. GİRİŞ

Agrega ile reçinelerin biraraya getirilerek üretimi gerçekleştirilen polimer beton, yüksek performansa sahip bir kompozit malzeme olarak değerlendirilmektedir (Abbasnejadford vd., 2022). Geleneksel Portland çimentolu betondan farklı olarak polimer beton, sahip olduğu yüksek korozyon direnci, kür süresinin kısa oluşu, üstün dayanım ve durabilite özellikleri, yüksek yapışma ve eğilme mukavemeti gibi nitelikleri ile özel bir beton türü olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Agavriloaie vd., 2012; Jamshidi ve Pourkhorshidi, 2012; Oussama vd., 2012; Jung vd., 2014; Bulut ve Şahin, 2017; Yeon vd., 2017; Jafari vd., 2018; Ferdous vd., 2020). Bu sayede polimer betonlar; kanalizasyon boruları, prekast elemanlar, menholler, otoyollar, köprüler, yalıtım işleri, bakım ve onarım gerektiren imalatlar gibi uygulamalarda ideal bir malzeme görevi görmektedir (Jo vd., 2008; Lokuge ve Aravinthan, 2013; Yeon vd., 2014; Ferdous vd., 2016; Hongliang vd., 2018; Thillo vd., 2021).

Geleneksel betonda kullanılan çimento ve agrega yerine bağlayıcı malzeme olarak reçine, dolgu malzemesi olarak da genellikle kuvars agregası, polimer beton üretiminde yer almaktadır (Cai vd., 2022; Sikandar vd., 2022). Polyester (Chen vd., 2018; Gao vd., 2020; Kim vd., 2020), epoksi (Jin vd., 2017; Elalaoui vd., 2018; Wang vd., 2019), vinilester (Gorninski vd., 2007), akrilik (Son ve Yeon, 2012; Yeon vd., 2014) gibi reçineler, polimer betonlarda en çok kullanılan reçine türlerini oluşturmaktadır. Epoksi reçineler yüksek maliyetli olup (Ghassemi ve Toufigh, 2020), akrilik reçineler ise sıcaklık karşısında değişken performanslar sergilemektedir (Son ve Yeon, 2012). Polyester reçineler, üstün dayanım özellikleri, düşük kür süresi ve diğer reçinelere göre daha az maliyeti sebebiyle çeşitli avantajlara sahip olup uygulamada daha çok tercih edilmektedir (Abbasnejadford vd., 2022; Martínez-Barrera vd., 2022). Doymamış reçine, lipit ve doymamış çift bağlara sahip doğrusal bir polimerdir (Cai vd., 2022). Daha yoğun bir polyester bileşimi elde edip polyester reçinelerin performansını yükseltebilmek için sertleştirici ve hızlandırıcı kimyasal maddeler kullanılmaktadır (Gao vd., 2019). Bu sayede doymamış polyester kompozitlerinin çapraz bağları gelişerek polimer betonların özellikleri üzerinde ciddi katkıda bulunulduğu belirlenmiştir (Chen vd., 2018).

Öte yandan, maliyetlerdeki azalma ile birlikte dünya çapında hem çeşit olarak hem de ileri teknolojiye sahip elektronik ürünlerin sayısındaki hızlı artış, beraberinde çok fazla miktarda elektronik atık (e-atık) ortaya çıkmasına neden olmuş ve bu da çevre kirliliğini ciddi boyutlarda artırmıştır (Rajesh vd., 2022). Dünya genelinde katı atık olarak en hızlı büyüyen atık çeşidi, e-atık olarak değerlendirilmektedir (Perkins vd., 2014). Bu atık çeşidi; telefonlardan, temel ev aletlerinden, pillerden, bilgisayarlardan, sağlık ekipmanlarından ve her türlü elektronik parçalardan toplanabilmektedir (Jia vd., 2022). E-atıkların küresel olarak değerlendirildiği 2020 yılına ait izleme raporuna göre, yaklaşık 53.6 milyon metrik ton e-atık üretilmiş, bunların %17.4'ü geri dönüştürülmüş, %82.6'sı ise geri dönüşüme tabi tutulmamıştır (Forti vd., 2020). 2030 yılına gelindiğinde, dünya çapında e-atık tahmininin 74.7 milyon metrik ton olacağı bildirilmiştir (Hsu vd., 2021; Rajesh vd., 2022). Yapısında pek çok zararlı element (örneğin kadmiyum, arsenik, kurşun, civa, nikel, baryum, selenyum vd.) barındıran e-atıklar (Bryan vd., 2020), kayıt dışı işçiler tarafından imha edilmekte, yakılmakta, çöp olarak doğaya atılmakta veya gelişmekte olan ülkelere ihraç edilmektedir (Ilankoon vd., 2018).

Bulut ve Şahin (2017) tarafından yayınlanan çalışma, e-atıkların agrega olarak kullanılıp polimer betonların mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği literatürdeki tek çalışmadır. Bu çalışmada ise Bulut ve Şahin (2017)'da belirtilenlerden farklı oranlarda e-atık içeren polimer betonların çeşitli çevresel etkiler altındaki dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla polimer betonda agrega olarak kullanılan kuvars agregası ve çakılın yerine %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. Doymamış polyester reçinenin bağlayıcı olarak kullanıldığı çalışmada, e-atık agregalı polimer betonların geçirimsizlik özellikleri (kılcal su emme, hızlı klor geçirimsizliği) ile agresif çözeltilere (asit ve sülfat atağı) karşı davranışındaki ortaya çıkan değişimler 7, 28 ve 90 gün sonunda değerlendirilmiştir. Ayrıca bu betonlar üzerinde; birim ağırlık, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV) ve dinamik elastisite modülü deneyleri de gerçekleştirilerek kıyaslamalar yapılmıştır. Tez çalışması pek çok açıdan özgün ve benzersiz olup ilk kez e-atık agregalı polimer betonların mekanik özelliklerinin dışında geçirimsizlik özellikleri ile asit ve sülfat gibi zararlı çözeltilere karşı davranışları erken, orta ve ileri yaşta incelenmiştir. 2025 yılına gelindiğinde dünyada beton sektöründe agrega ihtiyacının %59'a yükselmesi beklenmektedir (Saikia ve Brito, 2012). Bu yükselişin doğal bir sonucu olarak agrega kaynaklarının ciddi miktarlarda azalması

düşünülmektedir (Gu ve Ozbakkaloglu, 2016). Elektronik çağında yaşadığımız ve devasa üretimler sonucu e-atıkların çok fazla oranlarda atık olarak ortaya çıktığı göz önüne alındığında, çevre kirliliğini azaltmak ve geri dönüşüm süreçlerini sürdürülebilir beton konsepti kapsamında değerlendirebilmek için e-atıkların polimer betonlara dâhil edilmesi çok büyük önem arz etmektedir. Böylece hem atık malzeme inşaat endüstrisinde değerlendirilecek hem de yeni bir agregâ alternatifi literatüre kazandırılmış olacaktır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez konusu kapsamında polimer beton ve e-atıklar ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Geçmişten günümüze kadar polimer betonun performansı ile ilgili çeşitli araştırmacılar tarafından çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin, polyester ve epoksi reçineli polimer betonların mekanik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Vipulanandan ve Paul, 1990), basınç dayanımının elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı ile güçlü ve doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Rebeiz vd. (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, %15 uçucu külün doymamış polyester reçineli polimer betona ilavesinin hem eğilme hem de basınç dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Bir diğer çalışmada (Gorninski vd., 2007), ortoftalik polyester reçineli polimer betonların, izoftalik bazlıya göre daha üstün mekanik performans sergilediği belirlenmiştir.

Shi-Cong ve Chi-Sun (2013) yaptıkları çalışmada, metakaolin ve uçucu külün epoksi reçineli polimer betonda basınç dayanımı ile elastisite modülü üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduklarını bildirmişlerdir. Farklı türdeki reçinelerin (epoksi, polyester, vinilester) polimer betonun mekanik davranışı üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada ise (Lokuge ve Aravinthan, 2013), 100 MPa basınç dayanımına üç reçine türü için de ulaşıldığı belirtilmiştir. Hashemi ve Jamshidi (2015), polimer betonların farklı kimyasal çözeltilerde bozunması üzerine karşılaştırmalı bir araştırma sunmuşlardır. Sonuç olarak numunelerin eğilme dayanımının tüm kimyasallarda (gaz yağı hariç) önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca eğilme dayanımındaki en yüksek düşüşün %36 oranı ile sodyum hidroksit çözeltilinde meydana geldiği bulunmuştur.

Polimer betonların 1 ila 12 ay arasında sülfürik asit ve alkalın çözeltilisine maruz kaldıktan sonra bu betonlar üzerinde ciddi bozulmaların gerçekleştiği başka bir çalışmada bildirilmiştir (Hashemi vd., 2018). Hameed ve Hamza (2019) tarafından yapılan çalışmada, %20 ila %30 arasında değişen farklı reçine oranına sahip doymamış polyester reçineli polimer betonların mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak reçine oranı arttıkça polimer betonun mekanik özelliklerinin tümünde iyileşmeler gözlemlendiği vurgulanmıştır. Polimer betonun çeşitli özelliklerinin incelendiği bir çalışma sonucunda (Taha vd., 2019), mekanik özelliklerin, kullanılan reçine tipine ve agrega özelliklerine

bağlı olduğu bildirilmiştir. Yüksek dayanımlı polimer beton üretmek için yüksek dayanımlı agregası kullanılması gerekliliği belirtilmiştir. İyi derecelenmiş agregası kullanımı sonucunda en yüksek basınç dayanımına ulaşıldığı bulunmuştur.

Yıldırım (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, polyester reçineli polimer betonda cam lifi ve cam tozu ikamesi yapılarak polimer betonun mekanik dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Cam lifi ve cam tozu katkılı polimer betonların, katkı oranlarına bağlı olarak eğilme ve basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Numunelerde su emme miktarının oldukça düşük çıktığı ifade edilmiştir. Korozyon koşulları altında polimer ve geleneksel betonun yorulma performansının karşılaştırıldığı bir çalışma sonucunda ise polimer betonun yorulma performansının geleneksel betondan daha iyi olduğu ortaya çıkarılmıştır (Ghassemi vd., 2020). Ghassemi ve Toufigh (2020), uzun süreli çevresel etkilerin epoksi polimer betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir araştırma yapmıştır. Asidik çözelti, Portland çimentolu beton ile polimer beton için en zararlı ortam olmuş, bu betonların basınç dayanımları sırasıyla %38,7 ve %40,1 oranında azalmıştır.

Gökbaşı (2021) çelik lifli polimer betonların mekanik davranışı üzerine geri dönüştürülmüş araç lastiği parçacıkları ve liflerinin birleşik etkisini incelemiştir. Atık lastik/dolgu oranı arttıkça betonların birim ağırlıkları düşmüş, basınç ve eğilmede çekme dayanımı ile ultrases geçiş hızı (UPV) değeri genel olarak azalmıştır. Atık araç lastiği parçacıkları ve çelik lif içeren polimer betonların sünek kırıldıkları gözlemlenmiştir. Kimyasal şartlara ve çeşitli sıcaklıklara maruz kalan hafif yoğun polimer betonların deneysel olarak incelendiği bir çalışmada, polimer oranı arttıkça mekanik özelliklerde bir artış gözlemlendiği ifade edilmiştir (Ataabadi vd., 2021). Ayrıca durabilite açısından polimer betonlar kimyasal şartlara karşı iyi bir direnç gösterirken yüksek sıcaklıklarda olumsuz sonuçlar elde edilmiştir. Lin ve Yu (2022) çalışmalarında, farklı oranlara sahip doymamış polyester reçineli yüksek performanslı polimer betonun mekanik performansını araştırmışlardır. Sonuçlar, %30 doymamış polyester reçinesi içeren polimer betonun optimum performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Martínez-López vd. (2022), polyester reçine, nanosilika ve gama ışınları kullanarak polimer betonun mekanik olarak iyileştirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak 50 kGy'de ışınlanmış, ağırlıkça %0,9 nanosilika içeren, 180 günlük

reçineyle üretilen beton için basınç dayanımı değerlerini korumanın ve elastisite modülünü önemli ölçüde artırmanın mümkün olduğu belirlenmiştir. Araç atık lastiklerinin polyester bazlı polimer betonların mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışma sonucunda, atık lastik oranı arttıkça dayanım azalmakla birlikte düşük reçine oranlarında sünekliğin arttığı vurgulanmıştır (Akın ve Polat, 2022).

Geri dönüştürülmüş polimer beton kompozitlerin ultrases geçiş hızının incelendiği bir diğer çalışma sonucunda (Mohal vd., 2023), %35 epoksi reçine, %15 silis dumanı ve %12 uçucu kül içeren polimer betonların, en yüksek çekme mukavemetine (29,23 MPa) ve en iyi ultrases geçiş hızına (12,9 μ s sürede 3101 m/s) ulaştığı tespit edilmiştir. 3D yazdırılabilir polimer betonun zamana bağlı reolojik ve erken yaş dayanım parametrelerinin araştırıldığı bir çalışmada (Najvani vd., 2023), polimer betonun akışının azaldığı, beton yaşlandıkça statik akma gerilimi ve tiksotropi artarken dinamik akma geriliminin değişmediği ifade edilmiştir. Aghdam vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda ise hem takviyesiz hem de lif takviyeli polimer betonların yük-deplasman eğrilerinin, yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan önce ve sonra gevrek kırıldıkları doğrulanmıştır.

E-atıkların genel olarak inşaat teknolojisi özel olarak da beton üretiminde agrega yerine kullanıldığı çalışmalar, henüz çok sınırlı sayıda ve yenidir. %10 ila %50 aralığında değişen oranlarda e-atığın iri agrega yerine kullanıldığı bir çalışmada (Kumar ve Baskar, 2015), e-atık oranı arttıkça betonların yoğunluklarında azalmalar meydana geldiği belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada (Manjunath, 2016), hem ince hem de iri agrega yerine kullanılan e-atıkların betonun eğilme dayanımı üzerinde olumsuz etki yarattığı gözlemlenmiştir. Shamili vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda e-atık katkılı betonların hafif beton olarak üretilebileceği bildirilmiştir. Bununla birlikte kontrol betonundan daha düşük basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin elde edildiği vurgulanmıştır.

Farooq vd. (2019) çalışmalarında, silis dumanı ile birlikte kullanılarak üretilen e-atıklı betonların özelliklerini araştırmıştır. Sonuç olarak, e-atık miktarının artışının yoğunluk, basınç, eğilme ve çekme dayanımı değerlerinde azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Ancak, beton karışımına silis dumanı eklendiğinde, kontrol karışımına benzer dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen en uygun beton karışımı, %5 e-atık ve %10 silis

dumanı içeren beton olmuştur. E-atığın yüksek dayanımlı betonların sertleşme özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada (Evram vd., 2020), çekme dayanımı ve elastisite modülü sonuçlarında düşüşler görülmüştür. Yapısal uygulamalar için beton kirişlerde iri agregaya yerine e-atığın kullanıldığı bir çalışma sonucunda (Hamsavathi vd., 2020), %15 e-atık oranına kadar iyi performanslar elde edildiği, bu oran aşıldığında dayanım açısından azalmalar meydana geldiği ifade edilmiştir.

Ahmad vd. (2021) çalışmalarında, betonda iri agregaya yerine %10 ila %50 oranlarında e-atık kullanmış, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi beton özelliklerinin olumsuz etkilendiğini belirtmiştir. Ayrıca, e-atık oranının artması ile birlikte kılcal su emme katsayısında azalma, aşınma kaybında ise artış gözlemlendiğini ifade etmiştir. E-atık kullanılarak üretilen betonların mekanik özellikleri ile ısı performansının incelendiği başka bir çalışmada (Ali vd., 2021), betonun basınç ve çekme dayanımları azalmakla birlikte gelişmiş termal özelliklere sahip kauçuklaştırılmış betonlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. E-atıklı betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelendiği bir diğer çalışma sonucunda ise, e-atık oranı arttıkça betonların kılcal su emme katsayısında, aşınma kaybında ve ultrases geçiş hızı değerlerinde azalma gözlemlenmiştir (Ullah, 2021).

Ullah vd. (2022), e-atıkların ince agregaya olarak kısmen değiştirilmesinin, CFRP sargısı olan ve olmayan farklı geometriye sahip betonların basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuç olarak e-atığın kullanımı sonucunda betonların eksenel basınç dayanımları azalmış ve bozulma süresi (failure time) artmıştır. Betonda e-atık ile birlikte polipropilen lifler kullanıldığında eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının belirgin bir şekilde arttığı bildirilmiştir (Ahmad vd., 2023). Reshma vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada ise bakteri ve e-atık katkılı betonun kendi kendini iyileştirme davranışının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Buna göre kontrol betonuna göre dayanım değerlerinde artış elde edilmiştir. Ayrıca yüzeyinde 5 mm çatlak bulunan %10 oranında e-atık betona dahil edildiğinde optimum dayanıma ulaşılabileceği tespit edilmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Polimer Malzemeler ve Tarihi Gelişim Süreci

Polimer malzemelerin tarihi, insanlık tarihi kadar eskidir. İlk polimer malzemeler, bitki özlerinden ve hayvanların bağırsaklarından elde edilmiştir. Ancak, modern polimer endüstrisinin temelleri, 19. yüzyılın sonlarına kadar dayanmaktadır. Bu dönemde, ilk sentetik polimer malzemelerin keşfi gerçekleşmiştir (Cowie, 2000; Paul ve Newman, 2013).

1907 yılında, Belçikalı kimyager Leo Baekeland, fenol ve formaldehit reaksiyonundan "bakalit" olarak adlandırılan ilk sentetik polimeri keşfetmiştir. Bakalit, yalıtkan ve dayanıklı özellikleri nedeniyle elektrik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Gupta, 2007). İlerleyen yıllarda, diğer sentetik polimer malzemelerin keşfi ve geliştirilmesi de gerçekleşmiştir (Allen ve Bevington, 1989). Bu polimerler arasında naylon, poliester, polipropilen, polivinilklorür ve polistiren gibi malzemeler yer almaktadır (Sperling, 2006).

1930'larda, naylon, polietilen ve polipropilen gibi sentetik polimer malzemelerin geliştirilmesi ile birlikte, polimer endüstrisi hızla büyümeye başlamıştır. Bu malzemelerin dayanıklılığı, hafifliği ve ucuzluğu, birçok endüstri için ideal malzemeler haline gelmiştir. İkinci Dünya Savaşı sırasında da, polimer malzemelerin askeri uygulamalar için kullanımı hızla artmıştır (Brydson, 1999).

1950'lerde, PET (polyethylene terephthalate) gibi yeni sentetik polimer malzemelerin geliştirilmesi, tüketici ürünleri ve gıda ambalajları gibi alanlarda kullanımı artırmıştır. 1960'larda, termoplastik polimer malzemelerin geliştirilmesi, özellikle otomotiv endüstrisinde kullanımı artırmıştır (Stevens, 2002). Bu dönemde, çeşitli yeni polimer malzemelerin keşfi gerçekleşmiştir. Bu malzemeler arasında aramidler, karbon fiberler ve lifli cam malzemeler gibi yüksek performanslı malzemeler de yer almaktadır. Aynı dönemde, polimerlerin biyolojik uygulamaları da keşfedilmiştir. Bu uygulamalar arasında, biyomedikal uygulamalar, biyolojik materyaller ve ilaçlar gibi alanlar yer almıştır (O dian, 2004a, Odian, 2004b).

Polimer malzemeler, kimyasal olarak birbirine bağı uzun zincir moleküllerinden oluşan malzemelerdir. Bu malzemeler doğal veya sentetik olarak üretilebilirler ve birçok farklı uygulama için kullanılabilirler. Polimer malzemeler, esnekliği, dayanıklılığı, hafifliği ve çeşitli şekil ve boyutlarda üretilebilme özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Mark, 1996; Hillmyer, 2014).

Günümüzde, polimer endüstrisi hızla gelişmekte ve yeni polimer malzemelerin keşfi devam etmektedir. Nanoteknoloji, biyomalzemeler, elektrot materyalleri, yenilenebilir enerji depolama materyalleri ve polimerlerin biyolojik kullanımları gibi alanlarda yoğun çalışmalar yürütülmektedir (Okamoto, 2013). Ayrıca otomotiv, havacılık, inşaat, tekstil, tıp ve gıda endüstrilerinde bu malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Yeni malzemelerin keşfi ve geliştirilmesi, polimer endüstrisinin de gelişimini sağlamaktadır (Seymour vd., 2003).

3.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerlerin esas maddesi, pamuk, odun ve kömür gibi selülozik maddeler, doğal gazlar ya da petroldür. Yapay şekilde elde edilen polimer malzemeler ise elastomerler, fiberler ve plastiklerdir. Temelde yapay ve doğal polimerler olarak ikiye ayrılabilirler da polimerlerin pek çok açıdan sınıflandırmasını yapmak mümkündür (Akova, 1993; Kayhan ve Demire, 2016).

3.2.1. Termoplastikler

Termoplastikler, ısı altında eritilen ve farklı şekiller verilen polimerlerdir. Bu polimerler lineer polimerler olarak da isimlendirilmiştir (Onaran, 2003).

Termoplastiklerin özellikleri arasında esneklik, dayanıklılık, şeffaflık, kimyasal direnç, ısıya karşı direnç ve düşük yoğunluk sayılmıştır. Termoplastikler, örneğin plastik şişeler, tüpler, ambalaj malzemeleri, filmler, oyuncaklar, otomobil parçaları ve tıbbi cihazlar gibi birçok endüstride kullanılmıştır (Kandelbauer vd., 2022).

3.2.2. Termosetler

Termosetler, yapısındaki zincirler arasında yoğun çapraz bağ içermektedir. Isı tesiri ile eritilmesine imkân bulunmayan yahut eritilmesi çok zor olan plastik termosetler, elastomer çeşidi olarak sınıflandırılmıştır. Bu malzemelere uzay ağı polimerleri ya da duroplastikler de denilmiştir. (Onaran, 2003).

Termosetler, polimerizasyonla iki farklı kademede elde edilmişlerdir. İlk kademede, malzemenin içinde bulunan monomerler, reaktörde lineer bir zincir meydana getirmeye başlamışlardır. İkinci polimerizasyon işlemi ise kalıplama esnasında, sıcaklık ve basınç altında önceden reaksiyona girmeyen bölümler sıvı hale gelerek molekül zincirlerini üç boyutlu biçimde rijitleştirilmiştir. Bu yüzden tekrar ısı ile yumuşatılamazlar (Saçak, 2002). Kandelbauer vd.'nin (2022) çalışmalarında, termosetlerin işlenmesinin pratik yönlerine de odaklanılmıştır. Bu işlemler arasında fırça yerleştirme, reçine enfüzyonu, reçine transfer kalıplama, levha ve hacim kalıplama, pultrüzyon, bobinleme ve santrifüj döküm gibi teknolojik yaklaşımlar yer almıştır.

3.3. Polimer Malzemelerin Diğer Bileşenleri

Polimer malzemeler, genellikle diğer malzemelerin birleştirilmesiyle oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu malzemelerin diğer bileşenleri, polimerlerin özelliklerini değiştirmek, performansını artırmak veya özellikle belirli uygulamalara uygun hale getirmek için kullanılır. Bu bileşenler arasında solventler, plastifiyanlar, stabilizanlar, dolgu maddeleri ve pigmentler yer almaktadır (Utracki, 1998).

Polimer malzemelerin bileşenleri, malzemelerin özelliklerini, performansını ve uygulanabilirliğini belirleyen kritik faktörlerdir. Doğru bileşenlerin kullanımı, malzemelerin kalitesini ve ömrünü artırabilirken, yanlış bileşenlerin kullanımı malzemelerin özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir (Pilato ve Wicks, 2012). Bu nedenle, polimer malzemelerin tasarımı ve üretimi sırasında bileşenlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi önemlidir. (Agrawal ve Dharmi, 2012).

3.3.1. Solventler

Solventler, polimer malzemelerin üretiminde sıklıkla kullanılan maddelerdir. Bu malzemeler, polimerin çözünürlüğünü artırmak ve reaksiyonlar sırasında malzemenin viskozitesini düşürmek için kullanılmaktadır. Solventler ayrıca, kaplama, boyama ve baskı uygulamalarında da yer almaktadır (Agrawal ve Dhami, 2012).

Bazı yaygın solventler arasında aseton, metanol, etanol, kloroform ve asetik asit bulunmaktadır. Ancak, solventlerin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, solventlerin yüksek yanıcılık ve toksisiteye sahip olmaları, işçiler ve çevre için ciddi riskler oluşturabilmektedir (Utracki, 1998).

3.3.2. Plastifiyanlar

Plastifiyanlar, polimer malzemelerin esnekliğini artırmak için kullanılan maddelerdir. Bu bileşenler, polimer molekülleri arasındaki bağları gevşetir ve malzemenin daha esnek hale gelmesine yardımcı olurlar. Bu özellikle, termoplastik polimerlerin üretiminde önem kazanmaktadır (Callister ve Rethwisch, 2018).

Bazı yaygın plastifiyanlar arasında ftalatlar, adipatlar ve trimellititler yer almaktadır. Ancak, bazı plastifiyanlar insan sağlığı için zararlı olabilmektedir. Bu nedenle, bazı plastifiyanlar çevreye ve insan sağlığına zarar veren özellikleri nedeniyle yasaklanmıştır (Crawford, 2002).

3.3.3. Stabilizanlar

Stabilizanlar, polimer malzemelerin yaşlanma sürecini yavaşlatmak ve bozulmasını önlemek için kullanılan maddelerdir. Bu bileşenler, oksidasyon, termal bozulma ve ışık hasarına karşı malzemeleri koruyarak, malzemenin kalitesini ve ömrünü artırmışlardır (Jones, 1999).

3.4. Dolgu Maddeleri

Polimer malzemelerin özelliklerini değiştirmek ve maliyetlerini düşürmek için kullanılan maddelerdir. Polimer malzemelerde dolgu maddeleri, polimer matrisin mukavemet,

sertlik, aşınma direnci, yangın direnci ve termal iletkenlik gibi özelliklerini artırmak için kullanılmaktadır. (Pilato ve Wicks, 2012).

Dolgu maddeleri, polimer matrisin içine homojen bir şekilde dağıtılabilir veya belirli bir oranla karıştırılabilir. Polimer matrisin belirli bir oranında dolgu maddesi ilave edilmesi, polimer malzemenin özelliklerinde değişikliklere neden olmuştur. Dolgu maddelerinin çeşitli tipleri vardır. Örneğin, doğal dolgu maddeleri arasında ahşap unu, mısır koçanı, kenevir, saman, çeltik kabuğu gibi malzemeler bulunmaktadır. Sentetik dolgu maddeleri arasında ise cam elyafı, karbon fiber, silika, titanyum dioksit, talk, kalsiyum karbonat gibi malzemeler bulunmaktadır (Sperling, 2006).

