

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

VİNİLESTER VE POLYESTER REÇİNELİ POLİMER BETONLARIN
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE DOĞAL VE GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT
AGREGALARIN ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bedirhan İhsan GÜLNAHAR

Danışman: Doç. Dr. H. Alperen BULUT

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Doç. Dr. Didem OKTAY
Doç. Dr. H. Alperen BULUT
Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Bedirhan İhsan GÜLNAHAR]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

VİNİLESTER VE POLYESTER REÇİNELİ POLİMER BETONLARIN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE DOĞAL VE GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT AGREGALARIN ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bedirhan İhsan GÜLNAHAR

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. H. Alperen BULUT

2025, 93 sayfa

Bu çalışmanın amacı, doğal ve genleştirilmiş perlit agregaları kullanılarak üretilen hafif polimer betonların durabilite performansını incelemektir. Bu kapsamda, perlit agregalarının polyester ve vinilester reçineli polimer beton matrislerinin hem makroskobik performansı hem de mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri bütünsel ve karşılaştırmalı bir yaklaşımla özgün biçimde değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmada, kuvars agregalarının hacimce %5 ve %10'u doğal veya genleştirilmiş perlit ile ikame edilmiş; üretilen karışımlar üzerinde 28, 56 ve 90 günlük kılcal su emme, asit ve sülfat etkisi, yüksek sıcaklık ve donma-çözünme deneyleri uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık ve donma-çözünme sonrası mikroyapısal değişimler SEM analizleriyle incelenmiştir. Bulgular, perlit tipinin ve kullanım oranının durabiliteyi önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Doğal perlit, her iki reçine tipiyle daha iyi aderans sağlayarak su emme oranını azaltmış ve kimyasal etkiler, donma-çözünme döngüleri ile yüksek sıcaklıklara karşı daha yüksek direnç sunmuştur. Genleştirilmiş perlit ise yüksek gözenekliliği nedeniyle matris geçirgenliğini artırarak dayanımı olumsuz etkilemiştir. Karışımlar arasında %5 doğal perlit içeren vinilester reçineli polimer beton, en düşük dayanım kayıplarıyla en kararlı içyapıyı oluşturmuştur. Sonuç olarak, doğal perlitin yerel, hafif ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir agrega olarak polimer betonların performansını artırmada önemli bir alternatif bulunduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Polimer beton, Perlit, Kılcal su emme, Asit ve sülfat saldırısı, Donma-çözünme, Yüksek sıcaklık, SEM.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE EFFECT OF NATURAL AND EXPANDED PERLITE AGGREGATES ON THE DURABILITY PROPERTIES OF VINYLESTER AND POLYESTER RESIN POLYMER CONCRETES

Bedirhan İhsan GÜLNAHAR

Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,

Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. H. Alperen BULUT

2025, 93 pages

This study investigates the durability performance of lightweight polymer concretes produced with natural and expanded perlite aggregates. The effects of perlite incorporation on the macroscopic behavior and microstructural characteristics of polyester- and vinylester-based polymer concrete matrices were examined through a comparative and integrated approach. Quartz aggregates were replaced by 5% and 10% natural or expanded perlite by volume, and capillary water absorption, acid and sulfate attack, high-temperature exposure, and freeze–thaw tests were performed at 28, 56, and 90 days. Microstructural changes after high-temperature and freeze–thaw conditioning were analyzed using SEM. The results showed that perlite type and replacement level significantly influenced durability. Natural perlite provided stronger adhesion with both resin systems, lowering water absorption and enhancing resistance to chemical attack, freeze–thaw cycles, and elevated temperatures. Conversely, the high porosity of expanded perlite increased matrix permeability and reduced mechanical stability. Among all mixes, the vinylester-based polymer concrete containing 5% natural perlite exhibited the lowest durability losses and the most stable internal structure. Overall, natural perlite proved to be a promising local and sustainable lightweight aggregate for improving the environmental and durability performance of polymer concretes.

Keywords: Polymer concrete, Perlite, Sorptivity, Acid and sulfate attack, Freeze thaw cycles, High temperature, SEM.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi, tecrübe ve yönlendirmeleriyle bana yol gösteren, sabrını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. H. Alperen BULUT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin akademik birikimi, titiz yaklaşımı ve her zaman teşvik edici tavrı, bu çalışmanın şekillenmesinde büyük bir rol oynamıştır. Bilimsel düşünceye bakışımı geliştiren, karşılaştığım her zorlukta sakinliği ve rehberliğiyle yanımda olan hocama minnettarım. En zor anlarımda bile sabır, sevgi ve anlayışla yanımda olan aileme, her daim inanarak bana güç verdikleri için minnettarım. Beton üretim sürecinde ve deneysel aşamalarda yardımını esirgemeyen arkadaşlarıma, emekleri ve dostlukları için gönülden teşekkür ederim. Ve en derin teşekkürü, bu yolculuğun her anında yanımda olan, sevgisiyle ve sabrıyla bana güç veren, en değerli varlığım Gamze Çelenk'e borçluyum; desteğiyle bu süreci daha anlamlı ve özel kıldığı için sonsuz teşekkür ederim. Son olarak bu tez çalışması, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FYL-2024-1017 projesi kapsamında desteklenmiştir.

Bedirhan İhsan GÜLNAHAR

Kasım, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
TABLolar DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı	2
1.2. Araştırmanın Önemi	3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Polimer Malzemeler ve Tarihsel Gelişimi	4
2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması	5
2.2.1. Termoplastikler	5
2.2.2. Termosetler.....	6
2.2.3. Elastomerler	7
2.3. Polimer Malzemelerin Diğer Bileşenleri.....	7
2.3.1. Solventler	7
2.3.2. Plastifiyanlar (Plastikleştiriciler).....	8
2.3.3. Stabilizanlar.....	8
2.3.4. Dolgu maddeleri	8
2.3.5. Pigmentler	9
2.3.6. Katkı maddeleri	9
2.4. Polimerlerin İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanımı	10
2.5. Polimer Beton Türleri.....	10
2.5.1. Polimer emdirilmiş beton (polymer impregnated concrete: PIC)	11
2.5.2. Polimer ile modifiye edilmiş beton (polymer modified concrete: PMC).....	11
2.5.3. Polimer beton (polymer concrete: PC).....	11
2.6. Polimer Betonun Durabilite Özellikleri	12
2.7. Polimer Betonun Avantaj ve Dezavantajları	13
2.8. Reçineler.....	14
2.8.1. Polyester reçine	15
2.8.2. Vinilester reçine	16
2.8.3. Furan reçine.....	17
2.8.4. Epoksi reçine	17
2.9. Perlit Madeni ve Tarihsel Gelişimi	17
2.9.1. Perlitin minerolojik kompozisyonu	18

2.9.2. Perlitin kimyasal bileşimi.....	18
2.9.3. Perlit fiziksel özellikleri	19
2.9.4. Perlitin üretimi.....	19
2.10. Doğal Perlit	20
2.11. Doğal Perlitin Genleştirilmesi.....	20
2.12. Genleştirilmiş Perlit.....	21
2.13. Perlitin Avantaj ve Dezavantajları	22
2.14. Doğal Perlitin Kullanım Alanları	23
2.15. Genleştirilmiş Perlitin Kullanım Alanları	23
2.16. Dünyada Perlit Rezervi	24
2.17. Türkiye’de Perlit Rezervi	25
2.18. Kaynak Özetleri.....	26
3. YÖNTEM.....	29
3.1. Reçineler.....	29
3.2. Agregalar	29
3.3. Sertleştirici ve Hızlandırıcı Maddeler	32
3.4. Beton Karışım Tasarımı	32
3.5. Polimer Betonların Hazırlanması ve Deney Prosedürleri	33
4. BULGULAR	37
4.1. Kılcal Su Emme	37
4.2. Asit Saldırısı	39
4.2.1. Asit saldırısına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı	39
4.2.2. Asit saldırısına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı	41
4.2.3. Asit saldırısına maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirilmesi.....	42
4.3. Sülfat Saldırısı	44
4.3.1. Sülfat saldırısına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı	44
4.3.2. Sülfat saldırısına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı.....	45
4.3.3. Sülfat saldırısına maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirilmesi.....	46
4.4. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları	47
4.4.1. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı.....	47
4.4.2. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı	49
4.4.3. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirilmesi	51
4.4.4. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polimer betonların SEM analiz sonuçları.....	53
4.5. Donma-çözünme Deney Sonuçları.....	56
4.5.1. Donma-çözünme döngüleri sonrası polimer betonların ağırlık kaybı.....	56
4.5.2. Donma-çözünme döngüleri sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı	58
4.5.3. Donma-çözünme döngüleri sonrası polimer betonların görsel değerlendirilmesi	59

4.5.4. Donma-çözünme döngüleri sonrası polimer betonların SEM analiz sonuçları.....	64
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	69
KAYNAKÇA	70



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Polimerlerin sınıflandırılması.....	5
Tablo 2. Perlitin kimyasal bileşenleri	19
Tablo 3. Perlitin fiziksel özellikleri	19
Tablo 4. Reçineler hakkında teknik bilgiler	29
Tablo 5. Agregalar hakkında detaylı bilgiler.....	32
Tablo 6. Kimyasal malzemelere ait özellikler	32
Tablo 7. Beton karışım tasarımı	33
Tablo 8. Deney prosedürü	36
Tablo 9. Polimer betonların kimyasal saldırı öncesi referans basınç dayanımı sonuçları.....	39
Tablo 10. Termal ve donma-çözünme döngüsü öncesi referans basınç dayanımı sonuçları ...	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Polimer malzemelerin gruplandırılması	6
Şekil 2. Termosetlerin bağ yapısı	6
Şekil 3. Bazı termoset malzemelerin kimyasal yapısı	7
Şekil 4. Elastomer zincirlerinin çekme kuvveti altındaki davranışı	7
Şekil 5. Polimerlerde kullanılan dolgu maddeleri	9
Şekil 6. Katkı maddeleri türleri	10
Şekil 7. Polimerlerde kullanılan farklı reçine türleri	15
Şekil 8. Difonkiyonel alkol ve asitten elde edilen polyesterin oluşumu	16
Şekil 9. Epoksi ve metakrilik asitten elde edilen vinilester reçine	16
Şekil 10. Doğal perlitin genişletirme şeması.....	20
Şekil 11. Dikey ve yatay roket fırını.....	21
Şekil 12. Dünya doğal perlit üretimi	25
Şekil 13. Türkiye perlit ve pomza yatakları haritası.....	25
Şekil 14. Granülometri eğrisi	30
Şekil 15. Kuvars agregası, doğal ve genişletilmiş perlitlerin görünüşleri ve mikro yapıları	31
Şekil 16. Polimer betonların hazırlanması ve deneysel yöntemi.....	34
Şekil 17. Polimer betonlar için yüksek sıcaklık prosedürleri	35
Şekil 18. Polimer betonların su emme sonuçları	37
Şekil 19. Asit saldırısı sonrası polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları.....	41
Şekil 20. Asit saldırısı sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları	42
Şekil 21. Asit saldırısı sonrası polyester/vinilester reçineli polimer betonların görüntüleri	43
Şekil 22. Sülfat saldırısı sonrası polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları.....	45
Şekil 23. Sülfat saldırısı sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları	46
Şekil 24. Sülfat saldırısı sonrası polyester/vinilester reçineli polimer betonların görüntüleri .	47
Şekil 25. Yüksek sıcaklık sonrası polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları	49
Şekil 26. Yüksek sıcaklık sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları.....	50
Şekil 27. Yüksek sıcaklık sonrası polyester reçineli polimer betonların görüntüleri.....	51
Şekil 28. Yüksek sıcaklık sonrası vinilester reçineli polimer betonların görüntüleri.....	52
Şekil 29. Yüksek sıcaklık sonrası polyester reçineli polimer betonlara ait SEM görüntüleri ..	54
Şekil 30. Yüksek sıcaklık sonrası vinilester reçineli polimer betonlara ait SEM görüntüleri..	55
Şekil 31. Donma-çözünme sonrası polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları	58
Şekil 32. Donma-çözünme sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları.....	59

Şekil 33. Donma-çözünme sonrası PRP0 kodlu numuneye ait görüntüler.....	60
Şekil 34. Donma-çözünme sonrası PRNP10 kodlu numunelere ait görüntüler	61
Şekil 35. Donma-çözünme sonrası PREP10 kodlu numunelere ait görüntüler.....	61
Şekil 36. Donma-çözünme sonrası VRP0 kodlu numuneye ait görüntüler.....	62
Şekil 37. Donma-çözünme sonrası VRNP10 kodlu numunelere ait görüntüler.....	63
Şekil 38. Donma-çözünme sonrası VREP10 kodlu numunelere ait görüntüler	63
Şekil 39. 300 donma-çözünme sonrası PRP0 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.....	64
Şekil 40. 300 donma-çözünme sonrası PRNP10 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.....	65
Şekil 41. 300 donma-çözünme sonrası PREP10 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü	65
Şekil 42. 300 donma-çözünme sonrası VRP0 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü	66
Şekil 43. 300 donma-çözünme sonrası VRNP10 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü	67
Şekil 44. 300 donma-çözünme sonrası VREP10 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde
°C	Derece
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
cm	Santimetre
D _{max}	Betonda kullanılan agreganın en yüksek boyutu
ITZ	Geçiş bölgesi
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Mega pascal
N	Newton
PC	Polimer beton
PIC	Polimer emdirilmiş beton
PMC	Polimer modifiye betonu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
s	Saniye
TS	Türk Standartları

1. GİRİŞ

Dünya çapında pek çok uygulama sahasını olumsuz anlamda etkileyen karbon emisyonları, artarak devam eden bir problem olarak görülmektedir (Yang vd., 2025). 2023 yılına gelindiğinde, sanayi faaliyetlerinin de katkısı ile küresel olarak karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık 35,8 milyar metrik tona ulaştığı bildirilmiştir (Liu vd., 2024). Dünyada CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ini oluşturan çimento sanayisinin karbon ayak izi üzerinde son derece etkili olduğu değerlendirilmektedir (Andrew, 2019). Geleneksel Portland çimento üretim süreçleri hem yüksek sıcaklıklara ulaşılan döner fırınlar hem de kireçtaşı kalsinasyonu işlemlerine dayanmakta (Habert vd., 2010), böylece çimento üretim sanayisinde karbon emisyonlarında artışa (Shi vd., 2011) ve enerji tüketiminde oldukça yüksek seviyelere (Hassan vd., 2020) çıkılmasına neden olmaktadır (Williams & Yang, 2024). Son olarak yenilenemeyen doğal kaynaklara son derece bağımlı olan çimento üretimi sonucunda iklim ve çevre sorunları gitgide kötüleşmektedir.

Bu bağlamda, geleneksel Portland çimentosuna alternatif oluşturacak malzemeleri aramak kritik önem taşımaktadır. İlk kez Cresson ve Lefebure tarafından 1923 yılında polimer reçinelerinin inşaatlarda kullanılması fikri ortaya çıkmış ve günümüze kadar gelişimini sürdüren polimerler sayesinde akademik ve sanayi sektörlerinde yaygın kullanım ve ilgi artışı gözlemlenmiştir (Ohama, 2011). Polimer beton (PC), sertleştirici ve hızlandırıcı kimyasal malzemeler eşliğinde, genellikle polyester, vinilester ve epoksi reçinelerin ana bağlayıcı malzeme işlevini görerek agregalar ile çapraz bağlandığı çimentosuz kompozit bir malzeme olarak tanımlanmaktadır (Gorninski vd., 2004; Niaki, 2023). Geleneksel Portland çimento esaslı betonlar ile polimer betonlar arasında ciddi farkların bulunduğu bilinmektedir. Bu farklar; çimento esaslı betonlara göre polimer betonların geçirimsizlik ve agresif çözeltilere karşı yüksek direnç göstermeleri (Aydın & Bulut, 2024), çok yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip oluşları (Heidari-Rarani vd., 2014), bakım ve onarım işlerinde hızlı kürlenme göstererek hızlı dayanım gelişimi sayesinde yüksek performanslı kompozitlerin üretilmesi (Palamarchuk vd., 2024) olarak sayılmaktadır. Ayrıca polimer betonların içerisinde çimento yer almadığından üretim süreçlerinde ne yüksek sıcaklıklarda kalsinasyon ihtiyacı ne de karbon emisyonu ve enerji tüketimi gibi problemler görülmemektedir (Atiweh vd., 2021; Salami vd., 2024). Ek olarak, polimer beton üretimlerinde hem endüstriyel yan ürünler (uçucu kül (Bedi vd., 2013; Ferdous vd., 2020; Gorninski vd., 2007), silis dumanı (Bărbuță vd., 2009), palmiye yağı yakıt külü (Khalid vd., 2015)) hem de atık malzemeler (elektronik atık (Bulut & Şahin, 2017), atık cam (Saribiyik vd., 2013), tekstil atığı (Reis, 2009)) kullanılmıştır. Böylece sürdürülebilirlik

konsepti ışığında bu malzemeler polimer betonda değerlendirilerek doğal agrega kaynaklarının korunması ve ekonomiye kazandırılması sağlanabilmektedir.

Polimer betonların sertleşme mekanizmaları diğer kompozitlerden farklılık göstermektedir. Agregaların inert faz, polimerlerin ise bağlayıcı faz olarak hareket ettiği bir polimerizasyon süreci oluşmaktadır (Khalid vd., 2016). Sertleştirici kimyasal malzemenin reçine ile gerçekleştirdiği kimyasal reaksiyon sonucunda kür varlığında uzun polimer zincirleri oluşarak esnekliği ve dayanımı yüksek matrisler meydana gelmektedir (Ferdous vd., 2016). Polimer betonların geleneksel Portland çimento esaslı betonlara göre çok yüksek dayanım ve kırılma enerjilerine sahip olduğu bilinmektedir (Abbasnejadfar vd., 2022; Toufigh vd., 2016). Ayrıca polimer betonlar, üstün asit ve sülfat direnci (Ferdous vd., 2020; Ghassemi & Toufigh, 2020), çok düşük su geçirimsizliği (Wang vd., 2019) ve klorür geçirimsizliğine karşı yüksek direnç (Mohammed vd., 2022) göstererek agresif ortamlarda stabil kalabilmektedir. Dahası, polimer betonların donma-çözünme dirençlerinin yüksek oluşu bu betonların soğuk iklim şartlarında tercih edilmesini uygun hale getirmektedir (Moodi vd., 2018). Bu avantajlar dikkate alındığında, polimer betonların geleneksel Portland çimento esaslı betonların ideal bir ikamesi olarak geniş uygulama alanlarında kullanım beklentisi artmaktadır (Alhazmi vd., 2021).

Her ne kadar polimer betonlar ile ilgili çalışmalarda ilerlemeler sağlanmış olsa da ham madde kaynaklarının çeşitlendirilmesi, malzeme özelliklerinin optimizasyonu, polimerizasyon reaksiyonlarının mekanizmasının anlaşılmasında yaşanan zorluklar, polimer betonların özellikle durabilite performansları ile ilgili sınırlı bilgi birikimi, maliyet ve çevresel etki değerlendirmelerinde beklentilerin henüz karşılanamaması gibi sorunlar devam etmektedir.

