

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLYESTER VE VİNİLESTER REÇİNELİ FARKLI E-ATIK
ORANLARINA SAHİP POLİMER BETON KOMPOZİTLERİNİN
EKSTREM KOŞULLAR ALTINDAKİ PERFORMANSININ
İNCELENMESİ

Ayşegül DİYARBAKIR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi H. Alperen BULUT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2024

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

POLYESTER VE VİNİLESTER REÇİNELİ FARKLI E-ATIK ORANLARINA SAHİP POLİMER BETON KOMPOZİTLERİNİN EKSTREM KOŞULLAR ALTINDAKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Ayşegül DİYARBAKIR

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Halit Alperen BULUT

Bu çalışma, e-atıkların yapısının plastik kökenli oluşunun reçine ile üstün uyum göstererek ekstrem şartlar altında polimer betonların performansına etkisinin de olumlu olabileceği hipotezine dayanmaktadır. Bu amaçla, e-atıklar %0, %4, %8, %12, %16 ve %20 oranlarında polimer betonun agregalarını oluşturan kuvars agregası ve çakıl yerine kullanılmıştır. Doymamış polyester reçine ile vinilester reçinenin polimer betonların bağlayıcı malzemesi olarak seçildiği çalışmada, bu betonların ekstrem şartlar (50, 100, 150, 200, 250 ve 300 donma çözünme döngüsü) ile yüksek sıcaklık (50°C, 100°C, 150°C ve 200°C)) altındaki performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca polimer betonların SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri de yapılarak ekstrem şartlara maruz kalan betonların içyapılarındaki değişiklikler değerlendirilmiştir. Deneylerde e-atık kullanılmayan polimer betonlar kontrol betonlarını oluşturmuştur. Donma-çözünme deneyi açısından en olumsuz etkilenen betonların polyester reçine içeren farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonlar olduğu görülmüştür. Vinilester reçine ile birlikte kullanılan e-atıklarla üretilen polimer betonların donma-çözünmeye karşı davranışları daha üstün bir performans göstermiştir. Öyleki 300 donma-çözünme döngüsü sonunda kontrol ve e-atıklı vinilester reçineli polimer betonların ağırlık kayıpları %0.17 ile %0.22 arasında 0 değerine çok yakın gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, örneğin, PREP8'in donma-çözünme döngüsünden önceki basınç dayanımı 40.45 MPa iken, döngüden sonraki basınç dayanımı 34.2 MPa olarak elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıklar sonrası yaşanan ağırlık kayıpları üzerinde ise vinilester reçinenin polyestere göre daha olumsuz bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca ağırlık kayıpları üzerinde polyester reçineli polimer betonlarda 150°C eşik değer olmuşken bu durum vinilester reçineli polimer betonlarda 100°C olarak elde edilmiştir. Genel olarak her iki tipli reçine ve farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonlarda, 150°C'nin ayırt edici özellikte olduğu belirlenmiştir. Bu sıcaklık derecesinde polimer betonların tümünde basınç dayanımlarında kayıp değil kazanç elde edilmiştir. SEM analiz sonuçları, yüksek sıcaklık deneyi sonucu ulaşılan veriler ile uyum göstermiştir. E-atık oranlarına (özellikle %4 ve %8) ve reçine tipine bağlı olarak deneysel bulgular, bu çalışmanın hipotezini doğrulamıştır.

2024, 72 sayfa

Anahtar Kelimeler: Donma-çözünme döngüleri, Doymamış polyester reçine, E-atık, Polimer Beton, Vinilester reçine, Yüksek sıcaklık.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF POLYESTER AND VINYLESTER RESIN POLYMER CONCRETE COMPOSITES WITH DIFFERENT E-WASTE RATIOS UNDER EXTREME CONDITIONS

Ayşegül DİYARBAKIR

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

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Halit Alperen BULUT

This study is based on the hypothesis that the plastic-origin structure of e-waste shows excellent compatibility with resin and can positively affect the performance of polymer concrete under extreme conditions. For this purpose, e-waste was used in place of quartz aggregate and gravel, which constitute the aggregates of polymer concrete, at rates of 0%, 4%, 8%, 12%, 16%, and 20%. In the study where unsaturated polyester resin and vinyl ester resin were selected as the binder materials for the polymer concretes, the performance of these concretes under extreme conditions (50, 100, 150, 200, 250, and 300 freeze-thaw cycles) and high temperatures (50°C, 100°C, 150°C, and 200°C) was examined in detail. Additionally, the changes in the internal structures of the concretes exposed to extreme conditions were evaluated by performing SEM (scanning electron microscope) analyses of the polymer concretes. The polymer concretes without e-waste were used as control concretes in the experiments. It was observed that the polymer concretes containing polyester resin with different e-waste ratios were the most adversely affected in terms of the freeze-thaw test. The polymer concretes produced with e-waste combined with vinyl ester resin showed superior performance against freeze-thaw cycles. Indeed, after 300 freeze-thaw cycles, the weight losses of the control and e-waste vinyl ester resin polymer concretes were very close to zero, ranging between 0.17% and 0.22%. However, for example, while the compressive strength of PREP8 before the freeze-thaw cycle was 40.45 MPa, the compressive strength after the cycle was lower, at 34.2 MPa. It was determined that vinylester resin showed more adverse behavior compared to polyester regarding weight loss after high temperatures. Additionally, the threshold value for weight loss in polyester resin polymer concretes was 150°C, while this value was 100°C in vinyl ester resin polymer concretes. Overall, it was determined that 150°C was a distinguishing feature in polymer concretes with both types of resin and different e-waste ratios. At this temperature, all polymer concretes showed gains in compressive strength rather than losses. The SEM analysis results were consistent with the data obtained from the high-temperature test. Experimental findings depending on the e-waste ratios (especially 4% and 8%) and resin type confirmed the hypothesis of this study.

2024, 72 Pages

Keywords: E-waste, Freeze-thaw cycles, High temperature, Polymer concrete, Unsaturated polyester resin, Vinylester resin

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde bana sürekli destek olan, bilgi ve deneyimleriyle katkıda bulunan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi H. Alperen BULUT'a, yüksek lisans tezimin hazırlık sürecinde emeği olan ve çalışmamın sonuçlanmasında her zaman güç kaynağım olan sevgili eşim Mustafa TEMEL'e, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen canım aileme teşekkürü borç bilirim.

Ayşegül DİYARBAKIR

Temmuz, 2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	5
3.1. Polimer Malzemeler	5
3.2. Polimerlerin Sınıflandırılması	6
3.2.1 Termoplastikler	8
3.2.2 Termosetler	8
3.3. Polimerlerin Genel Özellikleri	9
3.4. Polimer Malzemelerin Diğer Bileşenleri.....	10
3.4.1. Solventler.....	10
3.4.2. Plastifiyanlar	10
3.4.3. Stabilizanlar	10
3.4.4 Dolgu maddeleri	10
3.4.5. Pigmentler.....	11
3.4.6. Katkı maddeleri	11
3.5. Polimerizasyon Oluşumu	11
3.6. Polimer Beton ve Kullanım Alanları.....	12
3.6.1. Polimer beton (PC)	13
3.7. Reçineler.....	14
3.7.1. Polyester reçine.....	14
3.7.2. Vinilester reçine.....	15
3.8. E-Atık Tanımı ve Zararları.....	15
3.9. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Yönetimi	17
3.10. E-Atık Geri Dönüşümü ve Geri Kazanımı	18
3.10.1. E-Atık toplanması.....	20
3.10.2. E-Atık taşınması	20

3.10.3. E-Atık depolanması	20
3.10.4. E-Atık imhası.....	20
4. MATERYAL YÖNTEM	21
4.1. Materyal.....	21
4.1.1. Polimer.....	21
4.1.2. Agregalar	21
4.1.3. Elektronik atık (E-atık).....	24
4.1.4. Sertleştirici ve hızlandırıcı malzemeler	24
4.2. Yöntem	25
4.2.1 Parametreler ve beton karışım dizaynı	25
4.2.2. Polimer beton üretimi	26
4.2.3 Deneyisel çalışmalar	27
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	29
5.1.Donma-Çözünme Deneyi Sonuçları.....	29
5.1.1 Donma-çözünme döngülerinden sonra polimer betonların ağırlık kaybı	29
5.1.2 Donma-çözünme döngülerinden sonra polimer betonların basınç dayanımı kaybı	31
5.1.3 Polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası görsel değerlendirme sonuçları.....	33
5.1.4 Polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası SEM analiz sonuçları	37
5.2. Polimer Betonların Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları	39
5.2.1 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası polimer betonların ağırlık kaybı	39
5.2.2 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı	42
5.2.3 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları.....	44
5.2.4 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası polimer betonların SEM analiz sonuçları	48
6. SONUÇLAR	52
KAYNAKÇA	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Polimerin yapısı	6
Şekil 3.2. Monomerlerin polimerizasyon reaksiyonları ile birbirine bağlanarak polimer moleküllerine dönüşmesi	7
Şekil 3.3. Termoplastik ve termoset polimer zinciri (Akman, 1987; Yıldırım, 2019).....	9
Şekil 3.4. Polimerlerin betonda üç farklı kullanımı (Özden, 2010; Bulut, 2016).....	13
Şekil 3.5. E-atık olabilecek bazı teknolojik cihazlar.....	16
Şekil 3.6. AEEE oluşum süreci (AEEE Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi 2016).....	18
Şekil 3.7. E-atıkların geri kazanım süreci (Eag Geri Dönüşün A.Ş.).....	19
Şekil 4.1. Karışımın tane büyüklüğü eğrisi.....	22
Şekil 4.2. Kuvars agregalarının elek analizi sonrası görüntüleri	23
Şekil 4.3. E-atıkların elek analizi sonrası görüntüleri	24
Şekil 4.4. Polimer beton üretimi	27
Şekil 4.5. Donma-çözünme testinin uygulama görseli.....	27
Şekil 4.6. Polimer betonlara ait sıcaklık dereceleri ve zamana bağlı yüksek sıcaklık prosedürü.....	28
Şekil 5.1. Polyester reçineli polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası ağırlık kayıpları.....	30
Şekil 5.2. Vinilester reçineli polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası ağırlık kayıpları.....	30
Şekil 5.3. Polyester ve vinilester reçineli polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası basınç dayanımı kayıpları	33
Şekil 5.4. Polyester reçineli polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrasındaki görüntüleri, a: Kontrol betonu (PRE0), b: %8 e-atıklı polimer beton (PRE8), c: %16 e-atıklı polimer beton (PRE16), d: %20 e-atıklı polimer beton (PRE20).....	34
Şekil 5.5. Vilester reçineli polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrasındaki görüntüleri, a: Kontrol betonu (VRE0), b: %8 e-atıklı polimer beton (VRE8), c: %16 e-atıklı polimer beton (VRE16), d: %20 e-atıklı polimer beton (VRE20).....	36
Şekil 5.6. Polyester reçineli polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrası SEM görüntüleri, a: Kontrol betonu (PRE0), b: %8 e-atık katkı polimer beton (PRE8), c: %16 e-atık katkı polimer beton (PRE16), d: %20 e-atık katkı polimer beton (PRE20)	37
Şekil 5.7. Vinilester reçineli polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrası SEM görüntüleri, a: Kontrol betonu (VRE0), b: %8 e-atık katkı polimer beton (VRE8),	

c: %16 e-atık katkılı polimer beton (VRE16), d: %20 e-atık katkılı polimer beton (VRE20).....	39
Şekil 5.8. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polyester reçineli polimer betonların ağırlık kayıpları.....	40
Şekil 5.9. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan vinilester reçineli polimer betonların ağırlık kayıpları.....	41
Şekil 5.10. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polyester reçineli polimer betonların basınç dayanımı kayıpları.....	43
Şekil 5.11. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan vinilester reçineli polimer betonların basınç dayanımı kayıpları.....	44
Şekil 5.12. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polyester reçineli polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları.....	45
Şekil 5.13. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan vinilester reçineli polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları.....	47
Şekil 5.14. Yüksek sıcaklık deneyi (100°C ve 200°C) sonrasında polyester reçineli polimer betonların SEM görüntüleri, a ve b: Kontrol betonu (PRE0), c ve d: %12 e-atık katkılı polimer beton (PRE12), e ve f: %20 e-atık katkılı polimer beton (PRE20).	49
Şekil 5.15. Yüksek sıcaklık deneyi (100°C ve 200°C) sonrasında vinilester reçineli polimer betonların SEM görüntüleri, a ve b: Kontrol betonu (VRE0), c ve d: %12 e-atık katkılı polimer beton (VRE12), e ve f: %20 e-atık katkılı polimer beton (VRE20).	50

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Reçinelerin teknik özellikleri.....	21
Tablo 4.2. Kuvars agregasının özellikleri	23
Tablo 4.3. Sertleştiricinin teknik özellikleri.....	25
Tablo 4.4. Hızlandırıcının teknik özellikleri.....	25
Tablo 4.5. Polimer beton karışım dizaynı (kg/m ³)	26
Tablo 5.1. Polimer betonların donma-çözünme deneyi öncesi basınç dayanımı sonuçları	31



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	<i>Derece</i>
<i>cm</i>	<i>Santimetre</i>
<i>dk</i>	<i>Dakika</i>
<i>g</i>	<i>Gram</i>
<i>kg</i>	<i>Kilogram</i>
<i>kN</i>	<i>Kilonewton</i>
<i>m</i>	<i>Metre</i>
<i>mm</i>	<i>Milimetre</i>
<i>MPa</i>	<i>Mega paskal</i>

Kısaltmalar

AEEE	Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların
E-atık	Elektronik Atık
EEE	Elektrikli ve Elektronik Eşyalar
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
VR	Vinilester Reçine

1. GİRİŞ

Geleneksel beton, birçok olumlu özelliği olmasına rağmen, bazı durumlarda istenilen özellikleri karşılayamamaktadır. Bu tür durumlarda geleneksel betonun bileşen malzemelerinde çeşitli değişiklikler yapılarak betonun özelliklerini iyileştirmek veya yeni özellikler kazandırmak amacıyla özel beton türleri geliştirmiştir. Bu çalışma özel beton türlerinden biri olan polimer beton (PC) üzerine yoğunlaşmıştır. Dolgu malzemeleriyle birlikte (örneğin kuvars kumu, çakıl gibi) bağlayıcı malzeme olarak reçineler kullanılarak üretilen yüksek performansa sahip kompozitler, polimer beton (PC) adıyla tanımlanmaktadır (Jo vd., 2008; Bărbuță vd., 2010; Niaki vd., 2018). Polimer betonlar, üstün dayanımı, agresif kimyasallara karşı yüksek dirençleri, sertleşme sürecinin hızlı oluşu, formülasyonundaki çok yönlülüğü gibi nedenlerle günümüzde inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Martínez-Barrera vd., 2022; Farooq ve Banthia, 2022). Çimento esaslı geleneksel betonların yerine alternatif bir yapı malzemesi olarak değerlendirilen polimer betonlar; drenaj sistemleri, havuzlar, su arıtma yapıları, özellikle eski yapıların hızlı onarımı gibi uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Ulu vd., 2022).

Normal betona kıyasla polimer betonların daha düşük geçirimsizlik, daha iyi esneklik, üstün korozyon direnci, daha iyi durabilite özellikleri ve daha yüksek basınç, eğilme ve çekme dayanımına sahip olduğu, literatürdeki çalışmalarda belirtilmiştir (Gupta vd., 1983; Ribeiro vd., 2002; Reis ve Ferreira, 2006; Esmaceli vd., 2021). Furan reçinesi, poliüretan reçine, üre-formaldehit reçinesi, epoksi reçine, vinilester reçine ve doymamış polyester reçine, polimer beton üretimlerinde en çok kullanılan reçine tiplerini oluşturmaktadır (Gorninski vd., 2007; Esmaceli ve Andalibia, 2019; Ma vd., 2021; Byron vd., 2021).

Günümüzün yüksek teknolojiye sahip dijital çağında elektronik atıklar (e-atık), kimyasal olarak zehirli yapısı, aşırı üretim yoğunluğu ve hızı, yüksek miktardaki hacimleri nedeniyle çevresel tehdit bakımından son derece kritik bir sorun haline gelmiştir (Rocha ve Penteado, 2021; Perea vd., 2021; Charitopoulou vd., 2022). Öyleki 2020 yılında dünya genelinde yılda 54 milyon ton e-atık üretiminin gerçekleştirildiği tahmin edilmektedir (Forti vd., 2020). Bu rakamın 2030 yılına gelindiğinde 75 milyon tona ulaşacağı

öngörülmektedir (Madhav vd., 2022). Ayrıca e-atıkların katı atık akışı içerisinde ağırlıkça %70 ile çok büyük bir orana sahip olduğu vurgulanmıştır (Hazra vd., 2019). Yapısında arsenik, civa, kurşun, kadmiyum, selenyum, baryum gibi zararlı elementler içeren e-atıklar; monitörler, piller, bilgisayarlar, beyaz eşyalar, televizyonlar, cep telefonları gibi elektronik aletlerden toplanmaktadır (Al-Salem vd., 2022). E-atıkların çevresel zehirliliği nedeniyle doğru bir şekilde ayrıştırılması, çöp depolama alanlarından kaçınılması, sürdürülebilirlik açısından geri kazanılması, dünya genelinde ülkeler arası uyumlu yasal mevzuatlar ile kontrol edilmesi gibi parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Barouta vd., 2022; Sua-iam ve Chatveera, 2022).

Polimer beton üretimlerinde agrega yerine e-atıkların yer alıp mekanik özelliklerin incelendiği literatürdeki ilk ve tek çalışma, Bulut ve Şahin (2017) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, e-atıkların yapısının plastik kökenli oluşunun reçine ile üstün uyum göstererek ekstrem şartlar (donma çözünme, yüksek sıcaklık) altında polimer betonların performansına etkisinin de olumlu olabileceği hipotezine dayanmaktadır. Bu amaçla, e-atıklar %0, %4, %8, %12, %16 ve %20 oranlarında polimer betonun agregalarını oluşturan kuvars agregası ve çakıl yerine kullanılmıştır. Doymamış polyester reçine ile vinilester reçinenin polimer betonların bağlayıcı malzemesi olarak seçildiği çalışmada, bu betonların ekstrem şartlar (donma çözünme (50, 100, 150, 200, 250 ve 300 döngü) ile yüksek sıcaklık (50°C, 100°C, 150°C ve 200°C) altındaki performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca farklı e-atık oranlarına ve farklı tipli reçinelere sahip polimer betonların SEM analizleri de yapılarak ekstrem şartlara maruz kalan betonların iç yapılarındaki değişiklikler değerlendirilmiştir. Deneylerde e-atık kullanılmayan polimer betonlar kontrol betonlarını oluşturmuş ve beton gruplarının tamamı deney sonuçlarına göre kıyaslanmıştır. Çalışma birçok açıdan özgün ve çığır açıcı olup ilk kez e-atıklı doymamış polyester ve vinilester reçineli polimer betonların ekstrem şartlar altındaki performansı incelenmiş olacaktır. Günümüzde devasa boyutlarda çevreye atılan e-atıkların polimer betonlarda agrega yerine yenilikçi bir malzeme olarak değerlendirilmesinin hem sürdürülebilirlik hem de doğal kaynakların korunması açısından çok kıymetli olduğu dikkate alındığında, bu çalışmadan elde edilecek sonuçların literatüre katkısının da son derece önemli olacağı düşünülmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez konusu kapsamında polimer beton ve e-atıklar ile donma-çözünme, yüksek sıcaklık konularını içeren çalışmalar, aşağıda kronolojik sıra ile özetlenmiştir.

Polimer beton ile ilgili literatürdeki çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Polyester ve epoksi polimer harçların ağır termal koşullar altında eğilme performansının incelendiği bir çalışma sonucunda (Ribeiro vd., 2004), epoksi harçların polyester harçlara göre sıcaklığa daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. Reis ve Ferreira (2006b), donma-çözünme ve termal bozulmaya maruz kalan lif takviyeli polimer betonun kırılma özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Oluşan donma hasarı ile birlikte test döngülerinin sıcaklığı arttıkça, eğilme elastikiyetinin azalıp kırılmanın daha sünek hale geldiği ortaya çıkarılmıştır. Özden (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda, reçine/dolgu oranının artışı ile polimer betonların donma-çözünme ve basınç dayanımlarının da artmış olduğu saptanmıştır. Başka bir çalışmada optimize edilmiş polimer betonun mekanik özelliklerine termal döngülerin etkisi araştırılmış (Shokrieh vd., 2011), sonuç olarak polimer betonların dayanım özellikleri üzerinde en kötüleştirici etkiyi 25°C ila 70°C döngünün yaptığı ifade edilmiştir.