3.5. Pigmentler

Polimer malzemelerin renklerini değiştirmek veya malzemenin görünümünü iyileştirmek için kullanılan maddelerdir. Pigmentler, malzemenin yüzeyine yapışır ve malzemenin renk tonunu veya şeffaflığını değiştirebilirler. Pigmentler, genellikle inorganik ve organik olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır (Callister ve Rethwisch, 2018).

Pigmentler, malzemenin mekanik özelliklerini etkilemezler ancak malzemeye renk, opaklık ve/veya saydamlık kazandırdıkları için estetik değeri artırırlar. Ayrıca, Ultraviyole (UV) ışınlarına karşı koruma sağlayan UV stabilizatörleri gibi bazı diğer katkı maddeleri ile birleştirilerek malzemenin dayanıklılığını artırabilmektedirler (Crawford, 2002).

3.6. Katkı Maddeleri

Katkı maddeleri, bir bileşiğin veya malzemenin özelliklerini değiştirmek veya iyileştirmek amacıyla eklenen kimyasal veya fiziksel maddelerdir. Katkı maddeleri, bir malzemenin özelliklerini değiştirerek, mukavemet, sertlik, esneklik, ısı iletkenlik, yangın direnci, radyasyon koruması gibi özellikleri iyileştirebilmekte veya özelliklerini kötüleştirebilmektedir (Jones, 1999).

3.7. Polimerlerin Genel Özellikleri

Polimerler farklı özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemelerin başlıca özellikleri aşağıda verilmiştir (Akman, 1987; Akkurt, 1991; Öztürk, 2013).

- Kullanımları kolaydır.
- İyi işlenebilirler.
- Genellikle düşük yoğunluğa sahiptirler.
- Suya karşı dayanıklılıkları kuvvetlidir.
- Yüksek sıcaklıklara çok fazla dayanıklı değildir.
- Elektrik ve ısı yalıtkanlığı özellikleri bulunmaktadır.
- İç kovalent bağına sahiptirler.
- Düşük kayma dirençlerine sahiptirler.
- Kimyasal etkilere dayanıklılıkları yüksektir.
- Asit ve bazlara karşı dayanıklıdırlar.
- Organik solventlere dayanıklı değildirler.
- Sertlikleri, metal, seramik, ve cama göre daha azdır.

3.8. Polimer Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Polimer malzemelerin avantajları aşağıda verilmiştir (Topsakal, 2013; Kwan vd., 2014; Samadi vd., 2020; Madhuri vd., 2021).

- Yüksek dayanım
- Hafiflik
- Tasarım esnekliği
- Boyutsal stabilite
- Korozyon dayanıklılığı
- Beton yüzeylere uygulama imkânı
- Yüksek kimyasal direnç
- Malzemelerin daha uzun ömürlü olması
- Çevre dostu olması

Polimer malzemelerin dezavantajları ise aşağıda sıralanmıştır (Araghi, vd., 2015; Hadigheh vd., 2017; Karthik vd., 2017).

- Yüksek sıcaklıklara karşı düşük dayanıklılık
- Düşük alev direnci
- Düşük yüzey sertliği
- Bazı durumlarda çevre dostu olmayışı

3.9. Polimerlerin İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanımı

Polimerler, yüksek mukavemetli yapılar, dayanıklı kaplamalar, yalıtım malzemeleri ve daha pek çok inşaat malzemesi olarak kullanılabilir (Utracki, 1998). Ayrıca betonarme yapılarda, beton yüzeylerde kayma ve aşınmaya karşı önleyici olarak, köprülerde, zemin stabilizasyonunda, madencilikte, yol projelerinde, çatılarda, deniz yapılarında, geotekstillerde, borular ve boru hatlarında, elektrik kabloları ve iletişim hatlarında, havaalanlarında, stadyumlar ve spor alanlarında kullanımı yaygındır (Agrawal ve Dhama, 2012; Fischer vd., 2019; Samadi vd., 2020; Calderón-Morales vd., 2021; Madhuri vd., 2021; Zheng vd., 2022).

Tarihsel süreç incelendiğinde betonda polimer kullanımını 3 kategoride toplamak mümkündür. Bunlar;

- Polimer Emdirilmiş Beton (Polymer Impregnated Concrete: PIC)
- Polimer ile Modifiye Edilmiş Beton (Polymer Modified Concrete: PMC)
- Polimer Beton (Polymer Concrete: PC)

3.9.1. Polimer emdirilmiş beton (polymer impregnated concrete: pic)

Polimer emdirilmiş beton (PIC), polimerlerin betonun içine emdirilerek kullanıldığı bir yapı malzemesidir. Bu teknoloji, betonun sertliği, dayanıklılığı, aşınma direnci ve su geçirmezliğini artırmıştır. Polimer emdirilmiş beton, özellikle köprüler, su yapıları ve yüksek yapılar gibi daha zorlu koşullar altında kullanılan yapılar için ideal olmuştur. (Agrawal ve Dhama, 2012).

Fischer vd.'nin (2019) ifadelerine göre PIC, iki temel bileşenden oluşmaktadır: Polimer ve beton. Polimer, genellikle epoksi veya akrilik bazlı bir reçine formunda kullanılmıştır. Beton ise kum, çakıl, çimento ve su gibi geleneksel bileşenleri içermektedir. Polimer, betonun içine nüfuz ederek betonun özelliklerini geliştirmiştir. Bu, betona daha yüksek dayanıklılık, esneklik, sertlik ve aşınma direnci sağlamıştır.

Madhuri vd.'ye (2021) göre ise polimer emdirilmiş betonun avantajları arasında şunlar bulunmaktadır:

- Yüksek dayanıklılık: PIC, yüksek dayanıklılık sağlayan birçok polimer reçinesi içerir. Bu, PIC'nin daha uzun ömürlü olmasını sağlamıştır.
- Aşınma direnci: Polimer emdirilmiş beton, daha yüksek aşınma direncine sahiptir. Bu, özellikle yoğun trafikli bölgelerde kullanılan yapılar için önemli olmuştur.
- Su geçirmezlik: Polimer emdirilmiş beton, su geçirmez özelliklere sahiptir. Bu özellik, suya maruz kalan yapılar için ideal olmuştur.
- Kimyasal direnç: Bu özellik, endüstriyel tesisler ve laboratuvarlar gibi kimyasal maruziyetin yüksek olduğu yerlerde kullanılan yapılar için ideal olmuştur.
- Estetik: Polimer emdirilmiş beton, renkler, desenler ve diğer tasarım özellikleri açısından çok yönlüdür.

3.9.2. Polimer ile modifiye edilmiş beton (polymer modified concrete: PMC)

Polimer ile modifiye edilmiş beton, geleneksel betonun özelliklerini iyileştirmek ya da belirli gereksinimlere uyacak biçimde uyarlamak için polimerlerin beton karışımına eklenmesiyle elde edilmiş bir malzemedir. Polimerler, betonun direncini artırabilir, su geçirmezlik özelliğini geliştirebilir, çatlak oluşumunu azaltabilir ve kimyasal dayanıklılığını artırabilir. Bu nedenle, polimer ile modifiye edilmiş beton, çeşitli inşaat projelerinde ve uygulamalarda kullanılmıştır (Babalık ve Saylan, 1993).

3.9.3. Polimer beton (polymer concrete: PC)

Polimer betonlar agrega ile polimer reçinesinin karışımından oluşmaktadır. Reçineler, agregaları birbirleri ile bağlayan tutkal görevi görmektedir (Martínez-López vd., 2022). Polimer beton üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi, reçine ile agregalar arasında yer alan boşluk hacminin minimum seviyeye indirilmesidir (Martínez-Barrera vd., 2022). Bu noktada bir tutkal görevi gören polimer reçinesi agrega boşluklarını tamamlayacağından dolayı gerekli olan polimer miktarı fazlaşacak ve maliyet artışı ortaya çıkacaktır (Al-Haydari vd., 2021). Monomerin agrega karışımının içine yayılması sonucu kimyasal değişim meydana gelmektedir. (Nadiu, 1994).

Polimer beton, geleneksel betona kıyasla daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Bu avantajlar, polimer betonun inşaat sektöründe kullanımını artırırken, yapıların daha uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır (Ribeiro vd., 2004; Jo vd., 2008; Ataabadi vd., 2021).

Söz konusu betonun kimyasal ve mekanik özelliklerine, Tablo 3.1’de değinilmiştir (Dikeou ve Fowler 1981).

Tablo 3.1. Polimer betonların tipik özellikleri

Asite Dayanıklılık	Çok iyi
Su Emme	%1
Elastisite Modülü	700-35000 MPa
Basınç Dayanımı	40-150 MPa
Dona Dayanıklılık	İyi
Eğilme Dayanımı	8-35 MPa
Isıl Genleşme Katsayısı	5-10x10 ⁻⁶ /C

3.10. Reçineler

Reçineler, kimyasal yapısı polimer olan malzemelerdir. Bu polimerler, küçük moleküllerin birleşmesiyle oluşmaktadır. Reçineler, sıvı veya yarı katı hallerde

bulunabilir ve sertleştirici bir madde eklenerek katılaştırılabilir. Genellikle sentetik olarak üretilirler, ancak bazı doğal kaynaklı reçineler de vardır (Saride ve Patil, 2019).

Reçinelerin birçok avantajı bulunmaktadır. Örneğin, reçineler hafiftir ve yüksek mukavemetleri sayesinde birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Ayrıca, reçinelerin şekillendirme özellikleri yüksektir ve çok sayıda farklı formda üretilmektedirler (Singh vd., 2019). Ancak reçinelerin dezavantajları da vardır. Reçineler, genellikle diğer malzemelerden daha pahalıdır ve üretim sırasında çevreye zararlı kimyasallar salabilmektedirler. Ayrıca, bazı reçinelerin yanması toksik dumanlar yayabilir ve bu da insan sağlığı için risk oluşturabilmektedir (Gorninski vd., 2007; Hashemi ve Jamshidi, 2015).

Bununla birlikte, reçinelerin birçok farklı türü vardır ve her biri farklı özelliklere sahiptir. Örneğin, epoksi reçineler sert ve dayanıklıdır, polyester reçineler daha ucuz ve kolay şekillendirilebilirken, poliüretan reçineler yüksek esnekliğe sahiptirler. Reçinelerin özellikleri, uygulama alanına ve kullanım amaçlarına göre değişebilmektedir (Kiruthika vd., 2021; Farooq ve Banthia, 2022).

Epoksi reçine, genellikle yüksek performanslı yapı malzemelerinde kullanılan bir polimerdir. Bu malzeme, iki bileşenli (reçine ve sertleştirici) bir sistemden oluşmaktadır. Bu iki bileşen bir araya geldiğinde, kimyasal bir reaksiyon gerçekleşerek malzeme sertleşmektedir. Epoksi reçineler, yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve su geçirmezlik gibi özellikleriyle bilinmektedir. Bu nedenle, birçok endüstriyel uygulama, inşaat malzemeleri ve denizcilik gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Singh vd., 2019).

Tablo 3.2’de epoksi reçinenin özellikleri gösterilmiştir (Sevinç ve Durgun, 2021).

Tablo 3.2. Epoksi reçinenin özellikleri

Renk	Nötr
Görünüm	Sarımsı sıvı
Yoğunluk (g/cm ³)	1,20
Vizkozite (cP)	1500-2000

Polyester reçineler, termoset bir polimerdir ve genellikle fiberglas ve kompozit malzemelerde kullanılmaktadır. Polyester reçineler, sertleştiricilerle birlikte kullanılarak, çeşitli şekillerde katılaştırılabilirler. Bu malzemeler, hafif, dayanıklı ve kolayca şekillendirilebilir özellikleri ile bilinmektedir (Singh vd., 2019).

Tablo 3.3'te, polyester reçinenin özellikleri verilmiştir (Akın ve Polat, 2022).

Tablo 3.3. Polyester reçinenin özellikleri

Fiziksel durum	Sıvı
Renk	Sarımsı
Koku	Karakteristik Stiren kokusu
Çözünürlük	Suda çözünmez
Kaynama noktası (°C)	146 (Stiren)
Erime noktası (°C)	33 (Stiren)
Vizkozite (cP)	200-1500
Parlama noktası (°C)	32
Ateşleme noktası (°C)	490
Patlama limitleri (çözücü)	Alt sınır %1,1; üst sınır %7 (hacimce)
Eğilme dayanımı (Mpa)	120
Sertlik (Barcol)	42

Poliamid reçineler, polimerlerin sertleştiricilerle birleştirilmesi ile oluşan termoset bir malzemedir. Poliamid reçineler, genellikle endüstriyel boyalar ve yapıştırıcılar gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve dayanıklılık gibi özelliklere sahiptirler (Sarde ve Patil, 2019).

3.10.1. Reçine-plastik yapışma direnci

Reçine plastik yapışma direnci ile ilgili son yıllarda yapılmış olan çalışmalar, bu direnci etkileyen parametreleri açıklamaya yönelik değerli bilgiler sunulmuştur.

Zhao ve diğerkleri (2024a), elektroles bakır kaplama katmanı ile epoksi reçine (EP) tabanı arasındaki yapışma direncini artırmak amacıyla yüzey modifikasyonunu sağlamak için kullanımını araştırdı. Araştırmada, hacim oranı ve yüzey modifikasyon süresinin çeşitli yüzey özellikleri ve yapışma direnci üzerindeki etkisi incelendi. Araştırma sonuçları, bu faktörler arasındaki ilişkiyi ve bunların yüzey özelliklerine olan etkisini değerli bir şekilde ortaya koydu.

Ashori ve diğerkleri (2023), ahşap sunta ve plastik atık kompozit malzemeler arasındaki arayüzey yapışmasını artırmak için çiftleştirici ajanın kullanımını inceledi. Bu inceleme sonucunda, ahşap sunta ve HDPE film arasındaki arayüzey bağlanma yeteneğini artırmada önemli bir rol oynadı.

Kovačević ve diğerkleri (2024), katı roket propellantlarının viskoelastik ve mekanik özellikleri üzerinde reaktif plastikleştiricinin etkisini araştırdı. CO içeren propellantların mekanik özellikleri, reçine türüne bağlı olarak değişti ve GPC ile daha fazla analiz edildi olarak tanıdı.

Verilen çalışmalar, plastik ve reçine arasındaki yapışma sürecini anlamak ve iyileştirmek için çeşitli yöntemlerin araştırıldığını göstermektedir. Özellikle, yüzey modifikasyonu, çiftleştirme ajanlarının kullanımı ve plastikleştirici seçimi gibi faktörlerin plastik ve reçine yapışmasında belirleyici rol oynadığı görülmektedir.

Yüzey modifikasyonu, örneğin, Zhao ve diğerkleri (2024a) tarafından incelenmiştir ve bu çalışma, reçine yüzeyinin kimyasal bileşimi ve morfolojisini değiştirerek yapışma direncini artırmayı amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, uygun modifikasyonların yüzey pürüzlülüğünü arttırarak yapışma direncini iyileştirebileceğini göstermektedir.

Son olarak, plastikleştiricilerin seçimi de plastik ve reçine yapışmasını etkileyebilir. Kovačević ve diğerkleri (2024) tarafından yapılan çalışma, reaktif plastikleştiricilerin geleneksel plastikleştiricilere tercih edilebileceğini göstermektedir. Bu tür plastikleştiricilerin kullanımı, propellantların mekanik ve viskoelastik özelliklerini iyileştirerek daha güvenli ve güvenilir uygulamalar için potansiyel sağlayacaktır.

3.10.2. Reçine-agrega yapışma direnci

Geng et al. (2023), recycled coarse aggregate ve recycled aggregate concrete üzerindeki etkisini değerlendirmek için epoksi reçine yüzey modifiye tekniklerinin kullanıldığı bir çalışmada, epoksi reçinin su emilimini azalttığını ve modifiye edilmiş geri dönüştürülmüş agregası (MRCA) ile hazırlanan betonun basınç dayanımının doğal agregası betonuna kıyasla daha yüksek olduğunu bulmuştur. Bu çalışma, geri dönüştürülmüş agregası betonunun mekanik özelliklerini artırmak için bir strateji ve olasılık sağlamaktadır.

Lei et al. (2024) geri dönüştürülmüş agregası ve geri dönüştürülmüş beton tozu ile doldurulmuş asfalt macun arasındaki arayüzey yapışmasını araştıran bir çalışmada, filler-to-asphalt (F/A) oranını ve RCP yer değiştirme oranını artırmakla birlikte, RA-RCPAM arayüzeyinin yapışma direncini olumsuz etkilediğini tespit etmiştir. Bu sonuçlar, belirli bir RCP yer değiştirme oranı, yüzey pürüzlülüğü ve filler-to-asphalt (F/A) oranı aralığında geri dönüştürülmüş agregası ile dolu asfalt macun arasındaki arayüzey yapışma direncini tahmin etmek için birçok değişkenli karışık model önerilmiştir.

Tang et al. (2024) moleküler dinamik simülasyonlar kullanarak asfalt-agregası arayüzeyindeki yapışma mekanizmasını inceleyen bir derleme makalesinde, SBS modifiye asfalt ve çeşitli agregat tipleri arasındaki arayüzey yapışmasının değerlendirilmesinde van der Waals etkileşimlerinin belirleyici olduğunu ve elektrostatik etkileşimlerin farklı agregatlar arasındaki yapışma direncindeki varyasyonları etkilemede önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Tominaga et al. (2023), oksit seramik nanoparçacıkları ve epoksi reçine arasındaki arayüzey yapışmasını ıslak jet frezeleme (WJM) işlemi ile güçlendiren bir çalışmada, seramik/polimer kompozitlerinin mekanik ve fonksiyonel özelliklerini artırmak için etkili bir yöntem olarak WJM işlemini kullanmışlardır. WJM işlemi, nanoparçacıkların epoksi reçine yüzeyine iyi adsorpsiyonunu sağlamış ve kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmıştır.

Wang et al. (2023), agregat ve asfalt bağlantısının UV yaşlanma koşullarında SBS asfalt ve agregalar arasındaki arayüzey yapışma mekanizmasını değerlendiren bir çalışmada, SBS asfaltın alkalik agregatlara daha iyi yapıştığını ve yapışma işinin asfalt ve agregası

arasında van der Waals kuvvetleri ile sağlandığını belirlemişlerdir. Ayrıca, yaşlanma sonucunda, SBS malzemelerdeki kırılmaların ardından, asfaltten ve kolloidin artan polaritesi nedeniyle asfalt ve agregalar arasındaki elektrostatik etkileşimlerin arttığını ve yapışma işinin yükseldiğini tespit etmişlerdir.

Yu et al. (2023), asfalt-mineral arayüzünde asfalt-agrega arasındaki yapışma başarısızlık mekanizmasını inceleyen bir moleküler dinamik çalışmada, aşırı tuzlu bir ortamda asfalt ve agregası arasındaki yapışma başarısızlığını araştırmışlardır. Sonuçları, NaCl çözeltisinin asfalt bileşenlerinin yeniden dağılımını ve redifüzyonunu teşvik ettiğini, asfalt ve mineral yüzeyleri arasında hidrojen bağları oluşturduğunu ve asfalt-mineral ara yüzünde yapışmanın etkili bir şekilde bozulduğunu göstermektedir. Bu davranışlar, asfalt-agrega ara yüzündeki yapışmayı etkili bir şekilde zayıflatmaktadır.

Zou ve diğerleri (2024), aşırı tuzlu bir ortamda asfalt ve agregası arasındaki yapışma başarısızlığını moleküler dinamik simülasyonlar kullanarak araştırmış ve NaCl çözeltisinin asfalt-mineral ara yüzünde yapışmanın etkili bir şekilde bozulmasına neden olduğunu göstermişlerdir.

Yapılan çalışmalar, agregası ile reçine arasındaki yapışmanın karmaşıklığını ve önemini vurgulamaktadır. Özellikle asfalt-agrega ara yüzünde yapılan moleküler dinamik simülasyonlar, çeşitli çevresel koşullar altında bu yapışmanın nasıl etkilenebileceğini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Örneğin, Zou ve arkadaşları (2024), aşırı tuzlu bir ortamda asfalt-agrega ara yüzünde yapışma başarısızlık mekanizmasını inceleyerek, tuz çözeltisinin asfalt-mineral ara yüzünde yapışmayı etkili bir şekilde bozulduğunu göstermiştir.

Bununla birlikte, diğer çalışmalar da agregası ve reçine arasındaki yapışmayı etkileyen faktörleri araştırmıştır. Örneğin, Geng ve diğerleri (2023), su bazlı bir epoksi reçinin geri dönüştürülmüş iri agregası yüzeyini kaplayarak mekanik özelliklerini artırabileceğini göstermiştir. Bu tür çalışmalar, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını teşvik ederek çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

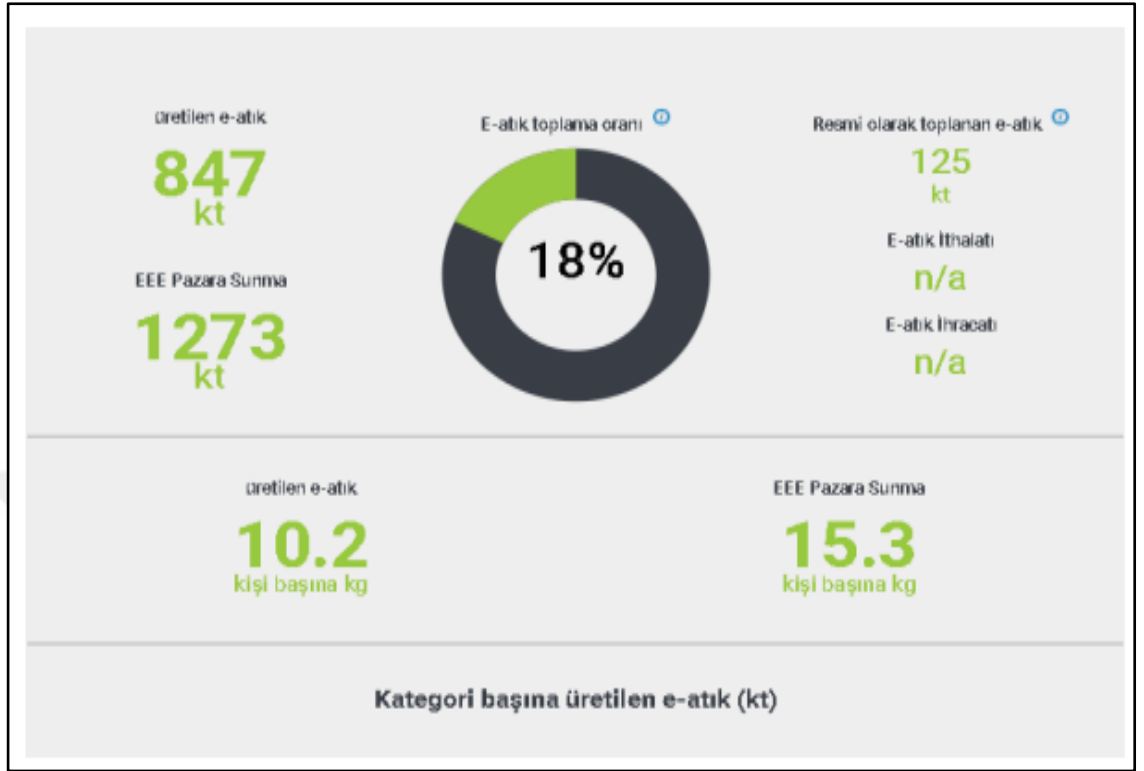
3.11. Atık Tanımı ve Elektronik Atıklar

Elektronik ve elektrikli atıklar, kompozisyon ve materyal özellikleri bakımından değişiklikler gösteren ve hızla büyük oranlarda meydana gelen kompleks bir yapıya sahiptir. E-atık veya İngilizce adı ile WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), kullanım ömrünü tamamlamış olan, içinde bir ya da daha fazla elektrik iletim elemanı barındıran ürünlere verilen isimdir (Kan, 2015).

Elektronik cihazların hızlı gelişmesi ve yenilenmesi, e-atıkların üretiminde büyük bir artışa neden olmuştur. Bu nedenle, elektronik atıkların yönetimi, çevre ve insan sağlığı açısından önemli bir konudur (Ahmad vd., 2022).

Uluslararası bir girişim olarak hizmet veren Solving the E-waste Problem (StEP) tarafından ortaya konulan sonuçlara göre, 2013 yılı kapsamında yeryüzünde 48,9 milyon ton e-atık ortaya çıkmıştır. StEP, söz konusu rakamın %33 oranında artarak 2017 yılında 65,5 milyon tona varacağını öngörmüştür. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2014 yılında sunulan veriler kapsamında, Türkiye’de 539.000 tona yakın e-atık üretilmiş, bu oranın yıllık %5 oranında yükseliş göstereceği göz önüne alınarak 2020 yılı için söz rakamın 894.000 tona varabileceği saptanmıştır. Elektronik atıkların geri dönüşümü sadece atık yönetimi noktasında değil, kıymetli metallerin geri elde edilmesi açısından da büyük öneme sahip olmuştur (Yapıcı, 2016).

Şekil 3.1’de kategori başına üretilen e-atıklar gösterilmiştir (Şahin, 2023).



Şekil 3.1. Kategori başına üretilen e-atık

E-atıkların elde edildiği elektronik ve elektrikli eşya sınıflandırılması, aşağıda yer aldığı şekilde yapılmaktadır (Çiftlik, vd., 2009).

- Büyük boyutlu ev eşyaları (Bulaşık makinesi, çamaşır makinesi, fırın ve buzdolabı vb.)
- Küçük ev aletleri (Ütü, mikrodalga fırın, tost makinesi, elektrik süpürgesi, vb.)
- Telekomünikasyon ile bilişim ekipmanları (Yazıcı, bilgisayar, faks, telefonlar vb.)
- Tüketici ekipmanları (Müzik enstrümanları ve video kameralar vb.)
- Aydınlatma ekipmanları (Avize, standart lamba ve floresan lambalar vb.)
- Elektronik ve elektrikli aletler (Matkap ve testere vb.)
- Eğlence ve spor aletleri ile oyuncaklar (Jetonlu makineler ve video oyunları vb.)
- Tıbbi aletler (MR ve diyaliz, analiz ekipmanları vb.)
- Kontrol ve izleme aletleri (Isı ayarlayıcıları ve termostatlar vb.)
- Otomat aletleri (İçecek otomatları ile para vb.)

Şekil 3.2’de ise e-atık olabilecek bazı teknolojik cihazlar gösterilmiştir (Şahin, 2023)



Şekil 3.2. E-atık olabilecek bazı teknolojik cihazlar

Son zamanlarda direkt olarak elektronik ve elektrikli atık yönetimini düzenleyen bir takım adımlar atılmıştır. 2003 yılından itibaren yürürlükte bulunan 2002/96/EC sayılı Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar yönergesi Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanmış ve ardından gelen 2012/19/EU sayılı yönerge ile revize edilmiştir. Söz konusu yönergede, elektronik ve elektrikli eşyalar on farklı kategoride sınıflandırılmıştır. Büyük ev aletleri kapsamında 2012 ile 2015 yılları arasında amaçlanmış bulunan geri kazanım oranı %80 oranındadır. Bu oran yazıcı, bilgisayar ve cep telefonu tarzındaki eşyalar için %75 olmuştur (Çiftlik, vd., 2009).