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu bilimsel çalışmanın temel amacı, doğal perlit ve genleştirilmiş perlit madenini agrega olarak kullanarak yeni bir hafif polimer beton hazırlamaktır. Çalışmada polyester ve vinilester olmak üzere iki farklı reçine tipi polimer betonlarda bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Kuvars agregası yerine ince agrega olarak %0, %5 ve %10 oranlarında doğal ve genleştirilmiş perlit içeren karışımlar hazırlanmış ve deneysel tasarım bu değişkenler doğrultusunda oluşturulmuştur. Bu karışımların optimum performansını belirlemek amacıyla örnekler, 28, 56 ve 90 günlük yaşlarda kılcal su emme, asit ve sülfat saldırısı, yüksek sıcaklık ve donma-çözünme testleri kapsamında durabilite açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca mikroyapı analizleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışma, doğal

ve geliştirilmiş perlit agregalarının katılımının polyster ve vinilester reçineli polimer beton matrislerinin hem makroskobik performansını hem de mikroyapı özellikleri üzerindeki etkilerinin bütünsel ve karşılaştırmalı bir analizini üstlenmektedir. Çalışma, hafif polimer beton üretimlerinde perlitlerin kullanımının durabilite özellikleri üzerindeki kıyaslamalı etkilerini detaylı inceleme fırsatı sunarak literatürdeki var olan boşlukları doldurmada önemli bir potansiyel taşımaktadır. Son olarak, bu çalışma ile geleneksel çimentolu malzemelere olan bağımlılığı azaltarak sera gazı emisyonunu düşürme amacıyla hafif polimer beton kullanımını teşvik edip sürdürülebilir inşaat uygulamalarına alternatif bir yenilikçi yaklaşım sunmak amaçlanmaktadır. Böylece küresel çapta düşük karbon hedefine katkıda bulunma, inovatif ve çevresel sorumluluğu yüksek yapılar inşa etme amacıyla referans bir çalışma ortaya çıkacağı düşünülmektedir.

1.2. Araştırmanın Önemi

Bu çalışma, polimer beton üretimlerinde Türkiye’de bol miktarda bulunan (dünya perlit rezervinin %74’ü Türkiye’dedir (Kaya, 2019)) perlit madenini agrega olarak kullanarak sürdürülebilir hafif polimer beton konseptini geliştirebilmek için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Hafif polimer betonlar, içerisinde bulunan hafif agregalar sayesinde geleneksel Portland çimentolu betonlara göre daha az ağırlık sağlayarak kolay kullanım, düşük nakliye maliyeti, düşük alt tabaka gerilimi gibi avantajlara sahip olmaktadır (Heidarnezhad vd., 2020). Perlit, kimyasal yapısında fazla oranlarda SiO_2 (%70–75) ve Al_2O_3 (%12–18) içeren camsı bir volkanik kayaç türüdür (Kolak & Oltulu, 2025). Perlitler, gözenekli yapıları ve düşük yoğunlukları sayesinde hem önceden döküm işlemi yapılan malzemelerin yerleştirilmesini ve kullanımını kolaylaştırır hem de yerinde dökülen malzemelerin ölü yükünü azaltarak alt tabakalardaki sorunlara çözüm sağlar (Ataabadi vd., 2021). Hafif polimer beton ile ilgili literatürde yer alan az sayıdaki çalışmada hafif agrega kullanımı ile birlikte polimer betonların daha az yoğunluk göstererek deprem etkisi altında hasarların azaltılmasına ve maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olabileceği ifade edilmiş (Almutairi vd., 2025) ve daha üstün mekanik özellikler sergilediği belirtilmiştir (Ataabadi vd., 2021; Ciminli & Bulut, 2025). Perlitlerin polimer betonlarda agrega olarak kullanımı sadece bol miktardaki rezervlerin değerlendirilmesini sağlamıyor, aynı zamanda yüksek performanslı sürdürülebilir hafif polimer beton konseptine katkıda bulunarak yerel kaynakların yapı malzemesi olarak geliştirilmesine de fırsat tanıyor.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Polimer Malzemeler ve Tarihsel Gelişimi

Polimerler, genellikle kovalent kimyasal bağlarla birbirine bağlanan küçük birimler olan monomerlerin tekrarlayan yapısal düzeniyle oluşan maddelerdir (Naguib vd., 2023). Monomer moleküllerinin kimyasal reaksiyonlar yoluyla birbirleriyle birleşerek uzun zincirler oluşturmaya "polimerizasyon" denir (Moodi vd., 2018). Yapay polimerler son 40-50 yılda hızla ilerlemiş (Tsuturu, 2001) ve malzeme ekonomisi, kolay işlenebilirlik, yüksek molekül ağırlığı, yüksek kimyasal korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahip olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Niaki vd., 2023).

Kelime anlamı “çok parçalı” olan polimerler, başlangıçta bitüm, nişasta, doğal kauçuk ve selüloz gibi doğal kaynaklı malzemelerden elde edilmiştir. Ancak bu doğal polimerler, istenen fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayamadığı ve işlenmeleri zor olduğu için zamanla üzerinde değişiklikler yapılarak yarı sentetik formlar geliştirilmiş (Pişkin, 1987) ve 1907 yılında, Belçikalı kimyager Leo Baekeland, fenol ve formaldehit reaksiyonundan "bakalit" olarak adlandırılan ilk sentetik polimeri keşfetmiştir (Gupta, 2007).

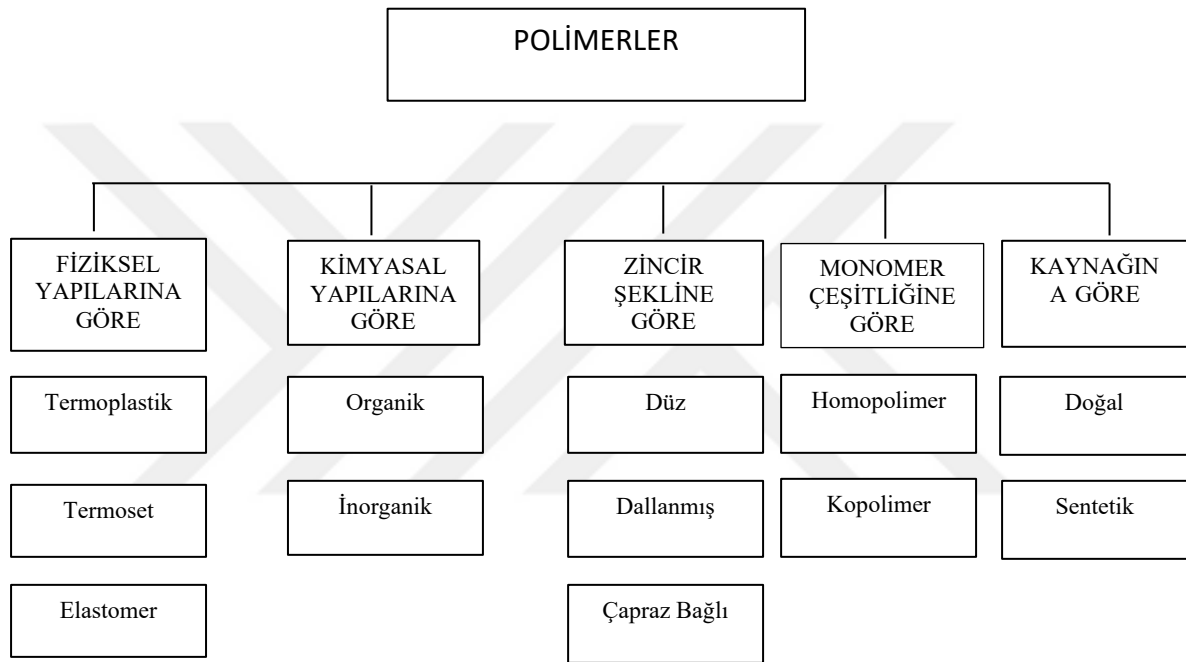
Polimer bilimi alanındaki en önemli dönüm noktası, Hermann Staudinger'in 1924 yılında ortaya attığı “makro molekül hipotezi” ile gerçekleşmiştir. Bu hipotez, uzun zincirli moleküllerin varlığını ortaya koyarak polimerlerin yapısına dair bilimsel bir temel oluşturmuş ve ilkel üretim yöntemlerinden modern, kontrollü sentez süreçlerine geçişi mümkün kılmıştır. Böylece polimer teknolojisinin temelleri atılmış, endüstriyel ölçekte yeni malzeme türlerinin geliştirilmesinin önü açılmıştır (Ateş, 1994). Günümüzde bu gelişmenin sonucu olarak, polietilen, polipropilen, polistiren, polivinil klorür ve naylon gibi polimerler, yüksek dayanım, kimyasal direnç ve üretim kolaylığı gibi özellikleri sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan polimer türleri hâline gelmiştir (Shiravi & Eftekhari, 2023).

İnşaat mühendisliği alanında polimerlerin kullanımı, 1950'li yıllarda Polimer Beton (PC) ve Polimer ile Modifiye Edilmiş Beton (PMC) türlerinin ortaya çıkmasıyla başlamıştır. 1970'lerde Polimer Emdirilmiş Betonların (PIC) geliştirilmesiyle birlikte bu malzemelere olan ilgi hızla artmış, 1975 yılında ise beton teknolojisinde polimerlerin kullanımına ilişkin ilk uluslararası kongre Londra'da düzenlenmiştir (Fowler, 1999).

2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler genel anlamda proteinler ve selüloz dahil olmak üzere doğal polimerler, plastikler ve kauçuklar gibi sentetik polimerler olarak ikili olarak sınıflandırılır (Lv vd., 2023). Kimyasal yapılarına göre ise polimerler, ana zincirlerinde bulunan atom türlerine bağlı olarak organik ve inorganik olarak ayrılır. Organik polimerlerin yapısında karbon, oksijen, hidrojen, azot ve halojen; inorganik polimerlerde ise silisyum, germanyum, bor ve fosfor gibi elementler bulunur (Bulut, 2016). Aşağıdaki tabloda polimerler özelliklerine göre sınıflandırılmıştır.

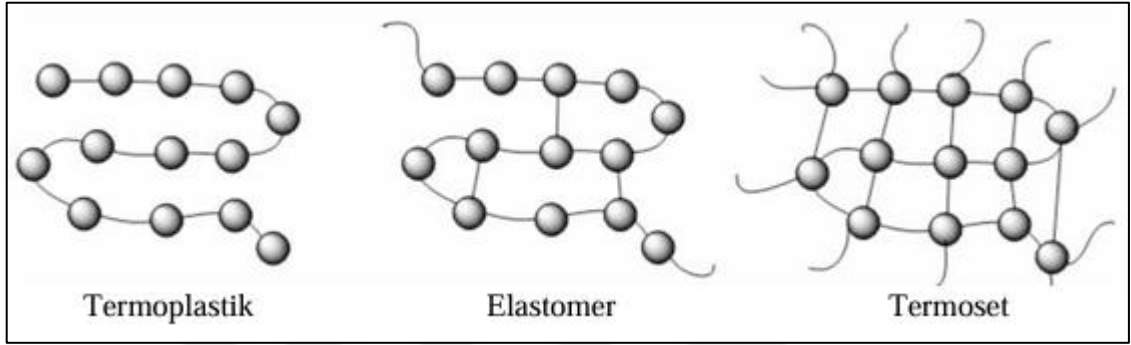
Tablo 1. Polimerlerin sınıflandırılması (Ayçiçek, 2021)



2.2.1. Termoplastikler

Termoplastik polimerler, zayıf Van der Waals bağlarıyla bir arada tutulan uzun moleküler zincirlerden oluşan ve ısı ile işlemle şekillendirilebilen malzemelerdir. Isıtıldıklarında moleküller arası bağlar zayıflar, malzeme yumuşayıp erir ve belirli bir basınç altında kalıba aktarılıp şekil verildikten sonra soğutularak sertleşir (Crawford, 1998). Bu tekrarlanabilir erime-sertleşme döngüsü, termoplastiklerin geri dönüştürülebilir olmasını sağlar. Ayrıca kürleme işlemine gerek kalmadan doğrudan ısı ile işlenebilirler. Termoplastikler, termosetlere göre daha sünek ve tok yapıları olduklarından ek dolgu malzemesi gerektirmeden kullanılabilir, ancak boyutsal ve ısıl kararlılık açısından daha zayıf performans gösterirler (Harper, 2003).

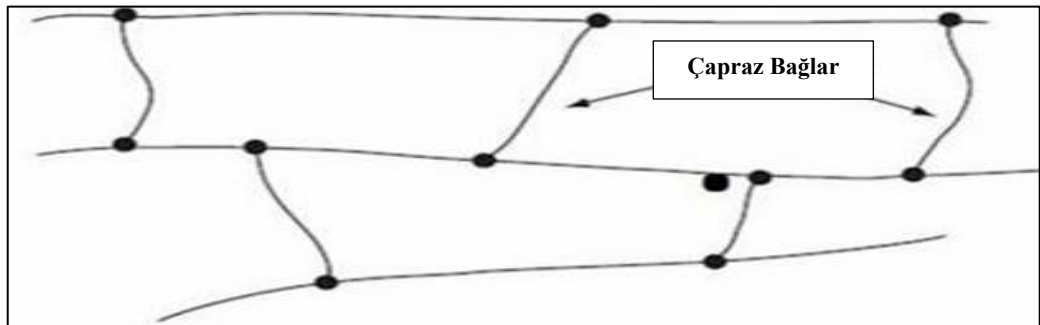
Termoplastik polimerlerin geri dönüştürülebilir olmaları çevresel açıdan önemli bir avantaj oluştururken, çapraz bağ yapılarının bulunmaması çevrim sürelerini kısaltarak üretim verimliliğini artırır. Ayrıca, uygun koşullarda üretildiklerinde su buharı veya gaz salınımı yapmazlar ve proses kontrolü termoset polimerlere kıyasla daha kolaydır. Bununla birlikte, çapraz bağların eksikliği nedeniyle yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanımları düşmekte ve sürünme dirençleri zayıflamaktadır. Termoplastikler, ateşe karşı düşük direnç gösterip erime eğilimi sergilerler ve sıvı fazda işlenmeye uygun türleri sınırlıdır (Biron, 2007). Bu kapsamda polimer malzemelerin gruplandırılması aşağıda Şekil 1’ de verilmiştir.



Şekil 1. Polimer malzemelerin gruplandırılması (Saçak, 2010)

2.2.2. Termosetler

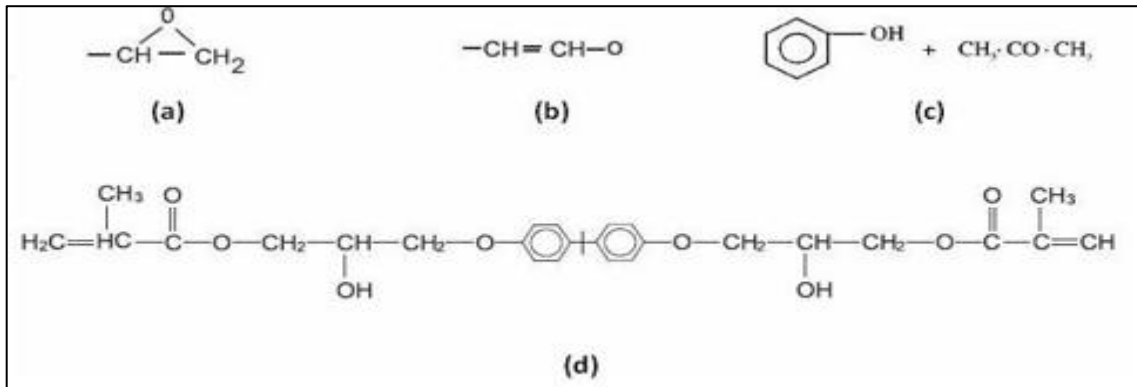
Termoset malzemeler, genellikle oda sıcaklığında sıvı fazda bulunan bir veya birden fazla bileşenden oluşur. Şekil 2’de görüldüğü üzere yapılarındaki çapraz bağlar, malzemeye yüksek rijitlik kazandırarak mekanik dayanımı artırır (Goodman, 1998). Çapraz bağ yoğunluğu arttıkça moleküler hareketlilik azalır, bu da sertlik ve darbe dayanımının iyileşmesini sağlar. Termosetler literatürde “termoset reçineler” olarak da adlandırılır (Dodiuk & Goodman, 2013).



Şekil 2. Termosetlerin bağ yapısı (Goodman, 1998)

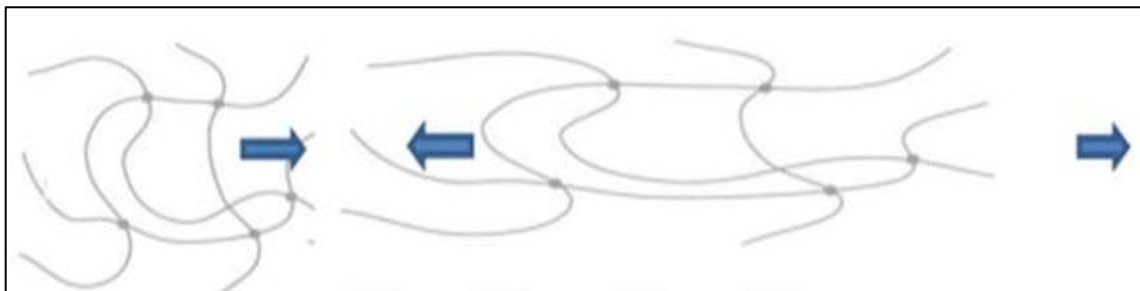
Termoset reçinelerin en önemli dezavantajı, üretim sonrasında uygulanan “post-kür” işlemini gerektirmeleridir. Bu işlemle malzeme tamamen katılaşır ve yeniden şekillendirilip geri

dönüştürülemez. Endüstride en sık kullanılan termoset türleri polyester, epoksi ve vinilester reçinelerdir (Topalömer, 2016). Endüstride yaygın olarak kullanılan bazı termoset malzemelerin kimyasal yapıları Şekil 3’te verilmiştir.



2.2.3. Elastomerler

Çekme kuvvetiyle uzayıp kuvvet kaldırıldığında eski boyuna dönebilen çapraz bağlı kauçuksuz polimerler elastomer olarak adlandırılır. Düşük çapraz bağ yoğunluğu ve düzensiz zincir yapısı, bu malzemelere yüksek esneklik kazandırır. Uygulanan gerilme sırasında zincirler uzar ancak çapraz bağlar plastik deformasyonu engeller. Düzensiz zincir dizilimi elastomerlerin tamamen amorf yapıda olmasına neden olur (Holden, 2000). Elastomer zincirlerinin çekme gerilmesi altındaki makroskobik deformasyon mekanizmasına ilişkin şematik gösterim Şekil 4’te sunulmuştur.



Şekil 4. Elastomer zincirlerinin çekme kuvveti altındaki davranışı (Gökbaşı, 2021)

2.3. Polimer Malzemelerin Diğer Bileşenleri

2.3.1. Solventler

Solventler, renksiz ve berrak formda bulunan, işlenebilme özelliğine sahip, buharlaşma hızlarına göre hızlı, orta ve yavaş olmak üzere üç gruba ayrılabilen maddelerdir (Akkaya

Özden, 2010). Yavaş buharlaşan solventler arasında glycol ve cyclohexanol; orta hızda buharlaşanlar arasında cyclohexanone, butanol ve xilen; hızlı buharlaşan solventler arasında ise benzin, eter ve aseton yer almaktadır (Öztürk, 2013).

2.3.2. Plastifiyanlar (Plastikleştiriciler)

Polimer malzemelerin esnekliğini artırmak amacıyla kullanılan katkı maddelerinden biri plastifiyanlardır. Bu maddeler, polimer zincirleri arasındaki moleküler etkileşimleri zayıflatarak yapının daha yumuşak ve esnek bir form kazanmasına olanak tanır. Özellikle termoplastik polimerlerin üretim süreçlerinde plastifiyanlar önemli bir rol oynamakta ve malzemenin işlenebilirliğini artırmaktadır (Callister vd., 2018).