Epoksi polimer betonun 250°C'ye kadar sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelendiği bir çalışma sonucunda (Oussama vd., 2012), optimum polimer içeriğinin %13 olduğu, epoksi polimer betonun çimento esaslı betondan 250°C altındaki sıcaklıklarda daha verimli olduğu görülmüştür. Geri dönüştürülmüş cam agregaları, uçucu kül ve metakaolin kullanılarak üretilen polimer betonların hem mekanik hem de geçirimsizlik özelliklerinde olumlu sonuçlar elde edildiği, başka bir çalışmada vurgulanmıştır (Shi-Cong ve Chi-Sun, 2013). Niaki vd. (2018), bazalt lif ve nanokil takviyeli polimer betonun mekanik ve termal özellikleri üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, yüksek mekanik özelliklere ve termal stabiliteye sahip hafif bir polimer beton üretilebileceğini göstermiştir.

Metalurjik atıkların polimer betonun özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışma sonucunda (Seco vd., 2020), bu atıkların doğal agrega yerine kullanılarak kimyasal ortamlara karşı direnci yüksek polimer betonlar üretilebileceği belirtilmiştir. Heidarneshad vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hafif polimer betonun

mekanik özelliklerine polimer içeriği ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Sıcaklığın +25°C'den -15°C'ye düşürülmesiyle basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımları ile elastisite modülü değerleri artarken, darbe enerjisi ile sünekliğin azaldığı ifade edilmiştir. Yüksek sıcaklıkların hafif polimer betonun mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışma sonucunda ise (Ataabadi vd., 2021), 250°C'yi geçen sıcaklıklarda hafif polimer beton özelliklerinde önemli bozulmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu bozulmaların SEM analiz görüntülerinden elde edilen polimer matris ile arayüzey geçiş bölgesinde (ITZ) oluşan çatlaklar ile teyit edildiği vurgulanmıştır.

E-atıkların beton üretimlerinde yer aldığı çalışmalar son derece sınırlıdır. Örneğin, betonda ince agrega yerine %7.5 oranında e-atık kullanımının basınç dayanımı açısından optimum oran olduğu, yapılan bir çalışma sonucunda ifade edilmiştir (Damal vd., 2015). Başka bir çalışmada (Suchithra ve Indu, 2015), iri agrega yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında e-atıklar kullanılarak elde edilen betonun %15'e kadar basınç dayanımının iyi performans sergilediği belirtilmiştir. Alagusankareswari vd. (2016), e-atıkları betonda ince agrega yerine kullanmış, kontrol betonu ile kıyaslandığında basınç ve yarmada çekme dayanımlarının azaldığını tespit etmiştir.

Bir diğer çalışma sonucunda (Ahirwar vd., 2016), e-atık oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin arttığı bildirilmiştir. Sabau ve Vargas (2018), yüksek oranlarda (%40, %50, %60) e-atıkların iri agrega yerine kullanılması sonucunda betonun hem yoğunluğunun hem de basınç dayanımının azaldığını ortaya çıkarmıştır. Santhanam vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda, e-atık oranının artışının betonun basınç ve eğilmede çekme dayanımlarını düşürdüğü vurgulanmıştır.

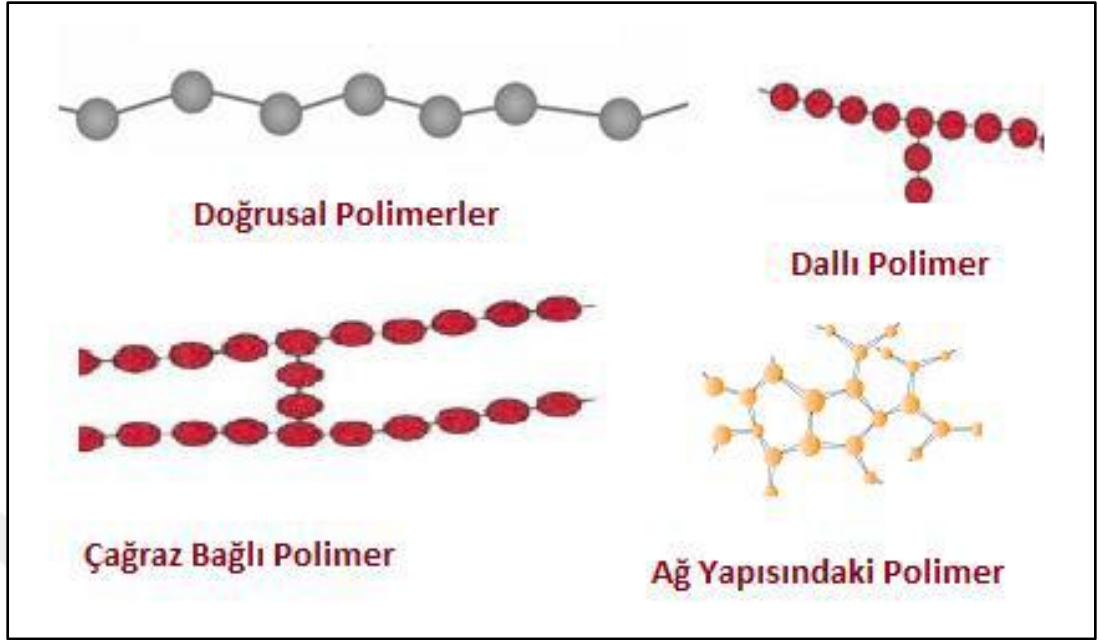
E-atıklı betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelendiği bir çalışma sonucunda (Ullah vd., 2021), mekanik özelliklerin azaldığı, durabilite özelliklerinde ise iyileşme görüldüğü rapor edilmiştir. E-atıklar üzerinde kum kaplama yapılarak betonun mekanik özelliklerinin araştırıldığı bir çalışma sonucunda ise (Abbas vd., 2022), kontrol betonuna göre işlenebilirliğin azaldığı, basınç, eğilmede ve yarmada çekme dayanımlarında artış görüldüğü bildirilmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Polimer Malzemeler

Polimerler, birçok endüstri sektöründe temel yapı taşları olarak kabul edilir ve özellikle inşaat, otomotiv, elektrik-elektronik gibi alanlarda hayati bir rol oynarlar. Tarihsel olarak, polimer malzemeler çok eski zamanlardan beri çeşitli uygulama alanlarında kullanılmıştır. Başlangıçta, bu uygulamalarda bitüm, doğal kauçuk, selüloz, nişasta gibi doğal polimerik maddeler yaygın olarak kullanılmıştır (Pişkin 1987; Özden 2010). Ancak, zamanla, bu doğal polimerik malzemelerin işlenmesi zorluklarla karşılaşmış ve ürünler belirli mekanik ve fiziksel gereksinimleri karşılayamamıştır. Bu eksiklikler ve diğer dezavantajlar nedeniyle, doğal polimerler, tarihsel olarak sentetik polimerlerin yükselişi ile yer değiştirmiştir (Pişkin 1987; Özden 2010). Bu, polimer malzemelerin evriminin bir sonucu olarak ortaya çıkan bir değişikliktir ve sentetik polimerlerin endüstriyel uygulamalarda daha iyi performans ve daha geniş kullanım alanları sunmasına işaret etmektedir (Pişkin, 1987; Allen ve Bevington, 1989).

Polimerler, genellikle yüz binlerce monomerin bir araya gelerek oluşturduğu uzun zincirlerden oluşur. Bu polimer zincirlerini oluşturan monomerlerin özellikleri ve birbirleriyle etkileşimleri, polimer malzemenin sonuçta sahip olacağı özellikleri belirler (Ghassemi vd., 2020). Polimer zincirinde yalnızca ana zincire bağlı yan grupların bulunduğu polimerlere doğrusal polimerler denir. Polimer zincirine yan grupların yanı sıra, kendisiyle aynı başka zincir gruplarının da bağlandığı polimerler ise dallanmış polimerler olarak adlandırılır. Dallanmış polimerler, yapı olarak doğrusal polimerlere benzese de viskozite, yoğunluk ve ışık saçma gibi özellikleri değişkenlik gösterir. Bu fark, yan dalların varlığından kaynaklanır. Farklı uzunluktaki zincir parçalarının birbirine çeşitli bölgelerinden bağlandığı polimerler ise çapraz bağlı polimerler olarak bilinir (Ekmen,2019). Günümüzde kullanılan birçok polimer çapraz bağlıdır ve bu çapraz bağlar, polimerlerin özelliklerini ve performansını önemli ölçüde etkiler (Yıldırım, 2019). Doğrusal, dallanmış ve ağ yapılı polimer yapıların basit gösterimleri aşağıda Şekil 3.1’de verilmiştir.

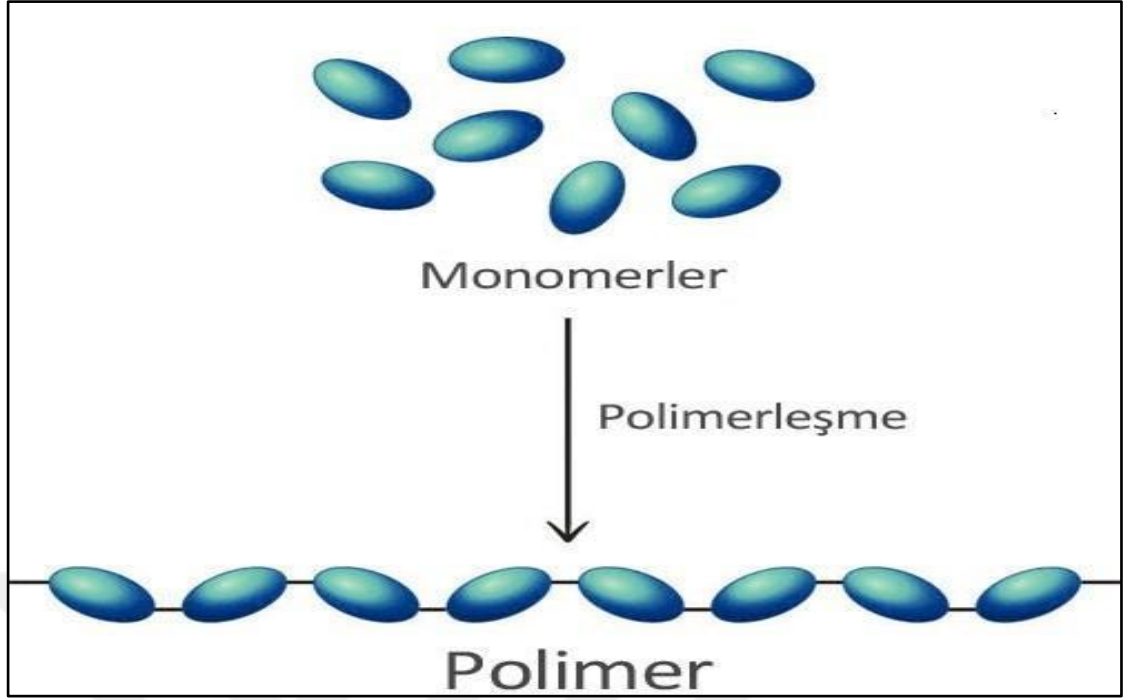


Şekil 3.1. Polimerin yapısı (Ekmen,2019)

Genel olarak, polimerlerin yapıları amorf (düzensiz) ve kristalin (düzenli) bölgeleri bir arada içerir. Kristalin bölgeler, malzemeye sertlik ve kırılmalık kazandırabilirken, aynı zamanda mukavemet sağlar. Amorf bölgeler ise malzemeye tokluk ve esneklik katar. Bu nedenle, polimer malzemelerin mekanik özellikleri, malzemenin içerdiği kristal yapıların oranıyla yakından ilişkidir. Doğrusal zincirler veya düzenli moleküler yapılar, kristal oluşunu kolaylaştırırken, moleküller arası çekim kuvvetleri de kristallliği arttırabilir (Baysal, 1981; Yıldırım, 2019).

3.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

Bir ya da daha fazla monomerin kovalent bağlar aracılığıyla birleşmesi sonucu oluşan büyük moleküllere polimer denir. Polimerler, "mer" veya "monomer" olarak adlandırılan basit birimlerden meydana gelir. "Polimer" kelimesi, Latince'de "çok" anlamına gelen bir kökten türemiştir. Monomerler, uygun koşullar altında polimerizasyon reaksiyonları ile kimyasal bağlar oluşturarak polimerleri meydana getirir (Ekmen, 2019).



Şekil 3.2. Monomerlerin polimerizasyon reaksiyonları ile birbirine bağlanarak polimer moleküllerine dönüşmesi (Ekmen, 2019)

Polimerler;

1. Molekül ağırlıklarına,
2. Doğada bulunup bulunmamasına ve sentez biçimine, (doğal veya yapay olarak)
3. Organik ve inorganik olmalarına,
4. Sentezleme tepkilerine, (basamaklı ya da zincir)
5. Zincirin kimyasal ve fiziksel yapısına, (lineer, dallanmış veya çapraz bağlı)
6. Isıya davranışına, (termoset veya termoplastik)
7. Zincir yapısına, (homopolimer veya kopolimer) göre sınıflandırılabilir (Özden Akkaya, 2010; Bulut, 2016).

Polimerlerin ana maddesi, selülozik maddeler, doğal gazlar veya petrolden elde edilen hammaddelerdir. Yapay olarak üretilen polimer malzemeler arasında elastomerler, fiberler ve plastikler bulunur. Genel olarak yapay ve doğal polimerler olmak üzere iki ana gruba ayrılrsa da polimerler çeşitli açılardan sınıflandırılabilir (Akovalı, 1993; Kayhan ve Demirer, 2016).

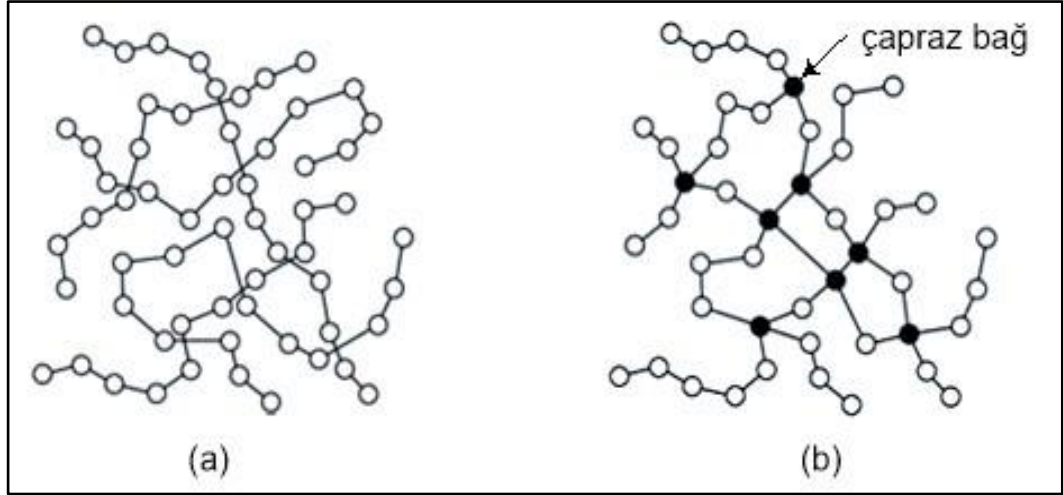
3.2.1 Termoplastikler

Termoplastikler, termal işleme maruz bırakıldıklarında yumuşak ve plastikleşen polimerlerdir. Dayanıklılık, esneklik, şeffaflık, kimyasal direnç, düşük yoğunluk ve ısıya karşı direnç gibi özelliklerle karakterizedir. Bu özellikler, plastik şişeler, tüpler, ambalaj malzemeleri, otomobil parçaları ve tıbbi cihazlar gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmalarını sağlar. (Kandelbauer vd., 2022).

3.2.2 Termosetler

Termoset, sert ve yüksek oranda çapraz bağlı bir polimer malzeme olduğundan ısıtıldığında sıvıya dönüşmez, kalıplanamaz veya şekillendirilemez. Termosetler, polimerizasyon sürecinin iki aşamasında oluşur. İlk aşamada, malzemenin içindeki monomerler, reaktörde lineer bir zincir oluşturmaya başlarlar. İkinci polimerizasyon adımı, kalıplama sırasında gerçekleşir; burada, önceden reaksiyona girmemiş bölgeler sıvı hale gelir ve molekül zincirleri üç boyutlu olarak rijit hale getirilir. Bu nedenle, termosetler tekrar ısıl işlemle yumuşatılamazlar. Kandelbauer vd. (2022) tarafından yapılan çalışmalarda, termosetlerin pratik işleme yönlerine odaklanılmıştır. Bu işlemler arasında fırça yerleştirme, reçine enfüzyonu, reçine transfer kalıplama, levha ve hacim kalıplama, pultrüzyon, bobinleme ve santrifüj döküm gibi teknolojik yaklaşımlar bulunmaktadır.

Termoplastiklerin ve termosetlerin farklı davranışlarının nedeni, moleküler yapılarından gelmektedir. Termosetlerde moleküller dallıdır ve komşu moleküller arasında kovalent bağlar oluşur. Termoplastik moleküller ise uzun, ipliksi, kaynaşmamış moleküllerdir (Akman, 1987).



Şekil 3.3. Termoplastik ve termoset polimer zinciri (Akman, 1987; Yıldırım, 2019)

3.3. Polimerlerin Genel Özellikleri

1. Polimer malzeme bir ısı ve elektrik yalıtkanıdır. İç bağların kovalent oluşumu burada etkilidir (Pişkin, 2010; Ünal, 2016).
2. Polimerik malzemeler kaymaya karşı hassastır ve düşük kayma mukavemetine sahiptir. Çoğunda yüksek basınç ve çekme dayanımı elde edilebilir (Pişkin, 2010; Ünal, 2016).
3. Kimyasal etkilere karşı çok dayanıklıdırlar. Çoğu durumda asitlere, bazlara karşı çok dirençlidirler. Öte yandan organik çözücülere karşı dayanımları iyi değildir (Pişkin, 2010; Ünal, 2016).
4. Yüksek sıcaklık polimerler için her zaman tehlikelidir. Bazı türleri 300- 400 °C'ye kadar (polifloren, teflon, melamin vb.) dayanabilse de çoğu 80°C'yi aşarsa zarar görebilir (Pişkin, 2010; Ünal, 2016).
5. Polimerler genellikle iyi su direncine sahiptir. Ancak bazıları su buharına karşı özellikle hassastır ve bozulabilir (Pişkin, 2010; Ünal, 2016).
6. Polimerlerin yoğunluğu genellikle düşüktür (Pişkin, 2010; Ünal, 2016).
7. Çeşitli renkleri ve türleri vardır (Pişkin, 2010; Ünal, 2016).
8. İşlenebilmeleri kolaydır (Pişkin, 2010; Ünal, 2016).

3.4. Polimer Malzemelerin Diğer Bileşenleri

3.4.1. Solventler

İşlemede büyük avantaj sağlayan solventler saklama sırasında stabil, fizyolojik olarak inaktif, renksiz ve berrak olmalıdır. Buharlaştırma hızına göre hızlı, orta ve yavaş olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bunlar;

1. Çabuk buharlaşanlar; aseton, eter, petrol
2. Merkezi buharlaştırıcılar; ksilen, butanol, sikloheksan
3. Yavaş buharlaşanlar; sikloheksanol bir glikoldür (Özden Akkaya, 2010).

3.4.2. Plastifiyanlar

Plastifiyanlar, özellikle düşük sıcaklıklarda plastik kütlelere esneklik kazandıran viskoz sıvılar veya katılardır. Polimerin çökmesine neden olmadan çözeltiyi seyrelten maddelerdir. Böyle bir malzemenin bir örneği, klorlu parafindir (Özden Akkaya, 2010).

3.4.3. Stabilizanlar

Stabilizanlar, plastiğin sıcaklık ve ultraviyole ışınlarının etkisi altında bozulmaması için çok az oranda (yüzde veya milyonda) parça olarak eklenen maddelerdir. Bunlar genellikle kurşun, kalay, baryum, kadmiyum, stronsiyum, stearatlardır. Metallerin organik tuzlarıdır ve zehirlidirler (Özden Akkaya, 2010).

3.4.4 Dolgu maddeleri

Bu malzemelerin kullanılmasındaki temel amaç plastik üretim maliyetlerinin biraz da olsa düşürülmesidir. Ancak dolgu maddeleri yardımıyla sertlik, sıcaklık ve ışık direnci, elektrik direnci veya iletkenlik özellikleri ile daha iyi performans sağlayabilirler. Dolgu maddeleri iki grupta toplanabilir (Özden Akkaya, 2010; Bulut, 2016).

Bunlar;

- Organik kökenliler; naylon, pamuk, kenevir, mantar tozları, ahşap vb.
- Mineral kökenliler; cam lifleri, bentonit, kaolin, metal oksitler vb.

3.4.5. Pigmentler

Pigmentler, boya endüstrisinde, özellikle boya işlerinde yaygın olarak kullanılan metal oksitlerdir. Ancak pigmentleri etkin bir şekilde kullanmak için bu malzemeleri ısıdan ve ultraviyole ışınlarından korumak gerekir. Mineral pigment malzemeleri, stabiliteyi korurken mükemmel örtücülükleri nedeniyle pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır (Özden Akkaya, 2010; Bulut, 2016).