Elektronik atıkların yönetimi, doğru şekilde imha edilerek veya geri dönüştürülerek sağlanabilmektedir. Elektronik atıkların doğru bir şekilde imha edilmesi, atık işleme tesisleri veya lisanslı elektronik atık işleme tesisleri tarafından gerçekleştirilmektedir. Elektronik atıkların geri dönüştürülmesi ise malzemelerin yeniden kullanımını sağlamak ve atık miktarını azaltmaktadır. Elektronik atıkların geri dönüştürülmesi, çevre açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir (Abbas vd., 2022).

Elektronik ve elektrikli eşyaların geri dönüşümü esasında geri dönüşüm, yeniden kullanım ve geri kazanım gibi temel faktörleri içermektedir. Bu faktörlerin tanımlarına aşağıda yer verilmiştir (Yazıcı, 2012).

- Geri dönüşüm: Değerlendirilebilir olan atıkların farklı kimyasal ya da fiziksel işlemlerden geçirilmek kaydı ile ürüne yahut ham maddeye dönüştürülmesine denmektedir.
- Yeniden kullanım: Elektronik atıkların temizleme ve toplama dışında herhangi bir işleme tabi tutulmadan mevcut biçimiyle normal ömrünü dolduruncaya dek birkaç defa kullanılmasına denilir.
- Geri kazanım: Yeniden kullanım ve geri dönüşümü de barındırmakta olan; atıkların özelliklerinden faydalanılarak içinde yer alan bileşenlerin kimyasal, fiziksel ya da biyokimyasal yöntemler sayesinde farklı ürünlere ya da enerjiye dönüştürülmesine denmektedir.

Şekil 3.3'te e-atık örneği gösterilmiştir (Şahin, 2023).



Şekil 3.3. E-atık örneği

3.12. Elektronik Atıkların Zararları

Elektronik atıkların çevre ve insan sağlığına zararlı olması birkaç nedenle açıklanabilmektedir. Öncelikle, bazı elektronik cihazlar, özellikle eski modellerde kullanılan ağır metaller ve diğer zararlı kimyasallar içermektedir. Bu kimyasallar,

zamanla çevreye yayılmakta, yer altı su kaynaklarına karışarak insan sağlığına zarar vermektedir (Abbas vd., 2022). Söz konusu atıkların yaşam alanları içinde depolanması herkes için risk teşkil eden bir durum olmuştur. Bünyesinde bulundurduğu zararlı bileşenler sebebi ile geri dönüşüme ayrıldıklarında bile en uygun şartlarda bekletilmeleri gerekmektedir (Öztüre, 2015).

Atık meydana geldikten sonra, söz konusu e-atıkların bilinçsiz bir biçimde parçalanması, yakılması ve kimyasal işlemlere tabi tutulmaları neticesinde ortaya çıkacak olan zararın boyutları büyük olmaktadır (Luhar, 2019). Alüminyum, demir, platin, paladyum, bakır, civa, gümüş, kadmiyum, fosfor, krom ve baryum e-atıklardan çıkan farklı maddelerdir. Bu maddelerden örneğin civanın nörolojik bozukluklara, beyin sorunlarına, böbrek sorunlarına, görme hasarına, sinir sistemi sorunlarına ve zihinsel bozukluklara, kas titremesi ile gebelerde düşükler veya doğumsal bazı anomalilere sebep olduğu bilinmektedir. Alüminyumun ise sinir sistemi bozukluklarına ve alzheimer gibi hastalıklara yol açtığı; berilyumun akciğer kanserine sebep olduğu; kadmiyumun ise böbrek rahatsızlıklarına ve prostat kanserine yol açtığı saptanmıştır (Öztüre, 2015).

Elektronik atıklar dâhilinde yer alan zararlı maddeleri, Tablo 3.4’te görmek mümkündür (Anonymous, 2003).

Tablo 3.4. Elektronik atıklarda bulunan zararlı materyaller

Materyaller	Uygulama
Ağır Metaller	
Sn, Pb, Cd	Lehim
Ba, Sr, Pb	Katon ışını tüpü camları
Cd, Eu, Zn	Florasan tozları
Hg	Röleler
Yarı İletkenler	
B, Ga, A	Bileşik devreler
LED, Ga, As	Fotovoltaik
Se, Ge	Diyotlar
Se	Fotokopi tamburları
Organik Bileşenler	
PCB	Kondansatörler
PBDE	Alev geciktiriciler
Mineral	Yağlar, yağlayıcılar
Plastik Katkıları	
Cl	PVC
Cd, Pd, Ni	Pigmentler
Pd,Ba,Cd	Stabilizatörler

3.13. Türkiye’de Elektronik Atıklar ve Dönüşüm

Türkiye’de e-atıkların tekrar kullanımı konusunda istenilen düzeyde ilerleme kaydedilememiştir. Bu bağlamda Türkiye’de uzun süre geri dönüşüm ve geri kazanım anlamında sistematik bir etkinlik ortaya çıkmamıştır. Türkiye’de e-atık geri dönüşümünü yapacak olan tesis sayısı son derece sınırlıdır. Ayrıca bu çalışmalar sağlık açısından da elverişli olmayan ortamlarda meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak atığın içinde yer alan değerli metaller ülke dışına gönderilmekte ve söz konusu ülkenin ekonomisine katkı

sağlamaktadır (Baş, 2012). Tablo 3,5'te görüldüğü gibi geri dönüşüm ile maddelerden sağlanacak enerji tasarrufu %60-95 gibi oldukça yüksek yüzdelerdedir.

Tablo 3.5. Bazı metallerin geri kazanımıyla elde edilen enerji tasarrufu (baş, 2012)

Malzeme	Enerji Tasarufu
Çinko	%60
Kurşun	%65
Demir ve Çelik	%74
Bakır	%85
Alüminyum	%95

Elektronik ürünler üretilme aşamasında yeniden kullanıma elverişli biçimde az maliyet kapsamında ayrışabilen özellikteki malzemelerin kullanılması sayesinde atık yönetim masraflarını azalabilecektir. Pek çok ülkenin son zamanlarda önemle üstünde durmuş olduğu sürdürülebilir kalkınma için bu durumun ekonomik boyutu da önemli bir etken olmuştur (Öztüre, 2015).

Sistemli bir şekilde yapılan atık yönetiminin uygulanması 4 temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar aşağıdaki gibidir;

- Toplama
- Biriktirme
- Taşıma
- Depolama

3.13.1. Toplama süreci

Elektronik atıkların geri dönüşümünün yapılması için toplama işleminin yalnızca lisansı bulunan geri dönüşüm kuruluşları tarafından yapılması gerektiği belirtilmektedir. Günümüzde çok sayıda gelişmiş ülkede elektronik atıkların tamamının toplanması işlemi, yalnızca yetkili lisanslı kuruluşlar yoluyla yapılmaktadır (Çakır, 2013).

3.13.2. Biriktirme süreci

Diğer atıklar ile elektronik atıklar asla birbiri ile karıştırılmamalıdır. Bunun yanı sıra bu işte yetkili kuruluşlar tarafından standart olarak kabul gören konteyner sistemleri ile atıkların bir araya getirilerek, ilgili kuruluşlara teslim etme zorunluluğu bulunmaktadır (Çevikel, 2009).

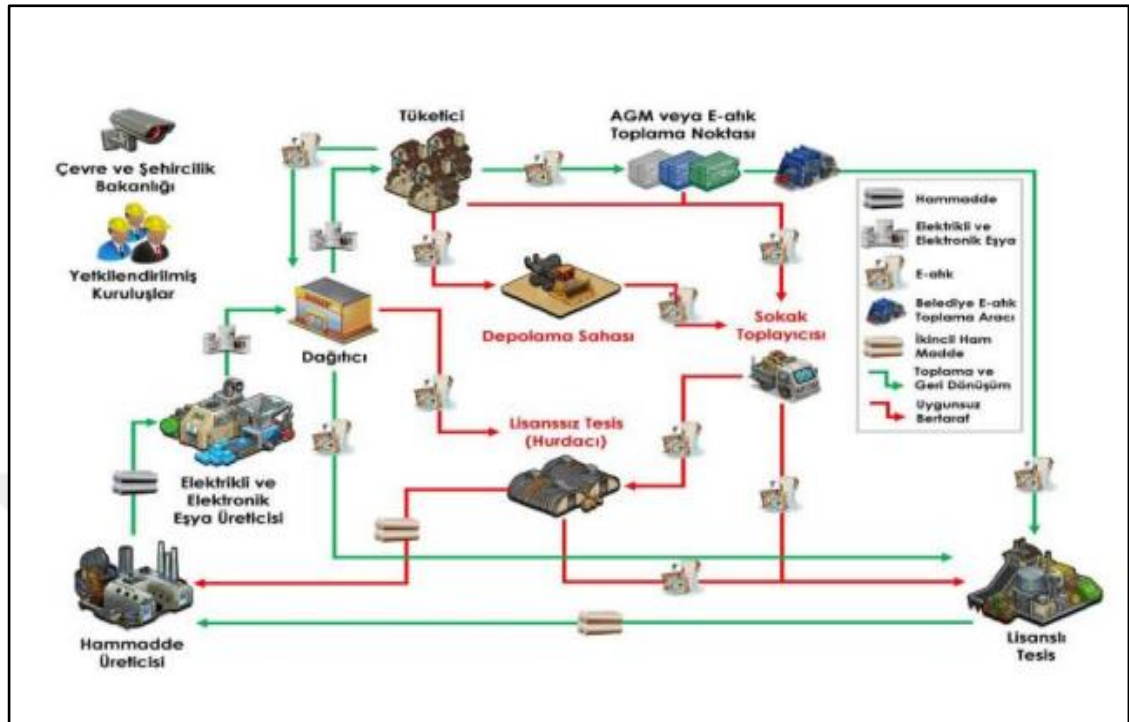
3.13.3. Taşıma süreci

Elektronik atıkların biriktirilme aşamasından işleme aşamasına kadar belirli bir sistem dâhilinde taşıma faaliyetinin yerine getirilmesi zorunludur. Bunun yanı sıra elektronik atıkların taşınması tehlikeli atık taşınmasına uygun olan yetkili araçlar tarafından yapılmalıdır (Çakır, 2013).

3.13.4. Depolanma süreci

En eski ortadan kaybetme yöntemlerinden birisi de depolama aşamasıdır. Ancak bu durum depolama alanlarının azalmasına, depolama sürecinde taşımanın maliyetinin yüksek olması ve bu maliyetin büyük bir ekonomik kaynağı değerlendirmek yerine beklemede tutması ve toplanan atıkların ilerleyen dönemlerde büyük bir çevre kirliliğine neden olması gibi etkenlere bağlı olarak artık bırakılması yönünde düşüncenin hâkim olduğu bir metottur. Ancak yine de depolama yapılmak istendiğinde doğal açıdan tehlikeli sınıfa girmekte olan elektronik atıkların, çevreye hasar vermeden titiz ve dikkatli bir biçimde depolama sahalarında alınması gerekmektedir (Çevikel, 2009).

Şekil 3.4’te e-atığın dönüşüm süreci gösterilmiştir (Şahin, 2023).



Şekil 3.4. E-atığın dönüşüm süreci

3.14. Elektronik Atık Kapsamında Yasal Düzenlemeler

Elektrikli ve Kısıtlanması Hakkındaki yönetmelik 2011/65/AB sayılı ve 8/6/2011 tarihli Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifi dikkate alınarak Avrupa Birliği mevzuatına uyum çerçevesinde hazırlanmıştır. Kapsamında ilgili hükümleri 1/1/2024 tarihinde, diğer hükümleri 1/2/2023 tarihinde, yürürlüğe girmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2022)).

4.MATERYAL YÖNTEM

4.1.Materyal

4.1.1.Polimer

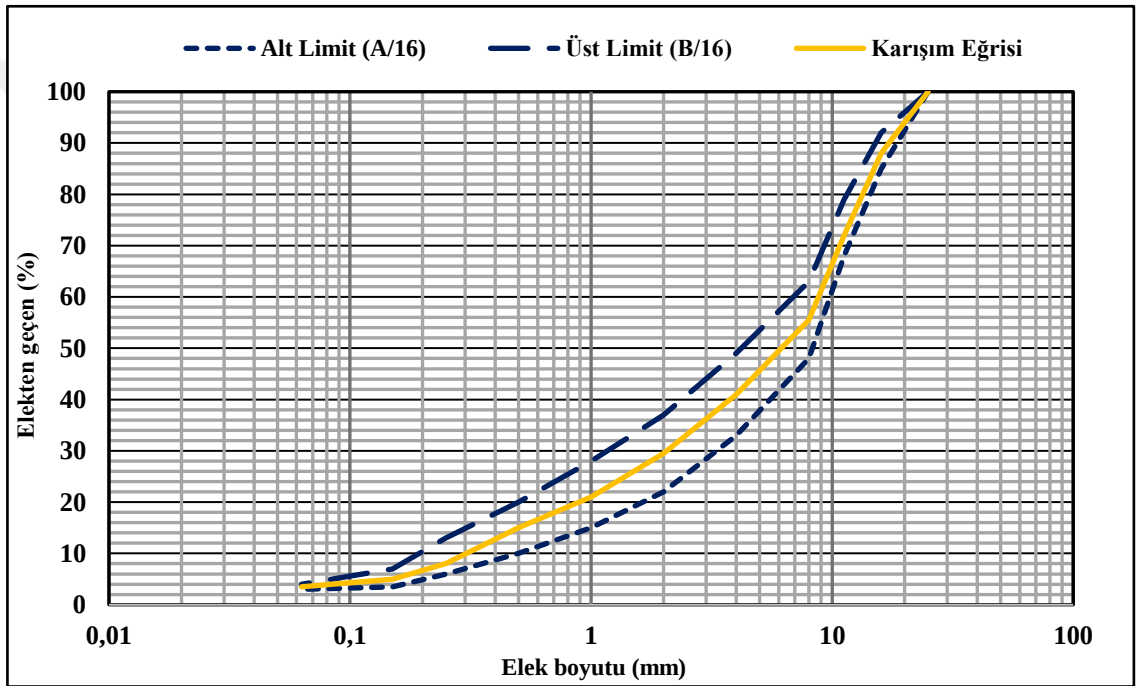
Polimer beton üretimlerinde esas ögeyi oluşturan bağlayıcı malzeme, bu tez çalışması kapsamında doymamış polyester reçine olarak seçilmiştir. Üstün mekanik özellikleri, düşük maliyeti ve kolay erişilebilirliği nedeniyle doymamış polyester reçineler diğer reçinelere göre daha çok kullanılmaktadır (Tasnım vd., 2021). Baran Boya firması aracılığıyla CE 80 döküm tipi ortoftalik esaslı polyester kod numarasıyla üretilen doymamış polyester reçineler temin edilerek polimer betonlar üretilmiştir. Bu reçineye ait bilgiler Tablo 4.1’de yer almaktadır.

Tablo 4.1. Doymamış Polyester Reçinenin Teknik Özellikleri

Özellikler	Konsantrasyon (%)
Doymamış Polyester Reçine	~ 60
Stiren	~ 40
Fiziksel Hali	Sıvı
Renk	Sarımsı
Koku	Karakteristik stiren kokusu
Parlama Noktası	~ 34 °C
Tutuşma Noktası (Solvent)	~ 490 °C
Patlama Limitleri (Solvent)	Alt Limit %1,1; Üst limit %8 (hacimce)
Buhar Yoğunluğu	Havadan ağır
Suda Çözünürlük	Çözünmez
Özgül Ağırlık	1,13 gr/cm ³
Viskozite	475 ± 75 cp
Jelleşme Süresi (25°C)	4 ± 1 dk
Sertlik	Minimum 35 Barcol
Eğilme Dayanımı	Minimum 100 N/mm ² (MPa)
Çekme Dayanımı	Minimum 55 N/mm ² (MPa)

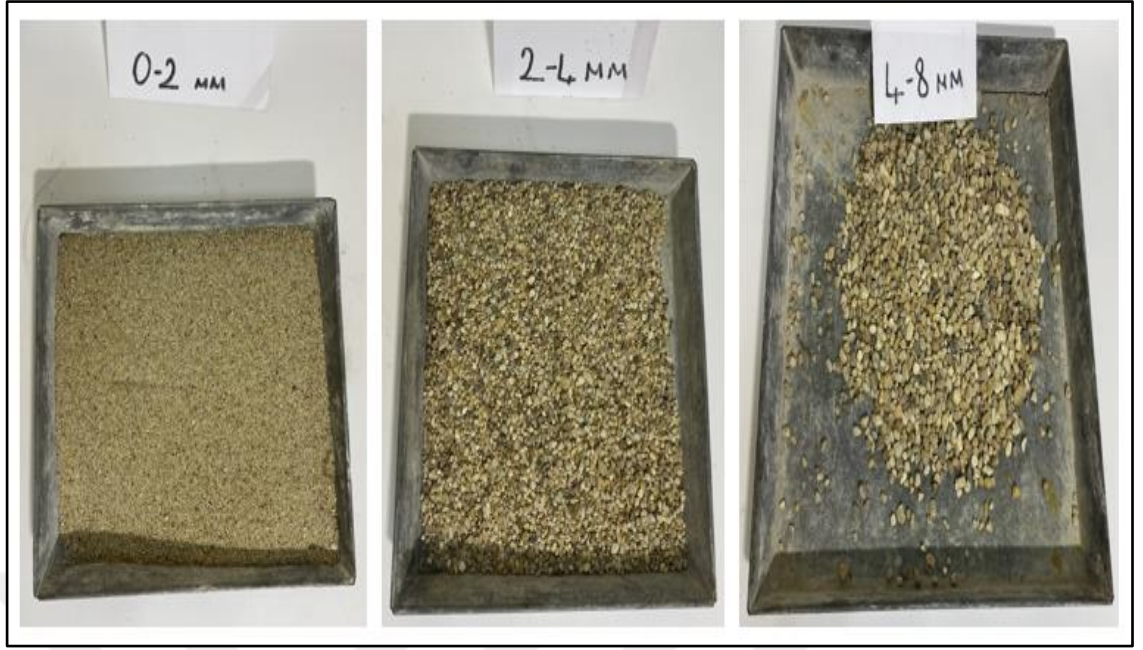
4.1.2. Agregalar

Kuvars agregası, çakıl ve e-atık, bu tez çalışmasında polimer betonların dolgu malzemesini oluşturmuştur. Üniform bir agrega boyutu dağılımı elde etmek amacıyla elek analizleri TS EN 933-1 (2012) ve TS 802 (2016) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Maksimum agrega tane büyüklüğü 16 mm olacak şekilde karışım eğrisi önerilen standart eğriler (A16/B16) arasında kalacak şekilde belirlenerek şekil 4.1'te verilmiştir. Buna göre agrega sınıfları; 0/2 mm = %29,5, 2/4 mm = %11,5, 4/8 mm = %14,5 ve 8/16 mm = %44,5 oranlarında seçilmiştir.



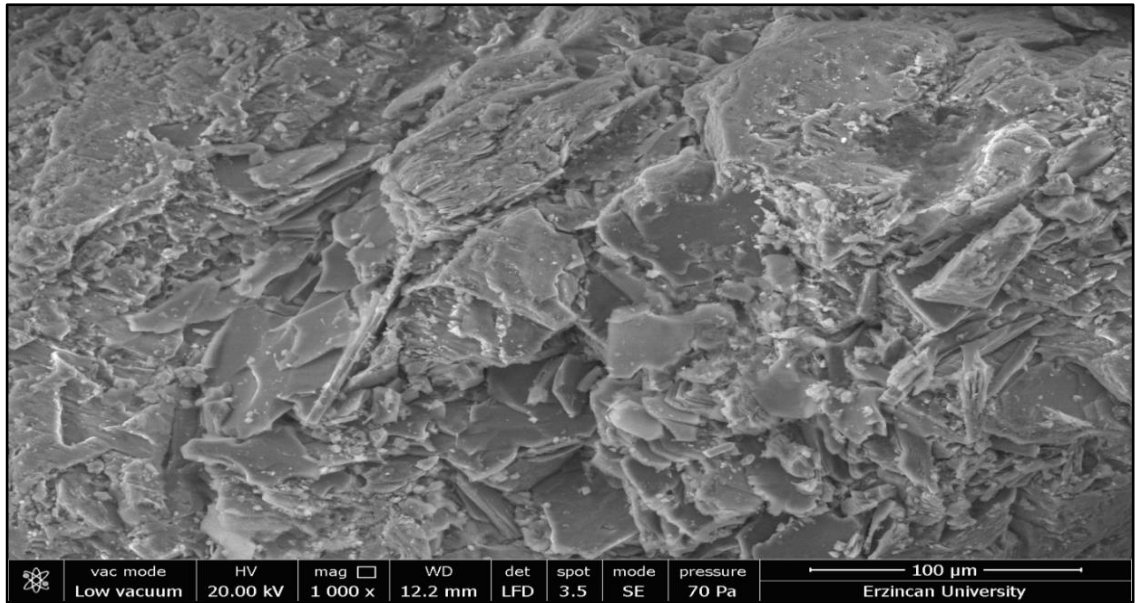
şekil 4.1. Karışımın tane büyüklüğü eğrisi

Kuvars agregası (0/2 mm, 2/4 mm ve 4/8 mm), çakıl ise (4/8 mm, 8/16 mm) boyutlarında karışımlarda yer almıştır. Kuvars agregasının özlöl ağırlığı 2,64 g/cm³ olup akılınkı ise tane boyutuna göre sırasıyla 2,625 g/cm³ ve 2,61 g/cm³'tür. Kuvars agregasına ait görseller şekil 4,2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Kuvars agregalarının elek analizi sonrası görselleri

Çalışmada kullanılan kuvars agregasının içyapısını gösteren SEM analiz görüntüsü ise Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.3’den, polimer beton üretimlerinde reçine ile uyumunun yüksek olması nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılan kuvars agregalarının az gözenekli ve kristal yapıya sahip olduğu görülebilmektedir (Asdollah-Tabar vd., 2021; Ali ve Lublóy, 2022).



Şekil 4.3. Kuvars agregasının SEM analiz görüntüsü

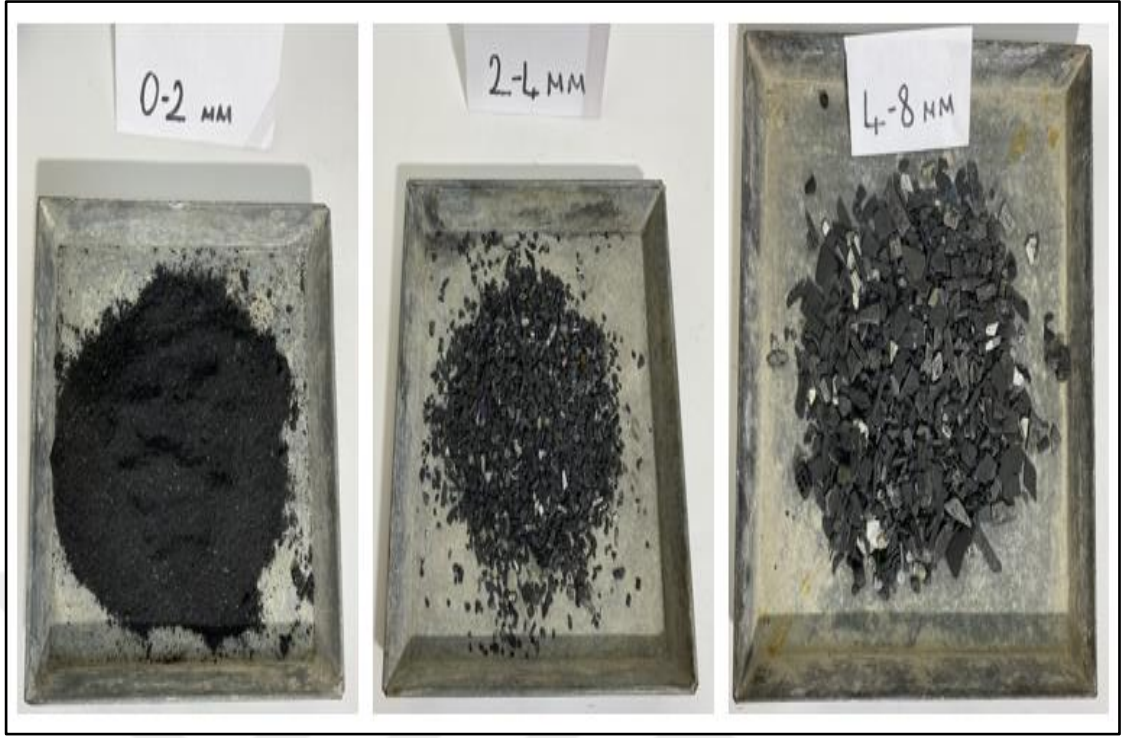
Kuvars agregasının üretici firmadan temin edilen teknik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Kuvars Agregasının Teknik Özellikleri

SiO ₂	%93,28
Al ₂ O ₃	%4,13
Fe ₂ O ₃	%0,070
MgO	%0,05
CaO	%0,04
Na ₂ O	%0,06
K ₂ O	%2,07
Kızdırma Kaybı	%0,30
Sertlik	7
Erime Sıcaklığı	1785 °C

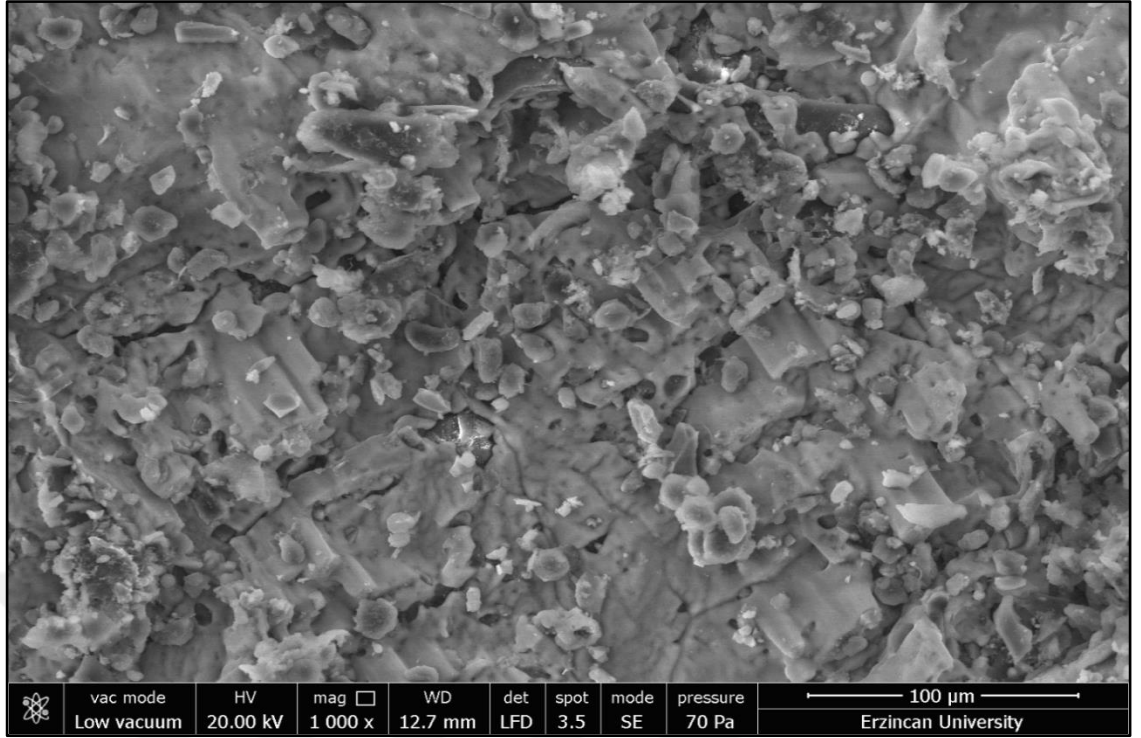
4.1.3. Elektronik atık (E-atık)

Exitcom Recycling firmasının (Kocaeli/TR) fabrikalarına gelen monitör, yazıcı, televizyon, telefon gibi elektronik atıkların geri dönüşümünden elde edilen ve agrega boyutuna parçalanan e-atıklar polimer betonlarda kullanılmıştır. Dolgu malzemesi olarak kuvars agregası ve çakıl yerine farklı oranlarda ve üç sınıfta (0/2 mm, 2/4 mm ve 4/8 mm) kullanılan e-atıkların özgül ağırlıkları 1,29 g/cm³’tür. E-atıkların elek analizi sonrası görselleri Şekil 8’te verilmiştir.