2.3.3. Stabilizanlar

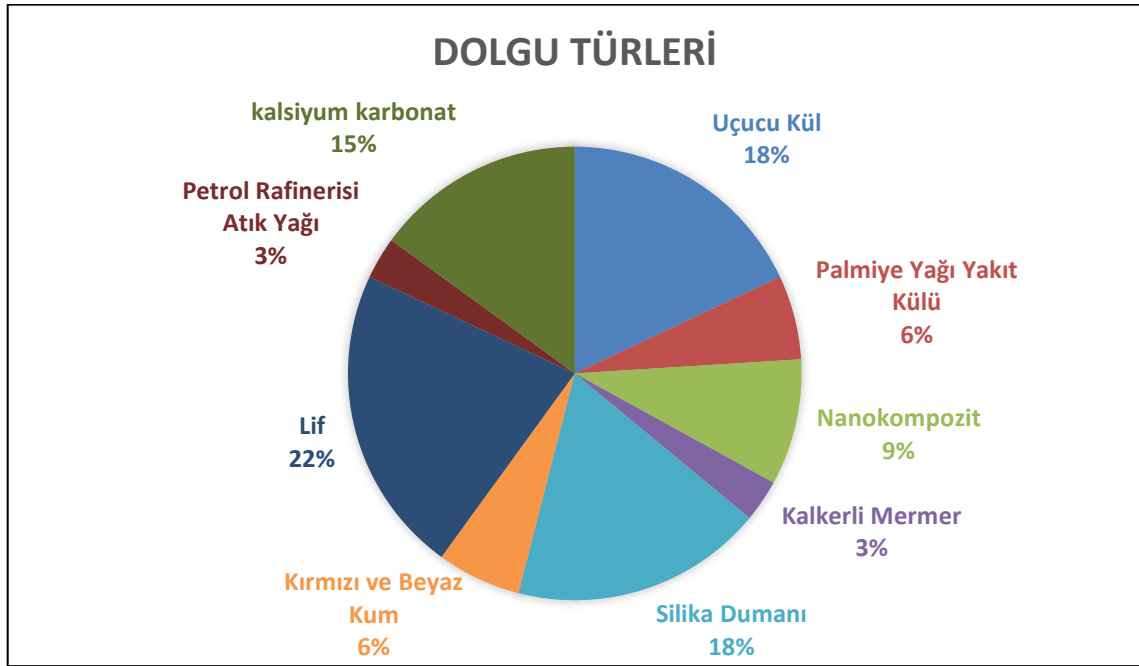
Stabilizanlar, polimer malzemelerin dış etkenlere karşı dayanımını artırmak ve uzun vadede yapısal bozulmalarını engellemek amacıyla kullanılan katkı maddeleridir. Bu bileşenler, oksidatif süreçler, yüksek sıcaklık etkisi ve UV ışını gibi zararlı çevresel faktörlere karşı polimeri koruyarak, malzemenin performans ömrünü uzatmada etkili olmaktadır (Jones, 1999).

2.3.4. Dolgu maddeleri

Dolgu maddeleri polimer betonun mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Aliha vd., 2012). Bu malzemelerin uygun oranlarda kullanımı, basınç, eğilme ve çekme dayanımını artırırken, aynı zamanda üretim maliyetlerini düşürmektedir (Muthukumar & Mohan, 2004). Polimer beton ile rötre deformasyonu (Rossignolo & Agnesini, 2002), yoğunluk, mukavemet ve sertlik gibi özellikler üzerinde kontrol sağlanabilmekte (Gorninski vd., 2004); ayrıca betonun boşluk oranını azaltmak amacıyla ekstra ince taneli dolgu maddeleri kullanılmaktadır (Marinela vd., 2010).

Son yıllarda, silis dumanı, uçucu kül, kalsiyum karbonat ve silis kumu gibi dolgu maddeleri polimer betonun dayanıklılık ve mekanik performansını artırmak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır (Barbuta, 2016; Tonet, 2013). Buna ek olarak, palmye yağı yakıt külü (POFA) gibi mikro dolgu malzemeleri (Khalid, 2015) ve PET elyaf ile plastik atık lifler (Nguyen, 2013), nano dolgu ve nano kil katkıları (Dagshah, 2016; Esteben, 2013) malzemenin dayanım, geçirimsizlik ve yapısal bütünlük özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Niaki, 2018). Ayrıca hindistan cevizi, şisal, jüt ve şeker kamışı küspesi gibi doğal lifler, kolay temin edilebilen tarımsal atık kaynakları olarak betonun tokluk, çatlak direnci ve enerji soğurma

kapasitesini artırmakta (Akinyemi, 2017) ve böylece sürdürülebilir yapı malzemesi üretimine katkı sağlamaktadır (Qasim, 2018). Bu bağlamda, polimer betonlarda kullanılan dolgu maddelerinin genel sınıflandırması Şekil 5’te sunulmuştur.



Şekil 5. Polimerlerde kullanılan dolgu maddeleri (Sarde & Patil, 2019)

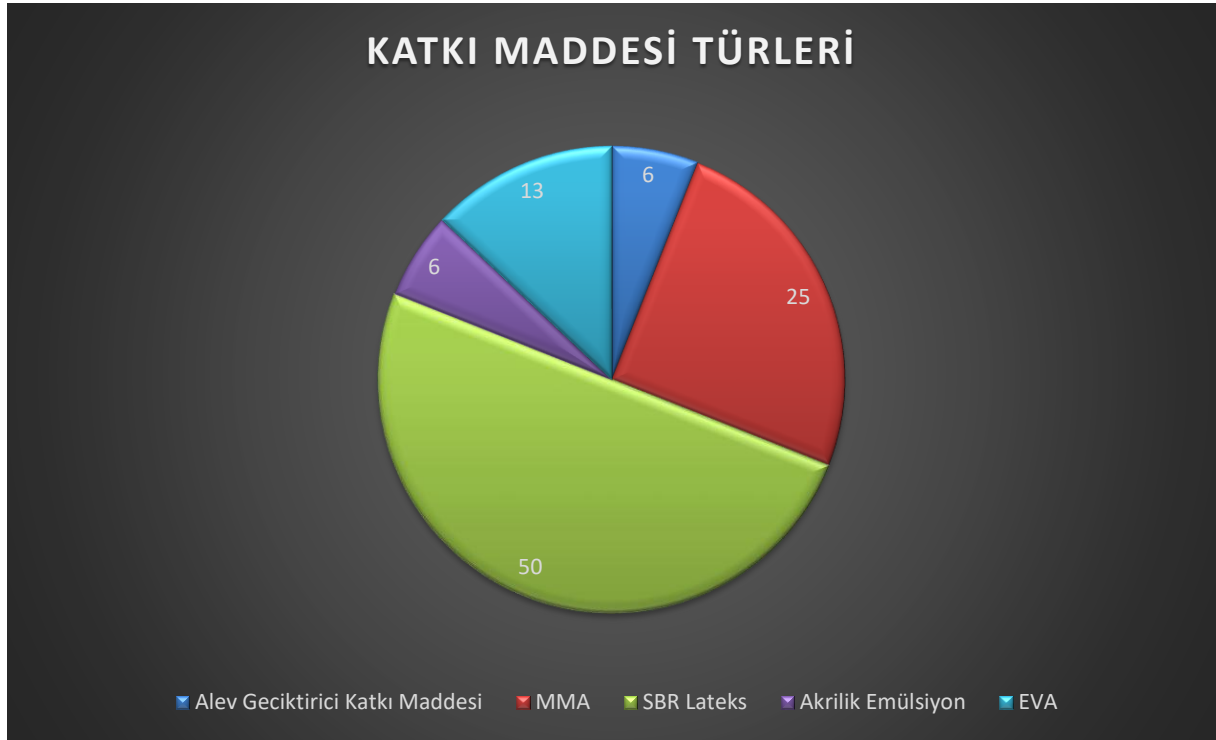
2.3.5. Pigmentler

Pigmentler, küçük partikül büyüklüğüne sahip, organik veya inorganik yapıda olan kimyasallardır. Pigmentler boyaya; renk, örtme, koruyuculuk (antikorozyon) ve dayanıklılık (örneğin korozyona, alkalilere vb.) gibi özellikler verirler. Pigmentler, kimyasal tertip, fiziksel şekil ve optik özellikler bakımından büyük değişiklikler gösterirler (Megep, 2008).

2.3.6. Katkı maddeleri

Katkı maddeleri; karışım dayanımı, su geçirmezliği, elastikiyeti, kimyasal saldırılara ve donma-çözünmeye karşı direnci, fiziksel özelliği, dayanıklılığı, daha düşük rötre ve daha kısa kür süresini iyileştirerek sıradan bir betona göre avantaj sağlar (Singh, 2012). Yaygın olarak kullanılan polimer dispersiyonları stiren-bütadien kauçuk (SBR) lateks, etilen-vinil asetat (EVA) ve poliakrilik ester (PAE) emülsiyonudur (Assaad, 2017). Polimer betondaki polimetilmetakrilat (PMMA) gibi akrilik katkıları yüksek elastisite modülü ve çok düşük elastisite katsayısı gösterir (Haddid, 2017). Ayrıca metilmetakrilat (MMA) ilavesi yüksek viskoziteli reçinenin viskozitesini düşürür, mükemmel kimyasal korozyon direnci ve bağ

mukavemeti sağlar (Nin vd., 2018). Polimer matrislerde kullanılan katkı maddelerinin türleri ve sınıflandırılması Şekil 6’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Katkı maddeleri türleri (Sarde & Patil, 2019)

2.4. Polimerlerin İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanımı

Polimerlerin başlıca kullanım alanı kimyasal depolama yapıları olmakla birlikte, son yıllarda kullanım yelpazesi önemli ölçüde genişlemiştir. Köprü tabliyeleri, beton çatlak onarımları (Ferdous vd., 2016), dekoratif paneller (Ferdous vd., 2018), boru ve drenaj sistemleri (Bulut, 2016), demiryolu traversleri ve kaplama tabakaları (Lokuge & Aravinthan, 2013) gibi çeşitli altyapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, endüstriyel ve kıyı inşaatlarında (Zhu vd., 2020) ile agresif çevre koşullarına maruz kalan yapılarda da tercih edilmektedir (Ferdous vd., 2013; Ferdous vd., 2016). Polimer esaslı harçlar ise özellikle hasarlı beton yapıların, kanalizasyon borularının, döşeme ve çatlakların onarımında (Maherzi vd., 2020), ayrıca prefabrik ve prekast mimari elemanlar, menholler ve makine temelleri gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Najvani vd., 2023).

2.5. Polimer Beton Türleri

Polimerlerin beton teknolojisinde kullanımı üç grupta sınıflandırılır: Polimer Beton (PC), Polimer Modifiye Betonu (PMC) ve Polimer Emdirilmiş Beton (PIC) (Beeldens, 2002).

Polimer Beton, imento yerine tamamen polimer reçine kullanılarak üretilir ve agrega ile karıştırılarak elde edilir (Gorninski vd., 2007). Polimer imento Betonu, taze karışma lateks veya emülsiyon formunda polimer katkılarının eklenmesiyle hazırlanır (Saçak, 2002). Polimer Emdirilmiş Beton ise, sertleşmiş betona düşük viskoziteli monomerlerin emdirilmesi ve polimerizasyonla sertleştirilmesiyle oluşturulur (Fowler, 1999).

2.5.1. Polimer emdirilmiş beton (polymer impregnated concrete: PIC)

Betonun performansını ve dayanıklılığını artırmanın etkili yöntemlerinden biri polimer emdirme tekniğidir. Bu yöntemde, düşük viskoziteli monomerler (örneğin metil metakrilat, stiren, akrilonitril, t-butil stiren ve vinil asetat) önceden sertleşmiş Portland imentosu esaslı betona emdirilir. Ardından bu monomerler, radyasyon veya kimyasal başlatıcılar yardımıyla polimerleştirilerek katı bir polimere dönüştürölür (Salami vd., 2024) ve imento hamurundaki hidrat fazına ek olarak ikinci bir sürekli bağ ağı oluşturur (ACI Committee, 2009). Böylece betonun çekme, basınç ve darbe dayanımları belirgin biçimde artar; özellikle polimer emdirilmiş betonun basınç dayanımı 35 MPa'dan 140 MPa'a kadar yükselebilir. Ayrıca donma-çözünme dayanımı, su geçirimsizliği ve sülfat ile kloröl gibi kimyasal etkilere karşı direnci önemli ölçüde gelişir (Kukacka, 1972). Bu üstün özellikleri nedeniyle polimer emdirilmiş beton; reaktörler, köprüler, borular, kimyasal depolama üniteleri ve deniz yapıları gibi yüksek dayanıklılık gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Fowler, 1999).

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

Polimer modifiye beton (PMC), özellikle beton tamirinde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Yüksek yapışma kabiliyeti (Bi, Lang, & Gao, 2013), aşınma direnci ve karbonatlaşmaya karşı sağladığı koruma, bu malzemelerin en önemli özelliklerindendir. PMC genellikle eski beton yüzeylere doğrudan uygulanır. Akrilik emülsiyonla modifiye edilmiş imento esaslı malzemeler, yüksek bağlanma kapasitesi (Mehta, 1986) ve dayanım özellikleri nedeniyle onarım uygulamalarında tercih edilmektedir.

2.5.3. Polimer beton (polymer concrete: PC)

Polimer beton (PC), reçine matrisi, agrega (kaba ve ince) ve diğ er dolgu maddelerinden oluşan ve belirli özellikleri elde etmek için sentezlenen kompozit bir malzemedir (Elalaoui vd., 2018). Yapısal açıdan geleneksel betona benzerlik göstermesi ve imento bağlayıcısının yerini iki bileşenli polimer reçinenin alması, bu malzemenin "polimer beton" olarak adlandırılmasına

neden olmuştur (Kępczak vd., 2021). İnşaat mühendisliği alanında 1950’li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanan polimer beton, gelişmiş mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde önemli bir alternatif yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır (Toufigh vd., 2020).

Polimer reçine, bu tür beton karışımlarında bağlayıcı işlevi üstlenir; sertleşme süreci tamamlandığında esnek bir matris oluşturarak agregalarla güçlü bir bağ kurar (Orak, 2000). Reçinenin özellikle düzgün yüzeylere daha iyi yapışabilmesi, yapı bütünlüğünü artırırken aynı zamanda çimento bazlı harçlara kıyasla büzülme oranını da azaltmaktadır (Miller, 2005). Yapı mühendisliği uygulamalarında sıkça tercih edilen reçine türleri arasında epoksi, polyester, vinilester, metakrilat ve poliüretan bazlı reçineler yer almaktadır (Mindess, 2019).

Polimer betonun özellikleri, kullanılan mineral agregalar ve dolgu maddeleri ile doğrudan ilişkilidir (Aliha vd., 2012). Bu tür malzemelerin karışıma katılması yalnızca üretim maliyetini azaltmakla kalmaz (Muthukumar & Mohan, 2004), aynı zamanda malzemenin basınç dayanımını artırarak daha dengeli mekanik performans sağlar (Rossignolo & Agnesini, 2002). Ayrıca eğilme ve çekme dayanımı (Gorninski vd., 2004), büzülme deformasyonu ve yoğunluk gibi özelliklerin daha hassas şekilde kontrol edilmesine imkân tanır (ACI Committee, 2003).

PC üretiminde kullanılan agregaların tane boyutları, genellikle geleneksel çimentolu betonlara kıyasla daha küçüktür (Bărbuță vd., 2009). Betonun boşluk oranını düşürmek ve elektriksel iletkenlik gibi belirli özellikleri geliştirmek amacıyla ince taneli dolgu maddeleri de karışıma dâhil edilmektedir (Golewski & Sadowski, 2006). Bu dolgu maddelerinin çapı çoğunlukla 75 mikrometreden küçük olacak şekilde seçilmektedir (Golewski & Sadowski, 2012).

Polimer beton (PC), geleneksel yapı malzemelerine kıyasla üstün nitelikler sergileyen gelişmiş bir beton türüdür. Yüksek erken dayanım (Jamshidi & Pourkhorshidi, 2012), hızlı sertleşme özelliği, agregalarla güçlü aderans (Jamshidi vd., 2013), uygun mekanik dayanım (Robles vd., 2008), yüksek dayanıklılık (Shokrieh vd., 2011) ve kimyasal ortamlara karşı gelişmiş direnç bu malzemenin öne çıkan özellikleri arasındadır. Ayrıca, polimer betonlar yapıların hizmet ömrünü uzatmak ve çevresel etkilere karşı koruma sağlamak amacıyla etkin bir malzeme çözümü olarak değerlendirilmektedir (Shokrieh vd., 2011).

2.6. Polimer Betonun Durabilite Özellikleri

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), dayanıklılığı “bir malzemenin hava koşulları, kimyasal etkiler, aşınma ve hizmet koşullarına karşı direnme kabiliyeti” olarak tanımlamaktadır (ACI

Committee, 2013). Bu doğrultuda, çevresel koşulların dikkate alınmasıyla malzeme seçiminin yapılması ve uygun bir yapısal hizmet ömrü elde edilmesi gerekmektedir (FIB, 2009). Dayanıklılık eksikliğinin ekonomik etkileri nedeniyle Uluslararası Yapısal Beton Federasyonu (FIB), hizmet ömrü tasarımına yönelik bir model kod geliştirmiştir (FIB, 2006). Betonun dayanıklılığı; bileşenlerin özellikleri, karışım oranları ve üretim yöntemleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu kapsamda geçirgenlik, zararlı maddelerin beton içerisine nüfuz etmesiyle mikro yapıda bozulmalara neden olarak dayanımı olumsuz yönde etkileyen temel parametrelerden biridir (Gesoglu vd., 2015; Kou & Poon, 2009). Klorür iyonu geçişi ise donatı korozyonunu tetikleyerek hizmet ömrünü kısaltan en önemli bozulma mekanizmalarından biridir (Zong vd., 2014).

Betonarme yapılarda; sülfat etkisi, deniz suyu, alkali-agrega reaksiyonu ve özellikle donma-çözünme döngüleri gibi çevresel etkenler durabiliteyi önemli ölçüde azaltmaktadır (Saran, 2007; Uygunoğlu, 2006). Soğuk iklimlerde gözenek içi suyun donarak hacimsel genişleme oluşturması çatlaklara ve yüzey hasarına yol açarken, bu durum betonun servis performansını düşürmektedir (FIB, 2009). Dayanım kayıplarının minimize edilmesi için karışım tasarımında uygun hava boşluğu oluşturulması ve geçirgenliğin sınırlandırılması önemli görülmektedir (ACI Committee, 2008).

Polimer bazlı betonlar ise kimyasal maddelere, donma-çözünme döngülerine (Bărbuță vd., 2009), agresif çözeltilere ve suya karşı düşük geçirgenlik ile yüksek korozyon direnci göstererek üstün durabilite performansı sergiler (Niaki, 2023). Polimerler beton matrisindeki boşlukları doldurarak zararlı iyon ve sıvı geçişini yavaşlatır (Tran vd., 2022). Uygun polimer türlerinin optimum oranlarda kullanımı, donma-çözünme ve aşınma dayanımını artırırken (Zhang vd., 2021) betonun büzülme eğilimi ve geçirgenliğini azaltır (Yin vd., 2016).