3.4.6. Katkı maddeleri

Betonda kullanılan kimyasal katkıları gibi istenilen özelliklerin elde edilmesi için plastik uygulamalarda çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Bunlar;

- Kalıplamayı kolaylaştırmak için malzemeye lübrifanlar yani yağlayıcılar eklenir. Örneğin metalik sabunlar, mumlar,
- Fungisit adı verilen katkı maddeleri mantar ve algelere karşı kullanılır. Örneğin civa ve bakırın organik tuzları,
- Kalıpçılık sektöründe malzemenin kalıptan kolayca çıkmasını sağlayan teflon ve silikon vernikler,
- Ignifugane adı verilen alev geciktirici katkılardır. Örneğin, antimon tuzları, klorlu parafinler (Özden Akkaya, 2010; Bulut, 2016).

3.5. Polimerizasyon Oluşumu

Polimerizasyon reaksiyonları sonucunda monomer molekülleri polimer haline gelir ve bu olaya polimerizasyon denir. Doymamış polyesterin (monomer) polimerizasyonu, serbest radikalın monomer molekülleri üzerindeki etkisiyle başlar. Oda sıcaklığında, kobalt (hızlandırıcı) varlığında nispeten kararsız mekpo'nun (başlatıcı/sertleştirici) oksijen bağını kırarak serbest radikaller oluşur. Serbest radikaller, monomer molekülleri ile reaksiyona girer ve monomer karbon üzerindeki çift bağı eşleşmemiş bir elektronla kırar. Çapraz bağlama elemanı olan stren de serbest radikallerle reaksiyona girerek çapraz bağlı polimerin üç boyutlu ağının polyester zincirinin doymamış bölgesinde kendine bağlanır. Polimerizasyon meydana geldiğinde, iki tür bağ oluşur. Bu bağlar kimyasal bağlar ve Van

der Waals bağları olarak bulunur. Sertleştirici miktarına veya sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak polimerizasyon süresi ayarlanabilir. Bu nedenle, kimyasal reaksiyonun tamamlanması için kürleme koşulları çok önemlidir. Ancak makul bir sürede maksimum dayanım elde edilir ve polyester polimer ve polimer beton çeşitli uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir (Vipulanandan ve Paul 1990; Bulut, 2016).

3.6. Polimer Beton ve Kullanım Alanları

İnşa edilen yapılardan, yapının servis ömrü boyunca onarım masrafı olmadan kullanılabilir olması ve ekonomik olarak imal edilmesini beklemek önemlidir. Bu nedenle çeşitli yapı malzemeleri denenmiş ve kullanılmıştır. Bu malzemelerden biri de çimento bağlayıcıya alternatif olarak kullanılan polimer betondur. Polimer beton (PC), bir monomer karışımının polimerizasyonu sonucu oluşan kompozit bir malzemedir. Betonun durabilite özelliklerini iyileştirmek için betonda polimer reçinelerin kullanımı dünya çapında ilgi çekmiş ve bu konuyu araştıran araştırmacı sayısı da artmıştır (Chen vd., 2018).

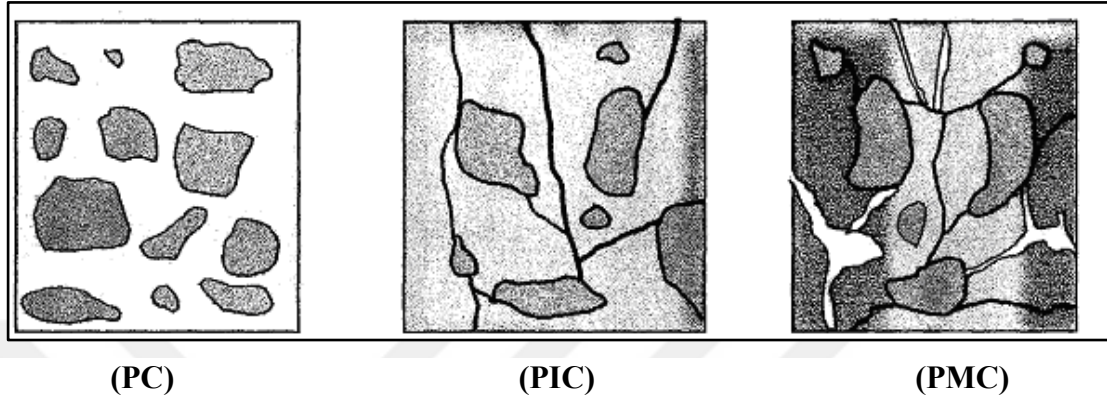
Polimer betonları üretmek için birçok polimer türü ve birçok farklı agrega kullanılmıştır. Bunlara örnek olarak epoksi reçine, doymamış polyester reçine, furan, akrilik reçine, poliüretan ve pomza, geri dönüştürülmüş agregalar ve hafif genişletilmiş kil agrega (Leca) verilebilmektedir. Karışımında kullanılan polimer tipi, agrega dağılımı, kürlenme derecesi ve test sıcaklığı PC'nin özelliklerini önemli ölçüde etkiler (Atabaadi vd., 2021).

Betonda polimer kullanımını 3 sınıfta toplamak mümkündür. Bunlar; (Özden, 2010; Bulut, 2016):

1. Polimer Beton (PC),
2. Polimer ile Modifiye Edilmiş Beton (PMC),
3. Polimer Emdirilmiş Beton (PIC).

Polimer emdirilmiş beton, bir monomerin sertleştirilmiş portland çimento betonu ile emprenye edilmesi ve polimerleştirilmesiyle elde edilen betondur. Polimer ile modifiye edilmiş betonun en iyi örneği yaygın olarak kullanılan lateks modifiye betondur (LMC). Betonda karışım suyu yerine lateks adı verilen polimer emülsiyonların kullanılmasıyla elde edilir. Polimer betonlar ise su ve çimentonun kullanılmadığı, bağlayıcı olarak sadece

polimer malzemenin kullanıldığı betonlardır. Dolgu maddesi ile bağlayıcı olarak kullanılan polimer malzemenin polimerleşmesi (tepkimesi) sonucu elde edilen betonlardır (Özden, 2010; Bulut, 2016). Şekil 3.4'te bu 3 farklı grubu anlatan görseller verilmiştir.



Şekil 3. 4. Polimerlerin betonda üç farklı kullanımı (Özden, 2010; Bulut, 2016)

Taranmış alanlar agregaları, siyah çizgili kanallar polimer dolgulu boşlukları, kesikli çizgiler çimento fazını ve beyaz alanlar polimer fazını göstermektedir.

3.6.1. Polimer beton (PC)

Polimer beton; Sürekli bir polimer matrisinde dolgu maddeleri ve agregalardan oluşan dağınık fazlı bir kompozittir (Pişkin, 2010). Polimer beton üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri agregalar arasındaki boşlukların en aza indirilmesidir. Yapıştırıcı olarak kullanılan polimer reçine agreganın gözeneklerini doldurduğu için gerekli polimer miktarı artmakta ve maliyetler artabilmektedir.

Polimer betonların kullanım avantajları kısaca şu şekildedir (Topsakal, 2013; Kwan vd., 2014; Samadi vd., 2020; Madhuri vd., 2021).

- -18°C-40°C arası dış ortamlarda hızlı kürlenme,
- Yüksek çekme, eğilme ve basınç dayanımı,
- Birçok yüzeyle iyi yapışma,
- Donma-çözünme koşullarında uzun süre dayanıklılık,
- Suyu ve solventlere karşı düşük geçirgenlik,
- İyi kimyasal direnç,
- Düşük rötre

Polimer betonların en yaygın kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

- Portland çimentolu betonlara katkı malzemesi olarak,
- Beton yüzeylerde aşınmaya ve kaymaya karşı önleyici olarak,
- Yapısal ve dekoratif konstrüksiyon panellerinde,
- Kanalizasyon borularında, yer altı yapılarında, drenaj kanallarda vb.,
- Jeotermal uygulamalarda karbon ve çelik boruların astarlanmasında,
- Yüzme havuzları, güverte vb. deniz yapılarında, su, tuz, rutubet ve neme karşı dayanıklılık gereken yerlerde,
- Barajlar, hendekler, rezervuar ve iskeleler gibi hidrolik yapılarda kullanılmaktadır (Agrawal ve Dhami, 2012; Fischer vd., 2019; Samadi vd., 2020; Calderón-Morales vd., 2021; Madhuri vd., 2021; Zheng vd., 2022).

3.7. Reçineler

Polimer beton yapımında en çok kullanılan reçine malzemeleri; polyester, epoksi, furan ve vinilester reçineleridir. Bu çalışmada iki farklı reçine türü (doymamış polyester ve vinilester) kullanılmıştır. Bu nedenle, sadece bu iki reçine tipi anlatılmıştır.

3.7.1. Polyester reçine

Polyester reçineler, termoset bir polimer olmakla birlikte genellikle fiberglas ve kompozit malzemelerde de kullanılır. Sertleştiricilerle kullanılarak katılaştırılabilirler. Bu

malzemeler, dayanıklı, hafif ve kolayca şekillendirilebilir olmalarıyla tanınır (Singh vd., 2019).

3.7.2. Vinilester reçine

Vinilester reçineler, termo-akışkan polimerlerin bir alt sınıfını oluşturur ve ester grubuna dahil edilir. Bu reçineler, epoksi reçinelerden farklı olarak epoksit grupları içermeyen birincil reçine yapısına sahiptir. Bu da vinilester reçinelerin daha fazla esneklik ve kimyasal dayanıklılık sunmasını sağlar (Singh vd., 2019).

3.8. E-Atık Tanımı ve Zararları

Teknoloji ilerledikçe tüketim alışkanlıkları hızla değişmekte ve bu değişime paralel olarak yeni atık türleri oluşmaktadır. Bu atık türlerinden biri de elektrikli ve elektronik atıklardır (E-atık). Günümüzde, elektronik cihazlar sürekli olarak daha hızlı, daha verimli, daha şık ve daha ekonomik olarak pazarlanmaktadır. Bu nedenle, kullanılan elektronik cihazlar, duruma bağlı olarak 1-6 yıl içinde "bozuk" veya "onarması, yenisini almaktan daha pahalı" hale gelebilmektedir. Bu durumda, bir zamanlar yüksek bedeller ödenen elektronik ürünler, çöpe veya hurdacılara gitmektedir. Bu şekilde ortaya çıkan atık türüne de E-atık adı verilmektedir (Çiftlik vd., 2009).

Elektronik cihazların hızlı gelişimi ve yenilenmesi, e-atık üretiminde büyük bir artışa yol açmıştır. Bu durum, çevre ve insan sağlığı açısından önemli bir konu haline gelen elektronik atıkların yönetimini gerekli kılmaktadır (Ahmad vd., 2022).

Elektrikli ve elektronik cihazların ürün kategorileri şu şekilde tanımlanabilir (Çiftlik vd., 2009).

- Büyük ev aletleri (buzdolabı, çamaşır makinesi vb.)
- Küçük ev aletleri (elektrikli süpürge, ekmek kızartma makinesi vb.)
- Bilgi ve iletişim cihazları (bilgisayar, telefon vb.)
- Tüketim malları (video kameralar, müzik aletleri)
- Aydınlatma teçhizatı (flüoresan lambalar, vb.)
- Elektrikli ve elektronik teçhizat (büyük ve sabit endüstriyel teçhizat hariç) (matkaplar, testereleler, vb.)

- [illegible]

Elektrikli ve elektronik cihazlar, birçok zararlı bileşeni içermektedir. Bu cihazlar, uygun şekilde toplanmaz ve atılmazsa çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Örneğin, CRT'ler yani ekran ve televizyon lambaları, kurşun, baryum ve fosfor gibi çok miktarda ağır metal içermektedir. Bu cihazlar, uygun teknikler ve dikkatli kullanım ile çevre ve sağlık açısından sorun yaratmaz. Ancak, gerekli güvenlik önlemleri alınmadan yapılan işlemler, birinci seviye atık işleyicileri ve işleme ortamındaki toprak ve yeraltı suları için tehlikeli yan etkilere neden olabilir. Diğer bir zararlı süreç, tehlikeli madde içeren atıkların yakılmasıyla oluşan halojenli klorürler ve bromürlerdir (Çiftlik vd., 2009). Bu bileşenler, alev geciktirici özelliklerinden dolayı elektronik atık plastik parçalarda ve kablolar için PVC kılıflarda kullanışlıdır. Ancak, yanıkları sırasında dioksin gibi görünürler ve sonunda atmosfere karışarak çevreye zarar verebilirler. Elektronik atıkların toprağa gömülerek bertaraf edilmesi yaygın bir yöntemdir. Ancak, bu yöntemin uzun vadede çevre üzerinde zararlı etkileri olabilir. Örneğin, bu tür atıklardaki cıva bileşenleri uzun vadede yeraltı sularına ve toprağa zarar verebilir (Çiftlik vd., 2009).

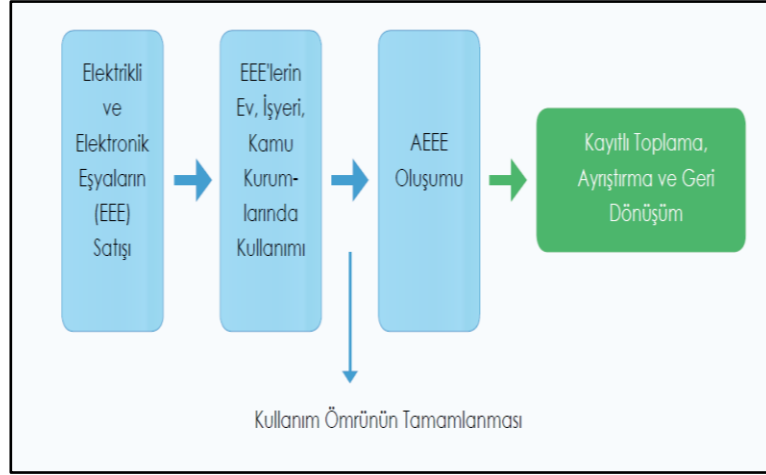
Elektronik atıklardan elde edilen maddeler arasında alüminyum, demir, platin, paladyum, bakır, cıva, gümüş, kadmiyum, fosfor, krom ve baryum bulunmaktadır. Bu maddelerden cıva, özellikle tehlikelidir; nörolojik bozukluklar, beyin sorunları, böbrek rahatsızlıkları, görme kaybı, sinir sistemi problemleri, zihinsel bozukluklar ve kas titremesi gibi sağlık sorunlarına yol açabilir. Ayrıca, gebelerde düşükler veya doğumsal anormalliklere neden olduğu bilinmektedir (Öztüre, 2015).

3.9. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Yönetimi

E-atık yönetimi hem ülkemizde hem de dünyada en zorlu atık yönetimi konularından biri olarak öne çıkmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, elektrikli ve elektronik aletlerin sayısı ve çeşitliliği artmakta, bu aletlerin kullanım alanları genişlemektedir. Hızla gelişen teknolojinin bir sonucu olarak, birçok elektrikli ve elektronik cihaz, eskimeden atık haline gelmektedir (Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi, 2016).

Elektrikli ve elektronik eşyalar (EEE), kullanım ömrünün sonunda atık elektrikli ve elektronik eşyalar (AEEE) haline gelir. Bu aşamada elektrikli ve elektronik atıkların uygun şekilde işlenmesi gerekmektedir.

Elektronik atıkların yönetimi, bu atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi veya geri dönüştürülmesi yoluyla gerçekleştirilebilir. Elektronik atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi, genellikle atık işleme tesisleri veya lisanslı elektronik atık işleme tesisleri tarafından yapılmaktadır. Geri dönüşüm ise, malzemelerin yeniden kullanılmasını sağlayarak atık miktarını azaltmakta ve çevreye önemli katkılar sağlamaktadır. Elektronik atıkların geri dönüştürülmesi, çevresel açıdan önemli bir adım olarak kabul edilmektedir (Abbas vd., 2022).



Şekil 3.6. AEEE oluşum süreci (AEEE Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi 2016)

AEEE Yönetilmesi;

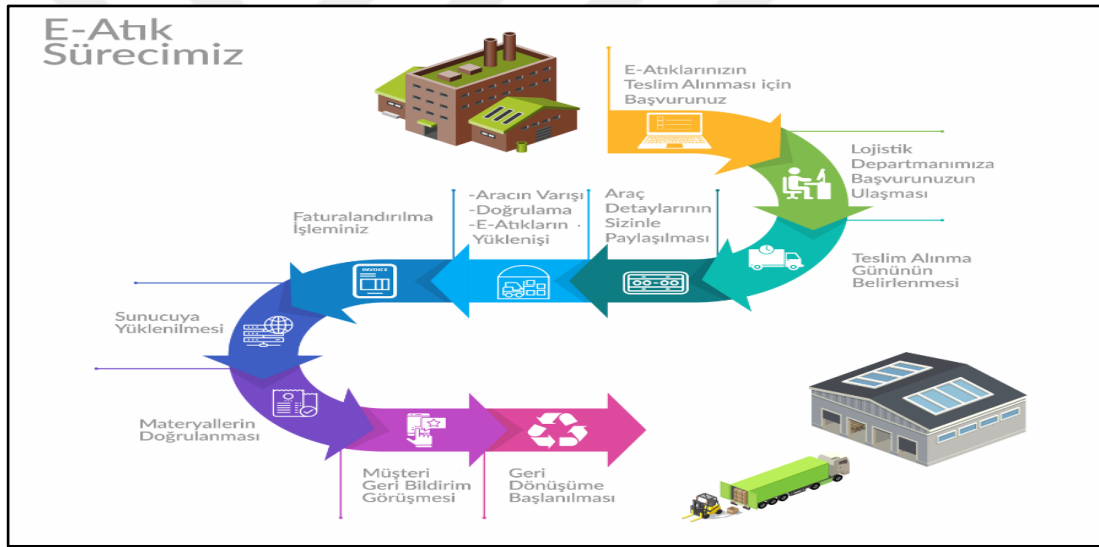
- Elektrikli ve elektronik aletlerin çevre dostu tasarımı, elektrikli ve elektronik aletlerin atık miktarını sınırlayacak önlemler
- Elektrikli ve elektronik aletlerin uygun yöntemlerle toplanması, tasnifi, yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımı oluşturulmasını içerir.
- Buna yasal mevzuat, piyasa yapısı, teknoloji birikimi ve bu süreçleri mümkün kılan farkındalığın oluşturulması dahildir. (AEEE Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi 2016)

3.10. E-Atık Geri Dönüşümü ve Geri Kazanımı

Atık elektrikli ve elektronik aletlerin geri kazanımı ve geri dönüşümü, etkin atık yönetiminin temel unsurlarından biridir. Elektrikli ve elektronik atıkların bertarafı, atıkların yeniden kullanım, enerji üretimi veya yeni bir ürün/hammadde elde etmek için çeşitli işlemler sonucunda işlenmesi anlamına gelir. Geri dönüşüm, elektrikli ve elektronik atıkların fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerle ürüne/hammaddeye dönüştürülmesini ifade eder. Ulusal mevzuatta, geri dönüşüm süreçleri daha geniş bir çerçeveyi kapsamakta ve geri dönüşümü içermektedir (Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi, 2016).

Geri kazanım ve geri dönüşüm süreçleri, elektrikli ve elektronik atıkların plastik ve metal gibi geri dönüştürülebilir kısımlarını mümkün olan en yüksek düzeyde zararlı/zehirli bileşenlerden arındırmayı hedefler (Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi, 2016).

AEEE'nin geri dönüşümü, zararlı maddelerin saflaştırılması ve değerli metallerin (örneğin bakır, altın, alüminyum) değerlendirilmesi için önemlidir. Atık elektrikli ve elektronik cihazlardaki zararlı/zehirli bileşenler belirli standart ve süreçlere göre geri dönüştürülmeli, geri dönüştürülemiyorsa uygun teknoloji ve yöntemlerle imha edilmelidir (Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi, 2016).



Şekil 3.7. E-atıkların geri kazanım süreci (Eag Geri Dönüşüm A.Ş.)

Geri dönüşüm yoluyla elde edilen geri dönüştürülmüş hammaddeler, birincil hammadde ihtiyacını azaltarak önemli bir katkı sağlar. Daha az miktarda birincil hammadde ihtiyacı, hammaddenin arama ve madencilik faaliyetlerini ve bu süreçte ortaya çıkan çevresel zararı azaltır (Önge 2020)

Ülkemizde e-atık geri dönüşümünün aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

- E-atıkların Toplaması
- E-atıkların Taşınması
- E-atıkların Depolanması
- E-atıkların İmhası

3.10.1. E-Atık toplanması

Elektronik atıklar belirlenen alana taşınmakta ve belediye veya geri dönüşüm şirketleri tarafından geri dönüşüm merkezine iletilmektedir. Bu yöntem, en verimli ve ekonomik yol olarak kabul edilmektedir. (Çakır, 2013).

3.10.2. E-Atık taşınması

Elektronik atıkların taşınması işlemi, tehlikeli atık taşıma sertifikasına (ADR izni) sahip, uygun metal veya plastik gövdeli sürücüler, deneyimli işçiler ve uygun araçlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu süreç, yasal düzenlemelere uygun olarak gerçekleştirildiği için İl Çevre Müdürü bilgilendirilecek ve aynı zamanda konuyla ilgili Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na da gerekli bilgiler iletilerek prosedürler takip edilecektir (Önge, 2020).