Şekil 4.4. E-atıkların elek analizi sonrası görselleri

SEM analizi sonucu üretimlerde yer alan e-atıklara ait görüntü ise, Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. E-atıkların SEM analiz görüntüsü

4.1.4. Sertleştirici ve hızlandırıcı malzemeler

Monomer ile reçine arasında gerçekleşecek kimyasal reaksiyonu başlatan ve bu sayede çapraz bağ oluşumunu sağlayan polyester sertleştirici ile kimyasal reaksiyonu hızlandırıcı görevi gören polyester hızlandırıcı, polimer betonların üretimlerinde yer almıştır. Sertleştirici ile hızlandırıcıya ait teknik bilgiler Tablo 4.3 ve Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Sertleştiricinin teknik özellikleri

Ürün Kodu	Akperox A1
Ürün Tanımı	Metil Etil Keton Peroksit karışımıdır.
Yoğunluk	1,16 gr/cm ³
Renk	Renksiz
Aktif Oksijen İçeriği	%9,4–%9,6
Peroksit İçeriği	%40

Tablo 4.4. Hızlandırıcının teknik özellikleri

Ürün Kodu	Cobalt Octoate (EGEDry 12201)
------------------	-------------------------------

Kullanım Yeri	Yağlı boyalarda kurutucu olarak, polyester katalizör hızlandırıcısı olarak, kauçuğu metale yapıştırmada
Yoğunluk	0,98 gr/cm ³
Görünüm	Berrak sıvı
Co Metal (%)	10
Toplam Katkı (%)	63

4.2. Yöntem

4.2.1 Parametreler ve beton karışım dizaynı

Tez çalışmasında seçilen parametrelerin birincisi kuvars agregası ile çakıl yerine agregası olarak farklı oranlarda kullanılan e-atıktır. Bu oranlar %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 olarak belirlenmiştir. İkinci olarak polimer betonların erken (7gün), standart (28gün), ve ileri (90 gün) yaş davranışlarını incelemek için beton yaşı parametresi seçilmiştir. Kontrol betonu olarak üretilen polimer betonda e-atık yer almamıştır. Yapılan yoğun ön deneyler sonucunda, polimer betonların üretimlerinde kullanılan sertleştirici ve hızlandırıcı oranları sırasıyla %1 ve %0,1 olarak belirlenerek tüm karışımlarda sabit tutulmuştur. Buna ilaveten, reçine/dolgu oranı, polimer betonların tümünde %15-85'tir. Her bir seri için 6 adet 150x150 mm küp numunesi (basınç dayanımı, asit ve sülfat atağı deneyleri için) ile 4 adet 100x200 mm silindir numunesi (kılcal su emme, hızlı klor geçirimsizliği deneyleri için) üretilmiştir. Yaş parametresi de gözönüne alındığında toplamda 108 adet küp ve 72 adet silindir numune üretilerek deneyler gerçekleştirilmiş ve tüm deneylerin sonuçları ortalama alınarak hesaplanmıştır.

Deneylerden elde edilen verilerin daha net ve kolaylıkla yorumlanabilmesi için kodlama yapılmıştır. Buna göre e-atık kısaltması EW (Electronic Waste) harfleriyle, e-atık oranları harflerden sonraki sayılarla (% işareti kullanılmadan), test günleri ise '/' işaretinden sonraki sayılarla belirtilmiştir. Örneğin EW12/90 kodu, %12 e-atık içeren polimer betonu temsil edip bu betonun 90. günde deneylere tabi tutulduğunu göstermektedir. Kontrol betonları C harfi ile kodlanmıştır.

Polimer betonların üretimleri için hazırlanan beton karışım dizaynı Tablo 4.5'te verilmiştir. Tablo 4.5'te deneylerin yapıldığı günü ifade eden sayılar yazılmamıştır.

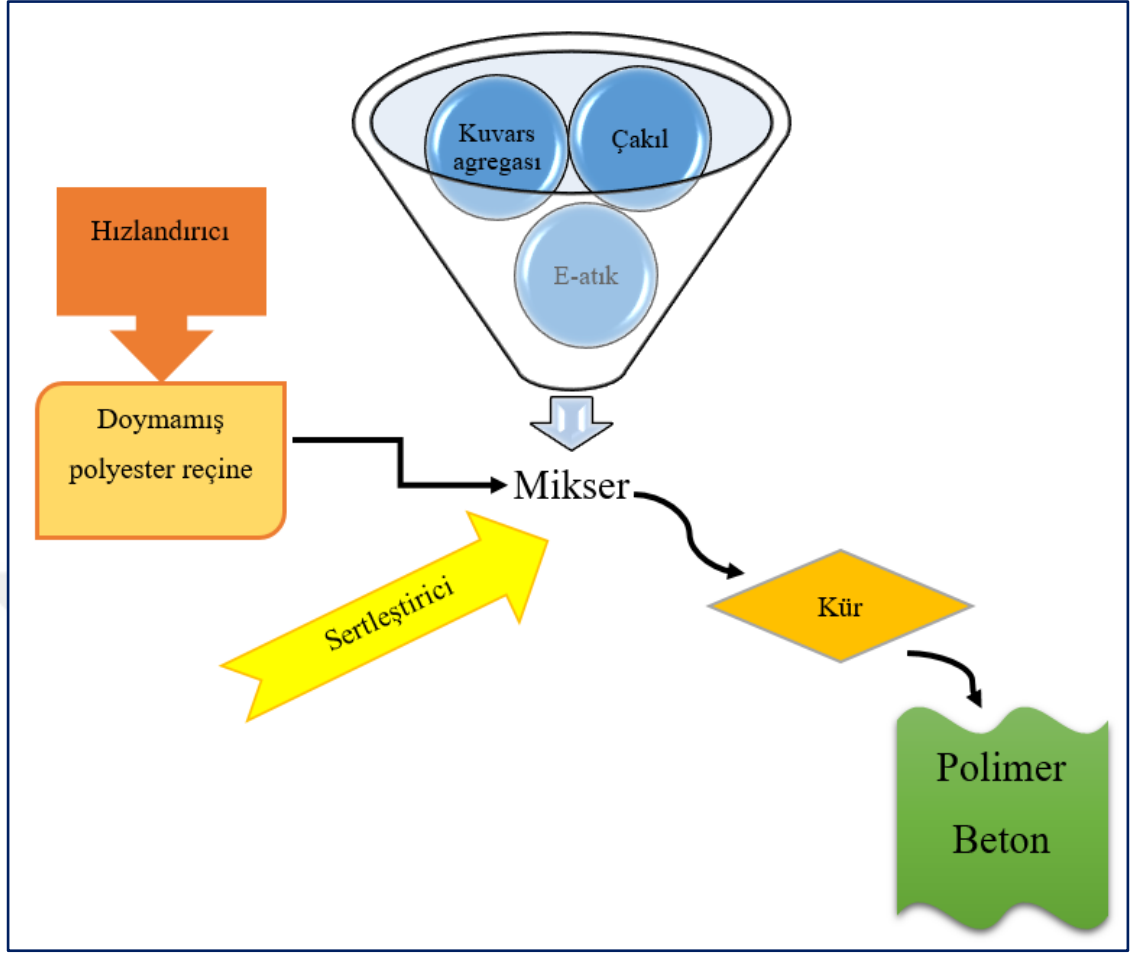
Tablo 4.5. Polimer beton karışım dizaynı (kg/m³)

Kod	E-atık	İnce Agregası (Kuars Agregası)	İri Agregası (Çakıl)	Polyester Reçine
C		836,41	1203,92	360
EW3	33,92	811,53	1194,87	360
EW6	67,85	786,28	1186,20	360
EW9	101,77	761,03	1177,16	360
EW12	135,70	736,15	1168,11	360
EW15	169,62	710,89	1159,44	360

4.2.2. Polimer beton üretimi

Agrega ve reçine malzemelerinin bir araya getirilmesi ile elde edilen polimer betonların üretim sürecinde, reçine içerisine düşük dozajlarda sertleştirici ve hızlandırıcı malzemeler eklenerek polimerizasyon ve kürlenme başlatılmaktadır. Daha sonra oluşan sıvı karışıma iri ve ince agregalar ilave edilerek karıştırma yapılmaktadır. Sertleşme sürecini kısa bir sürede tamamlayan malzeme, üniform bir agregası dağılımına sahip sağlam bir reçine bağlayıcısı ile birbirine bağlanmış kompozit bir yapıdan oluşmaktadır (Rebeiz, 1996).

Polimer betonların üretiminde ilk olarak kuvars agregası, çakıl ve e-atıktan oluşan dolgu malzemelerinin tümü beton mikserinde 60 sn karıştırılmıştır. Daha sonra reçine içerisine hızlandırıcı eklenerek 60 sn karıştırıldıktan sonra dolgu malzemelerinin üzerine dökülmüş ve mikserde tüm karışım 3 dk boyunca karıştırılmıştır. Son olarak elde edilen karışıma sertleştirici ilave edilerek malzemelerin tamamı 2 dk daha karıştırılmıştır. Kalıplarına yerleştirilen taze betonlar, masa tipi vibratör yardımıyla 2 dk boyunca titreşime tabi tutulmuştur. 24 saat sonra kalıplarından çıkartılan betonlar deney gününe kadar havada kürlenmiştir. Polimer beton üretimini gösteren diyagram, Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Polimer beton üretimini gösteren diyagram

4.2.3 Deneysel çalışmalar

Polimer betonların birim ağırlık deneyi, TS EN 12350-6 (2019) standardına göre gerçekleştirilmiştir. TS EN 12390-3 (2019) standardına göre ise 150x150 mm boyutlarındaki küp numunelerin 7, 28 ve 90 gün sonundaki basınç dayanımı deneyleri 3000 kN kapasiteli ELE marka pres cihazı ile yükleme hızı 0,4 MPa/s olacak şekilde yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyine ait bir görsel Şekil 4.7’de verilmiştir.

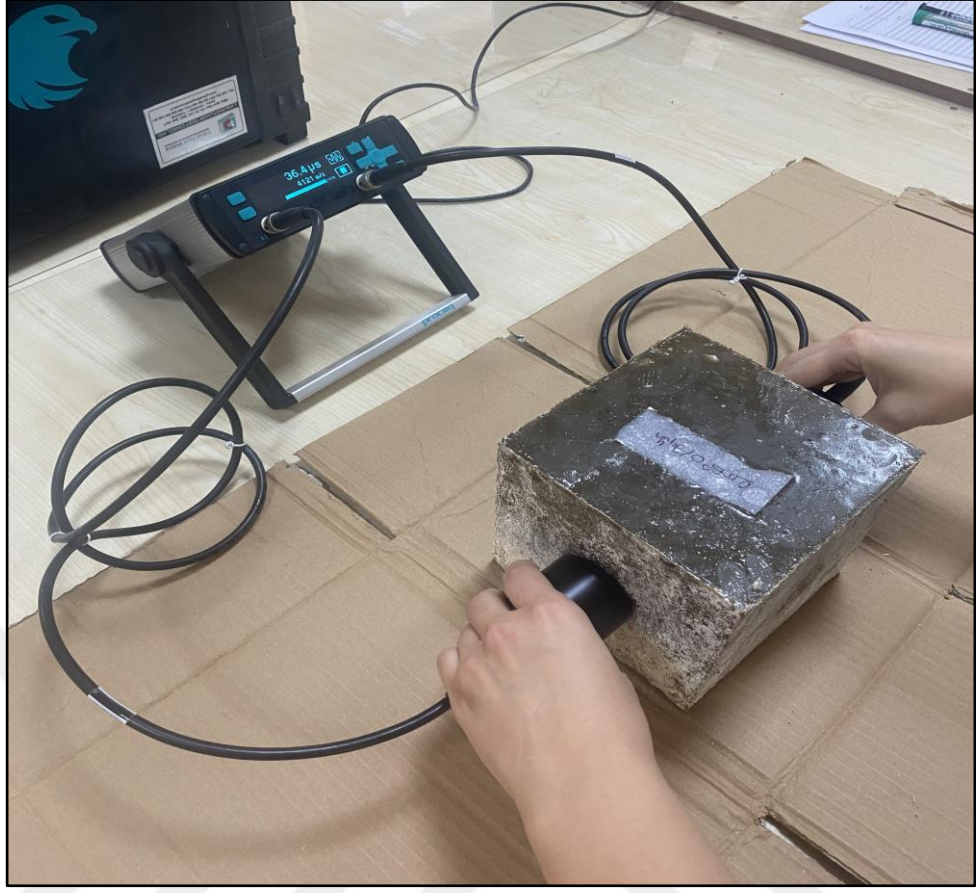


Şekil 4.7. Basınç dayanımı deneyine ait uygulama görseli

150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı (UPV) deneyi, 7, 28 ve 90 gün sonunda gerçekleştirilmiştir. Sesin zaman aralığı, alıcı ve verici probların polimer beton numunelerinin paralel yüzeylerine yerleştirilmesi sonucu kaydedilmiştir. Sürekli ses iletimini sağlayacak bir ortam yaratmak amacıyla bu deneyde probun betonlara temas ettiği yüzeyde ultrasonik jel kullanılmaktadır. Denklem (1) ile sesin betondaki hızı hesaplanmaktadır (Marie, 2016).

$$V=L/t \quad (1)$$

Denklem (1)'de yer alan L, problar arasında sesin kat ettiği mesafeyi (0,15 m), t ise ses iletim süresinin deneysel olarak ölçülmesini saniye cinsinden temsil etmektedir. m/s olarak ses hızı V ile gösterilmektedir. UPV deneyi, Şekil 4.8'de gösterildiği gibi uygulanmıştır.



Şekil 4.8. UPV deneyine ait uygulama görseli

Her bir polimer betonun UPV ölçümleri ile ortalama hızları elde edildikten sonra, dinamik elastisite modülü değerleri ASTM C 597 (2016) esas alınarak hesaplanmıştır. Bu standartta yer alan Denklem (2) hesaplamalarda kullanılmıştır.

$$E_d = \frac{\rho V^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (2)$$

Buna göre E_d polimer betonların MPa cinsinden dinamik elastisite modülünü, ρ ise betonların yoğunluğunu (kg/m^3) göstermektedir. Ayrıca UPV değeri V ile, poisson oranı ise μ ile temsil edilmektedir.

ASTM C 1585 (2020) standardı, polimer betonların kılcal su emme deneyinde kullanılmıştır. 24 saat süresince numuneler sabit ağırlığa gelinceye kadar 70 ± 7 °C sıcaklıktaki fırında kurutularak ortam sıcaklığında soğutulduktan sonra kuru tartım (W_0) yapılmıştır. Bir kumpas yardımıyla numunelerin su ile temas eden yüzey alanlarının

boyutları (F , cm^2) ölçülmüştür. Su kabına yerleştirilen her numunenin 1-4-9-16-25-36-49-64-81 dakikadaki su emme miktarı (t , dk) tartılmış ve kütle artışları elde edilmiştir (Q , cm^3). Daha sonra birim alandan emilen su miktarı ile geçen sürenin karekök değerlerinden oluşan eğrinin eğimi ile kılcal su emme katsayılarına ulaşılmıştır. Eğriden elde edilen sonuçlar Denklem (3) ile de değerlendirilmiştir.

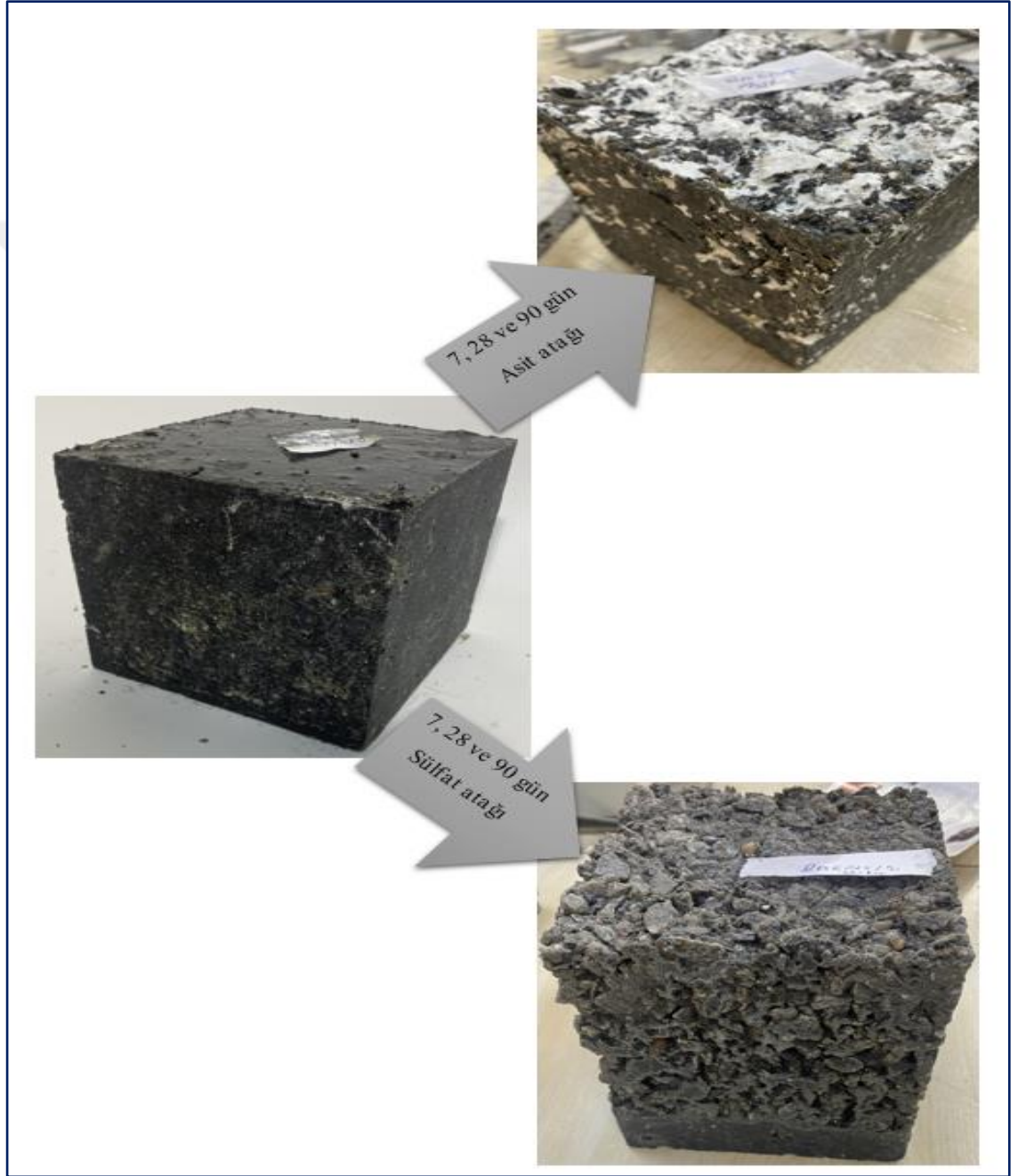
$$K = \frac{Q}{F \cdot \sqrt{t}} \quad (3)$$

Denklem (3)'te yer alan K , Q , F , t harfleri sırasıyla kılcal su emme katsayısını, emilen su miktarını, suyla temas edilen taban alanı ve süreyi temsil etmektedir. 7, 28 ve 90 gün sonunda küp numunelerin kılcal su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Permeabilite ölçümünün dolaylı yöntemi olarak değerlendirilen (Mindess vd., 2003) hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyleri ASTM C 1202 (2022) ve AASHTO T 277 (2015) standartlarına göre yapılmıştır. Çapı 100 mm, kalınlığı 5 ± 2 mm olan disk şeklindeki numuneler, su sızıntısını önlemek ve doğru elektrik iletimi sağlayabilmek amacıyla yalıtılmıştır. Deneyin başlangıç anına kadar suda bekletilen numuneler, 0,3M NaOH ve %3'lük NaCl çözeltilerinin bulunduğu deneysel sisteme yerleştirilmiştir. 30 dk aralıklarla 6 saat boyunca 60 V sabit potansiyel farkı uygulanan beton disklerden geçen elektrik akım şiddeti kaydedilmiştir. Daha sonra zaman-akım şiddeti grafiğinin altında kalan alan sayesinde Coulomb cinsinden iletilen elektrik akımı miktarları hesaplanmıştır. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyi, 7, 28 ve 90 günlük küp numuneler üzerinde uygulanmıştır. Bu deney DSİ Ankara Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığında bulunan laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir.

Asit ve sülfat atağı deneyleri ASTM C 267 (2020) ve ASTM C 1012 (2019) standartlarına göre küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. %5 H_2SO_4 ve %5 Na_2SO_4 çözeltilerine daldırılan her bir polimer betondan ikişer numune 7, 28 ve 90 gün boyunca bekletilmiştir. Hazırlanan çözeltiler, dört haftada değiştirilmiştir. Çözeltilerden çıkarılan betonlar temiz musluk suyu ile yıkanarak gevşek reaksiyon ürünlerinden arındırılmıştır. Daha sonra bir havluyla kurutulan numuneler tartıldıktan sonra görsel olarak incelenmiş ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Görsel değerlendirmede amaç H_2SO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerine maruz kalan numunelerin fiziksel dayanıklılık etkisini eleştirel olarak

değerlendirebilmektir. Bu değerlendirmede numunelerin yüzey dokusu, boyutu, şekli, rengi ve kenarlarının durumu gibi parametreler dikkate alınmıştır. Görsel değerlendirme sonrası numunelerin ağırlık kayıpları ile basınç dayanımı kayıpları (bu kayıplar maruziyet öncesi ve sonrası ağırlıklar ile basınç dayanımları üzerinden) yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Bu deneye ait görsel Şekil 4.9’da verilmiştir.

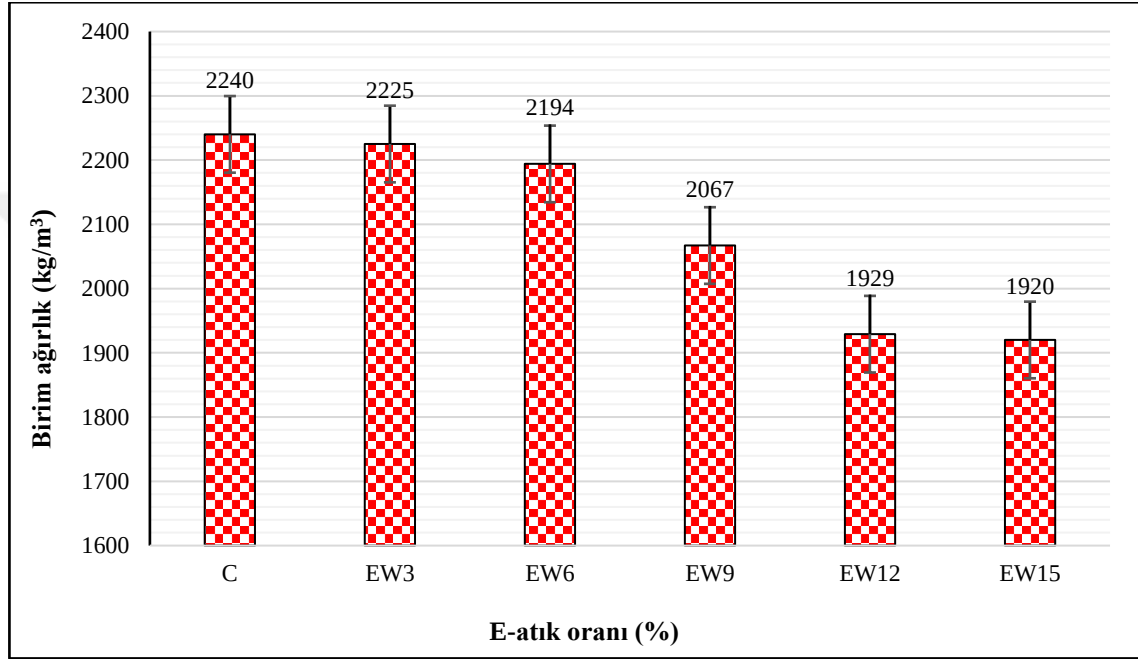


Şekil 4.9. Asit ve sülfat atağı deneyine ait uygulama görseli

5.ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Birim Ağırlık

Polimer betonların birim ağırlık değerleri, Şekil 5.1’de verilmiştir. Buna göre karışımlara e-atık eklendiğinde kontrol betonuna göre birim ağırlık sonuçlarında azalmalar meydana gelmiştir.