2.7. Polimer Betonun Avantaj ve Dezavantajları

Polimer beton, Portland çimentolu betona kıyasla daha yüksek basınç, eğilme ve çekme dayanımlarına sahip olup, korozyona karşı üstün direnç göstermektedir (Polat vd., 2022). Düşük yoğunluğu sayesinde (çimento betonunun yaklaşık dörtte biri), üretimden taşımaya kadar birçok aşamada enerji tasarrufu ve işlem kolaylığı sağlar (Rarani vd., 2014). Polimer beton; yüksek özgül dayanım, süneklik, darbe dayanımı, hızlı priz alma (Ghassemi & Toufigh, 2020) ve donma-çözünme döngülerine karşı dayanıklılık (Jafari vd., 2018) gibi özellikleriyle öne çıkar. Ayrıca kimyasal saldırı ve aşınmaya karşı yüksek direnç gösterir (Zegardlo vd.,

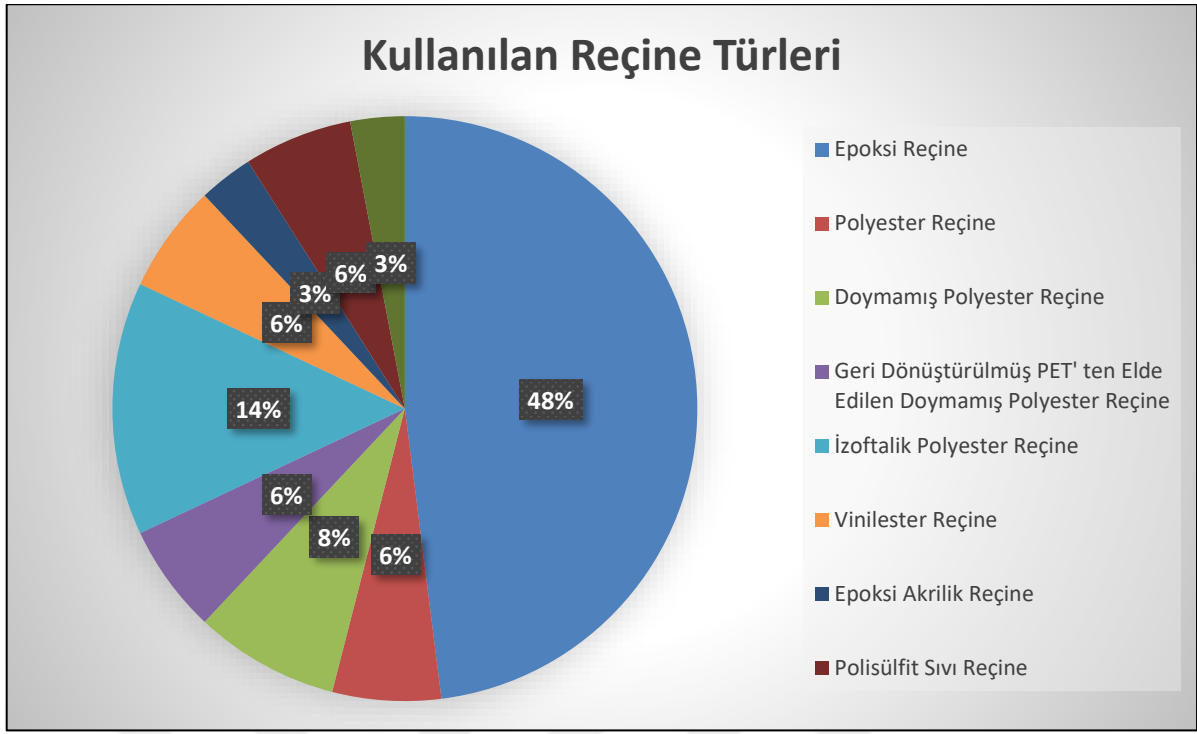
2018). Bu performans farkı, polimer betonun mikroyapısındaki gelişmiş bağlanma ve düşük geçirgenlikten kaynaklanmakta olup (Najvani vd., 2023), malzemenin dayanıklılığını ve düşük nem emme kapasitesini artırmaktadır (Martínez-Barrera vd., 2019).

Polimer kompozitlerin düşük yoğunluk (Qiu & Lau, 2021), esneklik (Yan vd., 2020) gibi avantajları, onları inşaat sektöründe giderek daha yaygın hale getirmiştir (Wang vd., 2020). Termal özellikleri, enerji ve ısı depolama uygulamaları açısından önem taşırken (Wu vd., 2021), sentetik polimerlerin kullanımı yeni malzeme teknolojilerinde esneklik ve ekonomik üretim imkânı sağlamıştır (Sun vd., 2020). Bu üstün özellikler, polimer betonların endüstriyel zeminler, su depolama tankları, banyo ve mutfak malzemeleri ile köprü ve bina bileşenleri gibi birçok alanda kullanımına olanak tanımaktadır (Martínez-Barrera vd., 2019).

Bununla birlikte, polimer betonun üretim sürecinde ortaya çıkan koku, kullanılan polimerlerin toksik ve alevlenebilir olması ile yüksek sıcaklıklara karşı zayıf dirençleri önemli dezavantajlar olarak öne çıkmaktadır (Bulut, 2016; Elalaoui vd., 2018). Ayrıca, yüksek maliyetleri nedeniyle geleneksel betonlara kıyasla yaklaşık 5–10 kat daha pahalıdır ve bu durum kullanımını yüksek performans gerektiren özel yapılara sınırlandırmaktadır (Lokuge & Aravinthan, 2013). Polimer beton karışımlarının belirlenmesinde hâlen sistematik bir tasarım prosedürü bulunmamakta, oranlar çoğunlukla Portland çimentolu beton deneyimlerine dayalı olarak rastgele belirlenmektedir (Muthukumar & Mohan, 2004). Literatürde bu konuda sınırlı sayıda sistematik çalışma mevcuttur (Jafari vd., 2018).

2.8. Reçineler

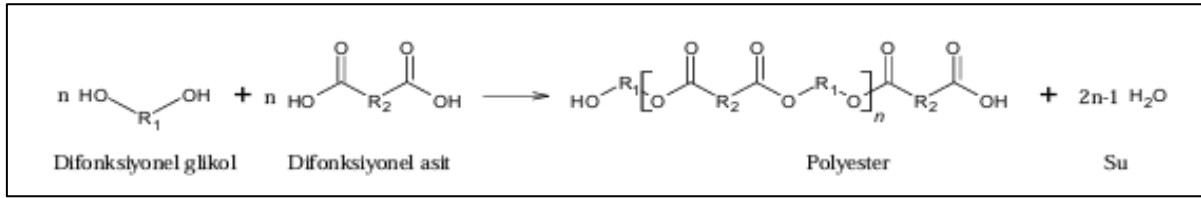
Polimer betonun maliyeti büyük ölçüde reçine miktarına bağlıdır; bu oran, kalıplanabilirliği etkilemeden olabildiğince düşük tutulmalıdır (Jafari, 2018). Şekil 7’de görüldüğü üzere doymamış polyester (Khalid, 2015), epoksi, vinilester (Agavriloaie, 2012), akrilik, furan ve fenol reçineleri, yüksek sertlik ve mukavemetleri nedeniyle polimer betonlarda yaygın bağlayıcı olarak kullanılır (Jamshidi, 2013). Ayrıca metakrilat esaslı termoplastikler de bağlayıcı olarak uygulanabilir (Reis, 2010).



Şekil 7. Polimerlerde kullanılan farklı reçine türleri (Sarde & Patil, 2019)

2.8.1. Polyester reçine

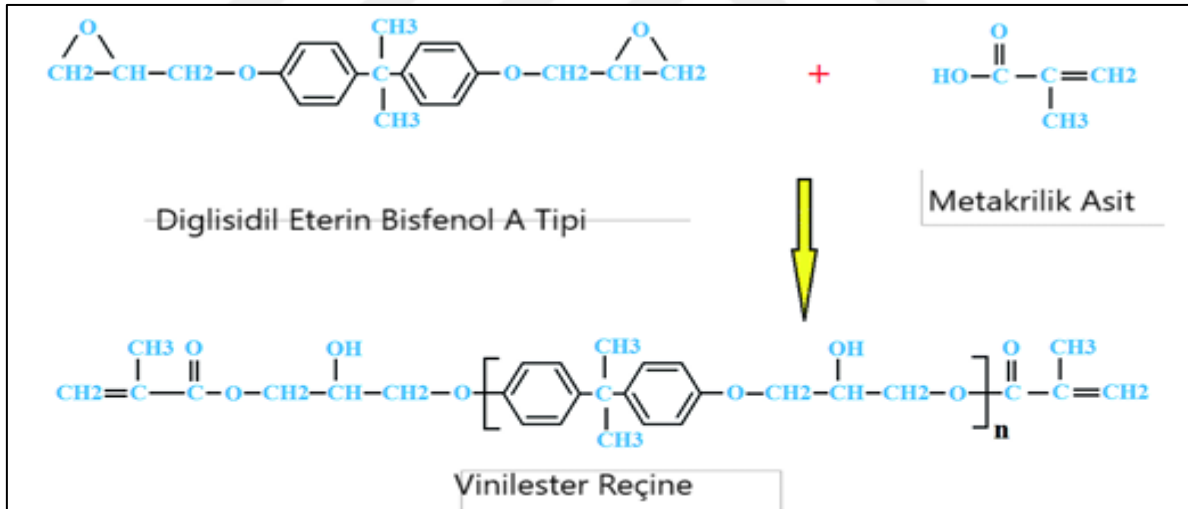
Doymamış polyester reçine (UP), doymamış dibazik asitlerin diollerle veya doymuş dibazik asitlerin doymamış diollerle polikondensasyonu sonucu oluşan ve zincir yapısında doymamış çift bağlar ($C=C$) içeren doğrusal bir polimerdir (Keinänen & Wigington, 2001). Bu polimerin oluşum süreci, difonksiyonel alkol ve difonksiyonel asidin polikondensasyonuna dayanmaktadır ve söz konusu mekanizma Şekil 8’de şematik olarak gösterilmiştir (Tınmaz Özbek, 2024). Reçine zincirindeki doymamış bağlar, stiren (ST) ile kopolimerizasyon reaksiyonuna girerek moleküller arası veya molekül içi çapraz bağlanma (Russell, 1983), dallanma ya da serbest stiren homopolimerizasyonu şeklinde dört olası yapı oluşturabilir (Hamer & Russell, 1982). Doymamış polyester reçinenin kurlenme süreci ise zincir başlatma, büyüme, sonlanma ve zincir transferi aşamalarını kapsayan radikal polimerizasyon mekanizmasına dayanır (Yang & Lee, 1988). Serbest radikal oluşumu genellikle ısı veya kimyasal başlatıcılarla sağlanmakta olup, uygulama şartlarına bağlı olarak normal sıcaklıkta, yüksek sıcaklıkta, ışıkla veya radyasyonla başlatılan sistemler tercih edilebilmektedir (Ardhyananta vd.,2017; Di Ciccio & Coates, 2011).



Şekil 8. Difonksiyonel alkol ve asitten elde edilen polyesterin oluşumu (Tınmaz Özbek, 2024)

2.8.2. Vinilester reçine

Vinilester reçineleri, epoksi reçineleri ile doymamış karboksilik asitlerin tepkimesi sonucu elde edilen termoset polimerlerdir. Endüstride en yaygın kullanılan vinilester türü, metakrilik asit ile bisfenol A (BPA) temelli epoksi reçinesinin reaksiyona girmesi ve ardından stiren monomerinde çözünmesiyle oluşan yapıdır (Blankenship vd., 1989). Söz konusu reaksiyon mekanizmasına ilişkin şematik gösterim Şekil 9’da sunulmuştur. Vinilester reçinelerin kimyasal yapısında bulunan reaktif çift bağlar, komonomer ilavesiyle çapraz bağlanarak üç boyutlu ağ yapısının oluşmasına olanak sağlamaktadır. Bu reçineler tipik olarak %40–50 oranında stiren içermekte olup, viskoziteyi düşürmek amacıyla viniltoluen veya metil metakrilat gibi düşük moleküler ağırlıklı komonomerlerle seyreltilebilmektedir (Naycı, 2019).



Şekil 9. Epoksi ve metakrilik asitten elde edilen vinilester reçine (Vahid & Alireza, 2016)

Vinilester reçineleri, 1960’lı yılların başında Shell Chemical Company tarafından “Epocryl” adıyla tanıtılmıştır. Epoksi ve polyester gruplarının kimyasal birleşimi, bu reçinelere yüksek mekanik ve kimyasal dayanım kazandırır. Yüksek sıcaklık, asidik ve bazik ortamlarda gösterdikleri direnç, vinilesterlerin agresif koşullarda kullanımını mümkün kılar (Ma vd., 2023). Ayrıca darbe etkilerine karşı toleranslı yapıları çatlama eğilimini azaltır ve lif takviyeli

sistemlerde matris ile lif arasında güçlü bağlar oluşturarak yapısal bütünlüğü artırır. Düşük büzülme oranı ve iyi şekil stabilitesi, kalıplama işlemlerinde ek avantaj sağlar (Naycı, 2019).

2.8.3. Furan reçine

Furan reçineleri, fenoplast termoset polimerler grubuna dâhil olup fenol-formaldehit reçineleriyle benzer özellikler gösterir. Furfural ve türevleri, asidik ortamlarda kendiliğinden polimerleşebilen heterosiklik aldehit bileşikleridir. Furan bazlı reçineler genellikle birinci ve üçüncü tür polimerizasyon süreçlerine göre uygulanır. Furfural aseton bileşiği, uygun asit katalizörü ve agrega kullanımıyla yüksek basınç dayanımı sağlar. Asidik ortamlarda gösterdikleri yüksek kimyasal direnç nedeniyle furan reçineleri, aşındırıcı koşullara maruz betonlarda tercih edilmektedir (Akman, 1987).

2.8.4. Epoksi reçine

Epoksi reçineler ilk olarak İsviçreli bir diş protez ustası tarafından geliştirilmiş, günümüzde ise Araldite ve Epon markalarıyla yaygınlaşmıştır. Temel bileşenleri, bisfenol A (BPA) ve glikol epiklorhidridir; bu bileşikler epoksi grubunun ana kaynağını oluşturur (Akman, 1987). Katı epoksi reçineler tehlikeli olmayan malzemeler sınıfında yer alır ve kolay kürlenebilir yapıları sayesinde kısa sürede yüksek mukavemet sağlar. Bu özellikleri, hızlı onarım gerektiren inşaat uygulamalarında tercih edilmelerini sağlamaktadır (Dai vd., 2019). Epoksi polimer beton (EPC) ise agregaların epoksi reçine ile birleştirilmesiyle elde edilir ve hızlı priz alma, yüksek dayanım, iyi sönümleme performansı ve güçlü yapışma özellikleriyle öne çıkar (Liu vd., 2021).

2.9. Perlit Madeni ve Tarihsel Gelişimi

Perlit; yaklaşık %70 SiO₂ içeren, gözenekli ve camsı karakterde, asidik bileşimli volkanik kökenli bir kayaç olup mineral değil kaya grubunda değerlendirilmektedir (Papa vd., 2018). Fransızca “perle” (inci) kelimesinden türeyen adı, kırıldığında yüzeyinde küçük küresel yapılar oluşturmasından gelmektedir (Turanlı vd., 2021). Yağlı parlaklıkta ve konkoidal (midye kabuğu benzeri) kırılma yüzeyine sahip olan perlit (Turgay, 1981); taneli, lifli, iri kristalli (Tüzün, 1989), kaya veya kum perlit gibi türlerde sınıflandırılmaktadır (Kibici, 2018).

Perlitin ısıl işlemle genleşme özelliği ilk kez 1925 yılında Almanya’da perlitik obsidyenin ısıtılmasıyla gözlemlenmiş ancak bu olgu üzerine detaylı çalışmaların yapılması zaman almıştır (Orhun, 1969). Endüstriyel anlamda genleşme özelliğinin fark edilmesi ise 1941 yılında Arizona’da emaye üretimi sırasında gerçekleşmiş ve perlit, bu tarihten sonra küresel ölçekte

dikkat çekmeye başlamıştır (Uzel, 2018). 1940 yılında Las Vegas'ta gerçekleştirilen ilk deneysel uygulamalarda genleştirilmiş perlit, alçıyla birlikte sıva malzemesi olarak kullanılmış; elde edilen başarılı sonuçlar sonrasında perlitin endüstriyel ölçekte işlenmesine yönelik tesisler kurulmaya başlanmıştır (Okucu, 1992). İkinci Dünya Savaşı sonrasında küçük ölçekli üretim tesislerinin çoğalmasıyla 1949 yılında “The Perlite Institute” kurulmuş ve perlitin ticari kullanımına ilişkin standartların oluşturulması sağlanmıştır (Uzel, 2018). Türkiye’de ise perlit üretimi 1960’lı yılların başında başlamış, yaklaşık 700 tonluk ilk ihracat gerçekleştirilmiş ve 1968–1970 yılları arasında Batı Anadolu’daki yatakların potansiyeli ortaya konmuştur (Etibank, 1995).

Perlit cevherinin endüstriyel değerini belirleyen en önemli özellik, yüksek sıcaklıklarda hacimsel genleşme kapasitesidir (Kasai vd., 2019). Doğal perlit 900–1200 °C sıcaklık aralığında hızla ısıtıldığında bünyesindeki kimyasal olarak bağlı su buharlaşarak hacmini yaklaşık 20 kata kadar artırır (Maxim vd., 2014; Rashad, 2016). Genleşme işlemi sonucunda 80–240 kg/m³ yoğunlukta hafif ve hücreli yapıda bir agrega elde edilir (Toma vd., 2024). Günümüzde küresel perlit üretimi 5,8–6 milyon ton aralığında olup perlit hem doğal formda hem de genleştirilmiş ürün olarak ticari pazarda önemli bir yer edinmektedir (Şapcı & Ceylan, 2021).

2.9.1. Perlitin minerolojik kompozisyonu

Perlit, hacimsel olarak yaklaşık %90 ila %97’si camlı yapıdan meydana gelmektedir. Bu cam matris içerisinde feldspat ve biyotit gibi kristalin minerallere de rastlanmakta, ayrıca nadir olmakla birlikte manyetit ve apatit gibi mineraller de görülebilmektedir. (Turanlı vd., 2021).

2.9.2. Perlitin kimyasal bileşimi

Perlit, kimyasal bileşimi itibarıyla %65–75 silisyum dioksit (SiO₂), %10–15 alüminyum oksit (Al₂O₃), %1,8–5 sodyum oksit (Na₂O) ve %3–5 potasyum oksit (K₂O) ile birlikte değişen oranlarda demir oksit (Fe₂O₃), kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) içeren volkanik kökenli bir cam kayadır (Thanh vd., 2011). Hafif ve gözenekli yapısı sayesinde su yüzeyinde kalabilen perlit, kimyasal açıdan oldukça saf olup ağır metaller, radyoaktif elementler veya organik bileşikler içermez. Bu özellikleriyle çevre dostu bir malzeme olarak değerlendirilen perlit, farklı sanayi alanlarında güvenle kullanılmaktadır (DPT, 2001). Perlitin başlıca kimyasal bileşenleri Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Perlitin kimyasal bileşenleri (Turanlı vd., 2021)

Kimyasal Bileşim	Miktar
SiO ₂	71,0 – 75,0
Al ₂ O ₃	12,5 – 18,0
Na ₂ O ₃	2,9 – 4,0
K ₂ O	0,5 – 5,0
CaO	0,5 – 2,0
Fe ₂ O ₃	0,1 – 1,5
MgO	0,02 – 0,5

2.9.3. Perlit fiziksel özellikleri

Perlit camsı bir yapıya sahiptir ve küçük parçalara ayrışabilir (Azizi, 2007). Doğal perlit ince taneli, gözenekli bir yapıya sahip olduğu için kolayca kırılır (M.T.A, 1985). Perlit görünümüne ve dokusuna göre Tablo 3’ te gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.