3.10.3. E-Atık depolanması

Malzemeler, özel tasarlanmış plastik konteynerlerde güvenli ve uygun koşullarda muhafaza edilmektedir. (Çevikel, 2009).

3.10.4. E-Atık imhası

İşlem sırasında ayrılan ve kırılan parçalar, kırıcılar kullanılarak özel kutulara yerleştirilir. Doldurulan kutular, uygun bölümde saklanır. Belediye kurumlarından biri olan İZAYDAŞ gibi lisanslı özel şirketlerde de söküm ve ayrıştırma işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu süreçte elde edilen atıkların büyük bir kısmı gübreye dönüştürülebilir (Önge, 2020).

4. MATERYAL YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Polimer

Polimer betonlarda bağlayıcı malzemesi görevini gören ve üretimlerin temel ögesini oluşturan reçineler, bu çalışma kapsamında doymamış polyester reçine ile vinilester reçine olarak seçilmiştir. Doymamış polyester reçine uygun maliyeti, erişim kolaylığı ve üstün mekanik özellikleri, vinilester reçine ise agresif çözeltilere karşı direnci ve düşük termal genleşme katsayısı ile diğer reçinelerden daha fazla tercih edilmektedir (Lv vd., 2023). Baran Boya'dan temin edilen CE 80 döküm tipi ortoftalik bazlı doymamış polyester reçine ile Polives 701 vinilester reçineye ait teknik bilgiler Tablo 4.1'de verilmiştir.

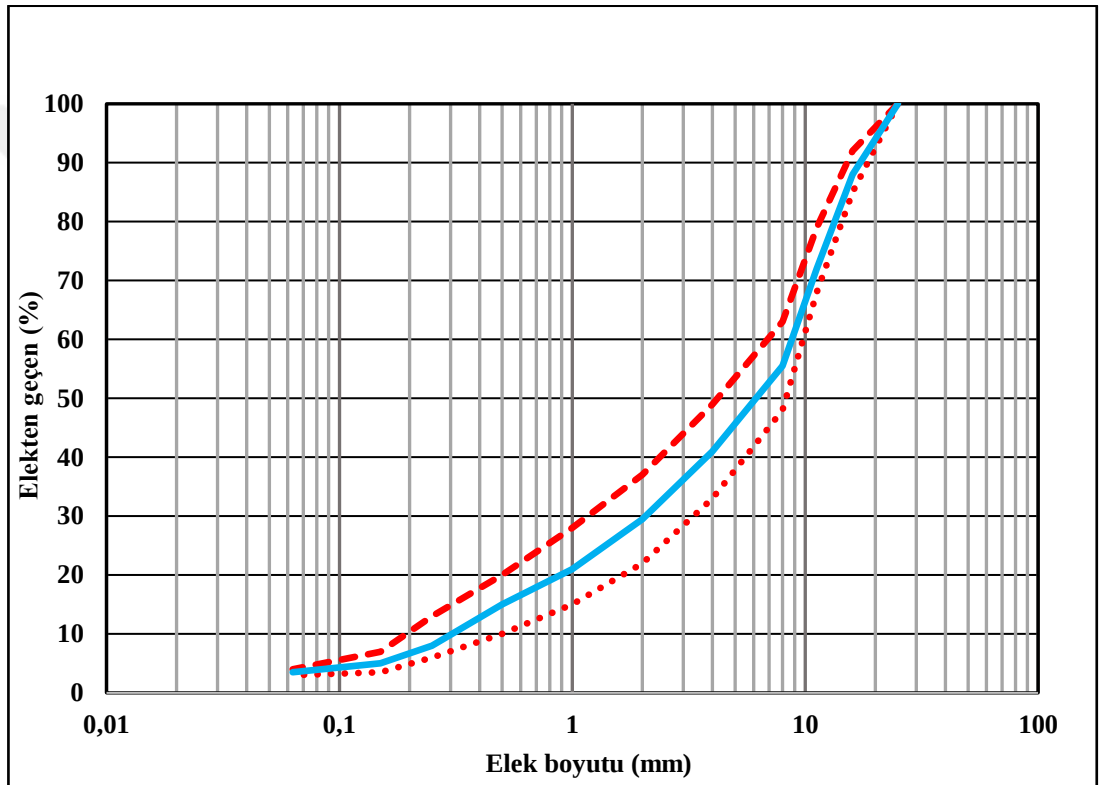
Tablo 4.1. Reçinelerin teknik özellikleri

Özellikler	Doymamış Polyester Reçine	Vinilester Reçine
Doymamış polyester reçine	~ 60	-
Stiren	~ 40	-
Fiziksel hal	Sıvı	Sıvı
Monomer oranı (%)	33-36	40-44
Asit indeksi	10-16	Maksimum 10
Su emme (%)	0.18	0.15
Özgül ağırlık	1.13 gr/cm ³	1.04 gr/cm ³
Viskozite	550-650 cP	400-500 cP
Jelleşme süresi (23°C)	9-11 dk	20-30 dk
Sertlik	42 Barcol	35 Barcol
Eğilme dayanımı	125 MPa	160 MPa
Çekme dayanımı	63 MPa	80 MPa
Elastisite modülü	3110-3700 MPa	3300-4360 MPa

4.1.2. Agregalar

Reçineler ile bir araya gelerek polimer betonları oluşturan dolgu malzemeleri, bu çalışmada kuvars agregası, çakıl ve e-atık olmuştur. TS EN 933-1 (2012) ve TS 802 (2016) standartlarına göre üniform bir agreg a boyutu dağılımı elde edebilmek amacıyla

elek analizleri gerçekleştirilmiştir. şekil 4.1’de ideal eğriler (A16/B16) arasında kalacak şekilde karışımların granulometri eğrisi oluşturulmuş ve agregaların maksimum boyutu 16 mm olarak belirlenmiştir. Mavi renkli eğri karışımı, kesik kırmızı çizgili eğri st limiti (B/16) ve kırmızı noktalı eğri de alt limiti (A/16) temsil etmektedir. Buna göre agrega gradasyonları ince agrega için %41 ve iri agrega için %59 olarak seçilmiştir. Polimer beton üretimlerinde kuvars agregası her boyutta, çakıl ise iri agrega olarak yer almıştır. Kuvars agregası ile çakılın özgül ağırlıkları sırasıyla 2.64 g/cm³ ve 2.62 g/cm³ olarak elde edilmiştir.



şekil 4.1. Karışımın tane büyüklüğü eğrisi

Kuvars agregalarının elek analizi sonrası görüntüleri Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Kuvars agregalarının elek analizi sonrası görüntüleri

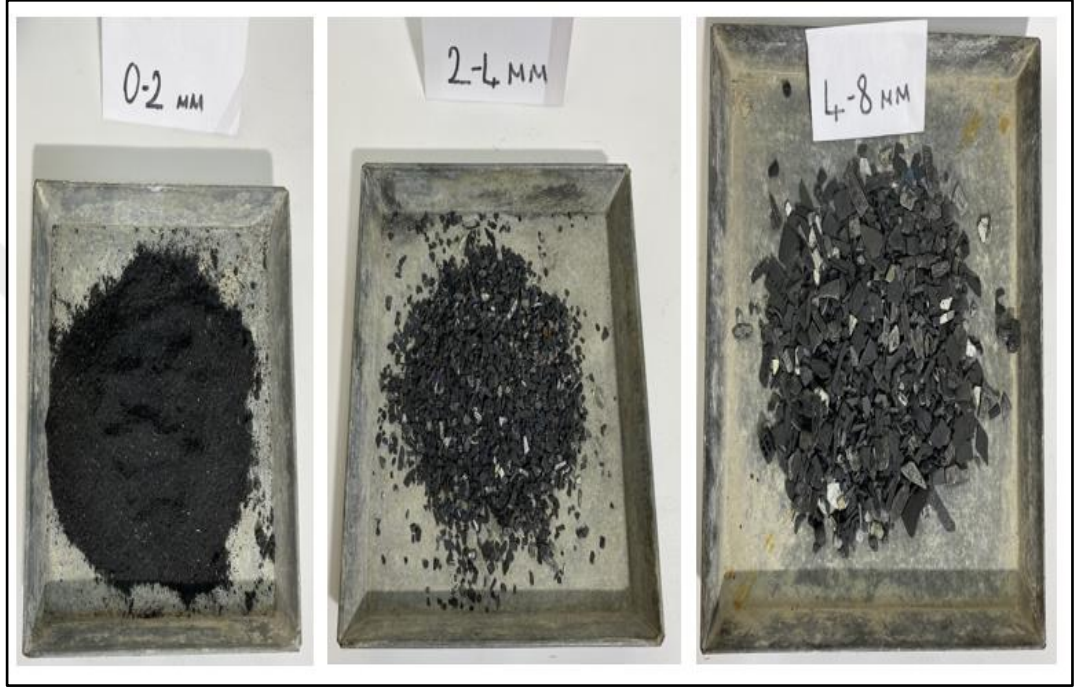
Üretici firmadan temin edilen kuvars agregasına ait özellikler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Kuvars agregasının özellikleri

SiO ₂	%92.57
Al ₂ O ₃	%4.37
Fe ₂ O ₃	%0.072
MgO	%0.05
CaO	%0.04
Na ₂ O	%0.06
K ₂ O	%2.52
Kızdırma kaybı	%0.30
Sertlik	7
Erime sıcaklığı	1779°C

4.1.3. Elektronik atık (E-atık)

E-atıklar, Exitcom Geri Dönüşüm firmasının (Kocaeli/TR) e-atık geri dönüşüm fabrikasından temin edilmiştir. Polimer betonlarda agrega olarak kuvars agregası ile çakılın yerine kullanılan e-atıkların özgül ağırlığı 1.29 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. E-atıkların elek analizi sonrası görüntüleri Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. E-atıkların elek analizi sonrası görüntüleri

4.1.4. Sertleştirici ve hızlandırıcı malzemeler

Sertleştirici ve hızlandırıcı kimyasal malzemeler sırasıyla reçineler ile monomer arasında kimyasal reaksiyonu başlatmak ve bu reaksiyonu hızlandırmak amacıyla polimer beton üretimlerinde kullanılmıştır. Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’te, sertleştirici ve hızlandırıcı malzemelerin teknik özellikleri yer almaktadır

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 içeriği	%9.4–%9.6
Peroksit içeriği	%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 (%)	6
Toplam katı (%)	63

4.2. Yöntem

4.2.1 Parametreler ve beton karışım dizaynı

Polimer beton üretimlerinde kuvars agregası ile çakılın yerine agrega olarak farklı oranlarda e-atık kullanımı, bu çalışmanın ilk parametresini oluşturmuştur. Bu oranlar %0, %4, %8, %12, %16 ve %20 olarak belirlenmiştir. Farklı tipli reçinelerin (doymamış polyester ve vinilester) e-atık oranları ile uyumu ve ekstrem şartlar altındaki polimer betonların performansına etkisi, çalışmadaki ikinci parametredir. İçerisinde hiçbir şekilde e-atık bulunmayan polyester ve vinilester reçineli polimer betonlar, kontrol betonlarını oluşturmuştur. Ön deneylerden elde edilen gözlem ve sonuçlar neticesinde polimer betonlarda kullanılan sertleştirici ve hızlandırıcı malzemelerin oranları sırasıyla %1,5 ve %0,2 olarak belirlenmiş ve sabit tutulmuştur. Bununla birlikte reçine/dolgu oranı %15-85 olacak şekilde polimer beton üretimleri yapılmıştır. Her seri için 100x200 mm silindir (donma-çözünme, yüksek sıcaklık) numune üretilmiştir. Tüm parametreler göz önüne

alındığında toplam 120 adet silindir numune üretilerek deney sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

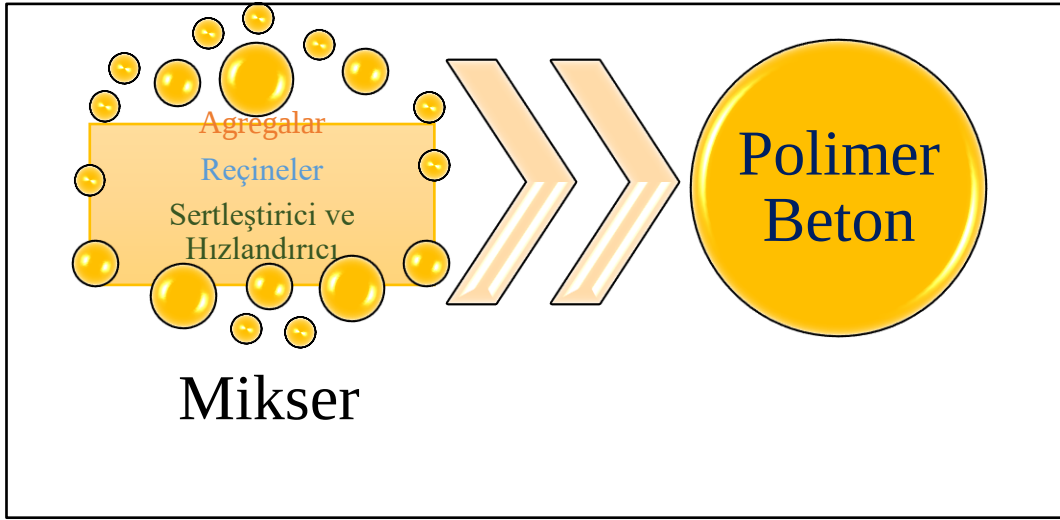
Deney sonuçlarının anlamlı ve okunabilir bir şekilde yorumlanabilmesi için kodlama yapılmıştır. Buna göre, reçineler ile e-atıkların kısaltması ilk harflerle, e-atık oranları ise harflerden sonraki rakamlarla (% işareti kullanılmadan) ifade edilmiştir. Örneğin, VRE8 kodu %8 e-atık içeren vinilester reçineli polimer betonu temsil etmektedir. PRE0 ile VRE0 kodları, içerisinde e-atık bulunmayan iki farklı tipli reçineye sahip kontrol betonları için kullanılmıştır. Polimer beton üretimlerinde kullanılan beton karışım dizaynı, Tablo 4.5'te verilmiştir.

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

Kod	E-atık	İnce Agregası (Kuvars Agregası)	İri Agregası (Çakıl)	Polyester Reçine	Vinilester Reçine
PRE0		836.52	1203.82	360	
PRE4	45.12	803.08	1192.14	360	
PRE8	90.23	769.64	1180.47	360	
PRE12	135.88	736.20	1168.26	360	
PRE16	181	702.76	1156.58	360	
PRE20	226.65	669.32	1144.90	360	
VRE0		831.74	1197.45		358
VRE4	45.11	798.83	1185.24		358
VRE8	90.22	765.39	1173.57		358
VRE12	135.35	731.95	1161.89		358
VRE16	180.47	699.04	1150.21		358
VRE20	225.05	665.61	1138.54		358

4.2.2. Polimer beton üretimi

Polimer betonların üretim süreci; agregalar, reçineler ve düşük dozda sertleştirici ve hızlandırıcı kimyasal malzemelerin polimerizasyonu ve havada kürleme işlemi ile gerçekleşmektedir. Bu işlemleri anlatan diyagram, Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Polimer beton üretimi

4.2.3 Deneysel çalışmalar

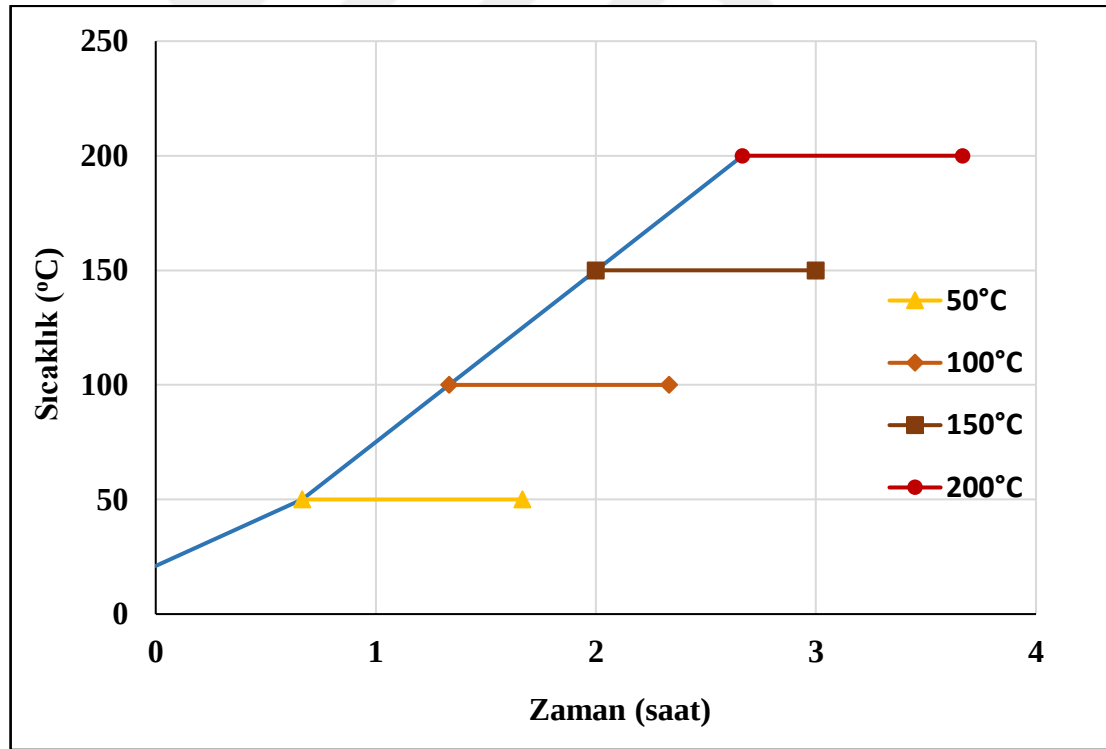
Farklı e-atık oranlarına sahip doymamış polyester ve vinilester reçineli polimer betonların donma-çözünme deneyleri; 300 döngü sonrası ağırlık kaybı, basınç dayanımı kaybı, görsel değerlendirme ve SEM analiz sonuçları ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler, ASTM C666 (2016) standardının B prosedürüne göre 0, 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 döngü donma-çözünmeye maruz bırakılmıştır. Otomatik donma-çözünme cihazına polimer betonlar yerleştirilmiş ve sıcaklık döngü -18°C ila 4°C olacak şekilde deney uygulanmıştır. Bu cihaz ve deney numunelerine ait görsel, Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Donma-çözünme testinin uygulama görseli

28 gün kürlenmiş polimer betonların yüksek sıcaklık altındaki performansını değerlendirmek için otomatik fırın kullanılmıştır. İlk ağırlıkları belirlenen polimer betonlar, fırın sıcaklığı 5°C/dakika olacak şekilde deney sıcaklıklarına kadar artırılmıştır. Daha sonra betonlar gerçek bir yangının ısıtma süresini simüle etmek ve betonların homojen bir şekilde ısıtılmasını sağlamak için 1 saat boyunca hedef sıcaklıklar olan 50°C, 100°C, 150°C ve 200°C’de tutulmuştur. Ardından herhangi bir termal şoku önlenmek için güç kapatılmış ve sıcaklıklar ortam sıcaklığına gelinceye kadar düşürülmüştür. Sıcaklık dereceleri ve zamana bağlı yüksek sıcaklık prosedürü şematik olarak Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Polimer betonların yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı, basınç dayanımı kaybı, görsel değerlendirme sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Son olarak polimer betonların ekstrem şartlara (donma-çözünme, yüksek sıcaklık) maruz kaldıktan sonraki mikro yapılarında meydana gelen değişiklikler, SEM analizi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Polimer betonlara ait sıcaklık dereceleri ve zamana bağlı yüksek sıcaklık prosedürü

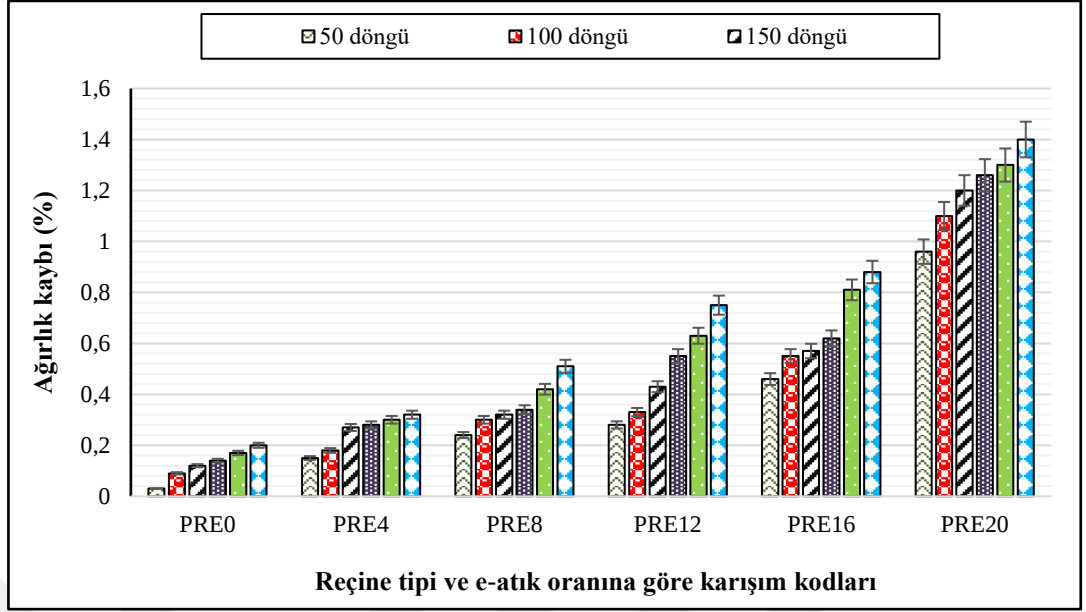
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Donma-Çözünme Deneyi Sonuçları