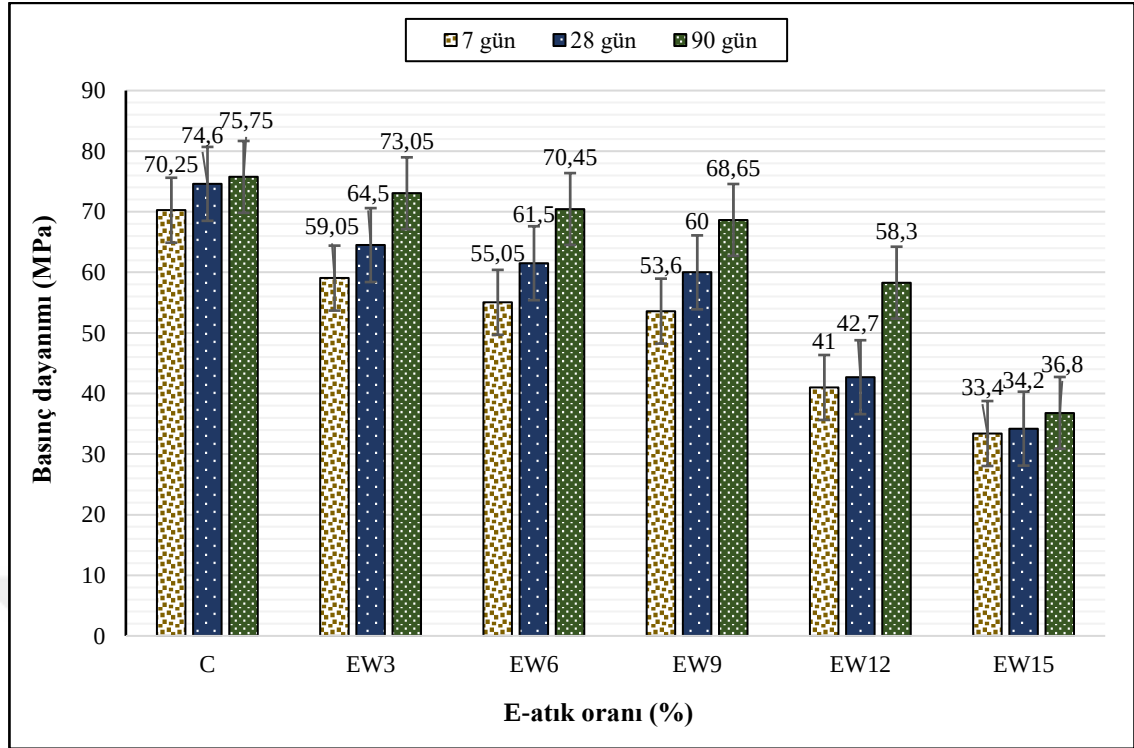
Şekil 5.1. Birim ağırlık sonuçları ile e-atık oranları arasındaki ilişki

En yüksek birim ağırlık değeri 2240 kg/m^3 ile kontrol betonunda (C), en düşük taze yoğun birim ağırlık değeri ise 1920 kg/m^3 ile EW15 kodlu numune elde edilmiştir. E-atık oranının artışı, polimer betonların birim ağırlık değerlerini azaltmıştır. E-atık oranı %3’ten %15’e yükseldiğinde %13,74 civarında birim ağırlık kaybı oluşmuştur. E-atıkların özgül ağırlık değerinin ($1,29 \text{ g/cm}^3$), agrega olarak yerine kullanıldıkları kuvars agregası ($2,64 \text{ g/cm}^3$) ile çakıldan ($2,625 \text{ g/cm}^3$ ve $2,61 \text{ g/cm}^3$) çok daha düşük olması, polimer betonların birim ağırlıklarındaki azalmanın temel sebebi olarak değerlendirilmektedir. E-atığın betonda doğal agrega yerine kullanıldığı çalışmalarda da benzer gözlemler ifade edilmiştir (Vishwakarma ve Ramachandran, 2018; Kumar vd., 2022). Reçine tipi ve oranına bağlı olarak değişmekle birlikte polimer betonların yoğunluklarının literatürde yaklaşık 2100 kg/m^3 civarı olduğu düşünüldüğünde (Heidarnezhad vd., 2020), polimer betonda e-atık kullanılarak hafif polimer betonlar

üretilebileceği (örneğin %15 e-atıklı polimer betonun (EW15) taze yoğunluğu 1920 kg/m³'tür) bu tez çalışması ile ilk kez literatüre kazandırılmıştır. Bu sayede hem deprem yükü altında yapıların maruz kalacağı hasarların azalabileceği hem de maliyet açısından daha avantajlı bir üretim yapılabileceği düşünülmektedir.

5.2. Basınç Dayanımı

Şekil 5.2'de farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Şekil 5.2'den, en yüksek basınç dayanımının 75,75 MPa ile 90 gün sonunda kontrol betonundan (C/90), en düşük basınç dayanımının ise 33,4 MPa ile 7 gün sonunda EW15/7 kodlu betondan elde edildiği görülmektedir. Karışımlarda e-atık kullanımıyla birlikte basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. E-atığın farklı beton tipleri içerisinde yer aldığı çalışmalarda da benzer bulgular elde edilmiştir (Alagusankareswari vd., 2016; Shamili vd., 2017; Ullah vd., 2022). Basınç dayanımı değerlerindeki azalmalar üzerinde e-atığın hidrofobik yapısının ve reçine ile kurduğu nispeten zayıf bağın etkili olduğu düşünülmektedir (Bahij vd., 2020; Santhanam vd., 2020; Kaliyavaradhan, 2022). Ayrıca basınç dayanımlarındaki kayıpların, e-atık-reçine ara yüzey geçiş bölgesinin artan oranlarda e-atık kullanımıyla birlikte daha güçsüzleşebileceğinden kaynaklandığı da düşünülmektedir (Abbas vd., 2022). E-atık katkılı polimer betonlar arasında en yüksek basınç dayanımları 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla 59,05 MPa, 64,5 MPa ve 73,05 MPa olacak şekilde %3 e-atık kullanılan betonlarda (EW3) görülmüştür. E-atığın %15 ile en yüksek oranda kullanıldığı polimer betonun (EW15) basınç dayanımları, kontrol betonundan güne bağlı olarak %51,42 ile %54,16 arasında kayba uğramıştır. Polimer betonların tamamında 7 günden 90 güne kür süresi arttıkça basınç dayanımları da artmıştır. Örneğin bu artış %3 ve %6 e-atık içeren polimer betonlarda 7 güne göre 90 gün sonunda sırasıyla %24 ve %28 oranlarında gerçekleşmiştir. Bu artışın yaşanmasında kür süresi ile birlikte kullanılan e-atığın optimum oranı, şekil özelliği ve parçacık boyutunun belirleyici olduğu düşünülmektedir (Ali vd., 2021; Sua-iam ve Chatveera, 2021). Bu tez çalışmasında en yüksek basınç dayanımına kontrol betonu dışında %3 e-atık kullanılan polimer betonlarda ulaşılmıştır. Ayrıca %3, %6 ve %9 e-atıklı polimer betonların kontrol betonu ile birlikte tüm günlerde 50 MPa ve üzerine çıkarak yüksek dayanıma sahip polimer betonlar üretilebileceği ortaya çıkarılmıştır.

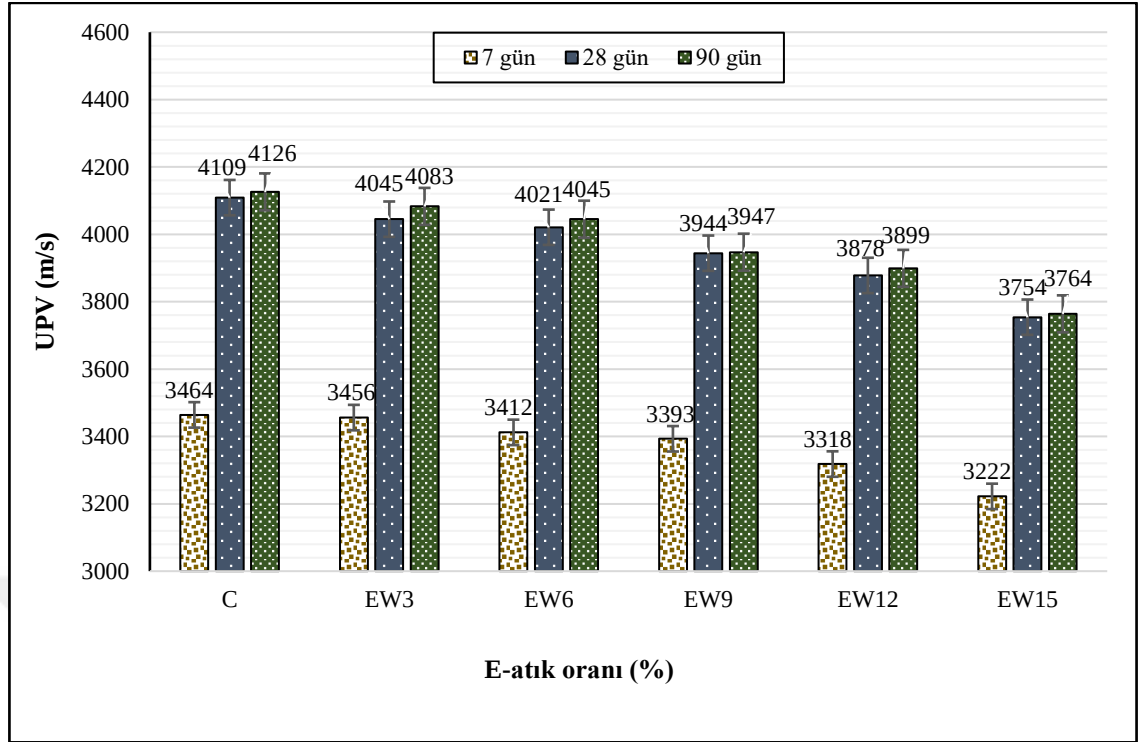


Şekil 5.2. Beton yaşına göre basınç dayanımı – e-atık oranı arasındaki ilişki

Son olarak deney esnasında da gözlemlendiği gibi e-atıkların polimer beton içerisinde agrega olarak kullanımıyla birlikte hem betonların kendi ağırlıkları azalmış hem de betonlar sünek bir davranış sergileyerek kırılma öncesi deformasyonları iyileşmiştir (Akram vd., 2015).

5.3 Ultrases Geçiş Hızı (UPV)

Şekil 5.3, gün parametresine (7, 28, 90 gün) ve e-atık oranına bağlı olarak polimer betonların ultrases geçiş hızı (UPV) deney sonuçlarını göstermektedir. E-atık oranı arttıkça polimer betonların UPV değerlerinde tüm günler için az farklar ile azalmalar meydana gelmiştir. E-atığın beton içerisinde %10, %20 ve %30 oranlarında kullanıldığı bir çalışmada da UPV sonuçlarında azalmaların görüldüğü bildirilmiştir (Kumar vd., 2022). Akın ve Polat (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı boyutlara sahip atık lastikli polimer betonların UPV'lerinin atık lastik oranı arttıkça olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Benzer davranış normal betonda plastik atığın kullanıldığı başka bir çalışmada da gözlemlenmiştir (Almeshal vd., 2020).



Şekil 5.3. UPV değerlerinin e-atık oranına ve yaşa göre değişimi

Bu durumun oluşmasında, özellikle yüksek e-atık oranına sahip polimer betonlardaki hava boşluğu içeriğinin fazla oluşu ve akustik empedans nedeniyle ultrasonik ses yayılımının en aza inmesinin UPV değerlerini azaltmış olabileceği değerlendirilmektedir (Heidarnezhad vd., 2020; Ullah vd., 2021). Ayrıca farklı hacimsel konsantrasyona sahip birden fazla bileşenli e-atık içeren polimer betonların, UPV değerlerini olumsuz yönde etkilemiş olabileceği düşünülmektedir. Son olarak özellikle kuvars agregası yerine artan oranlarda e-atığın polimer betonda kullanımının, kontrol betonuna göre e-atıklı karışımların gözenekliliğini artırarak UPV'leri düşürmüş olabileceği de kuvars kumu yerine geri dönüşümlü malzemelerin doymamış polyester harçlarda kullanıldığı bir çalışma esas alınarak söylenebilmektedir (Thillo vd., 2021).

UPV sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, polimer betonda farklı oranlarda e-atık kullanımı sonucunda kontrol betonuna kıyasla dramatik veya keskin düşüşler gözlemlenmemiştir. Örneğin 7 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde, en yüksek oran olan %15 e-atık katkılı polimer betonun (EW15/7) UPV'si (3222 m/s), kontrol betonuna (C/7) (3464 m/s) göre %7 oranında azalmıştır. 90 günün sonunda bu iki beton arasındaki UPV farkı çok az bir yükselişle %8,77 mertebesine çıkabilmiştir. Kür süresinin 7 günden 90

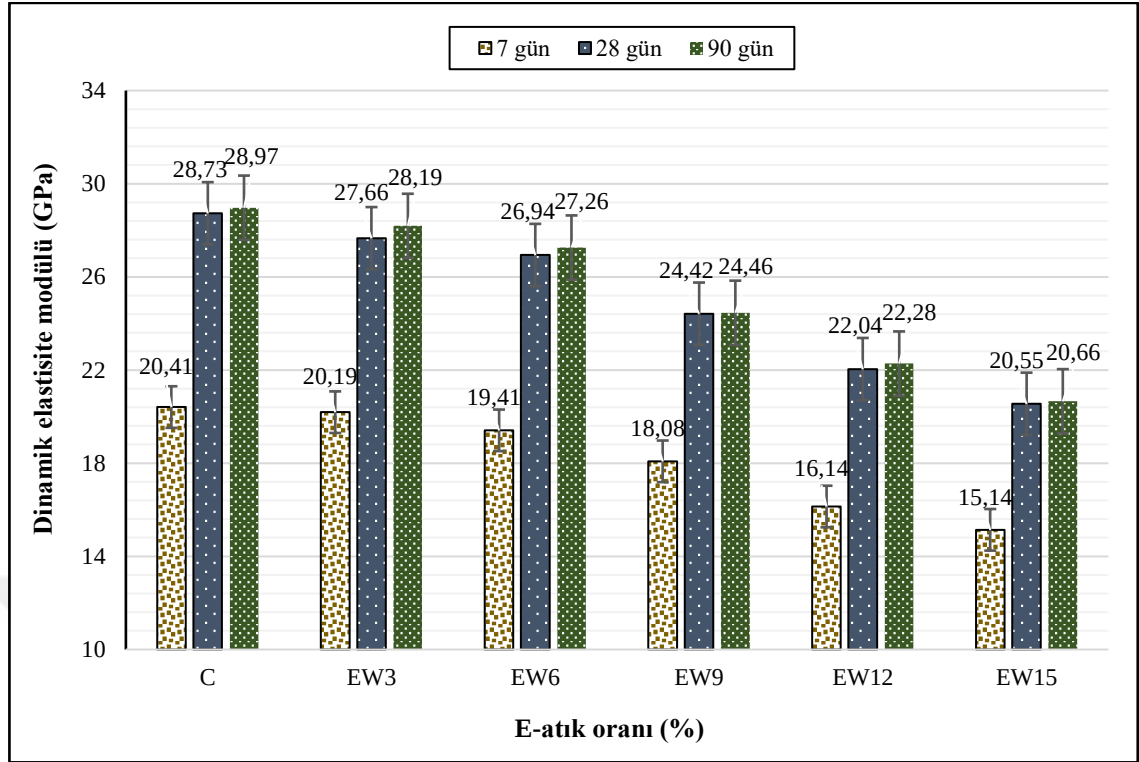
güne yükselmesi (erken yaştan ileri yaşa) beraberinde UPV değerlerinde de artış getirmiştir. Örneğin %6 e-atıklı polimer betonun (EW6/7) 7 günlük UPV sonucu 3412 m/s iken ileri yaşa gelindiğinde (EW6/90) bu değer %19 artarak 4045 m/s'ye yükselmiştir.

Şekil 5.3'de net bir şekilde görülebileceği gibi, e-atık katkılı polimer betonların 7 günden 28 güne kürlenmesi sonucunda UPV'lerdeki artış keskin olmakla birlikte bu durum 28 günden 90 güne ulaşıldığında çok az farklarla gerçekleşmiştir. Farklı oranlara sahip e-atıklı polimer betonların UPV sonuçları üzerinde kür parametresi olarak 28 gün dramatik etki gösterse de 90 gün gibi ileri yaşlarda anlamlı bir UPV değer artışı elde edilememiştir. E-atık katkılı polimer beton grupları arasında tüm günler için en yüksek UPV değerleri %3 e-atık kullanılan polimer betondan elde edilmiştir.

IS 13311 (1992) standardı, betonların UPV sonuçlarına göre bir sınıflandırma yapmıştır. Buna göre UPV'si 3000-3500 m/s olan betonlar orta, 3500-4500 m/s olan betonlar iyi ve 4500 m/s'den büyük olan betonlar ise mükemmel kalitede sınıflandırılmaktadır. Bu çalışma sonucunda hem kontrol hem de farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonlar 7 gün için orta, 28 ve 90 gün için iyi kalite sınıfına girmiştir. Ayrıca bu çalışma ile polimer betonlarda e-atık kullanımının maksimum oranı olan %15'te bile orta ve ileri yaşlarda UPV açısından beton kalitesinin önemli ölçüde etkilenmeyip iyi kalitede olacağı sonucuna varılmıştır.

5.4. Dinamik Elastisite Modülü

Dinamik elastisite modülü deney sonuçları, polimer betonların yoğunluk, UPV değerleri ile poisson oranı literatürden hareketle (Nunes vd., 2011) yaklaşık 0,2 kabul edilerek Denklem (2) aracılığıyla belirlenmiş ve Şekil 5.4'te verilmiştir (Rao vd., 2016; Thomaz vd., 2021). Polimer betonların dinamik elastisite modülü değerleri, UPV deney sonuçlarına paralel bir şekilde e-atık oranı arttıkça polimer betonların dinamik elastisite modülü değerleri tüm yaşlar için azalmıştır. Örneğin 28 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde, %12 e-atık katkılı polimer betonun (EW12/28) dinamik elastisite modülü (22,04 GPa), kontrol betonuna (C/28) (28,73 GPa) göre %23 oranında düşmüştür.



Şekil 5.4. Dinamik elastisite modülü ile e-atık oranı ve beton yaşı arasındaki ilişki

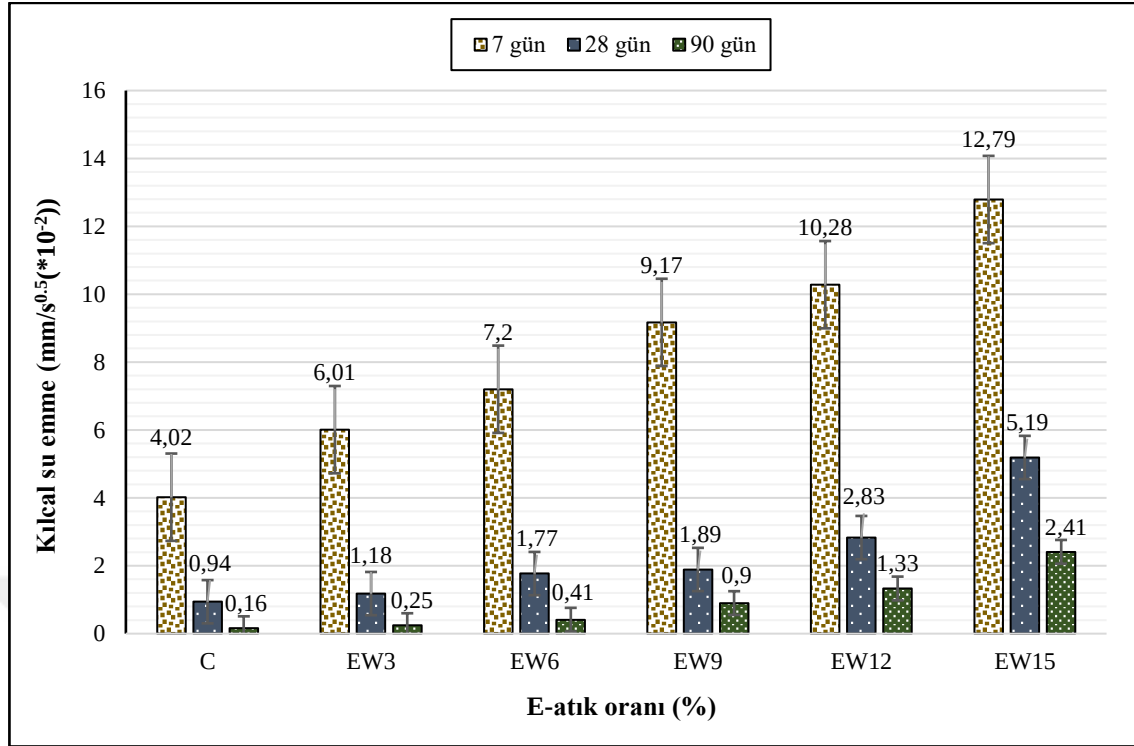
90 gün sonunda kontrol betonu ile %3 e-atıklı polimer betonun (EW3) dinamik elastisite modülü değerleri arasındaki fark %2,7 iken, e-atık oranı %15 ile en yükseğe çıktığında dinamik elastisite modülü farkı yaklaşık 10 kat artarak %29'a yükselmiştir. E-atığın harçlarda agrega olarak kullanıldığı bir çalışma sonucunda da (Makri vd., 2019), sonucunda da e-atık oranı arttıkça elastisite modülü değerlerinde azalmalar meydana geldiği bildirilmiştir. Polimer betonlarda artan oranlarda e-atık kullanımıyla birlikte dinamik elastisite modülü sonuçlarının azalması üzerinde, e-atıkların yoğunluğunun doğal agregalara göre düşük oluşu, dolgu malzemesi ile matris arasındaki bağın zayıflığı, üretimde yer alan atıkların parçacık boyutu gibi nedenlerin etkili olduğu düşünülmektedir (Záleská vd., 2018; Evram vd., 2020; Maherzi vd., 2020; Martínez-López vd., 2021). Ayrıca reçine tipi ile reçine-dolgu malzemesi miktarlarının da polimer betonların elastisite modülü değerleri için önemli bir parametre olacağı belirtilmektedir (Gorninski vd., 2004; Esmaili vd., 2021).

Tıpkı UPV sonuçlarında olduğu gibi kür süresinin farklı e-atık katkılı polimer betonların dinamik elastisite modülü değerleri üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Örneğin %9 e-atıklı polimer betonun 7 günlük dinamik elastisite modülü (EW9/7) 18,08 GPa iken ileri yaşı

gelindiğinde (EW9/90) bu değer %35 artarak 24,46 GPa'ya yükselmiştir. Benzer gözlemler e-atığın kendiliğinden yerleşen betonlarda kullanımı sonucunda da yaşanmıştır (Sua-iam ve Chatveera, 2022). Erken (7 gün), orta (28 gün) ve ileri yaşlar (90 gün) göz önünde bulundurularak tüm e-atıklı polimer betonlar değerlendirildiğinde, en yüksek (kontrol betonuna çok yakın) dinamik elastisite modülü sonuçları, %3 e-atık katkılı polimer betonda gözlemlenmiştir.

5.5. Kılcal Su Emme

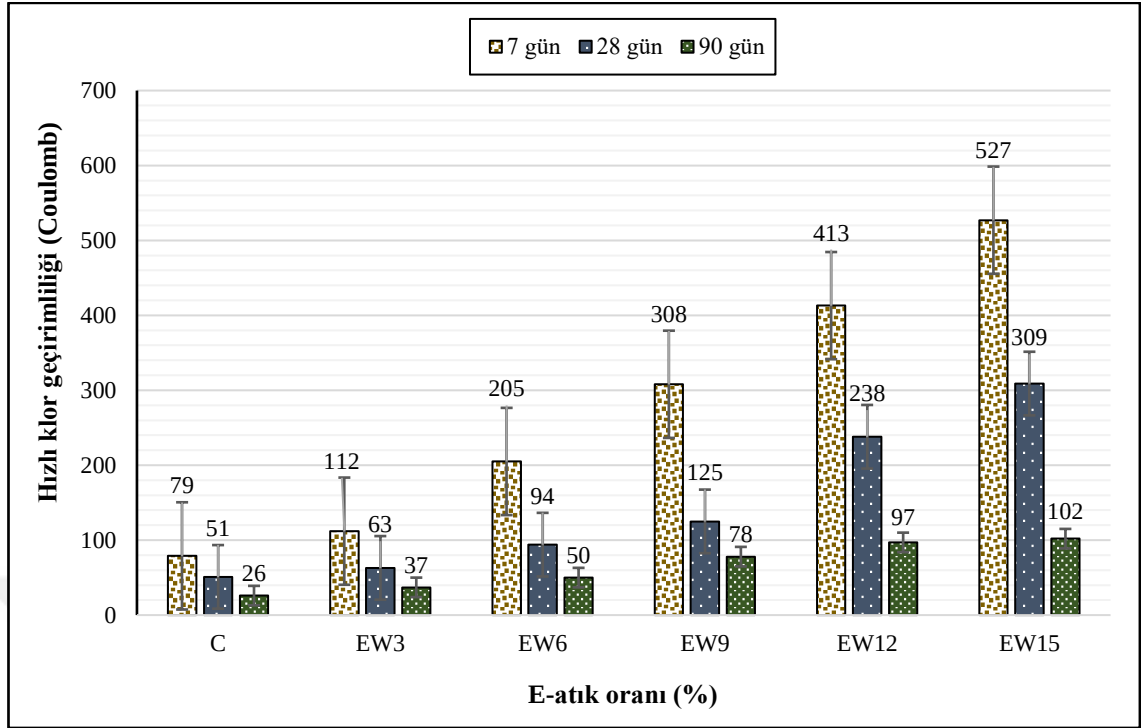
Şekil 5.5'de e-atık oranına bağlı olarak polimer betonların zaman içerisinde (7 günden 90 güne kadar) uygulanan kılcal su emme deney sonuçları verilmiştir. Şekil 5.5'den görülebileceği gibi polimer betonlarda e-atık kullanımı ile birlikte kılcal su emme katsayılarında artışlar görülmüştür. Erken yaşta (7 gün) sonuçlardaki artış belirgin olsa da orta (28 gün) ve ileri yaşlarda (90 gün) çok çok az farklarla bu durum yaşanmıştır. Genel olarak en yüksek kılcal su emme katsayısı $12,79 \text{ mm/s}^{0.5}(*10^{-2})$ ile %15 e-atık katkılı polimer betonda (EW15/7), en düşük kılcal su emme katsayısı ise $0,16 \text{ mm/s}^{0.5}(*10^{-2})$ ile kontrol betonunda (C/7) elde edilmiştir. 7 günden 28 ve 90 güne gelindiğinde farklı oranlara sahip polimer betonların kılcal su emme katsayılarında 5 ila 9 kata varan azalmalar meydana gelmiştir. Polimer betonlarda e-atık kullanımının beraberinde getirdiği çok düşük kılcal su geçirimsizlik değerleri üzerinde e-atığın var olan düşük su emme kapasitesinin belirleyici olduğu düşünülmektedir (Manjunath, 2016; Ullah vd., 2021; Ahmad vd., 2022). Ayrıca doymamış polyester reçine ile e-atığın ileri yaşlardaki yüksek aderansı sayesinde polimer beton içerisinde su girişine karşı geçirimsiz bariyerler oluşarak yoğun bir matris elde edilmiş olabileceği değerlendirilmektedir (Rasheed vd., 2021). E-atığın özellikle %9 oranına kadar kullanımı, 90 gün sonunda kontrol betonu ile çok yakın kılcal su emme katsayı değerlerine sahip polimer betonlar üretilebileceğini göstermiştir (bu değerler sırası ile 0,16, 0,25, 0,41 ve 0,9 $\text{mm/s}^{0.5}(*10^{-2})$ 'dur). Aynı zamanda bu değerlerin 0'a çok yakın elde edilmesi, e-atık içeren polimer betonların üstün bir performans sergileyerek kılcal su emme açısından neredeyse geçirimsiz betonlar üretilebileceğini bu tez çalışması ile ortaya çıkarmıştır.