Tablo 3. Perlitin fiziksel özellikleri (Turanlı vd., 2021)

	Doğal Perlit	Genleştirilmiş Perlit
Renk	Gri, Grinin tonları ve siyah	Beyaz, gri tonları
Yumuşama Noktası	800 – 1100 °C	871 – 1093 °C
Erime Noktası	1315 – 1390 °C	1260 – 1343 °C
pH	6,6 – 8	-
Sertlik	-	5 – 6 Mohs
Özgül Isı	0,2 kcal/kg°C	0,2 cal/g°C
Özgül Ağırlık	2200 – 2400 kg/m ³	-
Termal İletkenlik	-	0,04 W/Mk
Asit İçinde Çözünme	Sıcak konsantre alkali, minerallerde, konsantre asitlerde, seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde az miktarda erirler	Sıcak konsantre alkali ve hidrolik asitte çözünürler, mineral konsantre asitlerde az çözünürler, seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erirler

2.9.4. Perlitin üretimi

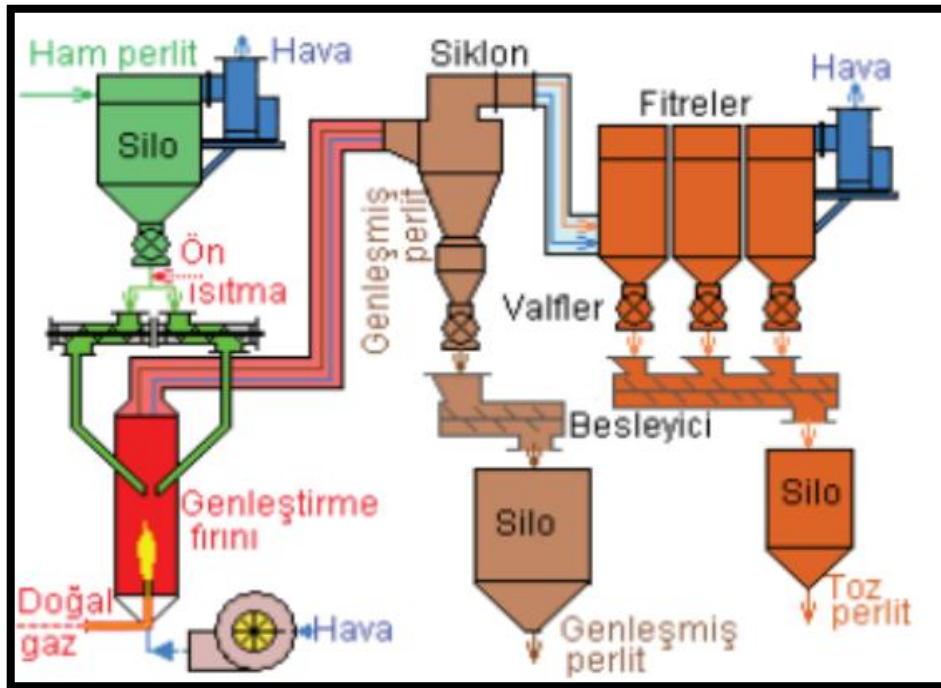
Perlit madeni genellikle açık işletme yöntemiyle çıkarıldıktan sonra, kırma, öğütme ve sınıflandırma gibi çeşitli işlemlerden geçirilerek kullanılabilir hâle getirilir. Ocaktan çıkarılan perlit, çoğunlukla çıkarım alanına yakın bölgelerde bulunan tesislerde ilk kaba kırma işlemine tabi tutulur ve istenen tane boyutuna indirgenir (Kaya, 2019). Bu süreçte perlitin hazırlanmasına yönelik işlemler; ön öğütme, kurutma, öğütme, ince öğütme, eleme, sınıflandırma, boyutlama ve son aşamada depolama adımlarından oluşur (Paşaoğlu Gül, 2021).

2.10. Doğal Perlit

Kayaç formundaki perlitin bu işlemler sonrası elde edilen şekline "doğal perlit" adı verilmektedir (M.T.A, 2022). Doğal perlitin rengi; saydam açık gri tonlarından, parlak siyaha kadar değişkenlik gösterebilmektedir (Baradan vd., 2022). Perlitin en karakteristik özelliklerinden biri, yapısında yaklaşık %2,5 oranında su bulundurmasıdır. Bu su, hidratlanmış camsı silis formunda perlitin bünyesinde yer almakta ve kayaca hem genleşme özelliği hem de termal kararlılık kazandırmaktadır (DPT, 2001). Perlitin pH değeri ise genellikle 6,6 – 8.0 aralığında değişmekte olup, bu değerler onun hafif alkali karakterini yansıtmaktadır (Neville, 1995).

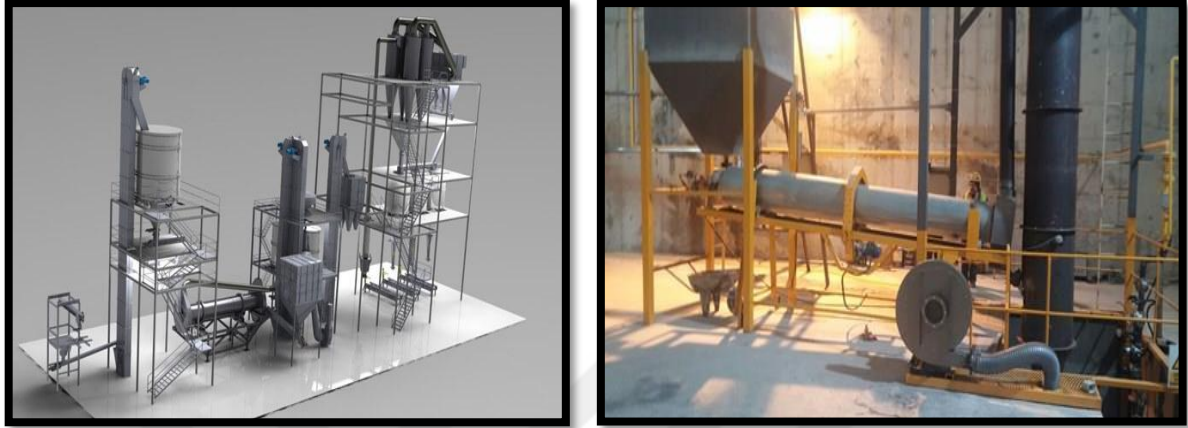
2.11. Doğal Perlitin Genleştirilmesi

Perlitin genleştirilme süreci, kayaç yapısında doğal olarak bulunan veya sonradan bünyeye dâhil olan suyun yüksek sıcaklık etkisiyle buharlaşması ve aynı anda silikat hamurunun viskoz bir hâle gelmesi sonucu gerçekleşmektedir (Şapıcı & Ceylan., 2021). Bu süreçte doğal perlit, öğütülüp 900–1100 °C sıcaklık aralığında hızlı ve kontrollü biçimde ısıtıldığında, serbest ve kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşmasıyla hacmini yaklaşık 10 ila 20 kat artırır. Isıl işlem sırasında yumuşayan ve camsı hâle gelen partiküller, çok sayıda mikro gözenek oluşturarak genleşmiş perlitin karakteristik hücresel yapısını meydana getirir (Kramar & Bindiganavile, 2011). Şekil 10’da doğal perlitin genleştirilme aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 10. Doğal perlitin genleştirilme şeması (Kaya, 2019)

Doğal perlitin genişletme sürecinde uygulanan ön ısıtma işlemi, genellikle "roket" olarak adlandırılan özel fırınlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Genleştirme işlemi, sabit dikey fırınlar ile döner yatay fırınlar olmak üzere iki farklı tipte fırında yapılabilmektedir. Her iki fırın tipi de benzer çalışma prensiplerine sahiptir (DPT, 2001; Başar, 2023). Şekil 11’de her iki roket fırınına ait görseller verilmiştir.



Şekil 11. Dikey ve yatay roket fırını (Başar, 2023; IPS Madencilik, 2025)

Doğal perlitin genişleme karakteristiği üzerinde dört temel faktör etkili olmaktadır: perlitin kökeni ve yapısal özellikleri, tane boyutu, genişletme sıcaklığı ve genişletme süresi (Orhun, 1969). Asidik karakterli bir magmanın yüzeyde ani soğuması sırasında su buharının kayaç yapısına hapsolmesiyle oluşan perlitin genişleme kapasitesinin, kimyasal bileşimden ziyade bünyesindeki “efektif su” (aktif su) miktarına bağlı olduğu belirlenmiştir (Özgenç, 1993). Efektif su miktarına göre doğal perlitler iki gruba ayrılmaktadır: aktif ve pasif perlit. Aktif perlitler yüksek oranda efektif su içerdikleri için 750–900 °C aralığında yüksek genişleme gösterebilirken, pasif perlitlerin genişleme sağlayabilmesi için 900–1100 °C gibi daha yüksek sıcaklıklar gerekmektedir (Özgenç, 1993).

2.12. Genleştirilmiş Perlit

TS 3682 standardına göre genleştirilmiş perlit, süngerimsi ve köpüksü bir yapıya sahip, silikat esaslı ve camsı dokulu bir volkanik kayaç olarak tanımlanmakta olup, birim hacim ağırlığı 1 g/cm³’ün altındadır (Çelik, 2010). Kimyasal olarak inert yapısı ve %30–40 arasında değişen su emme kapasitesi, onu inşaat ve sanayi uygulamaları için uygun hale getirmektedir (Gencel vd., 2022).

Perlit yapısal olarak yaklaşık %80 oranında cam fazı içermesi ve yüksek silika (SiO_2) ile alümina (Al_2O_3) içeriği, genleştirilmiş perlitin puzolan karakteri taşımasını sağlamaktadır (Esfandiari vd., 2019). Mohs sertlik skalasına göre sertliği 5 ile 6 arasında değişen bu malzeme, sıcak ve konsantre alkali çözeltilerde ve hidrolik asitlerde çözünürken, mineral asitlere karşı dirençlidir (Azizi, 2007); özellikle seyreltik veya zayıf konsantre asitlerde çözünürlüğü oldukça düşüktür (DPT, 2001).

Genleştirilmiş perlit ya da perlit tozu, beton teknolojisinde katkı maddesi ya da ikame malzeme olarak kullanılabilir. Hafif agregalı betonlarda ya da çimentolu karışımlarda hem ağırlık azaltıcı hem de yalıtım performansını artırıcı özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Esfandiari vd., 2019).

2.13. Perlitin Avantaj ve Dezavantajları

Perlitin yapısındaki hava boşlukları, düşük yoğunluk sağlaması nedeniyle onu etkili bir yalıtım malzemesi hâline getirmektedir. Kimyasal olarak kararlı ve nötr karakterli olan perlit, tepkimeye girmeyen yapısı sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Steril ve mikrobiyal oluşumlara karşı dirençli yapısı, özellikle hijyen gerektiren alanlarda kullanımına olanak tanımaktadır (Mutlu, 2020).

Isı iletim katsayısı 0,4–0,6 W/mK aralığında değişen perlit, yüksek sıcaklıklarda da yapısal bütünlüğünü koruyabilmektedir. Standartlara uygun perlit tabakaları yaklaşık 900 °C'ye kadar 4 saat boyunca dayanıklılık gösterebilmekte, bu da malzemenin yangın yalıtımında önemli bir avantaj sağlamaktadır (DPT, 2001). Genleştirme sonrası beyaz renge dönüşen perlit, kimyasal olarak ağır metal, nitrat, fosfat veya organik bileşik içermediğinden çevre dostu bir malzeme olarak değerlendirilmektedir (Paşaoğlu Gül, 2021).

Doğal ve genleştirilmiş perlit, geleneksel agregalara göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan betonun birim hacim ağırlığını azaltarak hafif beton üretimini mümkün kılar (Aktürk, 2024). Ancak düşük puzolanik reaktivitesi erken yaşlarda dayanım kaybına yol açabilir (Karein vd., 2019). Bununla birlikte, perlit katkılı betonların donma-çözünme döngülerine (Mo & Fournier, 2007), yüksek sıcaklıklara (Jia & Li, 2021) ve yangına (Abdul Ajeer vd., 2019) karşı yüksek direnç gösterdiği; ayrıca akustik konfor sağladığı bildirilmiştir (Baskar vd., 2022). Fakat yüksek ikame oranları, taze betonun işlenebilirliğini düşürdüğünden optimum kullanım oranı genellikle %30 civarında tutulmaktadır (Topçu & Işıkdag, 2008).

2.14. Doğal Perlitin Kullanım Alanları

Perlit, inşaat sektöründeki en eski kullanım alanlarından biri olan derz, sıva (Çelik vd., 2016) ve harç gibi yalıtım malzemelerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Davraz vd., 2020). Puzolanik aktivitesi sayesinde, daha yoğun ve dayanıklı bir harç yapısının oluşmasına katkı sağlamakta (Kapeluszná vd., 2021); bu özellik, özellikle yangına dayanıklı kaplama malzemeleri (Zukowski & Haese, 2010) ve magnezyum potasyum fosfat çimento (MKPC)–genleştirilmiş perlit kompozitlerinde belirgin şekilde gözlemlenmektedir (USGS, 2023).

Fiziksel dayanımı, kimyasal kararlılığı ve ısı yalıtım özelliği nedeniyle perlit, yalnızca yapı malzemelerinde değil; beton kanalizasyon borularında katkı maddesi olarak, su yalıtımı gereken çatı ve cephe uygulamalarında, hafif yapı elemanlarının üretiminde ve yüzme havuzu yapımında da yaygın biçimde kullanılmaktadır (DPT, 2001). Ayrıca demiryollarında patinaj kumu, abrasif sanayisinde aşındırıcı madde, su arıtma sistemlerinde filtreleme malzemesi ve karayolu yapımında asfalt dolgusu olarak değerlendirilmektedir. Bu çok yönlü kullanım alanları, perlitin hem endüstriyel hem de inşaat mühendisliği uygulamalarında stratejik bir hammadde olduğunu ortaya koymaktadır (Acar, 2023; M.T.A., 2022).

2.15. Genleştirilmiş Perlitin Kullanım Alanları

Genleştirilmiş perlit, düşük yığın yoğunluğu, gözenekli mikro yapısı ve yüksek ısı yalıtım kapasitesi sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Lanzón & García-Ruiz, 2008). Bu özellikleri onu özellikle hafif çimento esaslı kompozitlerde dolgu malzemesi ve yapı sektöründe yalıtım bileşeni olarak değerli kılmaktadır (Demirboğa & Karagöl, 2018). Doğal agregaların yerine kısmen veya tamamen ikame edilmesiyle (Rashad, 2016), harç ve betonların yoğunluğu azaltılabilir (Demirboğa vd., 2001); böylece termal iletkenlik düşerken gözeneklilik artar (Asadiab vd., 2018; Demir & Başpınar, 2008). Ayrıca perlit, yangına dayanımı artırarak yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılık sağlar (Li vd., 2004).

Son yıllarda genleştirilmiş perlitin kullanım alanları çeşitlenmiştir (Alkhazaleh, 2020); faz değişim malzemeleri (PCM) ile birleştirilerek enerji depolama teknolojilerinde değerlendirilmiştir (Liu vd., 2019). Petrol endüstrisinde kuyu çimentolama çamurlarının stabilitesini ve reolojisini iyileştirmek amacıyla da kullanılmaktadır (Bageri vd., 2021). İnşaat sektörünün yanı sıra, tarımda toprak düzenleyici, gıda endüstrisinde filtre malzemesi ve çevre mühendisliğinde sıvı kirlleticilerin gideriminde etkin bir bileşen olarak yer almaktadır (Perlit

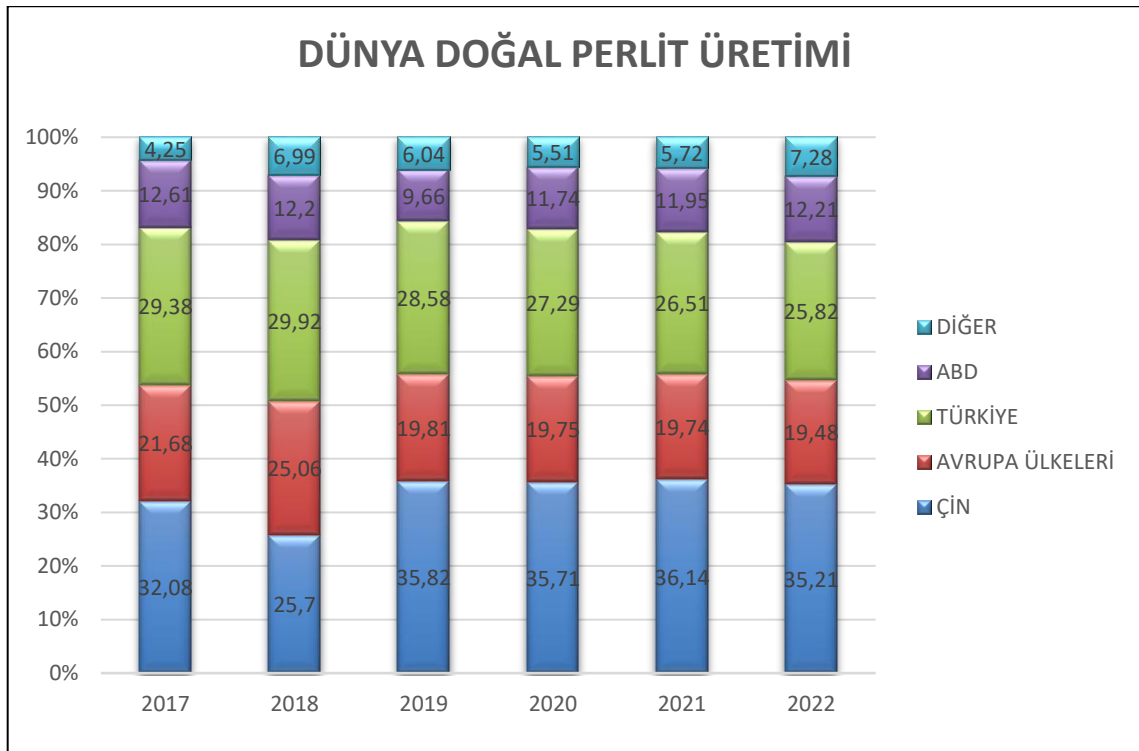
Enstitüsü, 2016). Kimyasal kararlılığı, yüksek yüzey alanı ve alkali ortamlarda reaktivitesi sayesinde zeolit sentezinde de öncü malzeme olarak değerlendirilmektedir (Pichór vd., 2014). Çimento ve agrega yerine kullanılabilen bu malzeme (Kapeluszná vd., 2021) sağlığa zararlı bir etkisi bulunmamaktadır (Khonsari vd., 2010). Ayrıca refrakter tuğla, hafif beton, kriyojenik yalıtım (USGS, 2023), filtrasyon ve harç katkı maddesi gibi çeşitli endüstriyel ürünlerde kullanılabilirliği (İbrahim vd., 2020), perlitin çok yönlü bir mühendislik malzemesi olduğunu göstermektedir (Panagiotopoulou vd., 2022).

2.16. Dünyada Perlit Rezervi

Dünya perlit rezervlerinin en büyük kısmı Türkiye’de bulunmakta olup, küresel rezervlerin %50’den fazlasını Türkiye tek başına oluşturmaktadır (Azizi, 2007). Perlit yataklarının coğrafi dağılımı, volkanik faaliyetlerle paralellik göstermekte ve genel olarak üç ana volkanik kuşakta yer almaktadır. Bunların ilki; Türkiye, Rusya, Yunanistan, İtalya ve Fransa’nın dâhil olduğu Akdeniz volkanik kuşağı, ikincisi Mozambik ve İzlanda’nın yer aldığı Atlantik volkanik kuşağı, üçüncüsü ise Meksika, Filipinler, Amerika Birleşik Devletleri, Yeni Zelanda, Avustralya ve Japonya’yı kapsayan Pasifik volkanik kuşağıdır (Çimen, 2019).

Günümüzde perlit üretimi ağırlıklı olarak Çin, Yunanistan, Türkiye, ABD, Macaristan, İran, Meksika, Yeni Zelanda ve Ermenistan gibi ülkelerde gerçekleştirilmektedir. Küresel tüketim oranlarına bakıldığında, perlitin yaklaşık %53’ü inşaat sektöründe, %14’ü tarımda, %14’ü yalıtım dolgusu olarak, %8’i filtreleme işlemlerinde ve %11’i diğer sanayi alanlarında kullanılmaktadır. En yüksek perlit tüketiminin Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Güney Kore ve Batı Avrupa ülkelerinde görülmesi, bu hammaddenin kullanımının gelişmişlik düzeyiyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir (Ahiler Kalkınma Ajansı, 2021).