5.1.1 Donma-çözünme döngülerinden sonra polimer betonların ağırlık kaybı

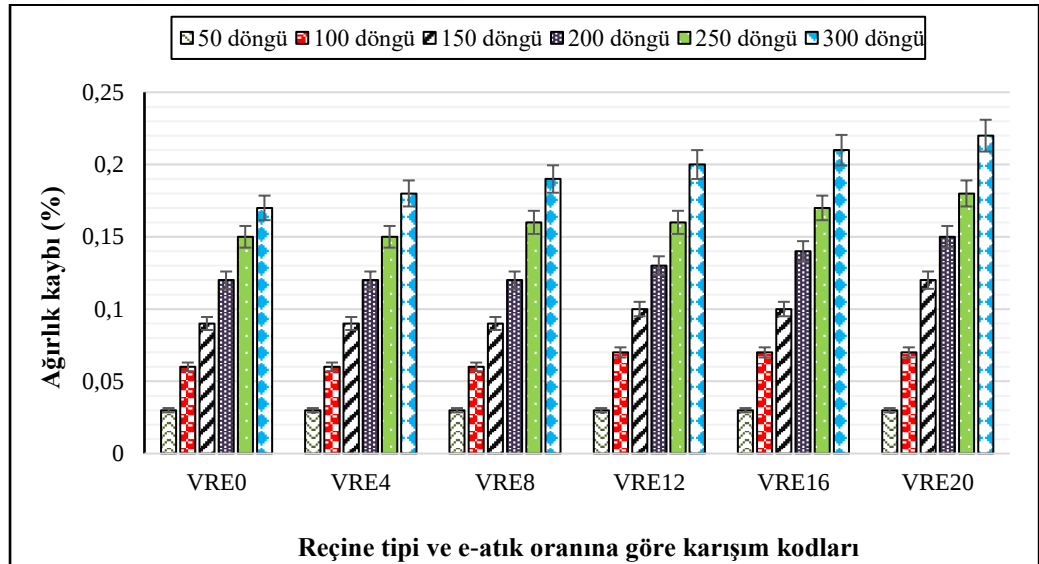
Şekil 5.1’de farklı e-atık oranlarına sahip polyester reçineli polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonucunda yaşadıkları ağırlık kayıpları yüzdesel olarak verilmiştir. Buna göre hem e-atık oranı hem de donma-çözünme döngü sayısı arttıkça polimer betonların ağırlık kayıplarında artışlar gözlemlenmiştir. Örneğin 150 döngü sonunda kontrol betonunun (PRE0) ağırlık kaybı %0,12 iken, %12 e-atıklı polimer betonda (PRE12) bu kayıp yaklaşık 4 kat artarak %0.43 mertebesinde gerçekleşmiştir. E-atığın %20 oranında kullanıldığı polimer betonlarda (PRE20) ise 150 döngü sonundaki ağırlık kaybı %1.2 ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durumun yaşanmasında, yüksek oranlarda kullanılan e-atığın yapısındaki hidrofobiklik ve yüzey morfolojisi özelliklerinin polyester reçine ile nispeten düşük uyum göstermesinden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmektedir (Goh vd., 2022). Polyester reçineli polimer betonların 50 ila 300 döngü sonundaki ağırlık kayıpları, 2 ila 6 kat aralığında değişim göstererek artış sergilemiştir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, e-atıklı polyester reçineli polimer betonlar ile kontrol betonlarının donma-çözünme deneyi sonrası uğradıkları ağırlık kayıpları çok düşük değerlerde elde edilmiştir. Öyle ki e-atığın en yüksek oranda kullanımı (%20) bile beraberinde donma-çözünme döngüleri boyunca %0.96 ila %1.4 aralığında ihmal edilebilecek düzeyde ağırlık kaybı getirmiştir. Donma-çözünme deneyi sonucu elde edilen ağırlık kayıpları, e-atığın polyester reçineli polimer betonlarda agrega olarak rahatlıkla kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 5.1. Polyester reçineli polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası ağırlık kayıpları

50-100-150-200-250 ve 300 döngü donma-çözünmeye maruz kalan farklı e-atık oranlarına sahip vinilester reçineli polimer betonların uğradıkları ağırlık kayıpları, Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Vinilester reçineli polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası ağırlık kayıpları

Şekil 5.2’ de, hem kontrol hem de e-atıklı polimer betonların birbirine çok yakın ve çok düşük değerlerde ağırlık kaybı yaşadıkları net bir şekilde görülmektedir. Öyle ki ağırlık

kayıpları tüm döngüler boyunca %0.03 ila %0.22 aralığında 0 değerine çok yakın elde edilmiştir. 300 döngü sonunda kontrol ve e-atıklı vinilester reçineli polimer betonların ağırlık kayıpları %0.17 ile %0.22 arasında gerçekleşmiştir. Bu sonuçların elde edilmesinde; e-atık-vinilester reçine arasındaki yüksek aderans, geçirimsiz mikroyapı ile donma-çözünme hasarı üzerinde en etkili faktörlerden birisi olan suyun polimer beton üretiminde var olmayışı gibi parametrelerin etkili olduğu düşünülmektedir (Jafari vd., 2021). Bu çalışma ile birlikte özellikle vinilester reçineli polimer betonlarda e-atıkların %20 oranı dahil olmak üzere agrega olarak kullanımının beraberinde donma-çözünmeye karşı yüksek performans göstereceği ortaya çıkarılmıştır.

5.1.2 Donma-çözünme döngülerinden sonra polimer betonların basınç dayanımı kaybı

Polimer betonların donma-çözünme deneyi öncesinde TS EN 12390-3 (2019) standardına göre ölçülen basınç dayanımı sonuçları, Tablo 5.1’de verilmiştir.

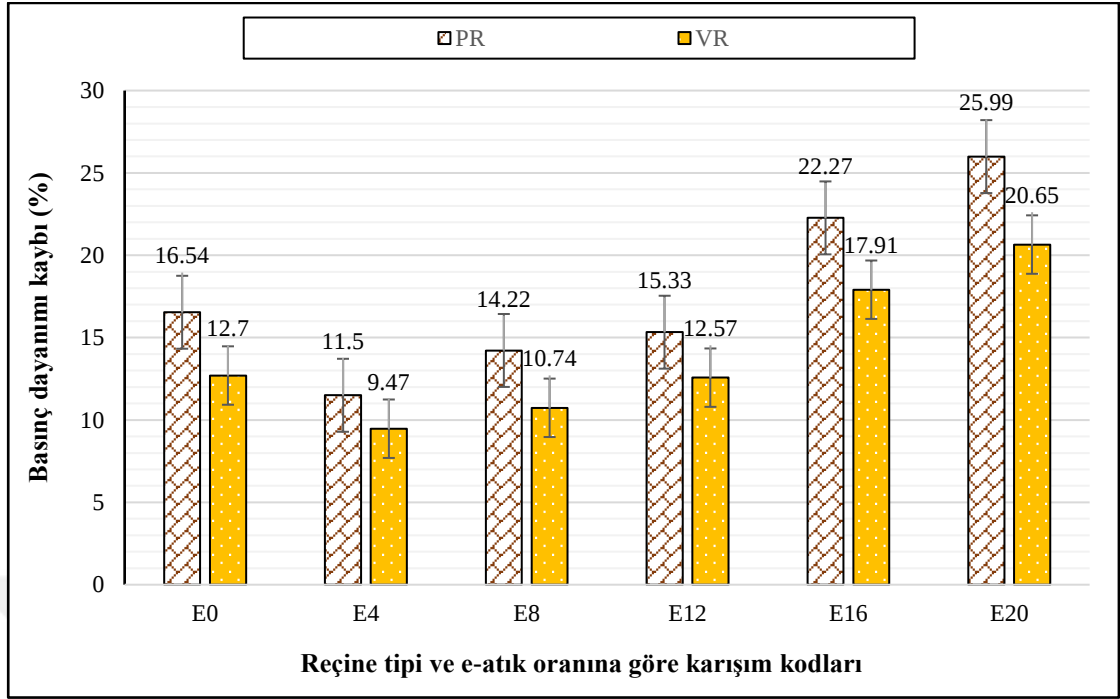
Tablo 5.1. Polimer betonların donma-çözünme deneyi öncesi-sonrası basınç dayanımı sonuçları

Kod	Basınç dayanımı Öncesi (MPa)	Kod	Basınç dayanımı Öncesi (MPa)
PRE0	66.80	VRE0	76.35
PRE4	49.15	VRE4	72.30
PRE8	40.45	VRE8	63.71
PRE12	34.22	VRE12	50.83
PRE16	30.13	VRE16	43.51
PRE20	23.02	VRE20	32.24
Kod	Basınç dayanımı Sonrası (MPa)	Kod	Basınç dayanımı Sonrası (MPa)
PRE0	66	VRE0	75.4
PRE4	47.8	VRE4	71.6
PRE8	34.2	VRE8	62.2
PRE12	33.1	VRE12	49.1
PRE16	28.4	VRE16	42.8
PRE20	20.5	VRE20	30.5

Tablo 5.1’de yer alan sonuçlardan hareketle Şekil 5.3’te, farklı e-atık oranlarına sahip polyester ve vinilester reçineli polimer betonlara ait donma-çözünme deneyi sonucunda gerçekleşen basınç dayanımı kayıpları yüzdesel olarak verilmiştir. Her iki reçine tipi için de e-atığın %4, %8 ve %12 oranlarında agrega olarak kullanımı, beraberinde kontrol betonlarına göre donma-çözünme sonrası daha düşük basınç dayanım kayıpları getirmiştir. Örneğin e-atık oranının %4 olduğu polyester reçineli polimer beton, kontrol betonuna göre %30 oranında daha az basınç dayanımı kaybı yaşamıştır. Bu durum vinilester reçineli betonda ise %25 oranında daha az gerçekleşmiştir. %8 ve %12 e-atıklı farklı reçineli polimer betonlarda da kontrol betonlarına göre benzer düşüşler gözlemlenmiştir. %4, %8 ve %12 e-atık oranlarına sahip polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonucu kontrol betonlarından daha az basınç dayanımı kaybı yaşamaları üzerinde, bu e-atık oranlarının reçineler ile sergiledikleri ideal uyumun, özellikle SEM analiz sonuçları kısmında da teyit edildiği gibi reçine-agrega arayüzey geçiş bölgelerinin dayanıklı kalışı gibi faktörlerin etkili olduğu düşünülmektedir (Shokrieh vd., 2011).

Polyester ve vinilester reçineli polimer betonların basınç dayanım kayıpları, e-atık oranının %16 ve %20 kullanımı sonucunda yükselişe geçmiştir. E-atıkların iri agrega olarak normal betonlarda kullanıldığı bir çalışma sonucunda da yapısal performansın %15 e-atık oranına kadar iyi olduğu, bu oranın aşılması durumunda beton dayanıklılığının azalma eğilimi gösterdiği bildirilmiştir. (Hamsavathi vd., 2020). Tıpkı ağırlık kaybı sonuçlarında gözlemlendiği gibi vinilester reçineli polimer betonlar, polyester reçinelilere göre daha az basınç dayanımı kaybı yaşamıştır.

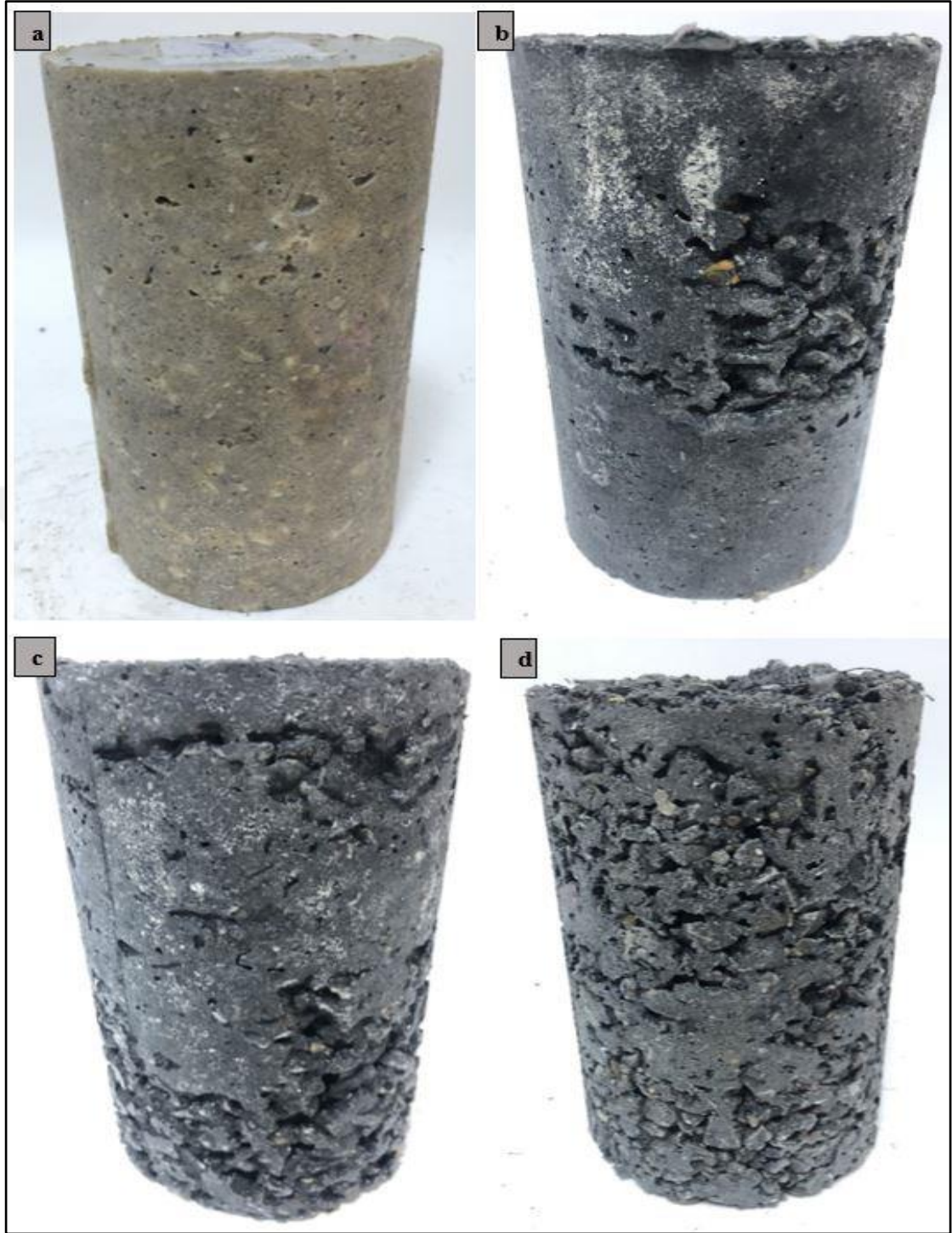
Genel olarak özellikle vinilester reçinenin polimer betonlarda bağlayıcı malzeme olarak yer almasıyla %4, %8 ve %12 e-atık oranlarının rahatlıkla agrega olarak kullanılabileceği, donma-çözünme deneyi sonrası gerçekleşen basınç dayanım kayıplarına bakılarak ilk kez bu çalışmadan elde edilen veriler ile ifade edilebilmektedir.



Şekil 5.3. Polyester ve vinilester reçineli polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası basınç dayanımı kayıpları

5.1.3 Polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası görsel değerlendirme sonuçları

Donma-çözünme deneyi sonucunda (300 döngü sonunda) polyester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonlara ait görseller Şekil 5.4'te verilmiştir. a görseli kontrol betonunu, b, c ve d görselleri ise sırasıyla %8, %16 ve %20 e-atıklı polyester reçineli polimer betonların hasar durumlarını göstermektedir. Kontrol betonu, a görselinde de görülebildiği gibi en az hasar alan polimer beton olmuştur. %8 e-atıklı polimer beton ise (b görseli) kontrole göre daha belirgin olarak çatlak, kapak atma, agrega-polimer matris bozulması gibi tahribatlar yaşamıştır. c görselinde yer alan %16 e-atıklı polimer betonda hasarların ilerlemesi devam etmiştir. %20 e-atığın polyester reçine ile birlikte kullanıldığı polimer betonu gösteren d görseli ise en fazla hasarın yaşandığı polimer beton olmuştur. Öyle ki e-atıklar reçineden neredeyse tamamen ayrılmış, aşınma, pul pul dökülme, ufalanma gibi hasarlar ileri düzeyde gerçekleşmiştir. Bu çalışma sonucunda tıpkı ağırlık ve basınç dayanımı kaybı sonuçlarına paralel bir şekilde donma-çözünme sonrası polyester reçineli polimer betonların uğradıkları hasarlar birbiriyle örtüşmüştür. Bununla birlikte bu hasar oluşmasında yerleştirmeden kaynaklı problemlerinde etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.4. Polyester reçineli polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrasındaki görüntüleri, a: Kontrol betonu (PRE0), b: %8 e-atıklı polimer beton (PRE8), c: %16 e-atıklı polimer beton (PRE16), d: %20 e-atıklı polimer beton (PRE20).

Vinilester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların donma-çözünmeye maruz kaldıktan sonraki (300 döngü sonunda) görselleri, Şekil 5.5'te verilmiştir. a görselinde yer alan kontrol betonu, en az tahribatın oluştuğu beton olmuştur. %8 e-atıklı vinilester reçineli polimer beton ise b görselinde görülebildiği gibi kontrol betonuna benzer bir şekilde daha az hasara uğramıştır. c görselinde bulunan %16 e-atıklı vinilester reçineli polimer betonda, donma-çözünme sonrası belirgin çatlaklar, lekelenmeler, ayrışmalar gözlemlenmiştir. %20 e-atığa sahip vinilester reçineli polimer beton (d görseli) ise kapak atma, çatlak ilerlemesi, ufalanma, boyut stabilitesinin bozulması gibi hasarlara uğramıştır. Görsel değerlendirmeler, vinilester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların donma-çözünme sonrası yaşadıkları ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarını teyit eder nitelikte meydana gelmiştir.

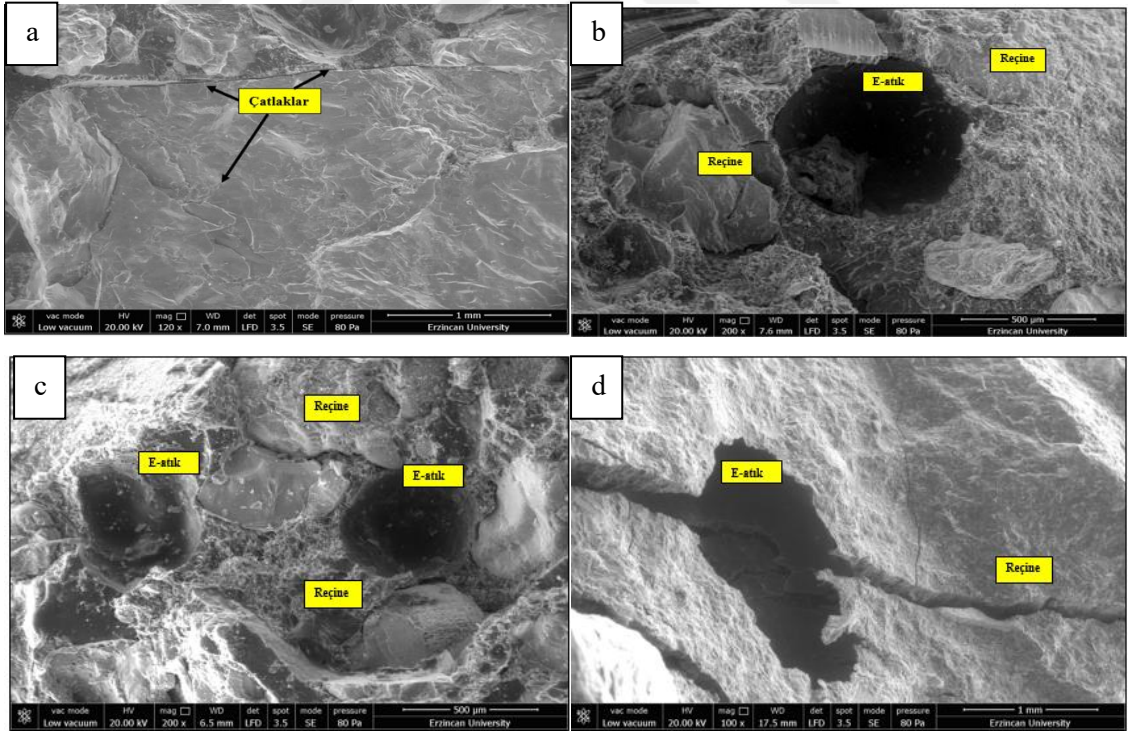
Genel bir değerlendirme yapıldığında, e-atıkların agrega olarak yer aldığı farklı tip reçineli polimer betonların donma-çözünme deneyi sonrası yaşadıkları görsel tahribat, polyester reçineli polimer betonlarda vinilester reineliye göre daha belirgin bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum, ağırlık ve basınç dayanım kayıpları sonuçları ile paralellik göstermiştir.