Şekil 5.5. Polimer betonların kılcal su emmeleri ile e-atık oranları arasındaki ilişki

5.6. Hızlı Klor Geçirirmliliği

Farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların gün parametresine bağlı olarak hızlı klor geçirirmliliği deneyinden elde edilen değerler, Şekil 5.6’da verilmiştir. Deney sonuçlarına göre e-atık oranının artışı beraberinde polimer betonların hızlı klor geçirirmliliği değerlerini artırmıştır. 7 gün sonuçları incelendiğinde, örneğin %15 e-atık oranına sahip polimer betonun (EW15/7) kontrol betonundan (C/7) yaklaşık 6 kat daha yüksek hızlı klor geçirirmliliğine ulaştığı bulunmuştur (bu değerler sırasıyla 527 ve 79 Coulomb’tur). Ancak tıpkı kılcal su emme deney sonuçlarında olduğu gibi e-atıklı polimer betonların yaş alıp kür süresi arttıkça özellikle de ileri yaşlarda (90 gün) hızlı klor geçirirmliliği değerleri üzerinde e-atık oran artışının çok çok az bir etkisi olmuş ve tüm değerler ihmal edilebilir seviyede düşük çıkmıştır. Örneğin 90 gün sonunda kontrol betonu (C/90) ile %3 ila %9 aralığında e-atık oranına sahip polimer betonlara (EW3/90, EW6/90, EW9/90) ait hızlı klor geçirirmliliği değerleri sırasıyla 26, 37, 50 ve 78 Coulomb ile birbirine çok yakın elde edilmiştir. Bu değerlerin 0’a çok yakın oluşu, e-atık içeren polimer betonlar ile geçirimsiz bir beton elde edilebileceğinin bir kanıtı olup bilimsel açıdan heyecan verici bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 5.6. Polimer betonların hızlı klor geçirimsizliği sonuçları

Literatürde daha çok normal beton üzerine kaplama malzemesi veya çimentolu harçlara modifiye malzemesi olarak kullanılan polimerlerin, klor geçirimsizliğini azalttığı bildirilmiştir (Medeiros ve Helene, 2009; Ramli ve Tabassi, 2011). Ayrıca polimerlerin, betona emdirilerek hazırlandığı numunelerin klorür iyonu geçirimsizliği üzerinde olumlu etkiler gösterdiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Chen vd., 2006; Saeed, 2021). Bu çalışmanın ayırt edici ve özgün yanı olan doğrudan beton olarak üretilen polimer betonlarda ise klor geçirimsizliği sonuçları ciddi anlamda ümit verici olmuştur. Özellikle 28 ve 90 gün sonucunda %3'ten %15'e kadar e-atık kullanımının polimer betonların hızlı klor geçirimsizliği bakımından ihmal edilebilir düzeylerde çok güçlü bir performans sergilediği, literatürde ilk kez bu tez çalışması ile birlikte ortaya çıkarılmıştır.

Son olarak ASTM C 1202 (2022) standardına göre betonlar, hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney sonuçlarına göre sınıflandırılmıştır. Tablo 5.1'de bu sınıflandırma ile çalışmada üretilen polimer betonların hangi sınıfta yer aldıkları belirtilmiştir. Tablo 5.1'de açık bir şekilde görüldüğü gibi e-atıklı polimer betonların hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney sonuçları çok düşük ve ihmal edilebilir sınıfına girmiştir.

Tablo 5.1. Hızlı klorür iyonu geçirimsilik sınıfları ve beton grupları

Betondan geçen elektrik yükü miktarı (Coulomb)	Betonların klorür iyonu geçirimsiliği açısından değerlendirilmesi	Karışım kodları
>4000	Yüksek	-
2000-4000	Orta	-
1000-2000	Düşük	-
100-1000	Çok düşük	EW3/7, EW6/7, EW9/7, EW9/28, EW12/7, EW12/28, EW15/7, EW15/28, EW15/90
<100	İhmal edilebilir	C/7, C/28, C/90, EW3/28, EW3/90, EW6/28, EW6/90, EW9/90, EW12/90

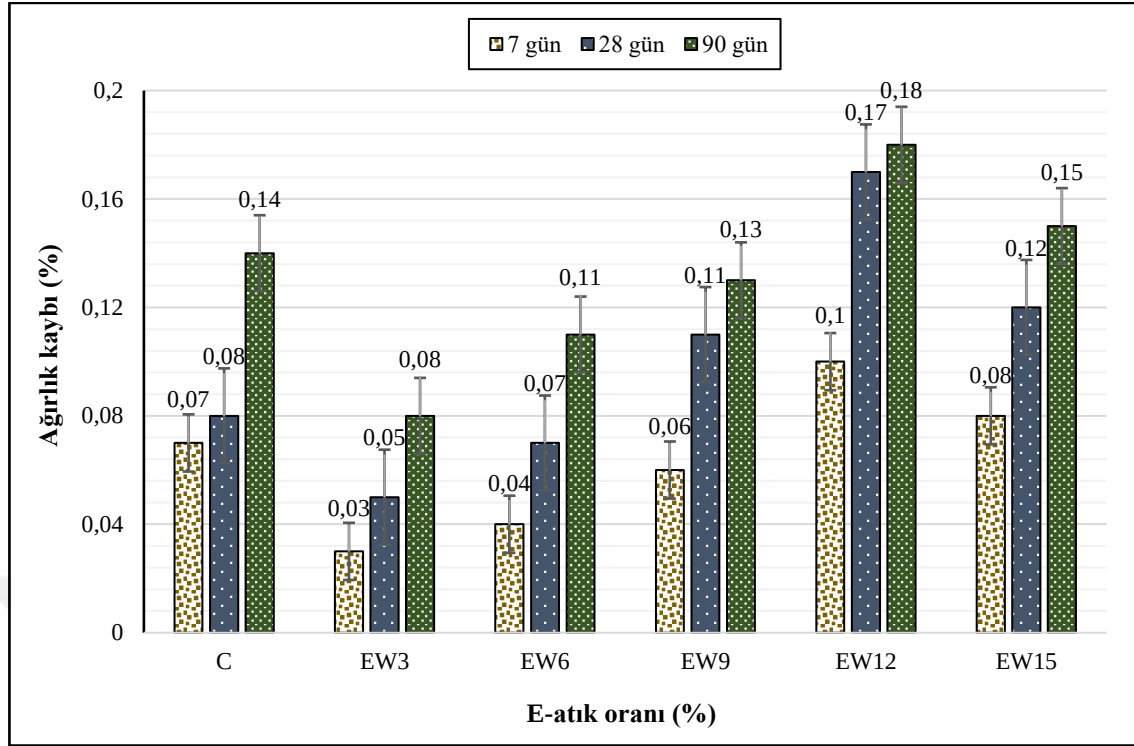
Böylece e-atığın agrega olarak polimer betonlarda değerlendirilerek önemli bir durabilite problemi olan klor geçirimsiliğine karşı üstün performansa sahip polimer betonlar üretilbileceği ortaya çıkarılmıştır.

5.7. Asit Atağı

Bu bölümde 7, 28 ve 90 gün boyunca asit atağına maruz kalan farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların ağırlık kayıpları, basınç dayanımı kayıpları ve görsel değerlendirmeleri, detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

5.7.1 Asit atağına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları

Şekil 5.7.1’de farklı günlerde asit atağı altında kalan polimer betonların yaşadıkları ağırlık kayıpları yüzdesel olarak verilmiştir. Buna göre polimer betonlarda e-atık oranı %3 olarak üretimde yer aldığında tüm günler için kontrol betonu da dâhil olmak üzere asit atağı sonrası en düşük ağırlık kayıpları yaşanmıştır. Örneğin 28 gün asite maruz kalan polimer betonların yüzdesel ağırlık kayıpları incelendiğinde, kontrol betonu (C/28) %0,08 ağırlık kaybı yaşarken, %3 e-atıklı polimer betonda (EW3/28) bu kayıp %37,5 azalarak %0.05 mertebesinde elde edilmiştir.



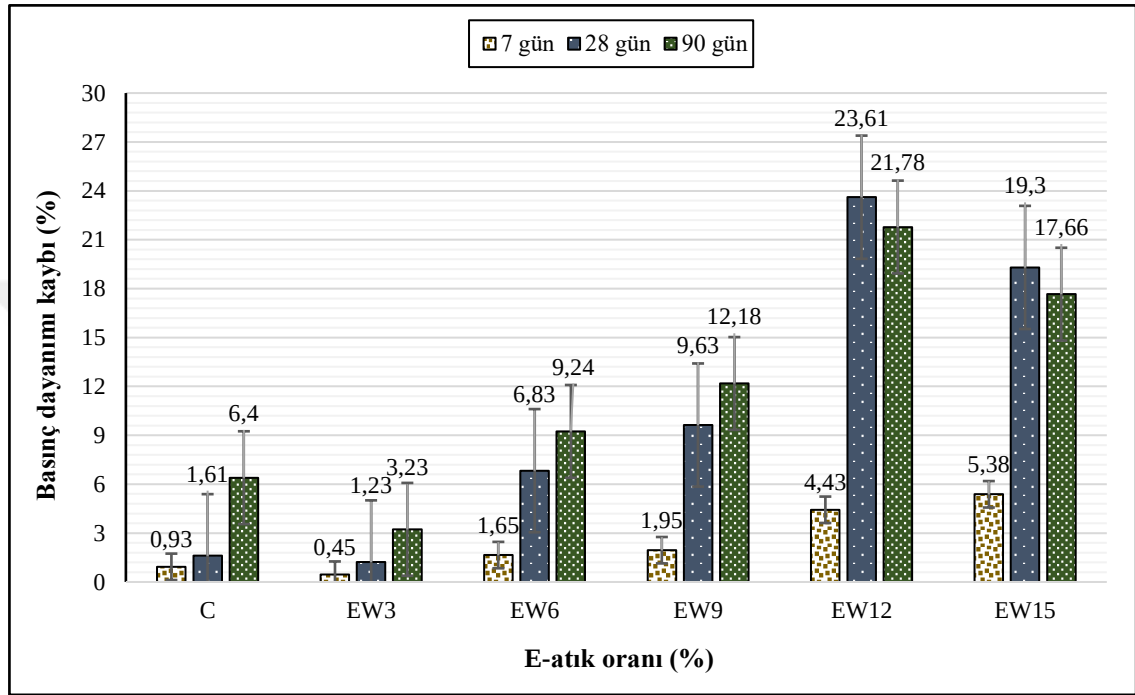
Şekil 5.7.1. Asit atağına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları

Bu durumun yaşanmasında, %3 e-atık oranı ile polimer beton üretimlerinde yer alan polyester reçine, sertleştirici ve hızlandırıcı malzemelerinin uyumunun optimum bir aderans sergileyerek deney esnasında da gözlemlendiği gibi başta işlenebilirlik olmak üzere performansı yüksek polimer betonlar üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. E-atığın oranı arttıkça gerçekleşen ağırlık kaybı da artarak %12 e-atıklı polimer betonda (EW12/28) %0,17 ile en yükseğe çıkmıştır. Benzer durum 7 ve 90 günlük sonuçlarda da görülmüştür. Erken yaştan (7 gün) ileri yaşı (90 gün) asit atağı, polimer betonların ağırlık kayıplarını artırmıştır. Genel olarak hem kontrol hem de farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların asit atağı sonrası uğradıkları ağırlık kayıpları yüzdesel olarak çok düşük seviyelerde bulunmuştur. Literatürdeki nadir çalışmalardan birisinde de asidik ortama maruz bırakılan reçineli betonların zaman içerisindeki kütle kayıplarındaki değişimlerin az farklarla elde edildiği bildirilmiştir (Ribeiro vd., 2002).

Bu tez çalışması ile %3 oranı başta olmak üzere e-atığın %6 ve %9 oranlarında (kontrol betonuna kıyasla) agrega olarak polimer betonda kullanıldığında asite karşı yüksek dirençli betonların üretilebileceği belirlenmiştir.

5.7.2. Asit atağına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları

Basınç dayanımı kayıpları Şekil 5.7.2’de verilmiştir. Tıpkı ağırlık kayıplarında olduğu gibi basınç dayanımı kayıpları sonuçlarında da polimer beton üretiminde %3 oranında e-atık kullanımı beraberinde tüm gruplar içerisinde en düşük dayanım kaybını getirmiştir.



Şekil 5.7.2 Asit atağına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları

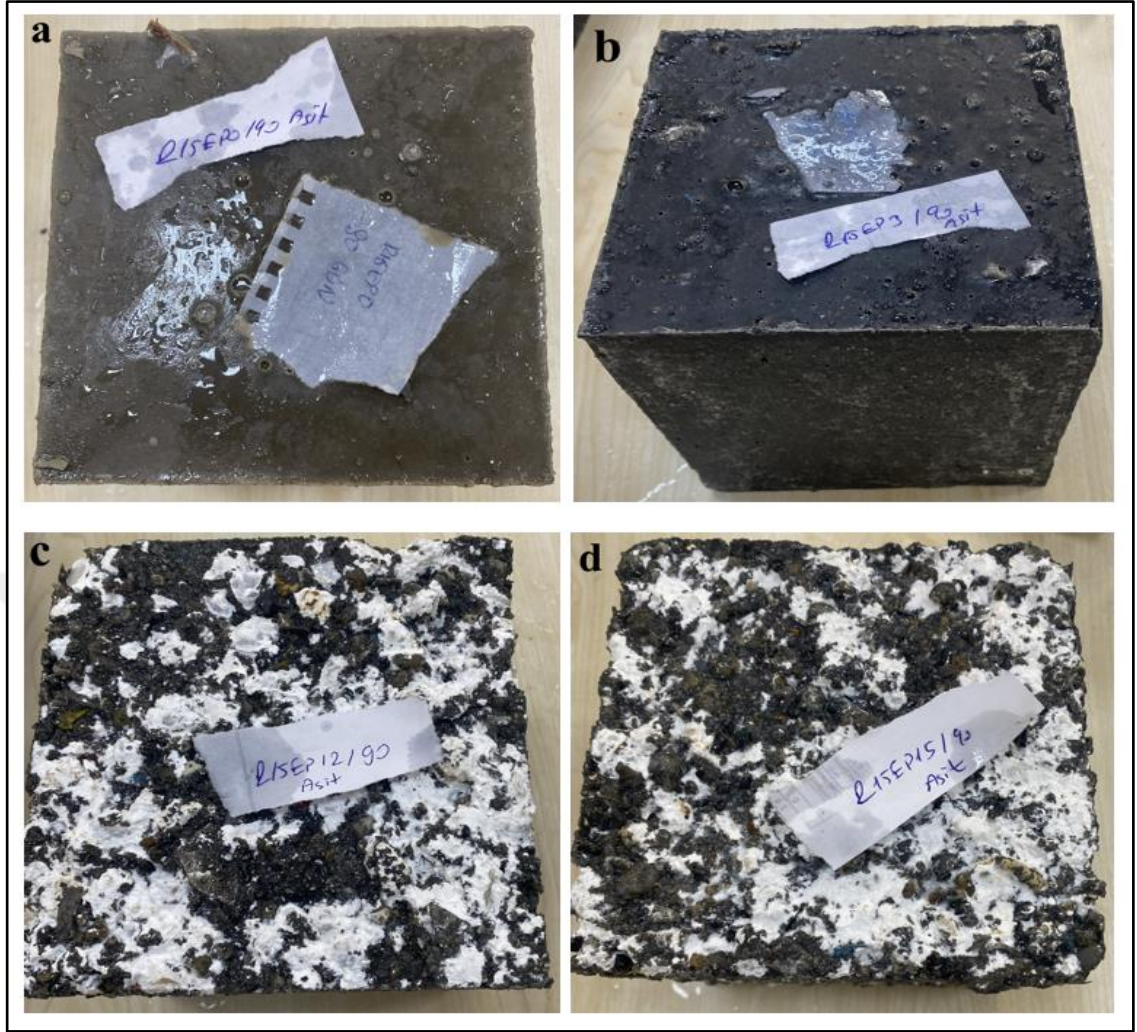
Örneğin 90 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde, kontrol betonunun (C/90) basınç dayanımı kaybı %6,4 olurken, %3 e-atıklı polimer betonda (EW3/90) bu kayıp %50 azalarak %3,23 seviyesinde gerçekleşmiştir. E-atık oranı arttıkça basınç dayanımı kayıpları EW12/90 ve EW15/90 için sırasıyla %21,78 ile %17,66 olarak elde edilmiştir. 7 ve 28 gün sonuçlarında da benzer trend yaşanmıştır. Ağırlık kayıplarında olduğu gibi polimer betonların asite maruziyet süresi 7 günden 90 güne çıktığında basınç dayanımı kayıpları da artmıştır. Jamshidi vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen literatürdeki çok az sayıda bulunan başka bir çalışma sonucunda da, polyester reçineli betonların 90 gün asit çözeltisinde tutulduktan sonraki basınç dayanım kayıplarının yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durumun nedenleri, uzun süre maruz kalan asitin reçineyi olumsuz anlamda etkileyerek e-atık oranı yüksek polimer betonu (agrega- polimer matris ara yüzeyini) bozması ve mikroçatlaklar meydana getirip dayanımı düşürmesi şeklinde değerlendirilebilir (Kajorncheappunngam vd., 2002; Ghassemi ve Toufigh, 2020). Ayrıca

polimer beton bileşimlerinin gözenek sayısı ile dayanım azalma seviyeleri arasında bir bağın olabileceği de düşünülmektedir (Gorninski vd., 2007).

Genel bir değerlendirme yapıldığında, özellikle %3 ve %6 oranları başta olmak üzere e-atıklı polimer betonların asit atağına karşı üstün performans sergilediği söylenebilir.

5.7.3. Asit atağına maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları

90 gün asit atağına maruz kalan polimer betonlara ait görseller Şekil 5.7.3’de verilmiştir. Buna göre polimer betonların görsel olarak asit atağı sonrası uğradıkları hasarlar, ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarına paralel bir şekilde elde edilmiştir. Ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarında en düşük sonuçların elde edildiği %3 e-atıklı polimer betonun (EW3/90), görsel olarak da asite karşı daha yüksek direnç gösterdiği, b görselinde net olarak görülebilmektedir. Öyleki %3 e-atıklı polimer betonun yüzey bozulması bile sınırlı olmuş, reçine adeta bir kalkan görevi görerek asitin polimer beton içerisine ulaşmasını engellemiştir (Jamshidi ve Pourkhorshidi, 2012). Yine ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarında en yüksek sonuçların elde edildiği %12 ve %15 e-atıklı polimer betonların (EW12/90 ve EW15/90) görsel olarak da en şiddetli hasarlara (pul pul dökülme, yüzeyde kapak atma, aşınma, ufalanma, beyaz lekelenme) uğradığı c ve d görsellerinde belirgin bir şekilde elde edilmiştir. Böylece bu çalışma sonucunda asit atağı sonrası polimer betonlarda yaşanan ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları ile görsel değerlendirme birbiriyle örtüşmüştür.



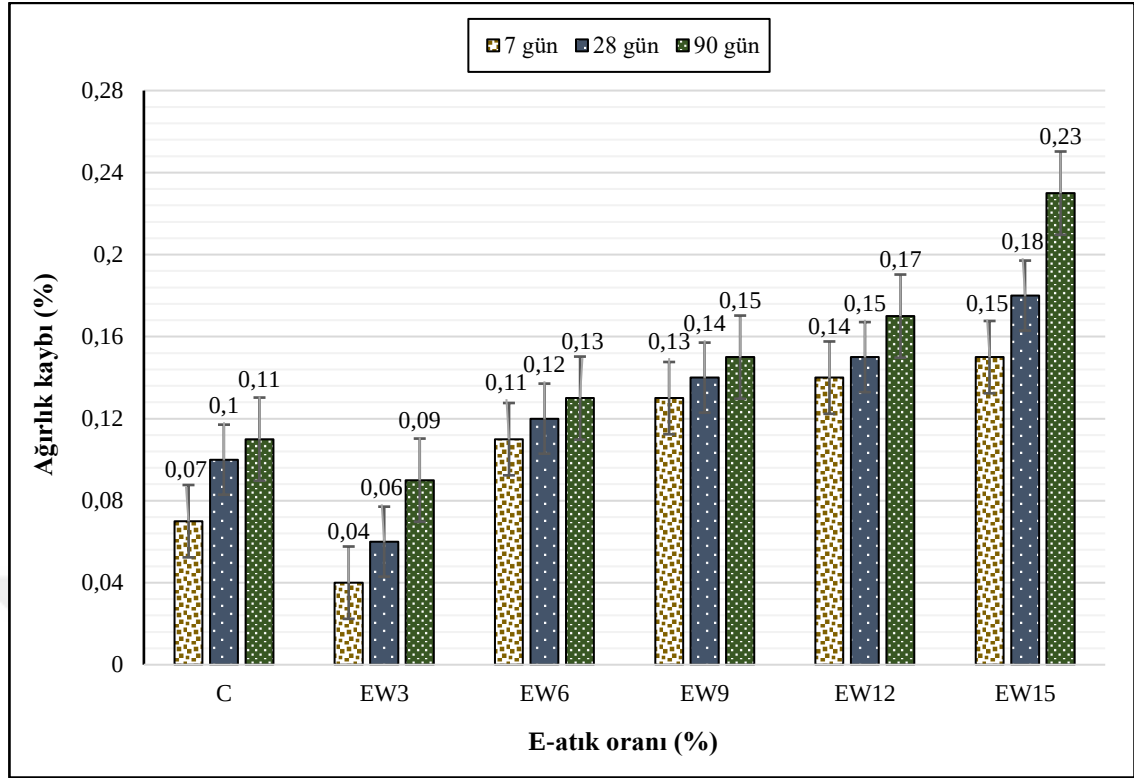
Şekil 5.7.3 90 gün boyunca asit atağına maruz kalan polimer betonların görselleri, **a:** Kontrol betonu (C/90), **b:** %3 e-atık içeren polimer beton (EW3/90), **c:** %12 e-atık içeren polimer beton (EW12/90), **d:** %15 e-atık içeren polimer beton (EW15/90).

5.8 Sülfat Atağı

E-atıklı polimer betonların erken, orta ve ileri yaş (sırasıyla 7, 28 ve 90 gün) sülfat atağına tabi tutulduktan sonraki ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları ile görsel değerlendirme sonucunda elde edilen analiz sonuçları bu bölümde yer almaktadır.

5.8.1 Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları

7, 28 ve 90 gün boyunca sülfat atağına maruz kalan polimer betonların yaşadıkları ağırlık kayıpları, Şekil 5.8.1’de verilmiştir.



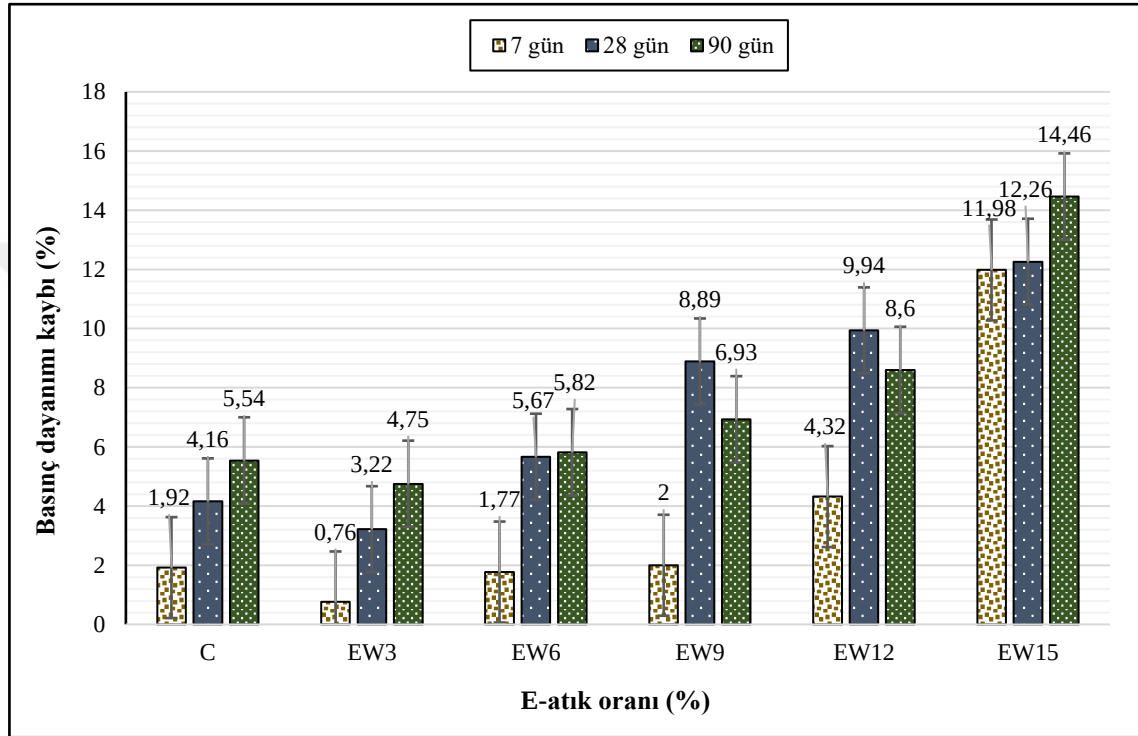
Şekil 5.8.1. Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları

Tüm gruplar içerisinde ve tüm günler baz alındığında sülfat atağına karşı en yüksek direnci göstererek en az ağırlık kaybının görüldüğü betonlar, %3 e-atık kullanılarak üretilen polimer betonlar olmuştur. Örneğin 7 günlük sülfat atağı sonrası kontrol betonunun (C/7) ağırlık kaybı %0,07 iken, %3 e-atıklı polimer betonda (EW3/7) bu kayıp %43 oranında daha az yaşanarak %0,04 gerçekleşmiştir. E-atık oranı ve gün süresi arttıkça ağırlık kayıplarında da artışlar gözlemlenmiştir. Benzer gözlem, Wu vd., (2022) tarafından da yapılmıştır. Bununla birlikte her ne kadar sülfat atağı sonucu ağırlık kayıplarında artışlar elde edilse de bu kayıpların çok düşük seviyelerde gerçekleştiği Şekil 5.10’da net olarak görülebilmektedir.

E-atığın agrega olarak değerlendirildiği polimer betonların, sülfat atağı gibi önemli bir durabilite problemine karşı etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucu bu tez çalışması ile ortaya çıkarılmıştır.

5.8.2 Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları

Şekil 5.8.2’de görülebileceği gibi, ağırlık kayıplarına benzer bir şekilde tüm gruplar arasında basınç dayanımı kaybının en az yaşandığı beton, %3 e-atıklı karışım polimer beton olmuştur.