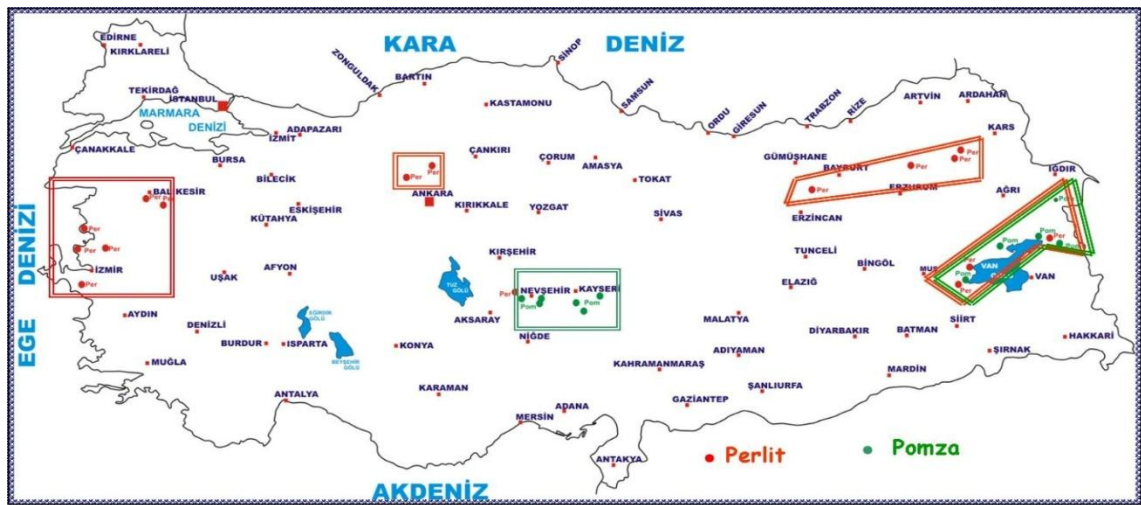
Dünya doğal perlit üretimi Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Dünya doğal perlit üretimi (USGS, 2023)

2.17. Türkiye’de Perlit Rezervi

Türkiye’deki perlit rezervleri ağırlıklı olarak Ege, İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Ülke genelinde öne çıkan başlıca perlit sahaları arasında Cumaovası, Manisa, Soma, Bergama-Dikili (İzmir), Üçsaray-Beşsaray (Eskişehir), Kütahya, Konya, Nevşehir ve Erzincan yer almaktadır. Bu sahalar, Türkiye’nin perlit üretiminde stratejik öneme sahip kaynak alanları olarak değerlendirilmektedir (M.T.A., 2016). Şekil 13’de Türkiye perlit ve pomza yatakları haritası gösterilmektedir.



Şekil 13. Türkiye perlit ve pomza yatakları haritası (M.T.A., 2016)

Türkiye, perlit rezervleri bakımından dünyada önde gelen ülkeler arasında yer almasına rağmen, bu alandaki Ar-Ge çalışmaları ve endüstriyel uygulamalar sınırlı kalmıştır. Özellikle yalıtım sektöründe genişmiş perlit temel hammadde olarak yaygın şekilde kullanılmakta, son yıllarda perlitli alçı sıva ve alçıpan panel üretiminde tüketim miktarları belirgin biçimde artmaktadır. Buna rağmen, yerli üretim tesislerinde kullanılan genleştirme parametreleri ve bu süreçlerin verimliliğine ilişkin bilimsel çalışmalar oldukça yetersizdir (Şapcı & Ceylan, 2021).

2.18. Kaynak Özetleri

Bu tez çalışması, ele aldığı konu bakımından literatürde benzerine rastlanmayan özgün bir içeriğe sahiptir. Yapılan kaynak taramaları sonucunda, perlit madeninin polimer betonlarda agrega olarak kullanımının betonun durabilite özelliklerine etkisinin değerlendirildiği bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu nedenle, çalışmada her iki bileşen (perlit agregası ile yapılan çalışmalar ve polimer beton ile yapılan çalışmalar) ayrı ayrı ele alınmış ve araştırma kapsamı doğrultusunda aşağıda sunulmuştur.

Polimer betonların atmosferik, kimyasal ve termal etkiler altındaki davranışlarını inceleyen çalışmalar, bu malzemenin dayanıklılık ve performans özelliklerini ortaya koymuştur. Reis ve Ferreira (2006), epoksi polimer beton (EPC) numunelerini bir yıl süreyle doğal çevre koşullarına maruz bırakarak, sıcaklık ve UV radyasyonunun etkisiyle belirgin bir yüzey bozulması oluştuğunu belirtmiştir. Reis (2010) ise pH'ı 1,2–12,8 arasında değişen çözeltilerde EPC'nin kırılma özelliklerini incelemiş ve kimyasal etkilere rağmen kalan mukavemetin çimentolu sistemlere kıyasla daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Benzer şekilde Elhem vd. (2012), 250°C'ye kadar ısı etkiler altında epoksi polimer betonun çimento esaslı betondan daha iyi performans gösterdiğini ve optimum reçine oranının %13 olduğunu ifade etmiştir. Kimyasal dayanıklılık yönünden, Jamshidi vd. (2013) ve Debska vd. (2014), farklı agresif ortamlara maruz bırakılan polimer betonların altı ila on iki aylık periyotlarda çimento esaslı numunelere göre çok daha iyi kimyasal direnç sergilediğini raporlamıştır.

Termomekanik ve dolgu malzemesi etkileri üzerine yapılan çalışmalarda, Bayram (2015), sıcaklık ve süre değişiminin polimer betonun mekanik özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu; matris/faz oranının da bu özelliklerde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Bulut ve Şahin (2017), elektronik plastik atıkların polimer betonlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmasının basınç dayanımını artırdığını, ancak yüksek atık oranlarının mukavemeti düşürdüğünü ve optimum bileşimin %15 reçine ile %5 atık oranında sağlandığını bildirmiştir. Kashi vd. (2018),

polimer katkılı betonlarda donma-çözünme ve aşınma dayanımının reçine türüne bağlı olarak değiştiğini, epoksi ve SBR katkılarında eğilme dayanımında %20'ye varan azalmalar gözlemlendiğini, buna karşın aşınma direncinin arttığını belirtmiştir. Jamshidi vd. (2018) de sülfürik asit ve alkali çözeltilerin polimer betonların kırılma dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerini incelemiş ve alkali çözeltilerin daha yıkıcı sonuçlar doğurduğunu göstermiştir.

Malzeme geri dönüşümü ve yeni bağlayıcı türlerine odaklanan çalışmalarda, Khaloo vd. (2019), reçine oranındaki artışın yüksek performanslı geçirgen betonlarda (HPPC) mekanik dayanımı artırdığını, iri agrega boyutunun ise olumsuz etki yaptığını belirtmiştir. Gao vd. (2019), doymamış polyester reçine betonlarının yüksek sıcaklık ve nem altında yaşlanma ile dayanım kaybı gösterdiğini; Singh vd. (2019) ise geri dönüştürülmüş PET reçinelerinin kullanımının mekanik dayanımı artırarak en yüksek değerlere %35 reçine içeriğinde ulaştığını raporlamıştır. Toufigh ve Ghassemi (2020), epoksi polimer betonun deniz suyu, asidik ve alkali ortamlara karşı çimentolu betondan daha dayanıklı olduğunu, A. Seco vd. (2020) ise metalurjik atık katkılı polimer betonlarda donma-çözünme döngülerine karşı yüksek direnç sağlandığını belirtmiştir. Son olarak, Gökbaşı (2021) ile Akın ve Polat (2022), atık lastik ve çelik lif katkılarının sünekliği artırırken dayanımı düşürdüğünü, Niaki (2023) donma-çözünme etkisinin kırılma enerjisi üzerinde sınırlı etki yaptığını, Aydın ve Bulut (2024) ise elektronik atık ikameli polimer betonların asit ve sülfat ortamlarında düşük ağırlık kaybı ile yüksek dayanım gösterdiğini ifade etmiştir.

Genleştirilmiş perlitin beton içerisindeki performansına yönelik çalışmalar, bu malzemenin hem hafiflik hem de yalıtım açısından sağladığı avantajları vurgulamaktadır. Polat (2007), genleştirilmiş perlit (GPA), pomza (PA) ve hava sürükleyici katkı (HSK) kullanarak ürettiği betonlarda kılcal geçirimsizlik, donma-çözünme ve basınç dayanımı ilişkisini incelemiş, GPA ve PA oranı arttıkça kılcal geçirimsizlik ve su emme oranının arttığını, ancak donma-çözünme çevrimleri sonrasında dayanım değerlerinin kararlı kaldığını belirtmiştir. Kara vd. (2015), asfalt betonlarında perlit agregası kullanımının, düşük ağırlık ve yeterli Marshall dayanımıyla köprü ve viyadük gibi hafiflik gerektiren yapılarda uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Engin (2018), farklı tane boyutundaki genleştirilmiş perlit agregalarıyla üretilen ultra hafif betonların kuru birim hacim ağırlığını 150 kg/m³'e kadar düşürmüştü; ısı iletkenliğinin ise 0,039 W/mK seviyesine indiğini bildirmiştir. Benzer şekilde, Li vd. (2018), aerjel dolgu perlit kullanarak betonun termal iletkenliğini 0,098 W/mK'ye kadar düşürmüştü ve 3,71 MPa basınç dayanımı elde etmiştir.

Perlitin bağlayıcı ikamesi olarak kullanıldığı araştırmalarda, Chihaoui vd. (2016), çimentonun %5–20 oranında perlit ile ikamesinin erken yaşta basınç dayanımını azalttığını, ileri yaşlarda ise kontrol numunelerine yakın sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Assaad vd. (2020), doğal atık perlit tozlarının (WP) kendiliğinden yerleşen betonlarda (SCC) özellikle metakaolin ve silis dumanı ile birlikte kullanıldığında dayanım artışı ve donma-çözünmeye karşı yüksek direnç sağladığını göstermiştir. Kapeluszna vd. (2020), öğütülmüş atık genleştirilmiş perlit (WEP) katkısının çimentolu harçların sülfat ve klorür ortamlarındaki dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığını, %20 WEP içeren harçların 5 yıllık sülfat testlerinde bile düşük genleşme (%0,38) sergilediğini raporlamıştır. Chelapandian vd. (2022), ince agreganın %15'e kadar perlit ile değiştirilmesinin istenen mukavemeti koruyarak beton yoğunluğunu azalttığını; Polat (2022) ise genleştirilmiş perlit agregasını bakteri taşıyıcısı olarak kullanarak çatlak iyileşmesini %100'e kadar artırdığını belirtmiştir.

Son yıllarda perlitin özel mühendislik uygulamalarındaki potansiyeli de araştırılmıştır. Kaplan ve Özel (2021), perlit ve pomza agregalı polimer betonların radyasyon zırhlama performansını karşılaştırarak pomza içeriğinin daha yüksek koruma sağladığını, ancak perlitin hafiflik avantajı sunduğunu ortaya koymuştur. Akyüncü ve Şanlıtürk (2021), polimer kaplı genleşmiş perlitin harçlarda ısı iletkenliği azalttığını ve yalıtım performansını artırdığını göstermiştir. Teja vd. (2021), %4 perlit ikamesiyle 600°C sıcaklığa kadar dayanım artışı gözlemlemiş; Hamidi vd. (2022) ise perlitin hafif geopolimer betonlarda %25'in üzerindeki oranlarda ayrışma riski oluşturduğunu bildirmiştir. Sharook vd. (2023), köpük betonlarda %30'a kadar perlit kullanımının basınç ve eğilme dayanımını azaltmasına rağmen, ısı yalıtımını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Bulut (2024), %10–100 oranlarında perlit içeren hafif betonlarda en yüksek dayanımın %10 perlit içeren karışımda (62,42 MPa) elde edildiğini, yüksek perlit oranlarında ise yalıtkan beton özelliklerinin öne çıktığını belirtmiştir. Li vd. (2023), genleşmiş perlit içinde immobilize edilen mikroorganizmaların çatlak iyileşme oranını %90'ın üzerine çıkardığını; Kaplan ve Özel (2023) ise perlit ve pomza katkılı polimer bağlayıcılı betonlarda optimum performansın %15 perlit oranında sağlandığını bildirmiştir. Son olarak, Bulut (2024), alkali-silika reaksiyonu (ASR) testlerinde %100 doğal perlit ikameli harçların ASR kaynaklı genleşmeleri belirgin biçimde azalttığını, bu nedenle perlitin alkali dayanımı artırıcı bir malzeme olarak değerlendirilebileceğini vurgulamıştır.

3. YÖNTEM

3.1. Reçineler

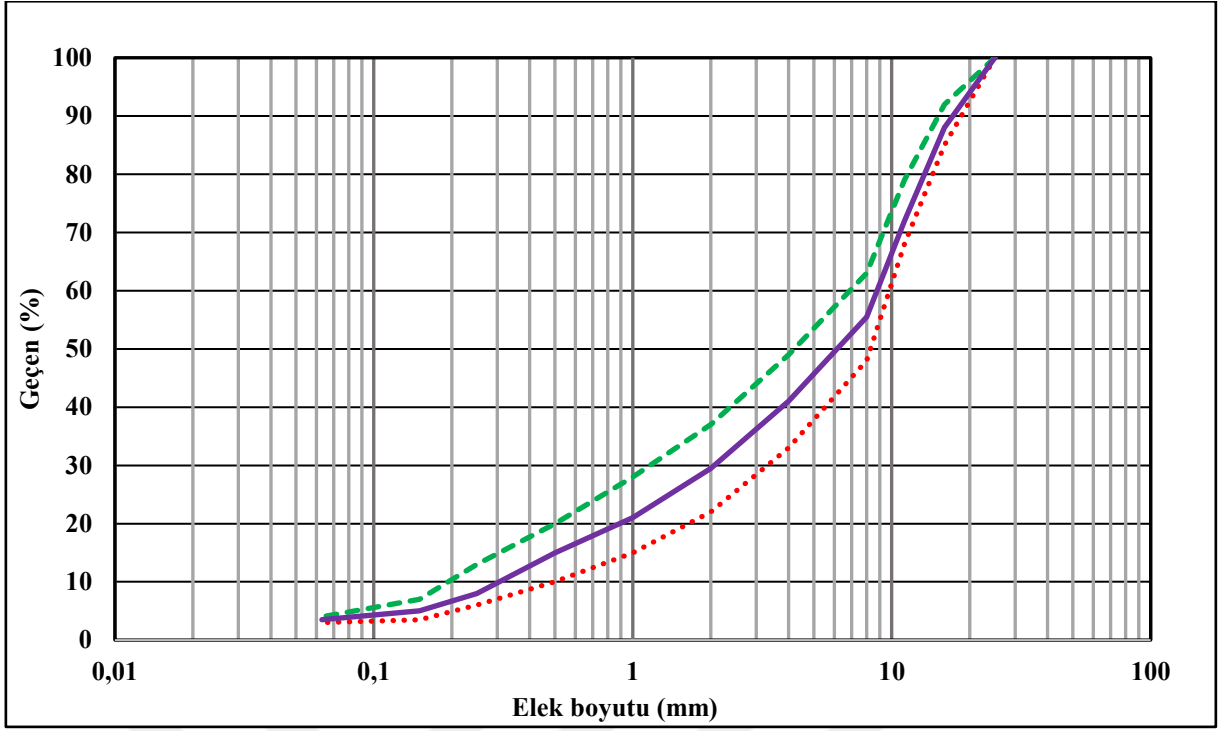
Polimer beton üretimlerinde bağlayıcı işlevi gören reçineler, bu çalışmanın hem özgünlüğünü hem de kapsamını artırmak amacıyla doymamış polyester ve vinilester olacak şekilde iki farklı tipte tercih edilmiştir. Bu tercih doğrultusunda, KP Kompozit Pazarı Şirketi'nden (İstanbul/TR) CE 80 döküm tipi ortoftalik esaslı doymamış polyester reçine ile Polives 701 vinilester reçinesi tedarik edilmiştir. Bu reçinelere ait teknik bilgiler, Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Reçineler hakkında teknik bilgiler

Özellikler	Doymamış Polyester Reçine	Vinilester Reçine
Doymamış polyester reçine	~ 60	-
Stiren	~ 40	~ 45
Fiziksel durum	Sıvı	Sıvı
Monomer oranı (%)	34-36	40-43
Asit indeksi	11-14	Maks. 10
Su emme (%)	0,16-0,19	0,14
Özgül ağırlık	1,1 gr/cm ³	1.038 gr/cm ³
Viskozite	550-600 cP	520-600 cP
Jelleşme süresi (23°C)	7-13 dk	21-25 dk
Sertlik	41 Barcol	34 Barcol
Eğilme dayanımı	124 MPa	157 MPa
Çekme dayanımı	62 MPa	79 MPa
Elastisite modülü	3000-3650 MPa	3350-4300 MPa

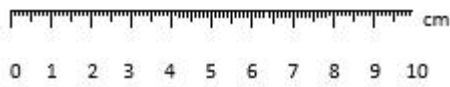
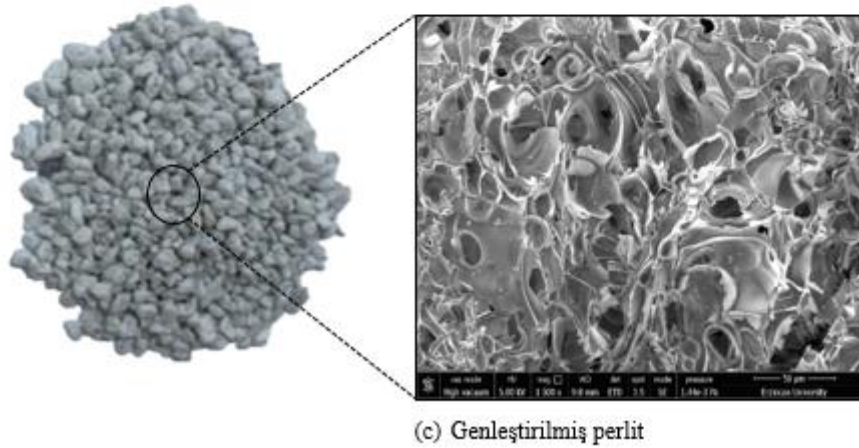
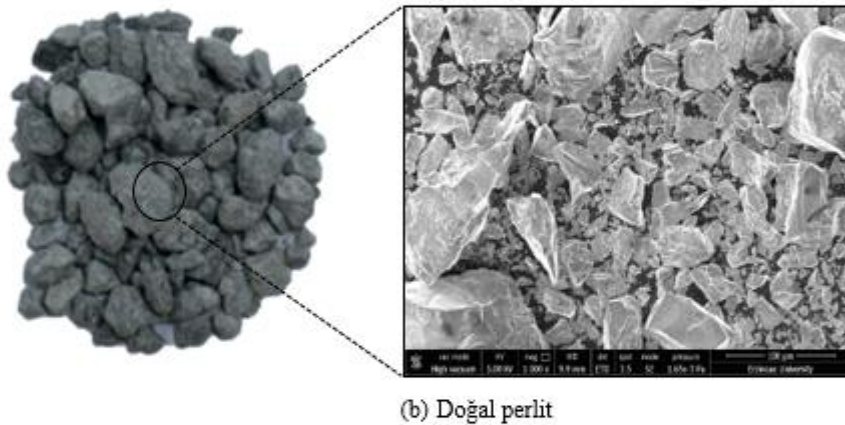
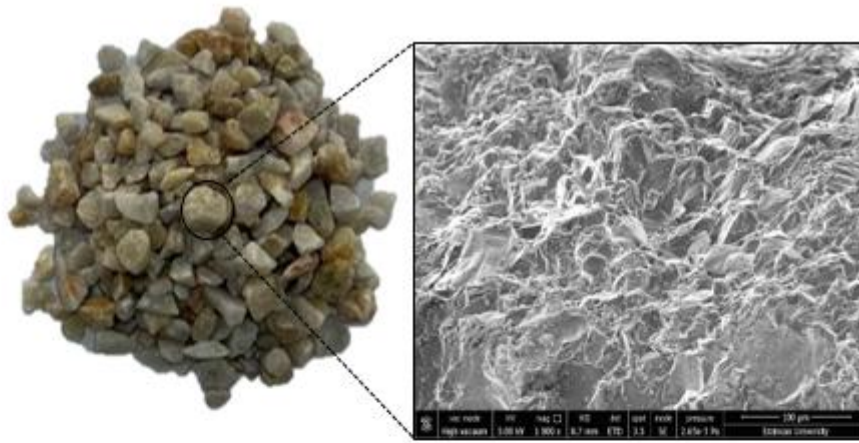
3.2. Agregalar

Kuvars agregası ile çakıl dışında, doğal ve genişletilmiş perlitler polimer beton üretimlerinde dolgu malzemesi olarak yer almıştır. Elek analizleri ile agregaların tane boyutu dağılımları, TS EN 933-1 (Türk Standartları Enstitüsü, 2016) ve TS 802 (ASTM International, 2020) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 14'de gösterildiği gibi karışımların granülometri eğrileri, ideal eğriler (A16/B16) arasında kalarak D_{max} 16 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Polimer betonlarda ince agregalar olarak kuvars, doğal perlit ile genişletilmiş perlitler kullanılırken, iri agregalar olarak kuvars ile çakıl kullanılmıştır. Ön deneyler sonucunda kuvars, doğal perlit, genişletilmiş perlit ve çakıl agregalarının özgül ağırlıkları sırasıyla 2,64 g/cm³, 1,96 g/cm³, 1 g/cm³ ve 2,61 g/cm³ olarak elde edilmiştir.