Şekil 5.5. Vinilester reçineli polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrasındaki görüntüleri, a: Kontrol betonu (VRE0), b: %8 e-atıklı polimer beton (VRE8), c: %16 e-atıklı polimer beton (VRE16), d: %20 e-atıklı polimer beton (VRE20).

5.1.4 Polimer betonların donma-çözünme döngüleri sonrası SEM analiz sonuçları

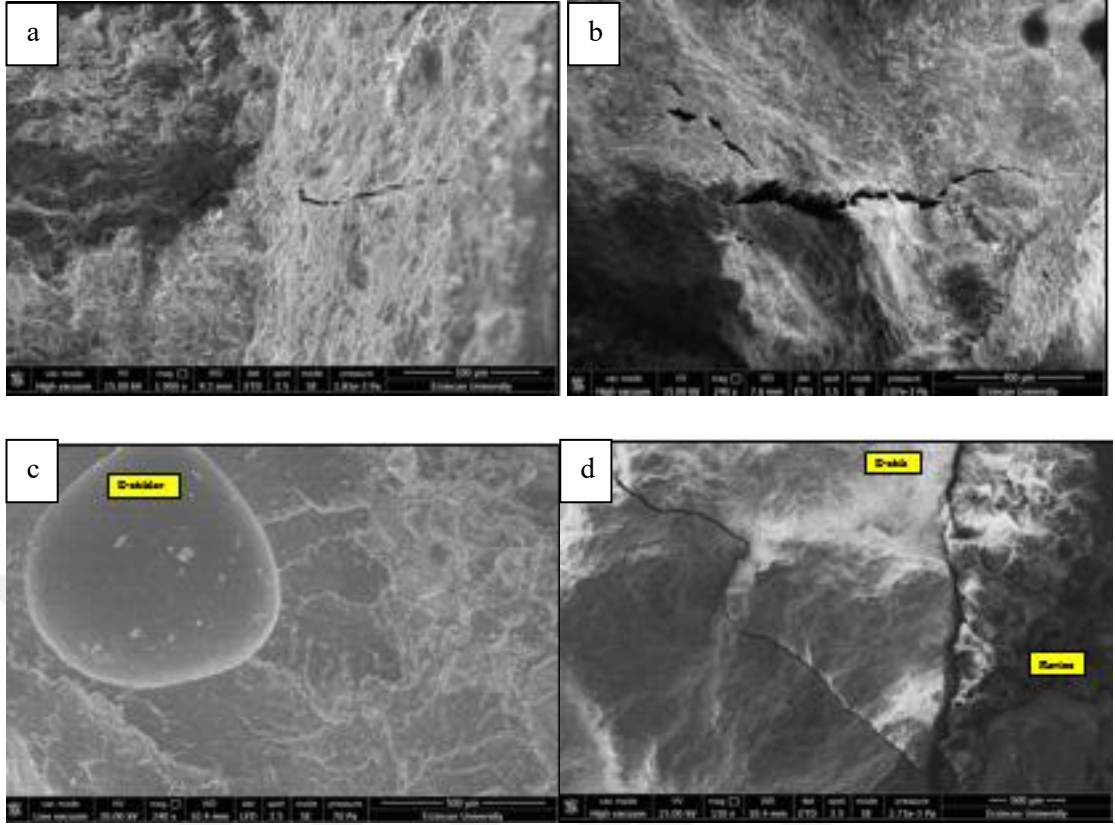
Donma-çözünme deneyi sonrası polyester reçineli polimer betonlara ait içyapı görüntüleri, SEM analizi yapılarak Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.6'da, (a); kontrol, (b); %8 e-atıklı polimer beton, (c); %16 e-atıklı polimer beton ve (d) ise; %20 e-atıklı polimer betonu göstermektedir. Buna göre içerisinde e-atık bulunmayan polyester reçineli polimer betonu temsil eden kontrol betonunda, 300 döngü sonunda yaygın olmasa da çatlakların meydana geldiği (a) görselinde görülmektedir. (b) görselinde %8 oranında e-atık kullanımının, özellikle reçine-e-atık ara yüzeyinde çatlaklar oluşturmaya başladığı elde edilmiştir. %16 e-atık oranına sahip polyester reçineli polimer betonda ise, (c) görselinde görülebildiği gibi hem çatlak sayısı artmış hem de reçine-e-atık ara yüzeyinde oluşan çatlaklar belirginleşmiştir. (d) görselini temsil eden %20 e-atıklı polyester reçineli polimer betonda ise hem e-atığın kendi yapısında çatlak ve parçalanmalar meydana gelmiş hem de polimer betonda oluşan çatlakların derinliği dikkat çekici boyutlara ulaşmıştır.



Şekil 5.6. Polyester reçineli polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrası SEM görüntüleri, a: Kontrol betonu (PRE0), b: %8 e-atık katkılı polimer beton (PRE8), c: %16 e-atık katkılı polimer beton (PRE16), d: %20 e-atık katkılı polimer beton (PRE20).

Daha önceki çalışmalardan elde edilen gözlemlere benzer şekilde, yüksek oranlarda (bu çalışma için %16 ve %20) e-atık kullanımı ile birlikte polyester reçineli polimer betonlarda boşlukların ve gözeneklerin sayısında donma-çözünme döngülerinin de varlığında artış görülmüştür (Alqahtani vd., 2017). Farklı e-atık oranlarına sahip polyester reçineli polimer betonların SEM analizi ile elde edilen iç yapı görüntüleri, donma-çözünme deneyi sonucu ulaşılan ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları ile görsel değerlendirme sonuçlarını teyit eder nitelikte bulunmuştur.

Vinilester reçineli polimer betonların 300 döngü donma-çözünme sonrası SEM analiz sonuçları, Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil 5.7’de yer alan (a) görseli kontrol, (b) görseli %8 e-atıklı polimer beton, (c) görseli %16 e-atıklı polimer beton ve (d) görseli de %20 e-atıklı polimer betonu temsil etmektedir. Vinilester reçineli kontrol betonunda donma-çözünme deneyi sonucu az da olsa çatlakların meydana geldiği, (a) görselinde görülebilmektedir. (b) görselinde, %8 oranında e-atığa sahip vinilester reçineli polimer betonun iç yapısında oluşan çatlakların kontrol betonuna göre daha derinleştiği tespit edilmiştir. (c) görselinde ise e-atık oranının %16’ya yükselmesi ile birlikte donma-çözünme deneyi sonucu oluşan tahribatın arttığı, e-atıklarda şekil bozukluğu, parçalanma, ufalanma gibi hasarların meydana geldiği belirlenmiştir. %20 e-atığa sahip vinilester reçineli polimer betonda ise (d) görselinde net bir şekilde görülebildiği gibi hem reçine-arayüzey çatlağının derinleştiği hem de e-atığın kendi yapısında çatlakların belirgin bir şekilde arttığı bulunmuştur. E-atık oranlarının %16 ve %20’ye yükselmesi, vinilester reçineli polimer betonların arayüzey yapışkanlık özelliğini azaltarak matris fazındaki bağlanmayı zayıflattığı, SEM görüntüleri ile kanıtlanmıştır (Balasubramanian vd., 2021). SEM analiz sonuçları, vinilester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların donma-çözünme deneyi sonucu ulaşılan verileri ile paralellik göstermiştir.



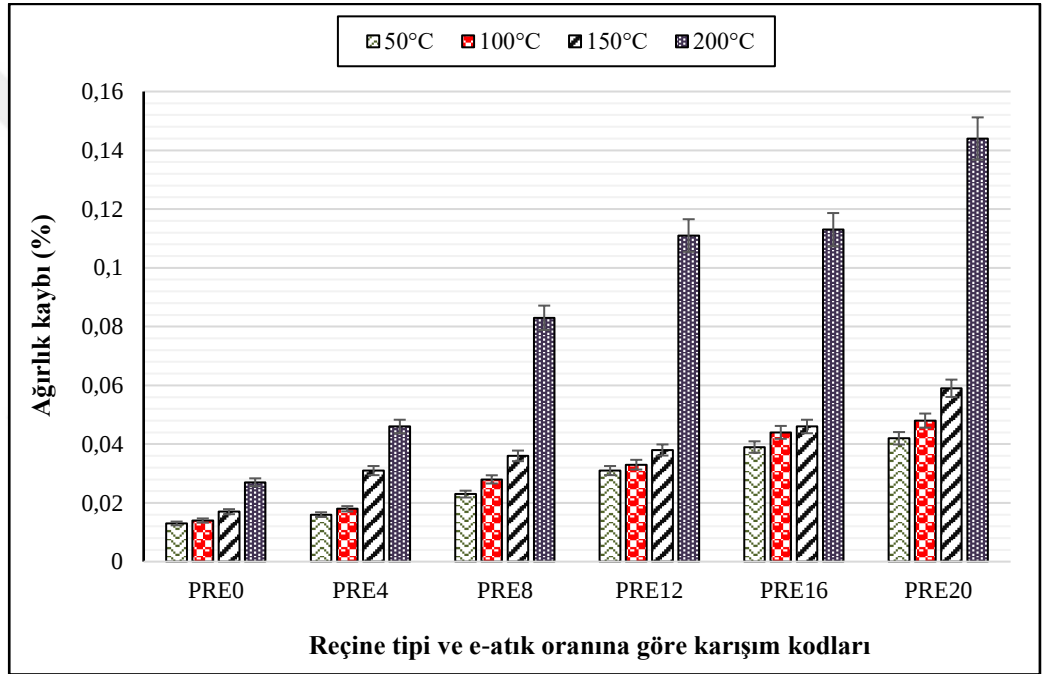
Şekil 5.7. Vinilester reçineli polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrası SEM görüntüleri, a: Kontrol betonu (VRE0), b: %8 e-atık katkılı polimer beton (VRE8), c: %16 e-atık katkılı polimer beton (VRE16), d: %20 e-atık katkılı polimer beton (VRE20).

5.2. Polimer Betonların Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları

5.2.1 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası polimer betonların ağırlık kaybı

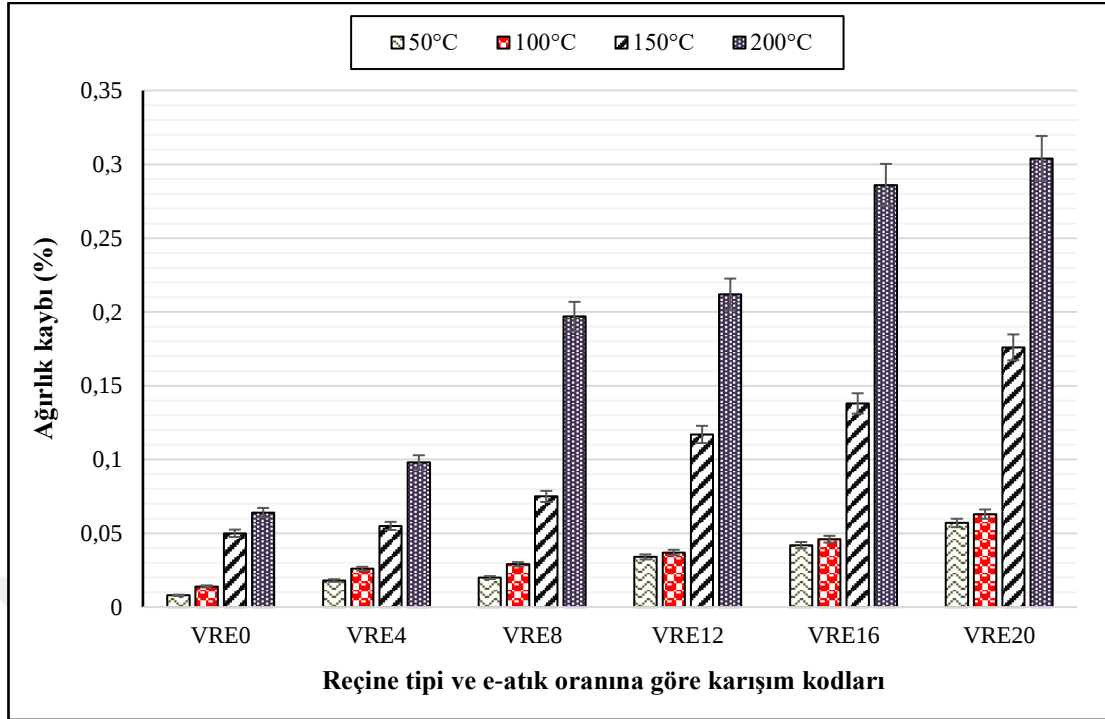
Şekil 5.8’de yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan polyester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların uğradıkları ağırlık kayıpları yüzdesel olarak verilmiştir. Buna göre polimer betonların tümünde sıcaklık derecesi yükseldikçe, ağırlık kayıplarında artışlar meydana gelmiştir. En düşük kayıplar 50°C, en yüksek kayıplar ise 200°C’de gerçekleşmiştir. Örneğin 50°C’de kontrol betonu (PRE0) ile e-atığın en yüksek oranda kullanıldığı %20 e-atıklı polyester reçineli polimer betonun (PRE20) ağırlık kayıpları sırasıyla %0.013 ile %0.042 olarak çok düşük düzeyde elde edilmiştir. Sıcaklık 200°C’ye yükseldiğinde ise bu iki beton arasındaki ağırlık kaybı farkı 5 kat artış sergilemiştir. Polyester reçineli polimer betonların ağırlık kayıplarında, sıcaklık derecesi önemli bir faktör olmuştur. Öyle ki sıcaklıklar 150°C’yi aşp 200°C’ye çıktığında polimer betonların

tamamında dramatik ağırlık kayıpları gerçekleşmiştir. Bu çalışmada olduğu gibi yüksek sıcaklık derecelerine çıkıldığında doğası gereği zaten düşük ısıl dirence sahip olan polimer matrisli betonlarda matris bozulması ile birlikte bu bozulmaya eşlik eden gaz salınımları, beraberinde polimer betonların ağırlık kayıpları yaşamasına neden olmuştur. (Niaki vd., 2018) Ayrıca yanıcı karaktere sahip e-atığın yüksek oranlarda agrega olarak kullanımının da yüksek sıcaklıklar altında polimer betonun performansını olumsuz etkilediği değerlendirilmektedir. (Ullah vd., 2022) E-atıkların özellikle %8 oranını aşırp daha yüksek oranlarda polyester reçineli polimer betonda kullanımı, sıcaklıkların artışı ile birlikte beraberinde daha fazla ağırlık kayıpları getirmiştir.



Şekil 5.8. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polyester reçineli polimer betonların ağırlık kayıpları

Vinilester reçineli e-atıklı polimer betonların, yüksek sıcaklıklar sonrası yaşadıkları ağırlık kaybı sonuçları, Şekil 5.9’da verilmiştir. Tıpkı polyester reçineli polimer betonlarda olduğu gibi sıcaklıkların yükselmesi ile birlikte vinilester reçineli polimer betonların ağırlık kayıplarında da artışlar gerçekleşmiştir. Örneğin e-atığın %16 oranında kullanıldığı vinilester reçineli polimer betonun (VRE16) 50°C sonunda yaşadığı ağırlık kaybı %0.042 iken sıcaklık 200°C’ye yükseldiğinde bu kayıp 6,8 kat artarak %0.286’ya yükselmiştir.



Şekil 5.9. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan vinilester reçineli polimer betonların ağırlık kayıpları

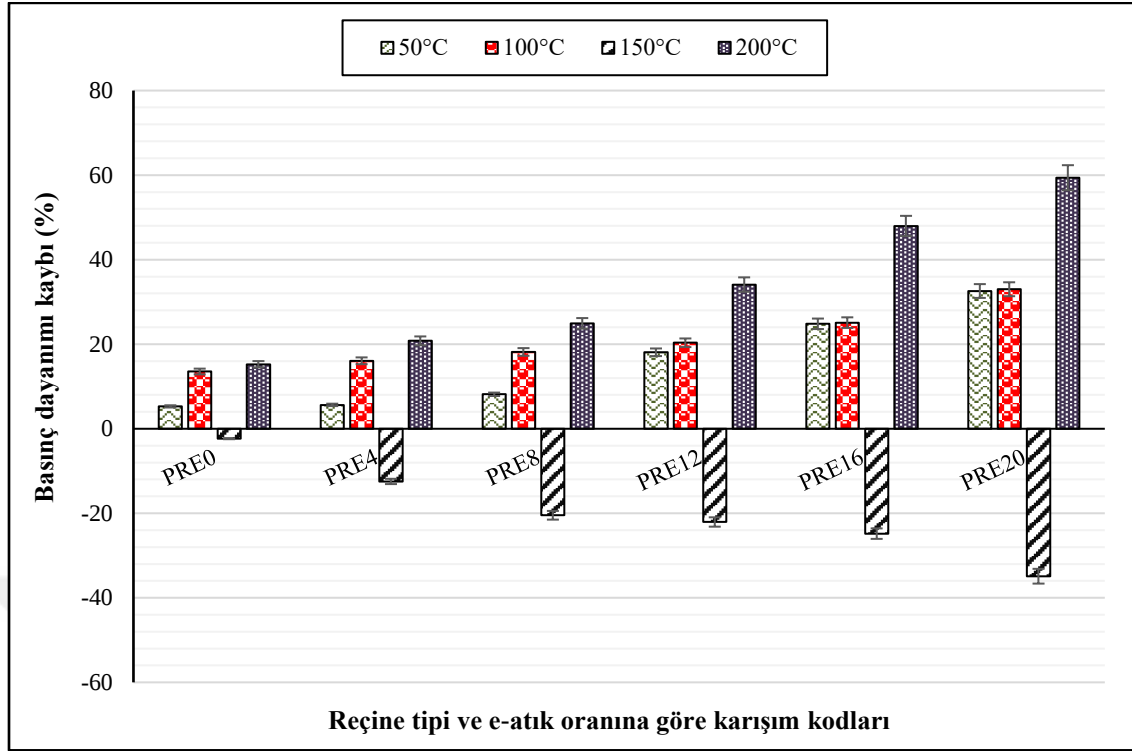
Reçine tipi olarak vinilester reçinenin polimer beton üretimlerinde e-atıklar ile birlikte kullanımı sonucunda, yüksek sıcaklıklar sonrası gerçekleşen ağırlık kayıpları, polyester reçineli polimer betonlardan daha fazla gerçekleşmiştir. Bu durumun yaşanmasının, hali hazırda geleneksel betona göre daha düşük ısıl dirence sahip olan polimer betonlarda kullanılan bağlayıcı reçine tipinin sıcaklık değişimlerine duyarlılığının vinilester reçinede polyestere göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Reis, 2012). Sıcaklıklar henüz 150°C'ye yükseldiğinde bile e-atık oranının da arttığı göz önüne alındığında anlamlı ağırlık kayıpları polyester reçineli polimer betonlardan ziyade vinilester reçineli polimer betonlarda tespit edilmiştir. Örneğin %12 oranında e-atığın agrega olarak yer aldığı polimer betonlar kıyaslandığında, 150°C sonunda polyester reçineli polimer betonun ağırlık kaybı (PRE12) %0.038 olarak elde edilmişken bu kayıp vinilester reçineli polimer betonda (VRE12) 3 kat artarak %0.117 olmuştur. Bu durum diğer sıcaklık dereceleri ve e-atık oranlarında da benzer şekilde gözlemlenmiştir.

Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında, yüksek sıcaklıklar sonrası yaşanan ağırlık kayıpları üzerinde vinilester reçinenin polyestere göre daha olumsuz bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca ağırlık kayıpları üzerinde polyester reçineli polimer

betonlarda 150°C eşik değeri olmuşken bu durum vinilester reçineli polimer betonlarda 100°C olarak elde edilmiştir. E-atık oranı açısından %4 oranının her iki reçine tipi ve sıcaklık derecelerinin tümü için ideal oran olduğu, bu çalışma sonucunda ilk kez söylenebilmektedir.