Şekil 5.8.2. Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları

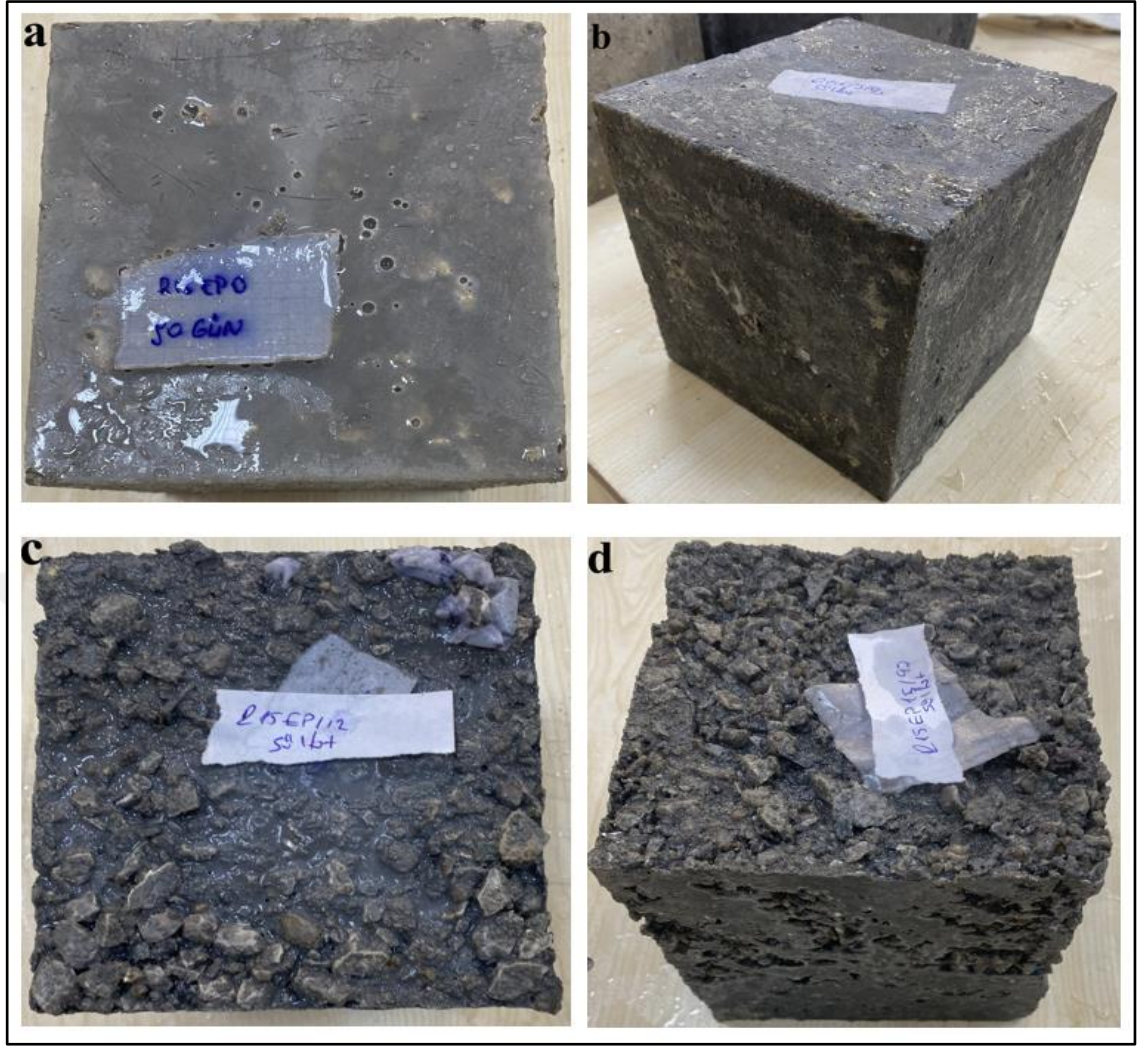
Örneğin 28 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde, kontrol betonunun (C/28) basınç dayanımı kaybı %4,16 olurken, %3 e-atıklı polimer betonda (EW3/28) bu kayıp %23 azalarak %3,22 seviyesinde gerçekleşmiştir. E-atık oranı %15’e yükseldiğinde ise (EW15/28), basınç dayanımı kaybı %12,26’ya çıkmıştır. 7 ve 90 gün sonuçlarında da benzer eğilim gerçekleşmiştir. Gün süresi arttıkça sülfat atağı nedeniyle yaşanan basınç dayanımı kayıpları da artmıştır. Normal betonda e-plastiklerin kullanıldığı bir çalışma sonucunda da 90 gün boyunca sülfat çözeltisine daldırılan betonların, %37’e varan dayanım kayıpları yaşadığı bildirilmiştir (Balasubramanian vd., 2021). Bu durumun meydana gelmesinde, e-atık oran artışının beraberinde getirmiş olduğu özellikle agrega-polimer matris ara yüzeyindeki daha fazla boşluk yolu ile sülfat iyonlarının yayılımının

kolaylaşması ve bu iyonların aderansı olumsuz etkileyip mikroçatlaklar oluşturarak polimer betonların dayanımını düşürmesinin etkili olduğu değerlendirilmektedir (Griffiths ve Ball, 2000; Hashemi vd., 2018; Ghassemi ve Toufigh, 2020).

Sonuç olarak, bu twz çalışması ile %3 e-atık oranının polimer betonlarda agrega olarak kullanımı ile sülfat atağına karşı dirençli betonlar üretilebileceği, bu tez çalışması ile literatüre kazandırılmıştır. Bu durumun yaşanmasında tıpkı asit atağında olduğu gibi %3 e-atık oranı ile polimer betonu oluşturan malzemelerin sergiledikleri üstün aderansın etkili olduğu düşünülmektedir.

5.8.3 Sülfat atağına maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları

Polimer betonların sülfat atağına 90 gün boyunca maruz kaldıktan sonraki görüntüleri Şekil 5.8.3’de verilmiştir. Asit atağı sonrası elde edilen görsel analiz sonuçlarına paralel bir şekilde sülfat atağı sonucunda da en az etkilenen polimer beton, %3 e-atığın agrega olarak kullanıldığı polimer beton (EW3/90) olmuştur. Bu durum b görselinde net bir şekilde görülmektedir. %12 ve %15 e-atıklı polimer betonlarda ise sülfat atağı sonrası belirgin hasarlar oluşmuştur. Bu hasarlar c ve d görsellerinde de görüldüğü gibi köşe ve kenarlardan başlayarak yüzeyin bozulması, kapak atma, pul pul dökülme, agrega-polimer matris ayrışması, soyulma şeklinde gerçekleşmiştir. Görsel analiz sonuçları, polimer betonların sülfat atağı sonrası yaşadıkları ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarını teyit eder nitelikte meydana gelmiştir. En az hasar %3, en fazla hasar ise %12 ve %15 e-atıklı polimer betonlarda gözlemlenmiştir.



Şekil 5.8.3. 90 gün boyunca sülfat atağına maruz kalan polimer betonların görselleri, **a:** Kontrol betonu (C/90), **b:** %3 e-atık içeren polimer beton (EW3/90), **c:** %12 e-atık içeren polimer beton (EW12/90), **d:** %15 e-atık içeren polimer beton (EW15/90).

6. SONUÇLAR

Polimer bağlayıcılar ile plastik kökene sahip e-atıkların aderansının/yapışmasının daha etkili ve güçlü olacağı, dolayısıyla bu atıkların polimer betonların geçirimsizlik özellikleri ile agresif çözeltilere karşı direncine etkisinin olumlu olacağı” hipotezine dayanmaktadır. Bu doğrultuda farklı e-atık oranlarına (%0, %3, %6, %9, %12 ve %15) sahip polimer betonların 7, 28 ve 90 günlük birim ağırlık, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV), dinamik elastisite modülü, kılcal su emme, hızlı klor geçirimsizliği, asit ve sülfat atağı deneyleri kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. E-atıklar polimer betonların birim ağırlıklarını düşürmüşlerdir. Ancak, araştırma sonuçları e-atıklar ile hafifi polimer betonlar üretilebileceğini göstermiştir. Nitekim %15 oranında e-atık içeren polimer betonların (EW15) birim ağırlıkları 1920 kg/m³ olarak bulunmuştur.
2. E- atıklar polimer betonların basınç dayanımlarının da düşmesine yol açmıştır. Kontrol betonundan sonra en yüksek basınç dayanımları, 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla 59,05 MPa, 64,5 MPa ve 73,05 MPa olacak şekilde %3 e-atık kullanılan polimer betonlardan elde edilmiştir. Ayrıca %3, %6 ve %9 e-atıklı polimer betonların kontrol betonu ile birlikte tüm günlerde 50 MPa ve üzerine çıkarak yüksek dayanıma sahip polimer betonlar üretilebileceği ortaya çıkarılmıştır.
3. UPV sonuçları üzerinde kür süresi açısından 7 günden 28 güne net bir artış gerçekleşirken bu durum 28 günden 90 güne anlamlı bir artış şeklinde gerçekleşmemiştir. Bu veride ayırt edici bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bu çalışma ile polimer betonlarda e-atık kullanımının maksimum oranı olan %15’te bile orta ve ileri yaşlarda UPV açısından beton kalitesinin önemli ölçüde etkilenmeyip iyi kalitede olacağı sonucuna varılmıştır.
4. Erken (7 gün), orta (28 gün) ve ileri yaşlar (90 gün) göz önünde bulundurularak tüm e-atıklı polimer betonlar değerlendirildiğinde, en yüksek (kontrol betonuna çok yakın) dinamik elastisite modülü sonuçları, %3 e-atık katkılı polimer betonda gözlemlenmiştir. Kür süresinin farklı e-atık katkılı polimer betonların dinamik elastisite modülü değerleri üzerinde olumlu etkisi olmuştur.

5. Kür süresi arttıkça farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların kılcal su emme katsayılarında 5 ila 9 kata varan azalmalar meydana gelmiştir. E-atığın özellikle %9 oranına kadar kullanımı, 90 gün sonunda kontrol betonu ile çok yakın kılcal su emme katsayı değerlerine sahip polimer betonlar üretilebileceğini göstermiştir (bu değerler sırası ile 0,16, 0,25, 0,41 ve 0,9 mm/s^{0.5}(*10⁻²)'dir). Aynı zamanda bu değerlerin 0'a çok yakın elde edilmesi, e-atık içeren polimer betonların üstün bir performans sergileyerek kılcal su emme açısından neredeyse geçirimsiz betonlar üretilebileceğini ortaya çıkarmıştır.
6. Özellikle ileri yaşlarda (90 gün) hızlı klor geçirimsizliği değerleri üzerinde e-atık oran artışının çok çok az bir etkisi olmuş ve tüm değerler ihmal edilebilir seviyede düşük çıkmıştır. Örneğin 90 gün sonunda kontrol betonu (C/90) ile %3 ila %9 aralığında e-atık oranına sahip polimer betonlara (EW3/90, EW6/90, EW9/90) ait hızlı klor geçirimsizliği sonuçları sırasıyla 26, 37, 50 ve 78 Coulomb ile birbirine çok yakın ve çok düşük değerlerde elde edilmiştir.
7. Polimer betonlarda e-atık oranı %3 olarak üretimde yer aldığında tüm günler için kontrol betonu da dâhil olmak üzere asit ve sülfat atağı sonrası en düşük ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları yaşanmıştır. %3 oranı başta olmak üzere e-atığın %6 ve %9 oranlarında (kontrol betonuna kıyasla) agrega olarak polimer betonda kullanıldığında asit ve sülfata karşı yüksek dirençli betonların üretilebileceği ifade edilebilmektedir. Ayrıca polimer betonların görsel olarak asit ve sülfat atağı sonrası uğradıkları hasarlar, ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarına paralel bir şekilde elde edilmiştir.
8. Çalışma sonucunda %3 e-atık oranının, gerçekleştirilen tüm deneyler için ideal oran olduğu ortaya çıkarılmıştır. E-atığın agrega olarak polimer betonlarda değerlendirilerek geçirimsizlik ve durabilite problemlerine karşı üstün performansa sahip betonlar üretilebileceği net olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışmanın hipotezi, kapsamlı deneyler sonucunda doğrulanmıştır.
9. Agrega kaynaklarının azaldığı, çevre kirliliğinin arttığı bir dönemde bu tez çalışması ile birlikte e-atıklı polimer betonların, sürdürülebilir beton konsepti açısından literatürde önemli bir boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.
10. Farklı reçine/dolgu oranı, e-atık oranları ve farklı tipte reçineler kullanılarak üretilecek polimer betonların bu çalışma dışındaki durabilite özelliklerinin incelenmesi, gelecekteki çalışmalarda araştırmacılara önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Abbas, S.N., Quereshi, M.I. & Abid, M.M. Tariq, M.A.U.R. Ng, A.W.M. (2022) “An investigation of mechanical properties of concrete by applying sand coating on recycled High-Density Polyethylene (HDPE) and Electronic-Wastes (E-Wastes) used as a partial replacement of natural coarse aggregates”, ***Sustainability***, 14(7), 4087.

Abbasnejadfar, M., Bastami, & M. Hashemi, S. (2022) “Experimental investigation on the stress-strain behavior of unsaturated polyester polymer concrete subjected to monotonic and cyclic loadings”, ***Journal of Building Engineering***, 48, 103966.

Abdel-Fattah, H. & El-Hawary, M. M. (1999) “Flexural behavior of polymer concrete”, ***Construction And Building Materials***, 13(5), 253-262.

Agavriloaie, L., Oprea, S. & Barbuta, M. Luca, F. (2012) “Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix”, ***Construction and Building Materials***, 37,190-196.

Aghdam, A.A., Niaki, M.H. & Sakkaki, M. (2023) “Effect of basalt fibers on fracture properties of nanoclay reinforced polymer concrete after exposure to elevated temperatures”, ***Journal of Building Engineering***, 76, 107329.

Agrawal, A. K. & Dhami, T. L. (2012) “Thermoplastic elastomers: Synthesis and applications”, ***International Journal of Polymer Science***,(1), 1-19.

Ahmad, F., Jamal, A. & Mazher, K. M. Umer, W. Iqbal, M. (2022) “Performance evaluation of plastic concrete modified with e-waste plastic as a partial replacement of coarse aggregate”, ***Materials***, 15(1), 175.

Ahmad, F., Qureshi, M.I. & Ahmad, Z. (2022) “Influence of nano graphite platelets on the behavior of concrete with E-waste plastic coarse aggregates”, ***Construction and Building Materials***, (316), 125980.

Ahmad, Z., Alsulamy, S. & Raza, A. Salmi, A. Abid, M. Deifalla, A.F. Khadimallah, M.A. Elhadi, K.M. (2023) “Life cycle assessment (LCA) of polypropylene fibers (PPF) on mechanical, durability, and microstructural efficiency of concrete incorporating electronic waste aggregates”, ***Case Studies in Construction Materials***, (18), e01979.

Akın, M. H., & Polat, R. (2022) “The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress–strain properties of polyester-based polymer concretes”, ***Construction And Building Materials***, 325, 126741.

Akkurt S (1991). Plastik Malzeme Bilgisi. İTÜ Mak.Fak. ***Birsen Kitabevi***, İstanbul.

Akman, M.S. (1987) Yapı Malzemeleri, ***İTÜ İnşaat Fakültesi Ders Notları***, İstanbul, 121.

Akovağ, D. (1993) Polimer Ders Notları, **O.D.T.Ü.**, Ankara, 56-60.

Akram, A., Sasidhar, C. & Pasha, K.M. (2015) “E-waste management by utilization of e-plastics in concrete mixture as coarse aggregate replacement”, **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, 4(7), 5087-5095.

Alagusankareswari, K., Kumar, S.S. & Vignesh, K.B. Niyas, K.A.H. (2016) “An experimental study on e-waste concrete”, **Indian Journal of Science and Technology**, 9(2), 1-5.

Ali, K., Qureshi, M.I. & Saleem, S. Khan, S.U. (2021) “Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete”, **Construction and Building Materials**, 285, 122952.

Ali, S.I.A. & Lublóy, E. (2020) “Effect of elevated temperature on the magnetite and quartz concrete at different W/C ratios as nuclear shielding concretes”, **Nuclear Materials and Energy**, 33,101234.

Allen, G. & Bevington, J. C. (1989) Polymer science and technology. **Pearson Education**, New York, 1-27.

Almeshal, I., Tayeh, B.A. & Alyousef, R. Alabduljabbar, H. Mohamed, A.M. (2020) “Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand”, **Journal of Materials Research and Technology**, 9(3), 4631-4643.

American Association of State Highway and Transportation Officials. “T 277 Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, USA.

Anonymous. (2003). **Official Journal of the European Union**, 528, 3007-3009.

Araghi, H. J., Nikbin, I. M. & Reskati, S. R. Rahmani, E. Allahyari, H. (2015) “An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various pet particles percentages against sulfuric acid attack”, **Construction And Building Materials**, 77, 461-471.

Asdollah-Tabar, M., Heidari-Rarani, & M. Aliha, M.R.M. (2021) “The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete”, **Composites Communications**, 25, 100684.

Ashori, A., Ayrimis, N., & Heydari, V. (2023). “Enhancing interfacial adhesion through coupling agent incorporation in plywood/plastic waste composite” materials. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 127, 103513.

ASTM International. “C267-18 Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes”, USA.

ASTM International. “C 1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, USA.

ASTM International. “C 1585 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-cement Concretes”, USA.

ASTM International. “C 597 Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete”, USA.

ASTM International. “C1012 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to A Sulfate Solution”, USA.

ASTM International. “C267 Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes”, USA.

Ataabadi, H. S., Sedaghatdoost, A. & Rahmani, H. Zare, A. (2021) “Microstructural characterization and mechanical properties of lightweight polymer concrete exposed to elevated temperatures”, *Construction And Building Materials*, 311, 125293.

Ataabadi, H.S., Zare, A. & Rahmani, H. Sedaghatdoost, A. Mirzaei, E. (2021)” Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation”, *Journal of Building Engineering*, 34, 101878.

Babalık, F. C. & Saylan, S. (1993) "Polimer betonun yapısı ve kullanım alanları", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(1), 119-129.

Bahij, S., Omary, S. & Feugeas, F. Faqiri, A. (2020) “Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review”, *Waste Management*, 113, 157-175.

Balasubramanian, B., Krishna, G.V.T.G. & Saraswathy, V. Srinivasan, K. (2021) “Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic”, *Construction and Building Materials*, 278, 122400.

Bassuoni, M. T. & Nehdi, M. L. (2007) “Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive ph reduction”, *Cement And Concrete Research*, 37(7), 1070-1084.

Baş, A.D. (2012) “Atık Devre Kartlarından Bakırın Biyoliç ve Kimyasal Liç Yöntemleriyle Geri Kazanımı”, (Yüksek Lisans Tezi), *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 1-114.

Bharani, S., Anupriya, R. & Jeevitha, V. Gnanajothi, G. (2022) “Influence of electronic waste and fly ash in strength and durability properties of concrete”, *Materials Today: Proceedings*, 62(4), 10.1016.

Bryan, C.G., Williamson, B.J. & Całus-Moszek, J. Yan Haute, Q. Guezennec, A-G. Gaydardzhiev, S. Wavrer, P. Frączek, R. (2020) “CEReS – co-processing of coal mine & electronic wastes: Novel resources for a sustainable future”, *Hydrometallurgy*, 197,105444.

Brydson, J. A. (1999) *Plastics materials. Butterworth-Heinemann*, Oxford, 1-920.

Bulut, H.A. & Şahin, R. (2017) “A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste”, *Composite Structures*, 178, 50-62.

Bureau of Indian Standards. “IS 13311, Part 1”, IS 13311-1: Method of Non-destructive testing of concret, Part 1: Ultrasonic pulse velocity: Bureau of Indian Standards: Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive, Son erişim tarihi: 20.11.2023.

Byron, D., Heitman, A. P. & Neves, J. De Souza, P. P. De Oliveira Patricio, P. S. (2021), “Evaluation of properties of polymer concrete based on epoxy resin and functionalized carbon nanotubes”, *Construction And Building Materials*, 309, 125155.

Cai, H., Yuan, B. & Yang, F. Chen, L. Feng, W. & Liang, Y. (2022) “Dynamic three-point flexural performance of unsaturated polyester polymer concrete at different curing ages”, *Journal Of Building Engineering*, 45, 103449.

Calderón-Morales, B. R., García-Martínez, A. & Pineda, P. García-Tenório, R. (2021) “Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: limits and potential in eco-efficient construction,” *Journal Of Building Engineering*, 44, 102506.

Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2018) *Materials science and engineering: An introduction (10th ed.)*, *John Wiley & Sons.*, United States of America, 1-975.

Chen, C., Huang, R. & Wu, J.K. Chen, C. (2006) “Influence of soaking and polymerization conditions on the properties of polymer concrete”, *Construction and Building Materials*, 20(9), 706-712.

Chen, D., Liu, F. & Yang, F. Jing, L. Feng, W. Lv, J. Luo, Q. (2018) “Dynamic compressive and splitting tensile response of unsaturated polyester polymer concrete material at different curing ages”, *Construction And Building Materials*, 177, 477-498.

Cowie, J. M. G. (2000) *Polymers: chemistry and physics of modern materials*, *CRC press*, Scotland Uk, 1-487.

Crawford, R. J. (2002) *Plastics engineering (2nd ed.) Elsevier Science*, Amsterdam, 1-352.

Çakır, İ. (2013) “Elektrikli ve Elektronik Atıkların Bertaraf Teknolojisi ve Floresan Lambaları Uygulaması”, (Yüksek Lisans Tezi), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-89.

Çevikel, B., (2009) “Elektronik Atıklardan Değerli Metal Geri Kazanımı”, (Yüksek Lisans Tezi), *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-59.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. “Çeşitli ve Son Hükümler”, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/yon-32055eee2024-0240209132729.pdf>, Son erişim tarihi:26.12.2022

Çiftlik, S. Vd., (2009) “Elektrikli ve Elektronik Atıkların (E-Atık) Yönetimi, Ekonomisi ve Metal Geri Kazanım Potansiyeli Bakımından Değerlendirilmesi”, *Türkiye’de Katı Atık Sempozyumu*, İstanbul, 1-7.

Dikeou, J.T. & Fowler, D.W. (1981) “Polymer concrete uses, materials and properties”, *ACI Special Publication*, 89, 44-45.

Elalaoui, O., Ghorbel, E. & Ouezdou, M.B. (2018) “Influence of flame retardant addition on the durability of epoxy based polymer concrete after exposition to elevated temperature”, *Construction and Building Materials*, 192, 233-239.

Esmaili, J., Andalibi, K. & Gencel, O. (2021) “Mechanical characteristics of experimental multi-scale steel fiber reinforced polymer concrete and optimization by Taguchi methods”, *Construction and Building Materials*, 313, 125500.

Evram, A., Akçaoğlu, T. & Ramyar, K. Çubukçuoğlu, B. (2020) “Effects of waste electronic plastic and marble dust on hardened properties of high strength concrete”, *Construction and Building Materials*, 263(6), 1-10, 120928.

Farooq, A., Malik, M. A. & Tariq, T. Riaz, M. Haroon, W. Malik, A. Ur Rehman, M. (2019). “Impact on concrete properties using e-plastic waste fine aggregates and silica fume”, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 35(2), 103-118.

Farooq, M. & Banthia, N. (2022) “Strain-hardening fiber reinforced polymer concrete with a low carbon footprint”, *Construction And Building Materials*, 314, 125705.

Ferdous, W., Manalo, A. & Aravinthan, T. Erp, G.V. (2016) “Properties of epoxy polymer concrete matrix: Effect of resin-to-filler ratio and determination of optimal mix for composite railway sleepers”, *Construction and Building Materials*, 124, 287-300.

Ferdous, W., Manalo, A. & Wong, H.S. Abousnina, R. AlAjarmeh, O.S. Zhuge, Y. Schubel, P. (2020) “Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects”, *Construction and Building Materials*, 232, 117229.

Fischer, J., Bradler, P. R. & Schmidtbauer, D. Lang, R. W. Wan-Wendner, R. (2019) “Long-term creep behavior of resin-based polymers in the construction industry”, *Materials Today Communications*, 18, 60-65.

Forti, V., Baldé, C.P. & Kuehr, R. Bel, G. (2020) The global e-waste monitor 2020: quantities, flows, and the circular economy potential, *United Nations University, Bonn*, 120.

Gao, Y., Romero, P. & Zhang, H. Huang, M. Lai, F (2019)” Unsaturated polyester resin concrete: A review”, *Construction and Building Materials*, 228, 116709.

Gao, Y., Zhang, H. & Huang, M. Lai, F. (2019) “Unsaturated polyester resin concrete: A review”, *Construction And Building Materials*, 228, 116709.

Gao, Y., Zhang, H. & Kang, H. Huang, M. Lai, F. (2020) “Road performance of liquid nitrile-butadiene rubber modified unsaturated polyester resin concrete”, **Construction and Building Materials**, 263, 120479.

Geng, W., Li, C., Zeng, D., Chen, J., Wang, H., Liu, Z., & Liu, L. (2023). “Effect of epoxy resin surface-modified techniques on recycled coarse aggregate and recycled aggregate concrete”. **Journal of Building Engineering**, 76, 107081.

Ghassemi, P. & Toufigh, V. (2020) “Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments”, **Construction and Building Materials**, 234, 117887.

Ghassemi, P., Rajabi, H. & Toufigh, V. (2020) “Fatigue performance of polymer and ordinary cement concrete under corrosive conditions: A comparative study”, **Engineering Failure Analysis**, 111, 104493.

Gorninski, J. P., Dal Molin, D. C. & Kazmierczak, C. S. (2007) “Strength degradation of polymer concrete in acidic environments”, **Cement And Concrete Composites**, 29(8), 637-645.

Gorninski, J.P., Molin, D.C.D. & Kazmierczak, C.S. (2004) “Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete”, **Cement and Concrete Research**, 34(11), 2091-2095.

Gorninski, J.P., Molin, D.C.D. & Kazmierczak, C.S. (2007) “Comparative assessment of isophthalic and orthophthalic polyester polymer concrete: Different costs, similar mechanical properties and durability”, **Construction and Building Materials**, 21(3), 546-555.

Gökbaşı, F. (2021) “Çelik Lifli Polimer Betonların Mekanik Davranışı Üzerine Geri Dönüştürülmüş Araç Lastiği Parçacıkları ve Liflerinin Birleşik Etkisi”, (Yüksek Lisans Tezi), **Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Erzurum, 121.

Griffiths, R. & Ball, A. (2000) “An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete”, **Composites Science and Technology**, 60(14), 2747-2753.

Gu, L. & Ozbakkaloglu, T. (2016) “Use of recycled plastics in concrete: A critical review”, **Waste Management**, 51, 19-42.

Gupta, V. B. (2007) Handbook of thermoplastics, **CRC Press**, London, 1-30.

Hadigheh, S. A., Gravina, R. J. & Smith, S. T. (2017) “Effect of acid attack on FRP-to-concrete bonded interfaces”, **Construction And Building Materials**, 152, 285-303.