Şekil 14. Granülometri eğrisi

Şekil 15, polimer beton üretimlerinde sıklıkla yer alan kuvars agregası ile doğal ve genleştirilmiş perlitlerin görünümünü ve mikro yapılarını (büyütme oranı/ölçek 1000-1500 arasındadır) göstermektedir.



Şekil 15. Kuvars agregası, doğal ve genişletilmiş perlitlerin görünüşleri ve mikro yapıları

Son olarak Tablo 5’te üretici firmalardan (kuvars agregası için (Aydınlar Madencilik Şirketi (İzmir/TR) ve perlitler için (ERPER Şirketi (Erzincan/TR)) temin edilen agregalara ait detaylı bilgiler verilmiştir.

Tablo 5. Agregalar hakkında detaylı bilgiler

Özellikler	Kuvars	Doğal ve Genleştirilmiş Perlit
SiO ₂	%95	%70–%75
Al ₂ O ₃	%4,24	%11–%16
Fe ₂ O ₃	%0,068	%0,5–%1,40
MgO	%0,04	%0,045–%0,2
CaO	%0,03	%0,2–%0,45
Na ₂ O	%0,055	%2,7–%3,8
K ₂ O	%0,10	%4–%5
Kızdırma Kaybı	%0,467	-
Sertlik	7	-
Erime Sıcaklığı	1783°C	-
TiO ₂	-	%0,02–%0,2

3.3. Sertleştirici ve Hızlandırıcı Maddeler

Polimer beton üretim sürecinde, kimyasal reaksiyonların başlatılması ve hızlandırılması amacıyla kullanılan katkı malzemeleri karışım performansında önemli bir rol üstlenmektedir. Çalışmada kullanılan bu kimyasal katkı malzemelerine ilişkin özellikler Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 6. Kimyasal malzemelere ait özellikler

Özellikler	Sertleştirici	Hızlandırıcı
Ürün kodu	AKPEROX A1	AKCOBALT %6
Ürün tanımı	Dimetil Ftalat içerisinde Metil Etil Keton Peroksit	-
Yoğunluk	1,16 ± 0,005 gr/cm ³	0,915-0,965 gr/cm ³
Renk	Renksiz, sıvı	Koyu Mavi
Aktif oksijen içeriği	%9,4–%9,6	-
Peroksit içeriği	%33–%37	-
Kobalt içeriği	-	%5,9–%6,1
Katı madde içeriği (%, 105°C 3 saat)	-	Maks. 45

3.4. Beton Karışım Tasarımı

Çalışmadaki ilk parametre, ince agrega yerine hacimce %0, %5 ve %10 oranlarında hem doğal perlitlerin hem de genleştirilmiş perlitlerin agrega olarak kullanılmasıdır. Çalışmanın ikinci parametresi ise doymamış polyester ile vinilester reçinelerinin polimer betonları elde ederken bağlayıcı malzeme olarak seçilmesidir. Bu sayede hangi perlit tipi ve oranının hangi reçine tipi ile daha iyi uyum göstereceği belirlenmek istenmiştir. Son olarak polimer betonların 28, 56 ve 90 günlük kılcal su emme, asit ve sülfat saldırısı deney sonuçları sayesinde farklı yaşlardaki kıyaslamaların elde edilebilmesi, çalışmanın bir diğer parametresini oluşturmaktadır. Ayrıca farklı sıcaklıklar (50°C, 100°C, 150°C ve 200°C) ve donma çözünme döngüleri (50-100-150-

200-250 ve 300 döngü) sonucunda polimer betonların yüksek sıcaklık ve donma-çözünme davranışlarının saptanacak oluşu da dikkate alınacak bir diğer parametre olarak değerlendirilmektedir. Kontrol betonları, doğal ve genişletilmiş perlit bulunmayan polimer betonları üretilip diğer beton gruplarıyla kıyaslayabilmek amacıyla elde edilmiştir. Detaylı ön deneyler sonucunda, polimer betonlarda kimyasal malzemelerin oranları sertleştirici için %1,5 ve hızlandırıcı için de %0,2 olarak belirlenmiş, tüm serilerde reçine/dolgu oranı %15-%85 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Tüm deneysel parametreler doğrultusunda toplam 80 silindir (100x200 mm) ve 220 adet küp (100x100x100 mm) numunesi polimer betonları üretebilmek amacıyla kullanılmış, sonuçların ortalaması alınarak kıyaslamalı değerlendirmeler yapılmıştır. Kodlama sisteminde kullanılan reçine ve perlit türleri, İngilizce adlandırılmalarının ilk harfleriyle ifade edilmiştir. Bu kapsamda; PR polyester reçineyi, VR vinilester reçineyi, EP genişletilmiş perlit agregasını ve NP doğal perlit agregasını temsil etmektedir. Perlit oranları ilgili harflerin devamında yüzde işareti kullanılmadan belirtilmiş, deney yaşları ise kodun sonunda yer alan “/” ifadesinden sonra gösterilmiştir. Örneğin, PREP5/90 kodu, polyester reçineli ve %5 genişletilmiş perlit içeren polimer betonun 90. günlük deneyine karşılık gelmektedir. Herhangi bir perlit içermeyen kontrol karışımları ise PRP0 ve VRP0 kodları ile ifade edilmiştir. Deney günlerini belirten sayılar çıkarıldıktan sonra elde edilen beton karışım tasarımı, Tablo 7’de verilmiştir.

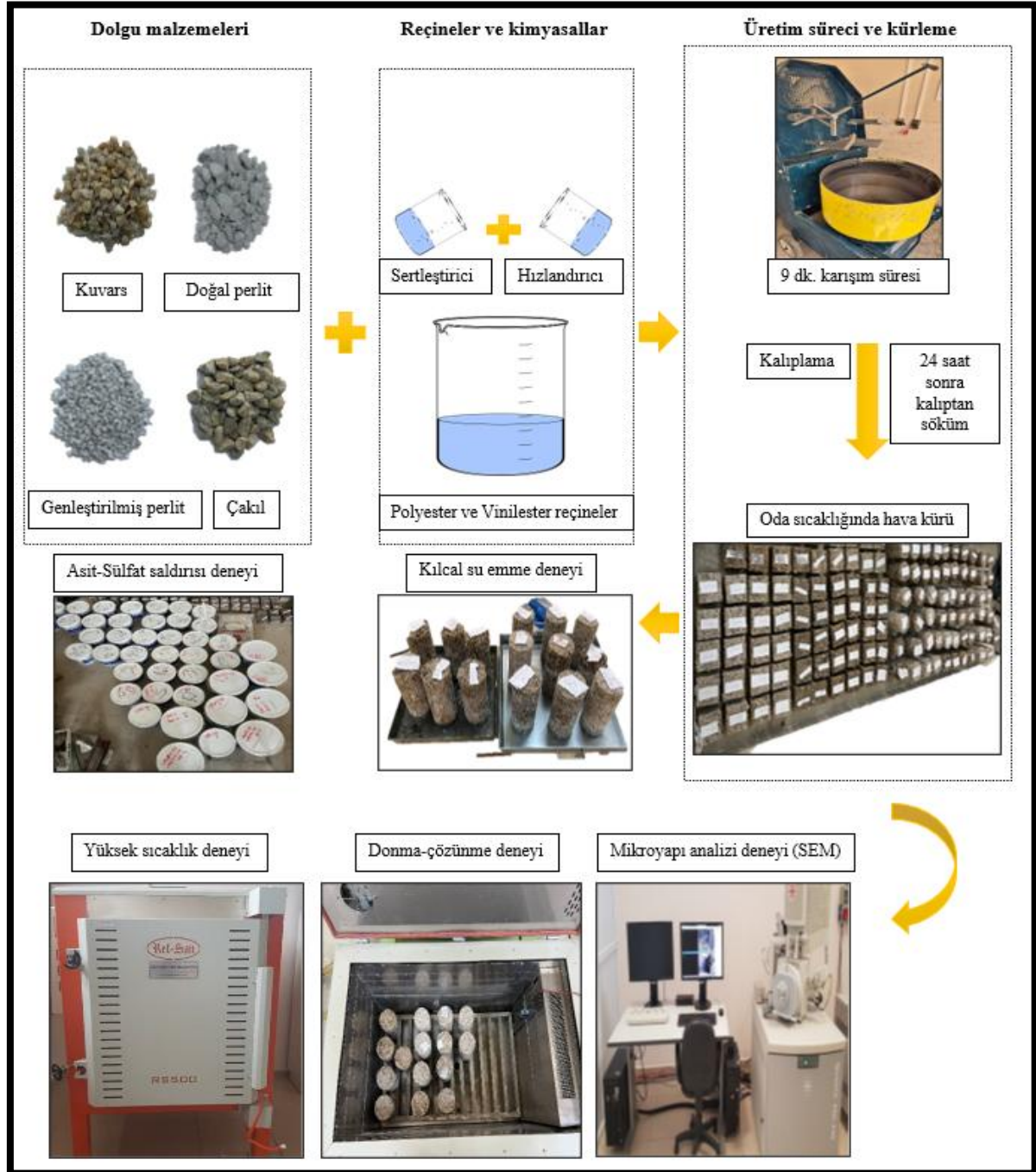
Tablo 7. Beton karışım tasarımı (kg/m³)

Kod	İnce Agrega	İri Agrega	Doğal Perlit	Genleştirilmiş Perlit	Polyester Reçine	Vinilester Reçine
PRP0	833,68	1201			357,11	
PRNP5	791,84	1201	38,84		357,11	
PRNP10	750	1201	80,68		357,11	
PREP5	791,84	1201		19,42	357,11	
PREP10	750	1201		40,34	357,11	
VRP0	829	1194,20				355,1
VRNP5	787,40	1194,20	38,6			355,1
VRNP10	745,80	1194,20	80,20			355,1
VREP5	787,40	1194,20		19,3		355,1
VREP10	745,80	1194,20		40,1		355,1

3.5. Polimer Betonların Hazırlanması ve Deney Prosedürleri

Polimer betonların üretimlerinde bağlayıcı malzeme olarak polyester ve vinilester reçineler, agrega olarak kuvars ve çakıl dışında doğal ve genişletilmiş perlitler ile polimerizasyon sürecinin gerçekleştirilip tamamlanması için sertleştirici ve hızlandırıcı kimyasal malzemeler yer almıştır. Beton mikserinde ilk olarak agregaların tümü 1 dk boyunca karıştırılmıştır. Bu

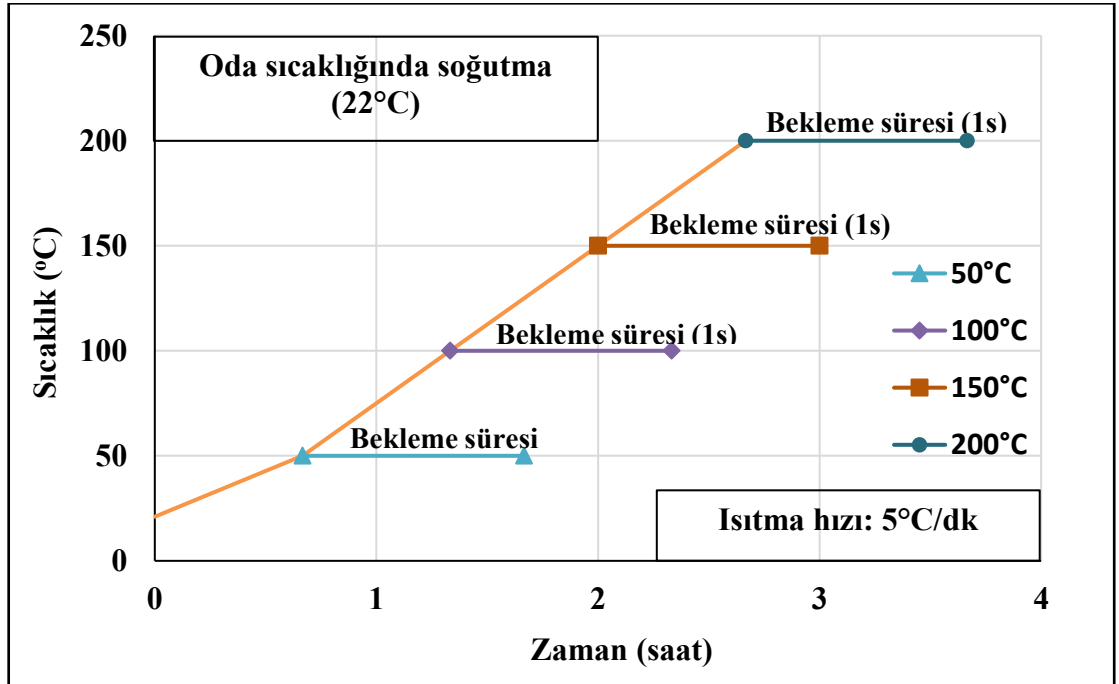
dolgu malzemesine hızlandırıcı kimyasal malzeme ile reçineler karıştırılarak dökülmüş ve 5 dk tüm karışım karıştırılmıştır. Karışıma sertleştirici kimyasal malzeme ilave edilerek nihai karıştırma süreci 3 dk içerisinde tamamlanmıştır. Kalıplara yerleştirilen taze polimer betonlara vibrasyon işlemi, yaklaşık 2 dk boyunca masa tipi vibratör sayesinde gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonrası polimer betonlar kalıplarda 24 saat tutulmuş, numunelere deney günlerine kadar 22 ± 1 °C oda sıcaklığında ve $\%45 \pm 5$ bağıl nem koşullarında hava kürü uygulanmıştır. Şekil 16, polimer betonların hazırlanma ve deneysel prosedürünü göstermektedir.



Şekil 16. Polimer betonların hazırlanması ve deneysel yöntemi

Polimer betonların kılcal su emme deneyleri, 28, 56 ve 90 gün sonunda silindir numuneler üzerinde ASTM C 1585 (ASTM C1585, 2020) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Asit ve sülfat saldırısı deneyleri, 28, 56 ve 90 gün boyunca %5 H₂SO₄ ve %5 Na₂SO₄ çözeltilerine maruz bırakılan küp numuneler üzerinde ASTM C 267 (ASTM C267, 2020) ve ASTM C 1012 (ASTM C1012, 2019) standartlarına göre uygulanmıştır. Numuneler ile çözelti arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda iyon derişiminin azalması ve agresif ortam koşullarının zayıflaması deneyi etkileyebileceğinden, saldırı şiddetinin deney süresince sabit tutulması amacıyla çözeltiler her 3-4 haftada bir yenilenmiştir. Deneylerin sonunda görsel değerlendirmenin yanı sıra ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları da yüzdesel olarak elde edilmiştir.

Otomatik fırına 28 gün hava kürü sonrası yerleştirilen polimer betonların yüksek sıcaklık deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk ağırlıkları alınan numuneler, Şekil 17’de gösterildiği gibi dakikada 5°C artacak şekilde sıcaklığı ayarlanan fırına yerleştirilmiştir. Hedef sıcaklıklar olan 50°C, 100°C, 150°C ve 200°C’ye gelinceye kadar düzgün bir şekilde ısınması sağlanan fırın sayesinde numuneler 1 saat boyunca seçilen sıcaklıklarda tutulmuştur. Son olarak gerçekleşebilecek termal şokları önleyebilmek amacıyla güç kapatılmış ve numuneler oda sıcaklığına (22°C) gelene kadar soğumaya bırakılmıştır (Aghdam vd., 2023; Ataabadi vd., 2021; Niaki vd., 2018; Vipulanandan & Dharmarajan, 1988).



Şekil 17. Polimer betonlar için yüksek sıcaklık prosedürleri

Donma-çözünme deneyleri ASTM C666 (ASTM, 2016) B prosedürüne göre 0, 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 döngü olacak şekilde uygulanmıştır. Numuneler tam otomatik donma-çözünme cihazına yerleştirilmiş ve deney -18°C ile 4°C arasında kontrollü sıcaklık geçişleriyle yürütülmüştür. Her döngü, donma ve çözünme fazlarının tamamlanmasını içerecek şekilde yaklaşık 6 saatlik süre içerisinde gerçekleştirilmiş olup sıcaklık değişim hızları cihaz tarafından sürekli kontrol altında tutulmuştur. Deney sonunda numunelerin görsel değerlendirme, ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları incelenmiştir. Son olarak, numunelerin mikroyapı analizleri, QUANTA FEG 450 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Polimer betonlara uygulanan deneylerin tamamına ait detaylı bilgiler, Tablo 8’de verilmiştir.

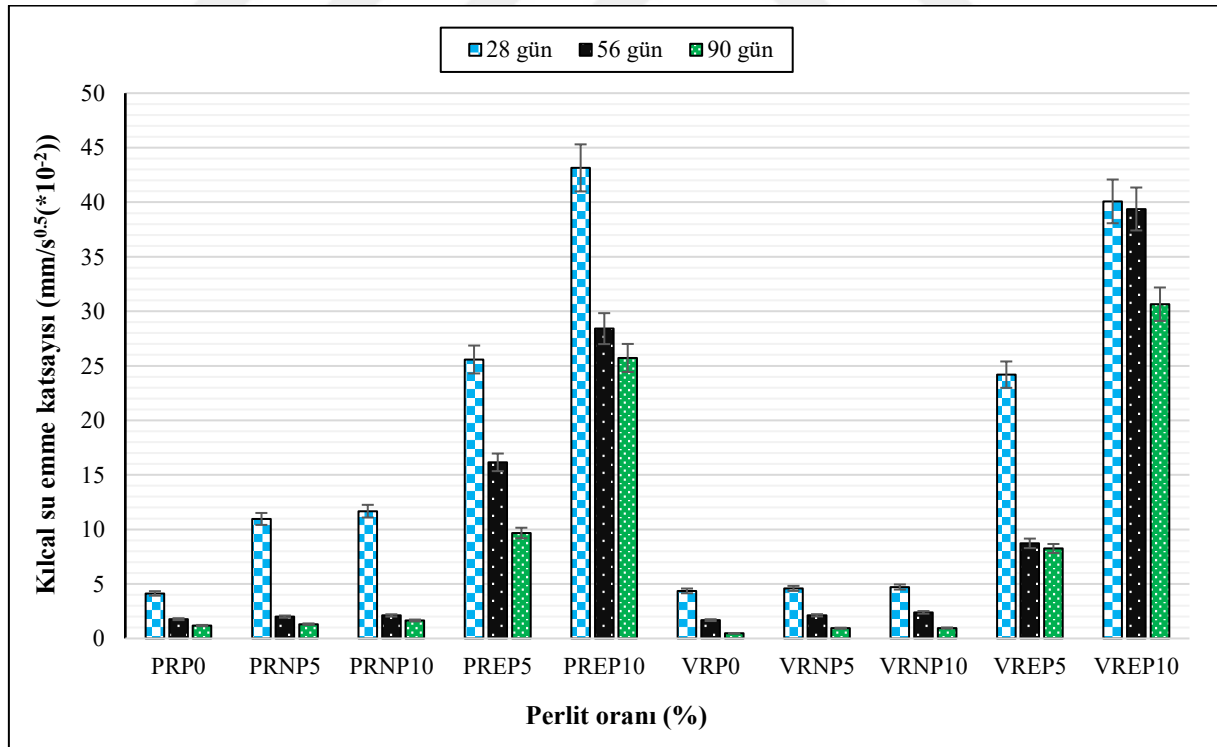
Tablo 8. Deney prosedürü

Deney İsimleri	Deney Standartları	Numune Şekilleri	Numune Boyutları	Gün Parametreleri
Kılcal Su Emme	ASTM C 1585 (2020)		100x200 mm, silindir	28, 56 ve 90 gün
Asit-sülfat saldırısı	ASTM C 267 (2020) ASTM C 1012 (2019)		100x100x100 mm, küp	28, 56 ve 90 gün
Yüksek sıcaklık	(Ataabadi vd., 2021; Aghdam vd., 2023; Niaki vd., 2018; Vipulanandan & Dharmarajan, 1988)		100x100x100 mm, küp	28 gün
Donma-çözünme	ASTM C666 (2016)		100x200 mm, silindir	28 gün

4. BULGULAR

4.1. Kılcal Su Emme

Farklı oranlarda doğal ve genişletilmiş perlit agregaları kullanılarak üretilen polyester ve vinilester reçineli polimer betonların 28, 56 ve 90 günlük kılcal su emme sonuçları, Şekil 18’de verilmiştir. Gün parametresi 28 günden 90 güne doğru ilerlediğinde, kılcal su emme katsayı değerlerini azaltmıştır. %10 doğal ve genişletilmiş perlit içeren polyester reçineli polimer betonlar (PRNP10 ve PREP10), 90 günlük kılcal su emme değerlerinde sırasıyla %86 ve %40 azalma göstermiştir. Bu durum vinilester reçineli %10 doğal ve genişletilmiş perlitli polimer betonlarda (VRNP10 ve VREP10) ise 90 gün sonunda sırasıyla %80 ve %24 azalmayla sonuçlanmıştır. Kontrol polimer betonlarından sonra, en düşük kılcal su emme katsayılarına sahip olan polimer betonlar %5 ve %10 oranında doğal perlitlerin kullanıldığı polyester/vinilester reçineli polimer betonlar olmuştur. Örneğin polyester reçineli kontrol polimer betonlarının (PRP0) 56 günlük kılcal su emme katsayısı $1,77 \text{ (mm/s}^{0.5}(*10^{-2})\text{)}$ iken, %5 doğal perlitli polimer betonda (PRNP5) bu değer 2 ($\text{mm/s}^{0.5}(*10^{-2})$), %10 doğal perlitlide (PRNP10) ise 2,11 ($\text{mm/s}^{0.5}(*10^{-2})$) değeri ile birbirine çok yakın ve benzer elde edilmiştir. Bu durum diğer günlerde de aynı eğilimi göstermiştir.