5.2.2 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı

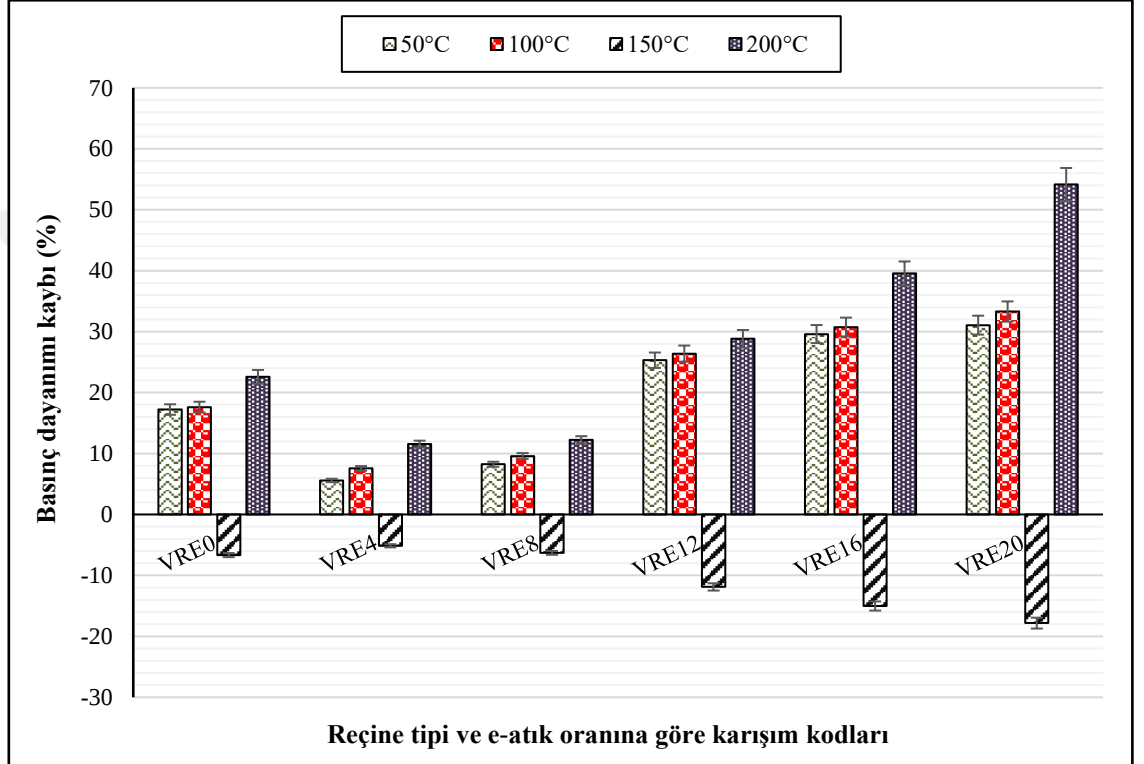
Polimer betonların ortam sıcaklığında (21°C) ölçülen basınç dayanımı sonuçları, Tablo 5.1’de verilmiştir. Farklı reçineli ve farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki yaşadıkları yüzdesel basınç dayanımı kayıpları, Tablo 5.1’de yer alan veriler doğrultusunda elde edilmiştir. Şekil 5.10’da görülebildiği gibi polyester reçineli polimer betonlarda, e-atık kullanımı ile birlikte yüksek sıcaklıkların etkisi altında basınç dayanımı kayıplarında artışlar gözlemlenmiştir. Bu durumun tek istisnası tüm gruplar için geçerli olmak üzere sıcaklığın 150°C olduğu şartlarda elde edilmiştir. Sıcaklık derecesi 150°C olduğunda polimer betonların tamamında basınç dayanım kaybı yerine tam tersi bir şekilde dayanımlarda artış elde edilmiştir. Literatürde bu konuda yer alan çok sınırlı çalışmadan birisi olan Oussama vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da bu çalışmaya benzer şekilde 150°C’nin polimer betonların özellikleri üzerinde belirleyici sıcaklık derecesi olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca 150°C ile birlikte post-retikülasyonun ortaya çıkarak reçinelerin çapraz bağlanma yoğunluklarının arttığı, zincir hareketliliğinin azalarak polimer betonların dayanımlarının arttığı bildirilmiştir. Örneğin e-atık oranının %8 olarak kullanıldığı polyester reçineli polimer betonun (PRE8) 100°C altındaki uğradığı basınç dayanımı kaybı %18.16 olmuşken, 150°C’de bu durum %20.47 dayanım artışı olarak gerçekleşmiştir. Polimer betonların tümünde sıcaklıkların 200°C’ye yükselmesi, beraberinde tekrar basınç dayanım kayıpları meydana getirmiştir. Bu kayıpların yaşanmasında reçinelerin ısı direncini aşan sıcaklık derecesine (bu çalışmada 200°C olmuştur) ulaşılmasının etkili olduğu düşünülmektedir. (Ataabadi vd., 2021). Ağırlık kaybı sonuçlarına benzer bir şekilde sıcaklığın 200°C’ye ulaşması sonucunda polyester reçineli polimer betonların basınç dayanımı kayıplarında e-atığının varlığında dramatik artışlar görülmüştür.



Şekil 5.10. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polyester reçineli polimer betonların basınç dayanımı kayıpları

Vinilester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların yüksek sıcaklıklar altında uğradıkları basınç dayanımı kayıpları, Şekil 5.11’de verilmiştir. Burada ilginç ve literatür için heyecan verici sonuçların elde edildiği rahatlıkla ifade edilebilmektedir. E-atığın %4 ve %8 oranlarında agrega olarak yer aldığı vinilester reçineli polimer betonlar, kontrol betonuna göre yüksek sıcaklıkların etkisi altında daha düşük düzeyde basınç dayanımı kaybı yaşamıştır. Örneğin 200°C sonunda kontrol betonu %22.59 oranında basınç dayanımı kaybı yaşamıştır. Örneğin 200°C sonunda kontrol betonu %22.59 oranında basınç dayanımı kaybı yaşarken, %4 e-atıklı polimer beton %11.54, %8 e-atıklı polimer beton ise %12.23 oranlarında kayıp yaşamıştır. Bu kayıplar kontrol betonuna göre yaklaşık 2 kat daha az gerçekleşmiştir. Bu durumun oluşmasında, plastik kökenli e-atıkların nispeten düşük oranlarda polimer beton üretimlerinde yer alması sonucunda polimer (plastik) kökenli vinilester reçine ile sergilediği üstün aderansın etkili olduğu düşünülmektedir. E-atığın %12 ve daha fazla oranlarda kullanımı ise sıcaklık artışıyla birlikte daha fazla basınç dayanım kayıpları beraberinde getirmiştir. Tıpkı polyester reçineli polimer betonlarda gözlemlendiği gibi vinilester reçineli polimer betonlarda da 150°C altında betonların basınç dayanımlarında artışlar elde edilmiştir.

Genel olarak her iki tipli reçine ve farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonlarda, 150°C'nin ayırt edici özellikte olduğu belirlenmiştir. Bu sıcaklık derecesinde polimer betonların tümünde basınç dayanımlarında kayıp değil kazanç elde edilmiştir. Vinilester reçineli polimer betonlarda %4 ile %8 e-atık oranlarının en düşük düzeyde basınç dayanımı kaybına uğraması da bu çalışmadan çıkarılan literatür için ilgi çekici bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

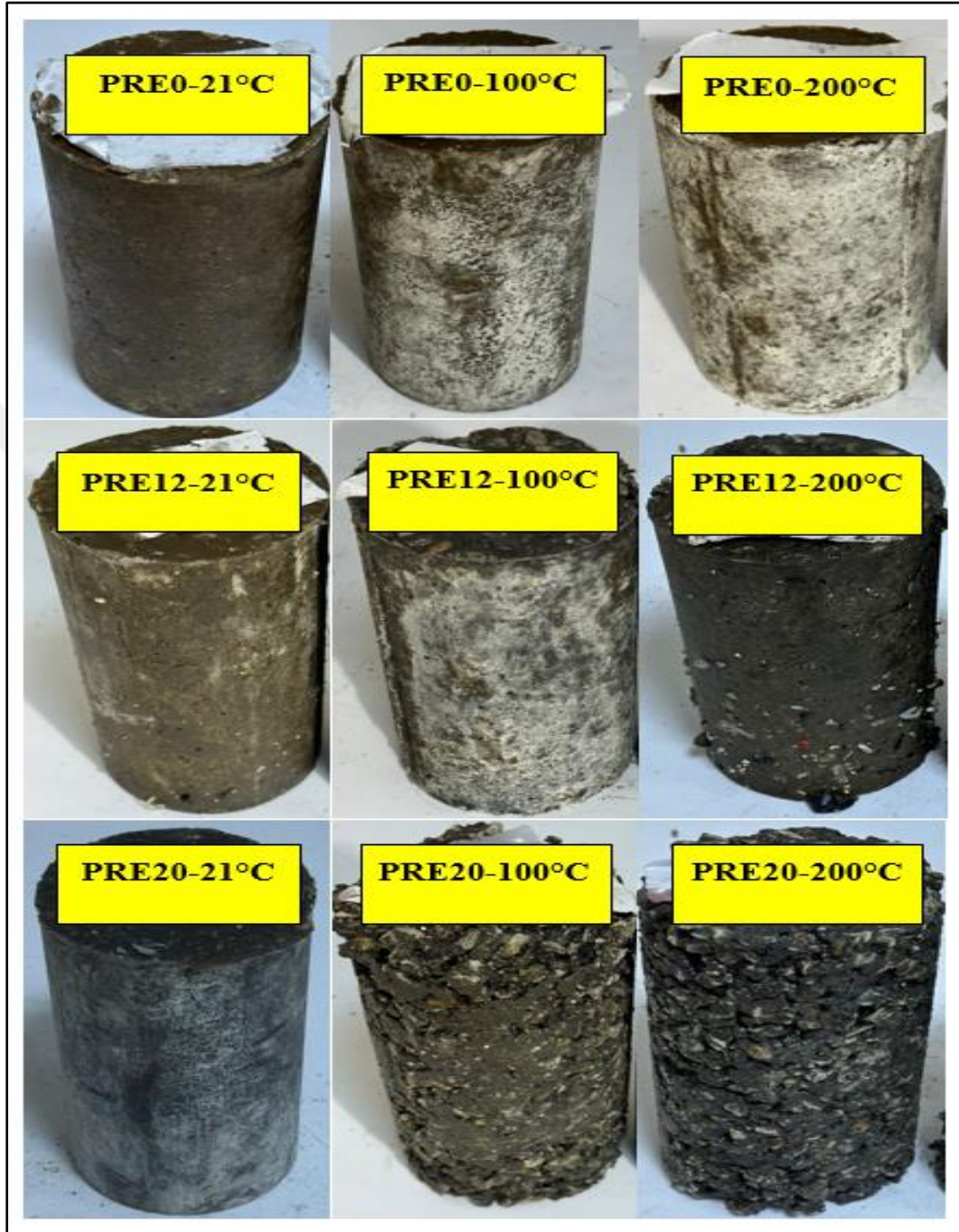


Şekil 5.11. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan vinilester reçineli polimer betonların basınç dayanımı kayıpları

5.2.3 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları

Yüksek sıcaklık deneyi sonucunda polyester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonlara ait görseller Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekil 5.12'de, ortam sıcaklığı (21°C), 100°C ve 200°C sonunda kontrol betonu (PRE0), %12 e-atıklı polyester reçineli polimer beton (PRE12) ve %20 e-atıklı polyester reçineli polimer betona (PRE20) ait hasar durumları görülmektedir. Buna göre kontrol betonunda 21°C'den 200°C'ye doğru sadece beyaz lekelenmelerin olduğu belirlenmiştir. %12 e-atıklı polyester reçineli polimer betonda ise özellikle 200°C sonunda erimeden kaynaklı agrega (e-atık dahil)-polimer

matris bozulması, çatlamlar, kapak atmalar, renk değişimi gibi tahribatlar belirgin bir şekilde yaşanmıştır.

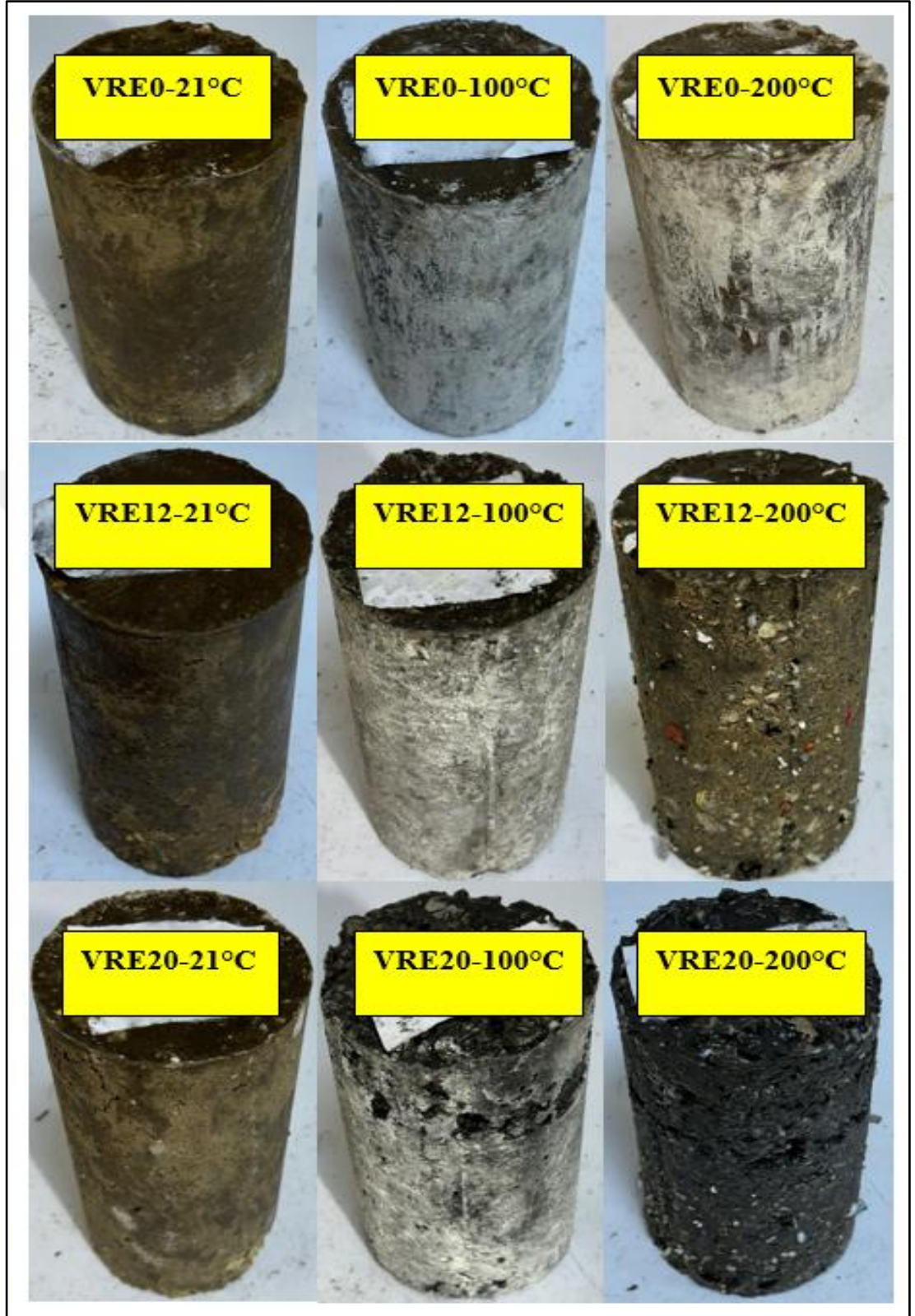


Şekil 5.12. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polyester reçineli polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları

E-atığın %20 oranında kullanımı sonucunda ise en fazla hasar oluşmuş, henüz 100°C ardından agregalar reçineden ayrılarak şekilsel bozukluklar meydana gelmiştir. 200°C

sonunda ise e-atıklar başta olmak üzere agregalar reçineden neredeyse tamamen ayrılmış, aşınma, pul pul dökülme, boyutsal stabilitenin kaybı gibi hasarlar net olarak gerçekleşmiştir. Son olarak, polyester reçineli e-atıklı polimer betonların yüksek sıcaklık deneyinden elde edilen verilerin birbirleriyle örtüştüğü tespit edilmiştir.

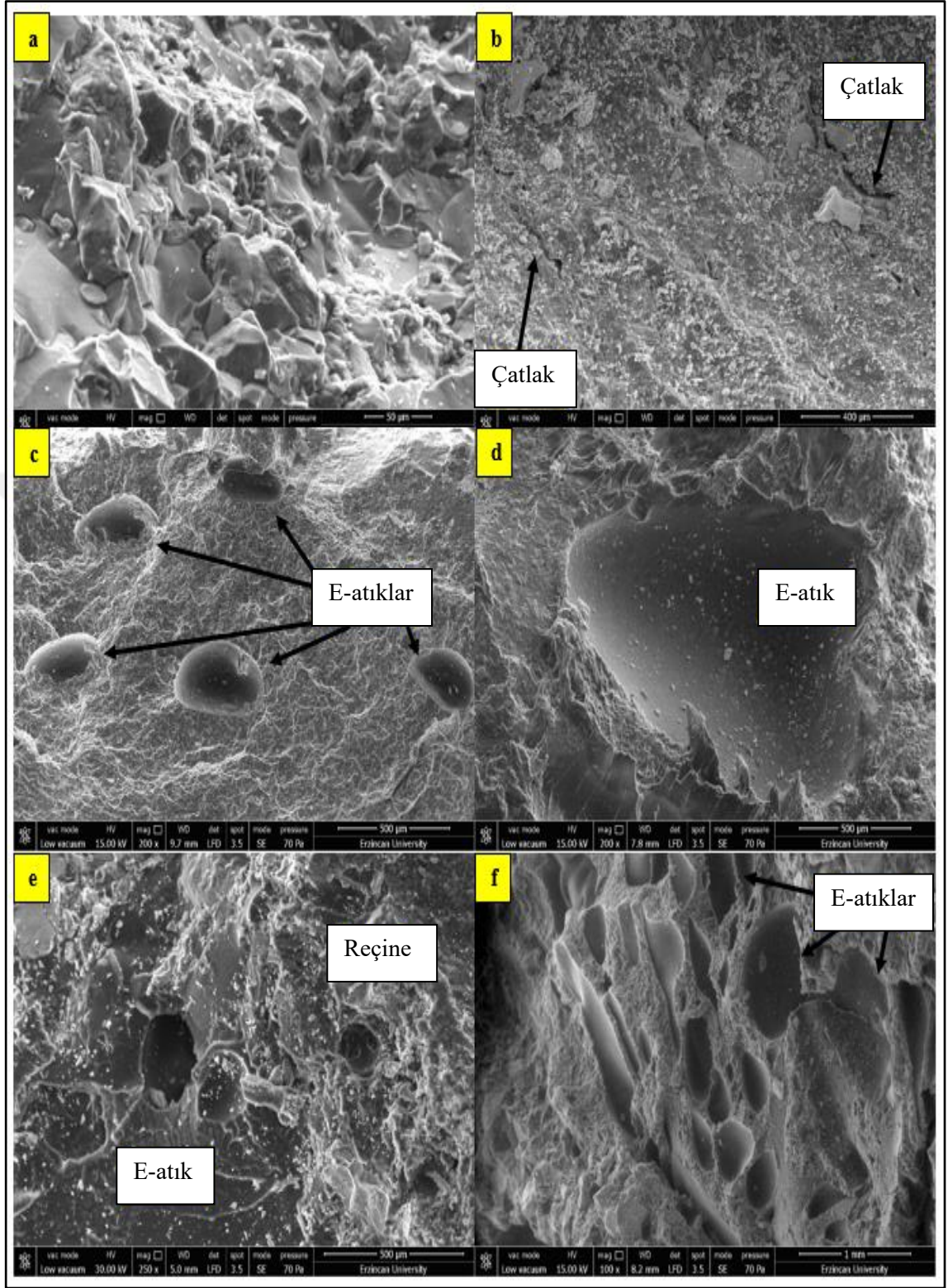
Vinilester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki görselleri, Şekil 5.13'te verilmiştir. Şekil 5.13'te ortam sıcaklığı (21°C), 100°C ve 200°C sonunda kontrol betonu (VRE0), %12 e-atıklı vinilester reçineli polimer beton (VRE12) ve %20 e-atıklı vinilester reçineli polimer betona (VRE20) ait hasar durumları görülmektedir. Kontrol betonunda 100°C ile birlikte beyaz lekelenmeler oluşmuş ve bu durumun yoğunluğu 200°C sonunda artmıştır. %12 e-atığa sahip vinilester reçineli polimer betonda ise 100°C'de beyaz lekelenmeler görülmekle birlikte asıl 200°C sonunda erimeden kaynaklı agregaların (e-atık dahil) reçineden ayrışması, çatlak oluşumu, soyulma gibi hasarlar meydana gelmiştir. %20 e-atığa sahip vinilester reçineli polimer betonda, henüz 100°C'de çatlaklar oluşmuş, 200°C'de ise belirgin bir şekilde erimelerden kaynaklı agrega-matris parçalanması, derin çatlak artışı, kapak atma, şekil ve renk değişimi gibi ağır hasarlar gerçekleşmiştir. Görsel değerlendirmeler, vinilester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların yüksek sıcaklıklar sonrası yaşadıkları ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarını teyit eder nitelikte belirlenmiştir.