Hamdan, A. (2022) “Impact of partial replacement of coarse aggregate with electronic plastic waste on compressive strength of concrete”, **Materials Today: Proceedings**, 56, 143-149.

Hameed A.M. & Hamza, M.T. (2019) “Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials”, **Energy Procedia**, 157, 43-50.

Hamsavathi, K., Prakash, K.S. & Kavimani, V. (2020) “Green high strength concrete containing recycled Cathode Ray Tube Panel Plastics (E-waste) as coarse aggregate in concrete beams for structural applications”, **Journal of Building Engineering**, 30, 101192.

Harish, N. & Janardhan, P. (2021) “Support vector machine in predicting epoxy glass powder mixed cement concrete” **Materials Today: Proceedings**, 46, 9042-9046.

Hashemi, M. J. & Jamshidi, M. (2015) “Flexural behavior of polyester polymer concrete subjected to different chemicals”, **International Journal Of Engineering**, 28(7), 978-983.

Hashemi, M.J., Jamshidi, M. & Aghdam, J.H. (2018) “Investigating fracture mechanics and flexural properties of unsaturated polyester polymer concrete (UP-PC)”, **Construction and Building Materials**, 163, 767-775.

Heidarnezhad, F, Jafari, K. & Ozbakkaloglu, T. (2020) “Effect of polymer content and temperature on mechanical properties of lightweight polymer concrete”, **Construction and Building Materials**, 260, 119853.

Heidarnezhad, F., Jafari, K. & Ozbakkaloglu, T. (2020) “Effect of polymer content and temperature on mechanical properties of lightweight polymer concrete”, **Construction And Building Materials**, 260, 119853.

Hillmyer, M. A. (2014) “Introduction to polymer science and chemistry: A problem-solving approach. **CRC press**, London, 1-722.

Hongliang, Z., Gaowang, Z. & Feifei, H. Zengping, Z. Wenjiang, L. (2018) “A lab study to develop a bridge deck pavement using bisphenol A unsaturated polyester resin modified asphalt mixture”, **Construction and Building Materials**, 159, 83-98.

Hossain, M. M., Karim, M. R. & Hossain, M. K. Islam, M. N. Zain, M. F. M. (2015) “Durability of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: A review”, **Construction And Building Materials**, 93, 95-109.

Hsu, E., Durning, C.J. & West, A.C. Park, A.A. (2021) Enhanced extraction of copper from electronic waste via induced morphological changes using supercritical CO₂, Resources, **Conservation and Recycling**, 168, 105296.

I. Marie, (2016) “Zones of weakness of rubberized concrete behavior using the UPV”, **Journal of Cleaner Production**, 116, 217-222.

Ilankoon, I.M.S.K., Ghorbani, Y. & Chong, M.N. Herath, G. Moyo, T. Petersen, J. (2018) “E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery”, **Waste Management**, 82, 258-275.

Jafari, K., Tabatabaeian, M. & Joshaghani, A. Ozbakkaloglu, T. (2018) “Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation”, **Construction and Building Materials**, 167, 185-196.

Jamshidi, M. & Pourkhorshidi, A. R. (2012) “Modified polyester resins as an effective binder for polymer concretes”, **Materials And Structures**, 45(4), 521-527.

Jamshidi, M. & Pourkhorshidi, A.R. (2012) “Modified polyester resins as an effective binder for polymer concretes”, **Materials and Structures**, 45, 521-527.

Jamshidi, M., Alizadeh, M. & Salar, M. Hashemi, A. (2013) “Durability of polyester resin concrete in different chemical solutions”, **Advanced Materials Research**, 687, 150-154.

Jia, C., Das, P. & Kim, I. Yoon, Y. Tay, C.Y. Lee, J. (2022) “Applications, treatments, and reuse of plastics from electrical and electronic equipment”, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 110, 84-99.

Jin, N.J., Seung, I. & Choi, Y.S. Yeon, J. (2017) “Prediction of early-age compressive strength of epoxy resin concrete using the maturity method”, **Construction and Building Materials**, 152, 990-998.

Jo, B. W., Park, S. K. & Park, J. C. (2008) “Mechanical properties of polymer concrete made with recycled pet and recycled concrete aggregates”, **Construction And Building Materials**, 22(12), 2281-2291.

Jones, R. G. (1999) Polymers at surfaces and interfaces. **Cambridge University Press**, England, 127.186.

Junak, J., Junakova, N. & Csiszar, V. (2019) “Electronic waste as a filler in concrete”, **In Iop Conference Series: Materials Science And Engineering**, 549, 012037

Jung, K., Roh, I. & Chang, S. (2014) “Evaluation of mechanical properties of polymer concretes for the rapid repair of runways”, **Composites Part B: Engineering**, 58, 352-360.

Kajorncheappunngam, S., Gupta, R.K. & GangaRao, H.V.S. (2002) “Effect of aging environment on degradation of glass-reinforced epoxy”, **Journal of Composites for Construction**, 6(1), 105-112.

Kaliyavaradhan, S.K., Prem, P.R. & Ambily, P.S. Mo, K.H. (2022) “Effective utilization of e-waste plastics and glasses in construction products - a review and future research directions, Resources”, **Conservation and Recycling**, 176, 105936.

Kan, F. (2015) “Afyon Manda Kaymağı ve Kaymakaltı Sütlerinde Bazı Ağır Metallerin ICP-MS ile Araştırılması”, (Yüksek Lisans Tezi), **Afyon Kocatepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü**, Afyonkarahisar, 69.

Kandelbauer, A., Tondi, G. & Zaske, O. C. Goodman, S. H. (2022) Unsaturated polyesters and vinyl esters. In handbook of thermoset plastics, **William Andrew Publishing**, Norwich, 97-158.

Karthik, A., Sudalaimani, K. & Vijayakumar, C. T. (2017) “Durability study on coal fly ash-blast furnace slag geopolymer concretes with bio-additives”, **Ceramics International**, 43(15), 11935-11943.

Kayhan, E., & Demirer, A. (2016). Polimer işleme sektörlerindeki meslek hastalıkları, kazalar ve iş güvenliği. **Sakarya University Journal of Science**, 20(3), 497-507.

Kim, K., Urgessa, G.S. & Yeon, J.H. (2020) “Analysis and modeling of uniaxial compressive creep of MMA-modified unsaturated polyester polymer concrete”, **Journal of Materials Research and Technology**, 9(6), 12773-12782.

Kiruthika, C., Prabha, S. L. & Neelamegam, M. (2021) “Different aspects of polyester polymer concrete for sustainable construction” **Materials Today: Proceedings**, 43, 1622-1625.

Kovačević, T., Mijatov, S., Gržetić, J., Cakić, S., Fidanovski, B., & Brzić, S. (2024). “The effect of reactive plasticizer on viscoelastic and mechanical properties of solid rocket propellants based on different types of HTPB resin.” **Defence Technology**, 33, 66-77.

Kumar, K.S. & Baskar, K. (2015) “Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries”, **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 17, 718-724.

Kumar, P.K., Kumaran, A.S. & Kandasamy, A. Mohamed, M.J.S. (2022) “Strength characteristics of concrete using electronic plastic waste and coconut shell as natural aggregates”, **Materials Today: Proceedings**, 62(2), 504-511.

Kwan, W. H., Ramli, M. & Cheah, C. B. (2014) “Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment” **Construction And Building Materials**, 63, 62-71.

Lei, B., Yang, W., Guo, Y., Wang, X., Xiong, Q., Wang, K., & Li, W. (2024). “Interfacial adhesion between recycled aggregate and asphalt mastic filled with recycled concrete powder.” **Case Studies in Construction Materials**, 20, e02721.

Lin, C. H. & Yu, J. (2022) “By adding EVA to the UP resin-binding material, polymer permeable concrete can be mechanically improved research on improving strength”, **Materials**, 359, 129416.

Lin, C. H. & Yu, J. (2022) “Research on improving polymer pervious concrete mechanical strength by adding eva to up resin binder material”, **Construction And Building Materials**, 359, 129416.

Liu, F., Yu, W., Wang, Y., Shang, R., & Zheng, Q. (2022) “Curing kinetics and thixotropic properties of epoxy resin composites with different kinds of fillers”, *Journal Of Materials Research And Technology*, 18, 2125-2139.

Lokuge, W. & Aravinthan, T. (2013) “Effect of fly ash on the behaviour of polymer concrete with different types of resin”, *Materials&Design*, 51, 175-181.

Madhuri, P. V., Rao, B. K. & Chaitanya, A. (2021) “Improved performance of concrete incorporated with natural zeolite powder as supplementary cementitious material”, *Materials Today: Proceedings*, 47, 5369-5378.

Maherzi, W., Ennahal, I. & Benzerzour, M. Mammindy-Pajany, Y. Abriak, N. (2020) “Study of the polymer mortar based on dredged sediments and epoxy resin: Effect of the sediments on the behavior of the polymer mortar”, *Powder Technology*, 361, 968-982.

Makri, C., Hahladakis, J.N. & Gidarakos, E. (2019) “Use and assessment of “e-plastics” as recycled aggregates in cement mortar”, *Journal of Hazardous Materials*, 379, 120776.

Manjunath, B.T.A. (2016) “Partial replacement of e-plastic waste as coarse-aggregate in concrete”, *Procedia Environmental Sciences*, 35, 731-739.

Mark, J. E. (1996) Physical properties of polymers handbook, *Springer Science & Business Media*, Cincinnati, 197.

Martínez-Barrera, G., Del Coz-Díaz, J. J., Martínez-Cruz, E., Martínez-López, M., Ribeiro, M. C., Velasco-Santos, C., ... & Brostow, W. (2019) “Modified recycled tire fibers by gamma radiation and their use on the improvement of polymer concrete”, *Construction And Building Materials*, 204, 327-334.

Martínez-Barrera, G., Gencel, O. & Martínez-López, M. (2022) “Performance improvement of polymer concrete produced with unsaturated resin, by a post-cure process, polyester fibers and gamma radiation”, *Journal Of Building Engineering*, 59, 105117.

Martínez-López, Á., Martínez-Barrera, G. & Viguera-Santiago, E. Martínez-López, M. Gencel, O. (2022) “Mechanical improvement of polymer concrete by using aged polyester resin, nanosilica and gamma rays”, *Journal of Building Engineering*, 58, 105083.

Martínez-López, M., Martínez-Barrera, G. & Salgado-Delgado, R. Gencel, O. (2021) “Recycling polypropylene and polyethylene wastes in production of polyester based polymer mortars”, *Construction and Building Materials*, 274, 121487.

Medeiros, M.H.F. & Helene, P. (2009) “Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption”, *Construction and Building Materials*, 23(3),1476-1484.

Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003) “Concrete”, *PCA*, USA, 1-644.

Mohal, S., Singh, G. & Rachna. (2023) “Ultrasonic pulse velocity of recycled polymer concrete composites”, **Materials Today: Proceedings**, In Press, Baba Banda, 27.

Nadiu, Bolan. (1994) "Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilization of phosphates." **Biology and Fertility of Soils**, 18(4),311-319.

Najvani, M.A.D., Murcia, D.H. & Soliman, E. Taha, M.M.R. (2023) “Early-age strength and failure characteristics of 3D printable polymer concrete”, **Construction and Building Materials**, 394, 132119.

Nunes, L.C.S., Reis, J.M.L., Mattos, H.S.D.C. (2011) “Parameters identification of polymer concrete using a fracture mechanics test method and full-field measurements”, **Engineering Fracture Mechanics**, 78(17), 2957-2965.

Odian, G. (2004a). Principles of polymerization, **John Wiley & Sons**, New York, 1-776.

Odian, G., (2004b). Principles of Polymerization Fourth Edition. **John Wiley & Sons**, Inc., Publication, Canada, 1-839.

Okamoto, M. (2013) Polymer science: A comprehensive reference, **Elsevier**, United States of America, 1- 875.

Onaran, K. (2003) Malzeme Bilimi, **Bilim Teknik Yayınevi**, İstanbul, 377.

Oussama, E., Elhem, G. & Valérie, M. Mongi, B.O. (2012) “Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250 °C”, **Construction and Building Materials**, 27(1), 415-424.

Öztüre, G. (2015) “Bilişim Teknolojisi Öğretmenlerinin Elektronik Atıklar Konusundaki Farkındalık Düzeylerinin Belirlenmesi: İzmir İli Örneği”, (Yüksek Lisans Tezi), **Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 1-175.

Öztürk, M. (2013) “Polimerle Modifiye Edilmiş Hafif Betonun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, (Yüksek Lisans Tezi), **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 1-67.

Paul, D. R. & Newman, (2013), Polymer blends and composites: chemistry and technology. **John Wiley & Sons**, New York, 65-78.

Perkins, D.N., Drisse, M.B. & Nxele, T. Sly, P.D. (2014) “E-waste: A global hazard”, **Annals of Global Health**, 80, 286-295.

Pilato, L. A. & Wicks, Z. W. (2012) Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design, **CRC Press**, New York, 65-78.

Rahimi, S., Nikbin, I. M. & Allahyari, H. Habibi, S. (2016) “Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack”, **Journal Of Cleaner Production**, 126, 166-177.

Rajesh, R., Kanakadhurga, D. & Prabakaran, N. (2022) “Electronic waste: A critical assessment on the unimaginable growing pollutant, legislations and environmental impacts”, ***Environmental Challenges***, 7, 100507.

Ramli, M. & Tabassi, A.A. (2011) “Influences of polymer modification and exposure conditions on chloride permeability of cement mortars and composites”, ***Journal of Materials in Civil Engineering***, 24(2), 216-222.

Rao, S.K., Sravana, P. & Rao, T.C. (2016) “Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand”, ***International Journal of Pavement Research and Technology***, 9(4), 289-301.

Rasheed, Q., Sikandar, M.A. & Khan, M.H. Akash, K. Nasir, H. Khan, B.J. (2021) “Assessment of chloride-induced reinforcement corrosion protection of modified sulfur polymer composites”, ***Construction and Building Materials***, 268,121086.

Rebeiz, K.S. (1996) “Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste”, ***Construction and Building Materials***, 10(3), 215-220.

Rebeiz, K.S., Serhal, S.P. & Craft, A.P. (2004) “Properties of polymer concrete using fly ash”, ***Journal of Materials in Civil Engineering***, 16(1), 15-19.

Reshma, T. V., Kumar, P. C. & Khalid, S. (2023) “Influence of self-healing behavior of bacteria & e-waste incorporated concrete on its mechanical properties”, ***Materials Today: Proceedings***, Amsterdam, 48-72.

Reshma, T.V., Kumar, P.C. & Khalid, S. (2023) “Influence of self-healing behavior of bacteria & e-waste incorporated concrete on its mechanical properties”, ***Materials Today: Proceedings***,

Ribeiro, M. C. S., Nóvoa, P. R. & Ferreira, A. J. M. Marques, A. T. (2004) “Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions”, ***Cement And Concrete Composites***, 26(7), 803-809.

Ribeiro, M., Tavares, C.M.L. & Ferreira, A. (2002) “Chemical resistance of epoxy and polyester polymer concrete to acids and salts”, ***Journal of Polymer Engineering***, 22(1), 27-44.

Saçak, M. (2002) Polimer Kimyası, ***Gazi Kitabevi***, Ankara, 475.

Saeed, H. H. (2021) “Properties of polymer impregnated concrete spacers”, ***Case Studies In Construction Materials***, 15, e00772.

Saeed, H.H. (2021) “Properties of polymer impregnated concrete spacers”, ***Case Studies in Construction Materials***, 15, e00772.

Saikia, N. & Brito, J. (2012) “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review”, ***Construction and Building Materials***, 34, 385-401.

Samadi, M., Huseien, G. F., Lim, N. H. A. S., Mohammadhosseini, H., Alyousef, R., Mirza, J. & Abd Rahman, A. B. (2020) “Enhanced performance of nano-palm oil ash-based green mortar against sulphate environment”, *Journal Of Building Engineering*, 32, 101640.

Santhanam, N., Ramesh, B. & Pohsnem, F.K. (2020) “Concrete blend with E-waste plastic for sustainable future”, *Materials Today: Proceedings*, 22(3), 959-965.

Sarde, B. & Patil, Y. D. (2019) “Recent research status on polymer composite used in concrete-an overview”, *Materials Today: Proceedings*, 18, 3780-3790.

Senhadji, Y., Escadeillas, G. & Benosman, A.S. Mouli, M. Khelafi, H. Kaci, S.O. (2015) “Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29, 625-640.

Sevinç, A. H. & Durgun, M. Y. (2021) “A novel epoxy-based composite with eggshell, pvc sawdust, wood sawdust and vermiculite: an investigation on radiation absorption and various engineering properties”, *Construction And Building Materials*, 300, 123985.

Seymour, R. B., Carraher, C. E. & Carraher Jr, C. E. (2003) Polymer chemistry: An introduction, *CRC press*, New York, 1-902.

Shamili, S., Natarajan, C. & Karthikeyan, J. (2017) “An overview of electronic waste as aggregate in concrete, World Academy of Science, Engineering and Technology”, *International Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(10), 1423-1427.

Sharma, N., Sharma, P. & Kumar Parashar, A. (2022) “An experimental investigation of sustainable concrete by incorporating e-waste and fly ash”, *Materials Today: Proceedings*, 62(6), 4188-4193.

Shen, Y., Ma, X., Huang, J., Hao, F., Lv, J., & Shen, M. (2020) “Near-zero restrained shrinkage polymer concrete incorporating ceramsite and waste rubber powder”, *Cement And Concrete Composites*, 110, 103584.

Shi-Cong, K. & Chi-Sun, P. (2013) “A novel polymer concrete made with recycled glass aggregates, fly ash and metakaolin”, *Construction and Building Materials*, 41, 146-151.

Sikandar, M. A., Ullah, S., Umar, D., Bashir, M. T., Ali, L., Waseem, M. & Qazi, A. (2022) “Comparative performance evaluation of smart reversible thermochromic pigment-based cement and polymeric mortars”. *Journal Of Building Engineering*, 58, 105072.

Singh, G., Kumar, H. & Singh, S. (2019) “Performance evaluation-pet resin composite composed of red mud, fly ash and silica fume”, **Construction And Building Materials**, 214, 527-538.

Son, S. Yeon, J.H. (2012) “Mechanical properties of acrylic polymer concrete containing methacrylic acid as an additive”, **Construction and Building Materials**, 37, 669-679.

Sperling, L. H. (2006) Introduction to physical polymer science, **John Wiley & Sons**,

Stevens, M. P. (2002) Polymer chemistry: an introduction, **Oxford University Press**, England, 1-572.

Sua-iam, G. & Chatveera, B. (2021) “A study on workability and mechanical properties of eco-sustainable self-compacting concrete incorporating PCB waste and fly ash”, **Journal of Cleaner Production**, 329, 129523.

Sua-iam, G. & Chatveera, B. (2022) “Effect of printed circuit board dust on the workability and mechanical properties of self-compacting concrete: A preliminary study”, **Case Studies in Construction Materials**, 16, e00862.

Szajerski, P., Bogobowicz, A. & Bem, H. Gasiorowski, A. (2019) “Quantitative evaluation and leaching behavior of cobalt immobilized in sulfur polymer concrete composites based on lignite fly ash, slag and phosphogypsum” **Journal Of Cleaner Production**, 222, 90-102.

Şahin, H. H. (2023) “Tersine Lojistik Açısından Elektronik Atık Yönetiminin İncelenmesi ve Bilgisayar Atıkları Üzerine Bir Uygulama”, (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), **Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Bilecik, 3-135.

Taha, M. R., Genedy, M. & Ohama, Y. (2019) “Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete” **Woodhead Publishing**, Sawston, 391-408.

Tang, Y., Fu, Z., Raos, G., Ma, F., Zhao, P., & Hou, Y. (2024). “ Molecular dynamics simulation of adhesion at the asphalt-aggregate interface: A review.” **Surfaces and Interfaces**, 44, 103706.

Tasnim, S. & Shaikh, F. U. A. (2021) “Effect of chemical exposure on mechanical properties and microstructure of lightweight polymer composites containing solid waste fillers”, **Construction And Building Materials**, 309, 125192.

Tasnim, S., Shaikh, F.U.A. & Sarker, P.K. (2021) “Mechanical properties and microstructure of lightweight polymer composites containing mono and hybrid fillers sourced from recycled solid wastes”, **Construction and Building Materials**, 277, 122369.

Thillo, L.V., Blom, J. & Moreels, A. Craeye, B. (2021) “Influence of aggregates, glass fibre reinforcement and recycled aggregates on polyester mortar”, **Construction and Building Materials**, 293, 123534.

Thomaz, W.D.A., Miyaji, D.Y. & Possan, E. (2021) “Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates”, **Case Studies in Construction Materials**, 15, e00645.

Tominaga, Y., Zhang, C., Sato, K., & Imai, Y. (2023). “Improvement of interfacial adhesion between oxide ceramic nanoparticles and epoxy resin by wet-jet milling.” **Ceramics International**, 49(19), 31658-31665.

Topsakal, A., (2013) “Polimer Betonların Bazı Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi”, (Yüksek Lisans Tezi), **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 125.

Tran, N. P., Nguyen, T. N. & Ngo, T. D. (2022) “The role of organic polymer modifiers in cementitious systems towards durable and resilient infrastructures: A systematic review”, **Construction And Building Materials**, 360, 129562.

Türk Standartları Enstitüsü. “12350-6 Taze Beton Deneyi Bölüm 6: Yoğunluk”, Ankara, Türkiye.

Türk Standartları Enstitüsü. “12390-3 Sertleşmiş Beton Deneyi Bölüm 3: Numunelerin Basınç Dayanımı”, Ankara, Türkiye.

Türk Standartları Enstitüsü. “802 Beton Karışımlarının Tasarımı”, Ankara, Türkiye.

Türk Standartları Enstitüsü. “933-1 Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Elleme Metodu”, Ankara, Türkiye.

Ullah, S., Qureshi, M. I., Joyklad, P., Suparp, S., Hussain, Q., Chaiyasarn, K. & Yooprasertchai, E. (2022) “Effect of partial replacement of E-waste as a fine aggregate on compressive behavior of concrete specimens having different geometry with and without CFRP confinement”, **Journal of Building Engineering**, 50, 104151.

Ullah, Z., Qureshi, M.I. & Ahmad, A. Khan, S.U. Javaid, M.F. (2021) “An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of E-waste concrete”, **Journal of Building Engineering**, 38, 102177.

Utracki, L. A. (1998) “Polymer alloys and blends: Thermodynamics and rheology”, **Hanser Publishers**,

Vipulanandan, C. Paul, E. (1990) “Performance of epoxy and polyester polymer concrete”, **ACI Materials Journal**, 87(3), 241-251.

Vishwakarma, V. Ramachandran, D. (2018) “Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives-A review”, **Construction and Building Materials**, 162, 96-103.

Wang, J., Dai, Q. & Guo, S. Si, R. (2019) “Mechanical and durability performance evaluation of crumb rubber-modified epoxy polymer concrete overlays”, *Construction and Building Materials*, 203, 469-480.

Wang, S., Du, F., Alghamdi, S., Feng, J., Chen, F., Wang, Z., Wu, C., Xiong, H., Liu, K., Zheng, Y., Huston, D., Dewoolkar, M., & Tan, T. (2023). “Effects of loading rates on interfacial adhesion between aggregates and asphalt binders.” *Construction and Building Materials*, 408, 133454.

Wu, H., Miao, Y. & Zhu, H. Zhao, C. Shu, Z. Liu, C. (2022) “Erosion resistance behavior of recycled plastic concrete in sodium sulfate solution”, *Construction and Building Materials*, 324, 126630.

Yapıcı, E. (2016) “Elektronik Atıklardan Değerli Metallerin Biyosorpsiyon Yoluyla Geri Kazanımı”, (Yüksek Lisans Tezi), *Eskişehir Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 1-76.

Yazıcı, E.Y. (2012) “Elektronik Atıklardan Metallerin Fiziksel ve Hidrometalurjik Yöntemlerle Geri Kazanımı”, (Doktora Tezi), *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 1-165.

Yeon, K., Cha, J. & Yeon, J.H. Seung, I.B. (2014) “Effects of TMPTMA and silane on the compressive strength of low-temperature cured acrylic polymer concrete”, *Journal of Applied Polymer Science*, 131(20), 1-8.

Yeon, K., Choi, Y. & Kim, K. Yeon, J.H. (2017) “Flexural fatigue life analysis of unsaturated polyester-methyl methacrylate polymer concrete”, *Construction and Building Materials*, 140, 336-343.

Yeon, K., Yeon, J.H. & Choi, Y. Min, S. (2014) “Deformation behavior of acrylic polymer concrete: Effects of methacrylic acid and curing temperature”, *Construction and Building Materials*, 63, 125-131.

Yıldırım, Y.F. (2019). “Cam Lifi ve Cam Tozunun Polimer Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi”, (Yüksek Lisans Tezi), *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, 1-104.

Yu, H., Ge, J., Qian, G., Shi, C., Zhang, C., Dai, W., & Xie, T. (2023). “Evaluation of the interface adhesion mechanism between SBS asphalt and aggregates under UV aging through molecular dynamics.” *Construction and Building Materials*, 409, 133995.

Záleská, M., Pavlíková, M. & Pokorný, J. Jankovský, O. Pavlík, Z. Černý, R. (2018) “Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics”, *Construction and Building Materials*, 180, 1-11.

Zhang, J., Han, N. & Zhang, X. (2019) “Study on the performance of sulfonated polyether ether ketone (SPEEK) modified cementitious material under sulfuric acid corrosion”, *Construction and Building Materials*, 225, 910-918.

Zhang, Y., Chen, H. & Liu, L. (2019) “Effects of waste glass powder on the properties and sulfuric acid resistance of concrete”, ***Journal of Cleaner Production***, 237, 117712.

Zhao, W., Liu, X., Song, X., Zhang, C., Chen, H., Li, X., Hui, K., Zhao, W., Qiao, L., Zhu, H., Cheng, Y., & Wang, Z. (2024a). “Surface modification of epoxy resin by $\text{MnO}_2\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O-Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ for enhanced adhesion to electroless copper.” ***International Journal of Adhesion and Adhesives***, 130, 103611.

Zheng, Y., Zhang, Y. & Zhuo, J. Zhang, Y. Wan, C. (2022) “A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete”, ***Construction And Building Materials***, 359, 129360.

Zhou, S., Zhang, Z., Wang, G., Wang, Y., Wu, X., Ma, N., Zhang, X., Wang, Q., Li, R., Peng, Y., Wei, H., & Zhang, S. (2024b). “Novel stable aqueous emulsion of vinyl sizing agents for strong adhesion force between carbon fiber and vinyl resin.” ***Materials Science and Engineering: B***, 300, 117135.

Zou, Y., Gao, Y., Chen, A., Wu, S., Li, Y., Xu, H., Wang, H., Yang, Y., & Amirkhanian, S. (2024). “Adhesion failure mechanism of asphalt-aggregate interface under an extreme saline environment: A molecular dynamics study.” ***Applied Surface Science***, 645, 158851.