Şekil 5.13. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan vinilester reçineli polimer betonların görsel değerlendirme sonuçları

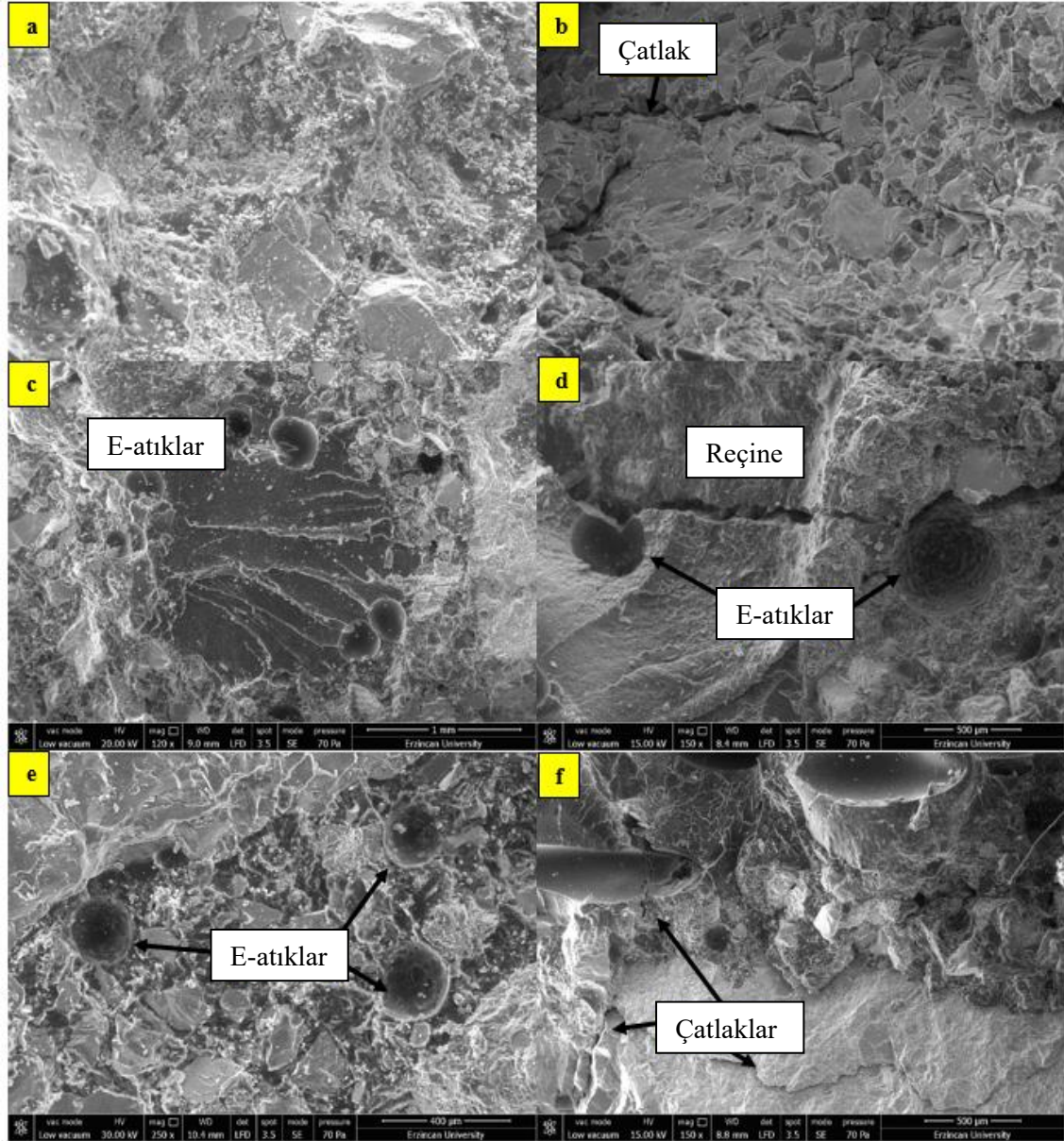
5.2.4 Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası polimer betonların SEM analiz sonuçları

Yüksek sıcaklık deneyi sonrası polyester reçineli polimer betonlara ait içyapı görüntüleri, SEM analizi yapılarak Şekil 5.14'te verilmiştir. Şekil 5.14'te a ve b görselleri; kontrol betonunun 100°C ve 200°C sonrası, c ve d görselleri; %12 e-atıklı polyester reçineli polimer betonun 100°C ve 200°C sonrası, e ve f görselleri ise; %20 e-atıklı polyester reçineli polimer betonun 100°C ve 200°C sonrası içyapılarının durumlarını göstermektedir. Buna göre içerisinde e-atık bulunmayan polyester reçineli polimer betonu temsil eden kontrol betonunda, 200°C sonunda yaygın olmasa da çatlakların meydana geldiği b görselinde görülmektedir. c görselinde 100°C ardından %12 oranında e-atığa sahip polyester reçineli polimer betonda, özellikle e-atıkların yüzeyinde çatlaklar oluşmaya başladığı elde edilmiştir. Sıcaklık 200°C'ye yükseldiğinde ise d görselinde net olarak görülebildiği gibi %12 e-atıklı polyester reçineli polimer betonda reçine-e-atık ayrışmaları başlayıp e-atıkların adeta parçalanarak tahrip oldukları belirlenmiştir. e ve f görsellerini temsil eden %20 e-atıklı polyester reçineli polimer betonda ise hem 100°C hem de 200°C sonunda e-atıkların reçineden sıyrılması, kopması, çatlakların oluşup yaygınlaşması dikkat çekici boyutlara ulaşmıştır. Bu hasarların oluşmasında; polyester reçine bağlayıcısının sıcaklık derecelerinin yükselmesi sonucunda termo-oksidatif bozunması ile polimer matris-agrega arasındaki bağın çözülmesine atfedilebileceği gerçeği (Oussama vd., 2012; Niaki vd., 2018), SEM analizi ile doğrulanmıştır. Farklı e-atık oranlarına sahip polyester reçineli polimer betonların SEM analizi ile elde edilen iç yapı görüntüleri, yüksek sıcaklık deneyi sonucu elde edilen tüm sonuçlar ile uyum göstermiştir.



Şekil 5.14. Yüksek sıcaklık deneyi (100°C ve 200°C) sonrasında polyester reçineli polimer betonların SEM görüntüleri, a ve b: Kontrol betonu (PRE0), c ve d: %12 e-atık katkılı polimer beton (PRE12), e ve f: %20 e-atık katkılı polimer beton (PRE20).

Vinilester reçineli polimer betonların yüksek sıcaklık deneyi sonrası SEM analiz sonuçları, Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15. Yüksek sıcaklık deneyi (100°C ve 200°C) sonrasında vinilester reçineli polimer betonların SEM görüntüleri, a ve b: Kontrol betonu (VRE0), c ve d: %12 e-atık katkılı polimer beton (VRE12), e ve f: %20 e-atık katkılı polimer beton (VRE20).

Şekil 5.15'te yer alan a ve b görselleri; kontrol betonunun 100°C ve 200°C sonrası, c ve d görselleri; %12 e-atıklı vinilester reçineli polimer betonun 100°C ve 200°C sonrası, e ve f görselleri ise; %20 e-atıklı vinilester reçineli polimer betonun 100°C ve 200°C sonrası içyapılarının durumlarını temsil etmektedir. Vinilester reçineli kontrol betonunda

200°C sonunda az da olsa çatlakların meydana geldiği, b görselinde görülebilmektedir. c görselinde, %12 oranında e-atığa sahip vinilester reçineli polimer betonun henüz 100°C sonunda özellikle e-atıklarda gerçekleşen erime, parçalanma ve reçine-agrega ara yüzey bozulması gibi hasarlar net bir şekilde görülebilmektedir. Bu durum d görselinde 200°C ile birlikte tahribatın artarak çatlakların sayısı ve derinliğinin artışı ve e-atıkların kendi yapılarında bile çatlamların oluşması şeklinde kendini göstermiştir.

%20 e-atığa sahip vinilester reçineli polimer betonda ise e ve f görsellerinde net bir şekilde görülebildiği gibi 100°C ve 200°C sonrası hem reçine-arayüzey çatlağının derinleştiği hem de e-atığın kendi yapısında çatlakların belirgin bir şekilde arttığı bulunmuştur. %12 ve %20 e-atıklı vinilester reçineli polimer betonların 100°C ve 200°C ardından ciddi hasar görmelerinin sebepleri olarak agrega-matris ara yüzeyindeki kohezyon kaybı ile polimer beton kompozitini oluşturan malzemelerin termal genleşmelerindeki farklılıklar, kimyasal olarak reçinenin bozulması gibi parametrelerin etkili olduğu düşünülmektedir. (Elalaoui vd., 2018; Ataabadi vd., 2021; Rashid vd., 2019). SEM analiz sonuçları, vinilester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların yüksek sıcaklık deneyi sonucu ulaşılan verileri ile paralellik göstermiştir.

6. SONUÇLAR

Deneyisel çalışmalar ile mikroskopik gözlemlerden elde edilen bulgular doğrultusunda ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. E-atıklı polyester reçineli polimer betonlar ile kontrol betonlarının donma-çözünme deneyi sonrası uğradıkları ağırlık kayıpları çok düşük değerlerde elde edilmiştir. Öyle ki e-atığın en yüksek oranda kullanımı (%20) bile beraberinde donma-çözünme döngüleri boyunca %0.96 ila %1.4 aralığında ihmal edilebilecek düzeyde ağırlık kaybı getirmiştir. 300 donma-çözünme döngüsü sonunda kontrol ve e-atıklı vinilester reçineli polimer betonların ağırlık kayıpları %0.17 ile %0.22 arasında 0 değerine çok yakın gerçekleşmiştir.
2. Her iki reçine tipi için de e-atığın %4, %8 ve %12 oranlarında agrega olarak kullanımı, beraberinde kontrol betonlarına göre donma-çözünme sonrası daha düşük basınç dayanım kayıpları getirmiştir. Örneğin e-atık oranının %4 olduğu polyester reçineli polimer beton, kontrol betonuna göre %30 oranında daha az basınç dayanımı kaybı yaşamıştır.
3. Tıpkı donma-çözünme deneyi sonrası meydana gelen ağırlık kaybı sonuçlarında gözlemlendiği gibi vinilester reçineli polimer betonlar, polyester reçinelilere göre daha az basınç dayanımı kaybı yaşamıştır.
4. E-atıkların agrega olarak yer aldığı farklı tip reçineli polimer betonların donma-çözünme deneyi sonrası yaşadıkları görsel tahribat, polyester reçineli polimer betonlarda vinilester reçineliye göre daha belirgin bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum, ağırlık ve basınç dayanım kayıpları sonuçları ile paralellik göstermiştir.
5. Yüksek oranlarda (bu çalışma için %16 ve %20) e-atık kullanımı ile birlikte polyester reçineli polimer betonlarda boşlukların ve gözeneklerin sayısında donma-çözünme döngülerinin de varlığında artış görüldüğü, SEM analizi ile elde edilen içyapı görüntüleriyle teyit edilmiştir.
6. E-atık oranlarının %16 ve %20'ye yükselmesi, vinilester reçineli polimer betonların arayüzey yapışkanlık özelliğini azaltarak matris fazındaki bağlanmayı zayıflattığı, SEM görüntüleri ile kanıtlanmıştır.
7. Farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların, donma-çözünme deneyi sonucu elde edilen ağırlık kaybı, basınç dayanımı kaybı, görsel değerlendirme ve SEM analiz

sonuçlarına paralel bir şekilde olumsuz anlamda en çok etkilenen polyester reçineli polimer betonlar olmuştur. Vinilester reçine ile birlikte kullanılan e-atıklarla üretilen polimer betonların donma-çözünmeye karşı davranışları daha üstün bir performans göstermiştir.

8. Yüksek sıcaklıklar sonrası yaşanan ağırlık kayıpları üzerinde vinilester reçinenin polyestere göre daha olumsuz bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca ağırlık kayıpları üzerinde polyester reçineli polimer betonlarda 150°C eşik değeri olmuşken bu durum vinilester reçineli polimer betonlarda 100°C olarak elde edilmiştir. E-atık oranı açısından %4 oranının her iki reçine tipi ve sıcaklık derecelerinin tümü için ideal oran olduğu, bu çalışma sonucunda ilk kez söylenebilmektedir.
9. Genel olarak her iki tipli reçine ve farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonlarda, 150°C'nin ayırt edici özellikte olduğu belirlenmiştir. Bu sıcaklık derecesinde polimer betonların tümünde basınç dayanımlarında kayıp değil kazanç elde edilmiştir. Vinilester reçineli polimer betonlarda %4 ile %8 e-atık oranlarının en düşük düzeyde basınç dayanımı kaybına uğraması da bu çalışmadan çıkarılan literatür için ilgi çekici bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.
10. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası yapılan görsel değerlendirmeler, her iki tip reçineli polimer betonda da 200°C sonrası özellikle %20 oranında e-atık kullanımı ile birlikte belirgin bir şekilde erimelerden kaynaklı agrega-matris parçalanması, derin çatlak artışı, kapak atma, şekil ve renk değişimi gibi ağır hasarların gerçekleştiğini göstermiştir.
11. SEM analiz sonuçları, polyester ve vinilester reçineli farklı e-atık oranlarına sahip polimer betonların yüksek sıcaklık deneyi sonucu ulaşılan verileri ile uyum göstermiştir.
12. Doymamış polyester reçine ile vinilester reçinenin polimer betonların bağlayıcı malzemesi olarak seçildiği çalışmada, bu betonların ekstrem şartlar altındaki davranışı üzerinde donma-çözünme deneyi için vinilester, yüksek sıcaklık deneyi için ise polyester reçinenin daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca e-atık oranlarına ve reçine tipine bağlı olarak deneysel bulgular, bu çalışmanın hipotezini doğrulamıştır.

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.
- Agrawal, A. K. & Dharni, T. L. (2012) “Thermoplastic elastomers: Synthesis and applications”, *International Journal of Polymer Science*,(1), 1-19.
- Ahirwar S., Malviya P., Patidar V., Singh V.K., (2016) “An experimental study on concrete by using e-waste as partial replacement for coarse aggregate”, *International Journal of Science Technology & Engineering* 3 (4) 7-13.
- 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.
- Akman, M.S. (1987) Yapı Malzemeleri, *İTÜ İnşaat Fakültesi Ders Notları Kitabı*, İstanbul, 121.
- Akovalı, D. (1993) Polimer Ders Notları, *O.D.T.Ü. yayınları*, Ankara, 56-60.
- 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.
- Allen, G. & Bevington, J. C. (1989) “Polymer science and technology”, *Pearson Education*, New York, 1-27.
- Al-Salem S.M., Leeke G.A., El-Eskandarany M.S., Haute M.V., Constantinou A., Dewil R., Baeyens J., (2022) “On the implementation of the circular economy route for E-waste management: A critical review and an analysis for the case of the state of Kuwait”, *Journal of Environmental Management* 323 116181.
- 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.
- 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.

- Bărbuță M., Harja M., Baran I., (2010) "Comparison of mechanical properties for polymer concrete with different types of filler", *Journal of Materials in Civil Engineering* 22 (7) 696-701.
- Barouta D., Alassali A., Picuno C., Bruno M., Syranidou E., Fiore S., Kuchta K., (2022) "E-plastics in a circular economy: A comprehensive regulatory review", *Journal of Cleaner Production* 355 131711.
- Bulut, H.A. & Şahin, R. (2017) "A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste", *Composite Structures*, 178, 50-62.
- Bulut H.A., Şahin R., (2017) "A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste", *Composite Structures* 178 50-62, 104.
- 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.
- 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.
- Charitopoulou M.A., Stefanidis S.D., Lappas A.A., Achilias D.S., (2022) "Catalytic pyrolysis of polymers with brominated flame-retardants originating in waste electric and electronic equipment (WEEE) using various catalysts", *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 26 100612.
- 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.
- 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.
- 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.
- Damal V.S., Londhe S.S., Mane A.B., (2015) "Utilization of electronic waste plastic in concrete", *International Journal of Engineering Research and Applications* 5 (4) 35-38.

- Ekmen,Ö., (2019) “Raft polimerizasyonu ile iyi tanımlanmış zincir ortası fotoaktif polistiren makrofotobaşlatıcısının sentezi ve karakterizasyonu”, (Yüksek Lisans Tezi), *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 58.
- 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.
- Esmaceli J., Andalibia K., (2019) “Development of 3D Meso-Scale finite element model to study the mechanical behavior of steel microfiber-reinforced polymer concrete”, *Computers and Concrete* 24 (5) 413-422.
- Esmaceli, 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.
- 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.
- Ghassemi, P. & Toufigh, V. (2020) “Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments”, *Construction and Building Materials*, 234, 117887.
- 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.
- Gupta A.K., Mani P., Krishnamoorthy S., (1983) “Interfacial adhesion in polyester resin concrete”, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 3 (3) 149-154.
- Hazra A., Das S., Ganguly A., Das P., Chatterjee P.K., Murmu N.C., Banerjee P., (2019) “Plasma arc technology: A potential solution toward waste to energy conversion and of GHGs mitigation”, *Waste Valorisation and Recycling*, 203-217.

- 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.
- 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.
- 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.
- Kayhan, E., & Demirer, A. (2016). Polimer işleme sektörlerindeki meslek hastalıkları, kazalar ve iş güvenliği. *Sakarya University Journal of Science*, 20(3), 497-507.
- 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.
- Ma D., Liang Z., Liu Y., Jiang Z., Liu Z., Zhou L., Tang L., (2021) "Mesoscale modeling of epoxy polymer concrete under tension or bending", *Composite Structures* 256 113079.
- Madhav A.V.S., Rajaraman R., Harini S., Kiliroor C.C., (2022) "Application of artificial intelligence to enhance collection of E-waste: a potential solution for household WEEE collection and segregation in India", *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 40 (7) 1047-1053.
- 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.
- Martínez-Barrera G., Gencel O., Martínez-López M., (2022) "Polyester polymer concrete modified by polyester fibers and gamma rays", *Construction and Building Materials* 356 129278.
- 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.
- Niaki M.H., Fereidoon A., Ahangari M.G., (2018) "Effect of basalt, silica sand and fly ash on the mechanical properties of quaternary polymer concretes", *Bulletin of Materials Science* 41 1-11.

- Niaki M.H., Fereidoon A., Ahangari M.G., (2018) “Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete”, *Composite Structures* 191 231-238.
- 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.
- Özden Akkaya, Ç., (2010) “Polimer Betonların Donma-çözünme Etkisine Dayanıklılığı”, (Yüksek Lisans Tezi), *Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ, 68.
- 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.
- Pişkin, A., (2010) “Polimer Beton Üretiminde Cam Tozu Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, (Yüksek Lisans Tezi), *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya. Reis J.M.L., Ferreira A.J.M., (2006) “Freeze-thaw and thermal degradation influence on the fracture properties of carbon and glass fiber reinforced polymer concrete”, *Construction and Building Materials* 20 (10) 888-892.
- Reis J.M.L., Ferreira A.J.M., (2006) “The effects of atmospheric exposure on the fracture properties of polymer concrete”, *Building and Environment* 41 (3) 262-267.
- 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. 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.
- Rocha T.B., Penteadó C.S.G., (2021) “Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: case study in the Campinas Area, Brazil”, *Journal of Cleaner Production* 314 128092.
- Sabau M., Vargas J.R., (2018) “Use of e-plastic waste in concrete as a partial replacement of coarse mineral aggregate”, *Computers and Concrete* 21 (4) 377-384.
- Santhanam, N., Ramesh, B. & Pohsnem, F.K. (2020) “Concrete blend with E-waste plastic for sustainable future”, *Materials Today: Proceedings*, 22(3), 959-965.

- Seco A., Echeverría A.M., Marcelino S., García B., Espuelas S., (2020) “Durability of polyester polymer concretes based on metallurgical wastes for the manufacture of construction and building products”, *Construction and Building Materials* 240 117907.
- 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.
- 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.
- Shokrieh M.M., Heidari-Rarani M., Shakouri M., Kashizadeh E., (2011) “Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete”, *Construction and Building Materials* 25 (8) 3540-3549.
- 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. (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.
- Suchithra S., Indu V.S., (2015) “Study on replacement of coarse aggregate by e-waste in concrete”, *International Journal of Engineering Research & Technology* 3 (29) 1-5.
- Tan D., (2010) “Katkılı betonların donma-çözünmeye karşı performanslarının incelenmesi”, (Yüksek Lisans Tezi), *Sakarya Üniversitesi fen Bilimler Enstitüsü*, Sakarya, 64.
- Topsakal, A., (2013) “Polimer Betonların Bazı Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi”, (Yüksek Lisans Tezi), *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 125.
- Türk Standartları Enstitüsü Yönetmeliği.** “12350-6 Taze Beton Deneyi Bölüm 6: Yoğunluk”, Ankara, Türkiye.
- Türk Standartları Enstitüsü Yönetmeliği.** “12390-3 Sertleşmiş Beton Deneyi Bölüm 3: Numunelerin Basınç Dayanımı”, Ankara, Türkiye.
- Türk Standartları Enstitüsü Yönetmeliği.** “802 Beton Karışımlarının Tasarımı”, Ankara, Türkiye.

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

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.

Ulu A., Tutar A.I., Kurklu A., Cakir F., (2022) “Effect of excessive fiber reinforcement on mechanical properties of chopped glass fiber reinforced polymer concretes”, *Construction and Building Materials* 359 129486.

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

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.

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.