Şekil 18. Polimer betonların su emme sonuçları

Betonun en önemli durabilite özelliklerinden birisi olan kılcal su emme, sıvı malzemelerin beton içerisinde hareket ederek zararlı maddeleri betona taşımaya imkân tanımaktadır (Ataabadi vd., 2021). Kılcal su emme sonuçları üzerinde, polimerizasyon süresi, boşlukların sayısı ve birbiriyle bağlantısı, hava içeriği, agrega özellikleri gibi parametrelerin etkili olduğu düşünülmektedir (Bulut, 2024). Perlit agregalarının gözenekli yapısı, başlangıçta reçineler ile aderansı ideal şekilde sağlayamayarak kılcal su emme değerlerini artırmış olabilir. Kür süresi ilerledikçe dolgu malzemesi (agregalar) ve reçineler arasında optimum şekilde gerçekleşen polimerizasyon reaksiyonları ile daha kararlı ve daha az boşluklu polimerik yapılar elde edilerek kılcal su emme katsayılarındaki düşüşler açıklanabilir (Bayraktar vd., 2024). Bu arada, çok yüksek sıcaklık derecelerine çıkılıp yaklaşık 35 kat hacim genişlemesine uğrayarak oluşan yüksek su emme özelliğine sahip genişletilmiş perlitlerin (Bulut, 2024) kuvars agregası ile yer değiştirilmesi sonucunda polimer beton matrisleri ile doğal perlite göre çok daha az bağlanabileceği, matrislerde daha gözenekli bir mikro yapı oluşturacağı, böylece yüksek gözeneklilik varlığında kılcal su emme katsayılarını artıracığı, bu çalışmadan elde edilen veriler ile teyit edilebilir. Ayrıca bu durum, özgül ağırlık etkisi ve genişletilmiş perlit ile reçineler arasındaki etkileşim ile de açıklanabilir. Özgül ağırlık azaldıkça su geçirimsizliğinin arttığı, genişletilmiş perlitin düşük özgül ağırlığının su geçirimsizliğini kontrol eden çok önemli bir faktör olduğu değerlendirilmektedir (Polat vd., 2010). Perlitlerin agrega olarak kullanıldığı ve kılcal su emme sonuçlarının analiz edildiği literatürdeki çalışmalar ile benzer eğilimler, bu çalışmada da gözlemlenmiştir (Badogiannis vd., 2021; Mathews vd., 2023; Sharma vd., 2022; Thillo vd., 2021; Türkmen & Kantarcı, 2007). Perlit agregalı polimer betonlarda vinilester reçinenin polyester reçineye göre nispeten daha düşük kılcal su emme katsayısı ortaya çıkarmasında, vinilester reçinenin perlitleri daha iyi ve homojen bir şekilde sararak güçlü bir kaplama etkisi yaratmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu sayede vinilester reçine, perlitlerdeki gözeneklere dolarak ve emilerek/adsorbe edilerek daha az su geçirimsizliği sağlanabilmiştir. Bu durum, polimer beton üretimlerinde dikkate değer bir gözlem olarak da not edilmiştir. Ayrıca vinilester reçinelerin diğer reçinelere kıyasla polimer beton karışımlarında sertliği ve aderansı artırma özelliğine sahip olduğu bilinmektedir (Farahani vd., 2023). Bu özellik, kılcal su emme katsayıları üzerinde olumlu anlamda etkili olmuş olabilir.

Bu çalışmanın önemli bulgularından birisi, genel olarak vinilester reçine polyestere göre, doğal perlit genişletilmiş görece polimer betonların kılcal su emme katsayıları üzerinde tüm günler göz önünde bulundurulduğunda daha olumlu bir etki göstermiştir. Bir diğer önemli bulgu ise uygun oranlarda doğal perlit kullanımı, polyester/vinilester reçineli polimer betonların kılcal su

emme katsayıları üzerinde etkili olabilir, böylece bu betonların su geçirimsizliği önemli olduğu inşaat uygulamalarında optimum performansla kullanılabilirliğini sağlayabilir. Yerel olarak bol miktarda bulunan doğal perlitler kullanılarak elde edilebilen düşük su geçirimsizliği sayesinde hem geleneksel agrega kaynaklarına bağımlılık azalabilecek hem de sürdürülebilir malzeme seçeneği ortaya çıkarak daha iyi performanslar alınabilecektir.

4.2. Asit Saldırısı

28, 56 ve 90 gün boyunca asit saldırısına maruz kalan polyester/vinilester reçineli doğal ve genişletilmiş perlit agregalı polimer betonların ağırlık kaybı, basınç dayanımı kaybı ve görsel değerlendirme sonuçları detaylı olarak analiz edilmiştir. Polimer betonların, asit ve sülfat saldırısı deneylerinden önce ilgili standartlara göre ölçülen basınç dayanımı sonuçları, Tablo 9'da verilmiştir.

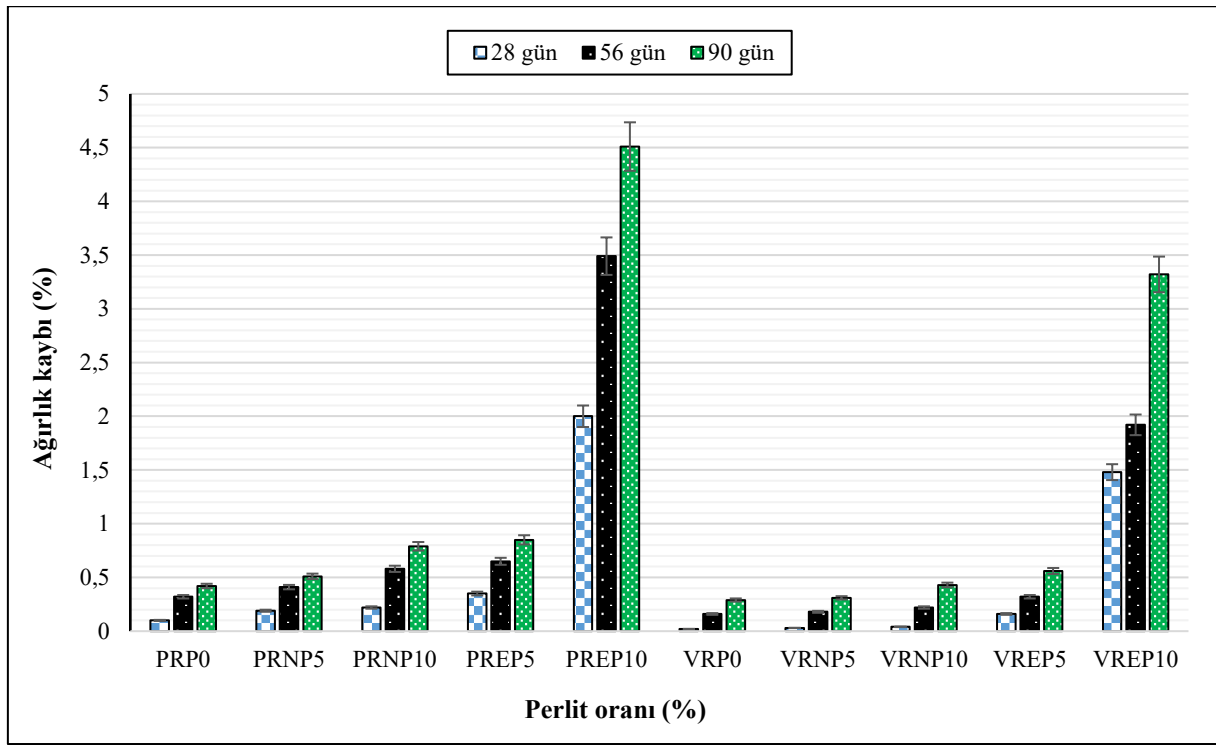
Tablo 9. Polimer betonların kimyasal saldırı öncesi referans basınç dayanımı sonuçları

Kod	Basınç Dayanımı (MPa)	Kod	Basınç Dayanımı (MPa)
PRP0/28	66,71	VRP0/28	72,24
PRNP5/28	49,05	VRNP5/28	55,59
PRNP10/28	41,56	VRNP10/28	47,45
PREP5/28	32,98	VREP5/28	37,21
PREP10/28	21,78	VREP10/28	28,88
PRP0/56	69,24	VRP0/56	74,66
PRNP5/56	52,45	VRNP5/56	58,71
PRNP10/56	44,89	VRNP10/56	50,52
PREP5/56	35,84	VREP5/56	40,23
PREP10/56	24,69	VREP10/56	31,79
PRP0/90	71,46	VRP0/90	76,82
PRNP5/90	55,63	VRNP5/90	61,43
PRNP10/90	47,23	VRNP10/90	53,13
PREP5/90	38,33	VREP5/90	43,77
PREP10/90	27,93	VREP10/90	34,44

4.2.1. Asit saldırısına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı

Sülfürik asidin betonlar için en yaygın bozucu reaktif olduğu bilinmektedir (AbdElmaseih vd., 2025). Çünkü sülfürik asit iyonları betona nüfuz ettiğinde bozulma etkisi yaratarak betonu dramatik bir şekilde çatlatmakta ve zarar vermektedir (Collepardi, 2003). Şekil 19'da, asit maruziyeti sonrası polimer betonların yaşadıkları ağırlık kayıpları yüzdesel olarak verilmiştir. Doğal perlitlerin hem polyester hem de vinilester reçineli polimer betonlarda agrega olarak

kullanımı, kontrol polimer betonlarına çok yakın ve çok düşük oranlarda asit saldırısı sonrası ağırlık kayıpları oluşturmuştur. Örneğin 90 günlük asit maruziyeti sonrası polyester reçineli polimer betonlardaki ağırlık kayıpları PRP0 için %0,42 iken, PRNP5 için %0,51, PRNP10 için %0,79 olarak birbirine çok yakın ve çok düşük değerlerde elde edilmiştir. Aynı gün dikkate alındığında vinilester reçineli polimer betonların ağırlık kayıpları ise VRP0 için %0,29 iken, VRNP5 için %0,31, VRNP10 için %0,43 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, polimer betonlarda doğal perlitlerin agrega olarak %5 ve %10 oranlarında kullanımının asit saldırısına maruz kalınacak yerlerde rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. %5 ve %10 doğal perlit agregaları her iki reçine tipi ile deneysel süreç esnasında da gözlemlendiği gibi optimum aderans sağlayarak yüksek kompaktlığa sahip polimer betonlar oluşturmuş, bu sayede asit saldırısı sonrası çok düşük ağırlık kayıpları yaşayan polimer betonlar üretilmiştir. Bu fenomen, doğal perlitlerin yapısındaki gözeneklerin, reçine ile ideal oran eşliğinde homojen doldurularak asit iyonları geçişini engellemiş olabileceği ile açıklanabilir. Ayrıca bu konu ile ilgili literatürde bulunan az sayıdaki çalışmada da asit maruziyetine bırakılan polimer betonların zamanla oluşan ağırlık kayıplarının küçük farklarla meydana geldiği bildirilmiştir (Aydın & Bulut, 2024; Ribeiro vd., 2002). Bu çalışma sonuçları, literatürdeki çalışmaları teyit eder niteliktedir. Genleştirilmiş perlitlerdeki durum ise dikkat çekici bir şekilde literatüre katkı sunabilir. Şöyleki genleştirilmiş perlitin %5 oranında kullanımı, doğal perlitli agregalar ile benzer eğilim sergilemiş ve her iki reçineye sahip polimer betonda da düşük ağırlık kayıpları oluşturmuştur. Ancak genleştirilmiş perlit oranı %5'ten %10'a yükseldiğinde, ağırlık kayıpları her gün için dramatik şekilde artış göstermiştir. Örneğin, 90 günlük kontrol polimer betonun ağırlık kaybı %0,42 iken, PREP10 için bu değer 10 kat artarak %4,51 olmuştur. Bu çalışma ile asit saldırısına maruz kalacak polimer betonlarda, genleştirilmiş perlitlerin agrega olarak kullanılması için %5 oranının kritik ve optimum oran olduğu ortaya çıkarılmıştır. Genleştirilmiş perlitlerin yüksek oranlarda kullanımının (%10), polimer beton üretimlerinde gözlemlendiği gibi sadece segregasyon yaratmadığı aynı zamanda yapısındaki fazla sayıdaki gözeneklerin reçine ile kaplanmasını engellediği düşünülmektedir. Gün parametresi arttıkça, polimer betonların tamamında ağırlık kayıpları artış sergilemiştir. Uzun süreli asit maruziyeti sonrası polyester reçineli polimer betonlarda asit çözeltisi ile agrega arasında kimyasal reaksiyon gerçekleşerek agrega-matris arayüzeyinin bozulduğu, bu durumun ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarına neden olduğu, Hashemi vd. (Hashemi vd., 2018) tarafından da bildirilmiştir. Vinilester reçineli polimer betonlar, polyester reçinelilerden tüm günler için daha az ağırlık kaybı göstermiştir. Bu durumun oluşmasında asidik çözeltinin penetrasyonuna karşı vinilester reçine yüzeyinin daha zengin ve homojen oluşunun etkili olduğu değerlendirilmektedir.

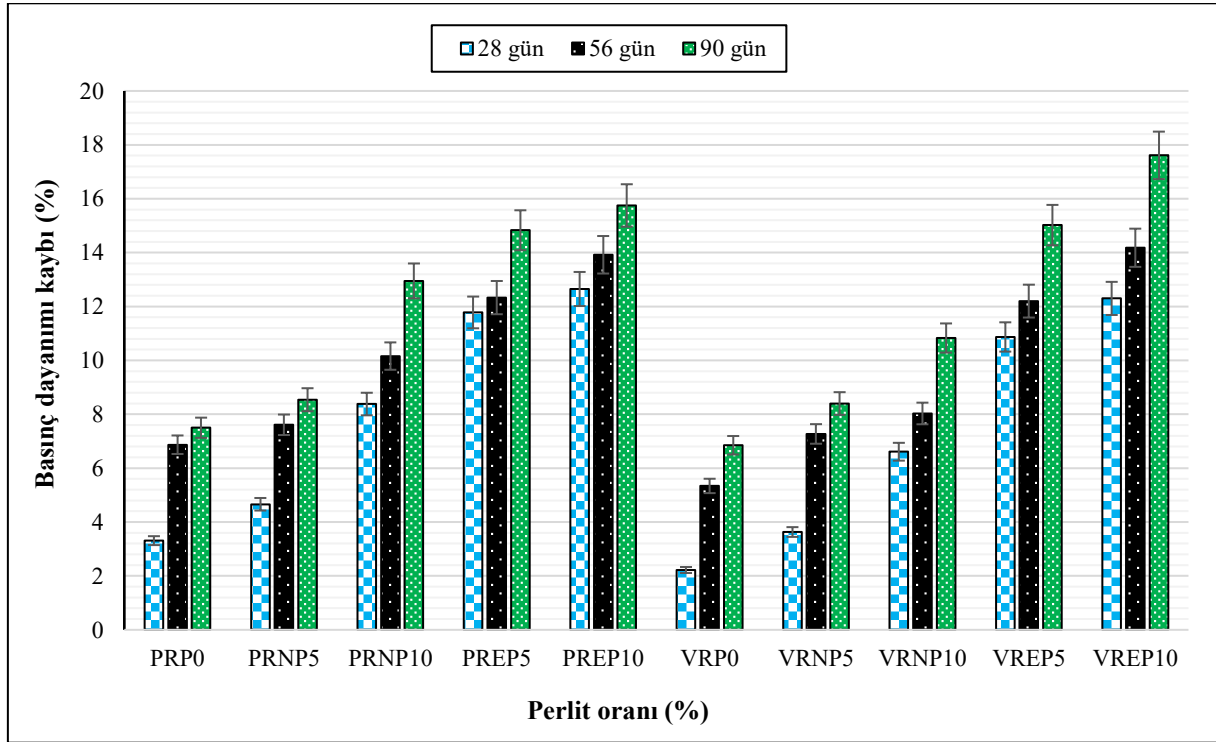


Şekil 19. Asit saldırısı sonrası polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları

4.2.2. Asit saldırısına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı

Polimer betonların 28, 56 ve 90 günlük asit saldırısı sonrası uğradıkları basınç dayanımı kayıpları, Şekil 20’de verilmiştir. Perlit kullanımı hem polyester hem de vinilester reçineli polimer betonların basınç dayanımı kayıplarını artırmıştır. Ancak özellikle %5 oranında doğal perlit agregasının üretimlerde yer alması sonucunda, kontrol polimer betonlara yakın değerler elde edilmiştir. Örneğin, PRP0 ile PRNP5 kodlu numunelerin 28 günlük basınç dayanımı kayıpları, sırasıyla %3,31 ve %4,66 olarak birbirine çok yakın gerçekleşmiştir. Bu durum, VRP0 ile VRNP5 için de sırasıyla %2,22 ve %3,63 olarak benzer eğilimi göstermiştir. Artan perlit oranı ile birlikte basınç dayanımı kayıplarının meydana gelmesinde, uzun süreli asit maruziyetinin reçinelerin polimer zincirlerini tahrip ederek perlit-reçine arayüzeyini bozmasının etkili olduğu düşünülmektedir (Kajorncheappunngam vd., 2002). Genleştirilmiş perlit agregaları, hem %5 hem de %10 oranlarında kullanıldığında tüm günler için basınç dayanımı kayıplarını artırmıştır. 28 günden 90 güne asit maruziyeti artışı, beraberinde basınç dayanımı kayıplarını yükseltmiştir. Polyester reçineli polimer betonların asit çözeltisinde 90 gün bekletildikten sonraki basınç dayanımlarında azalmaların gerçekleştiği, Jamshidi vd. (Jamshidi vd., 2013) tarafından da bildirilmiştir. Bu azalmalar; sülfürik asit iyonlarının maruziyet süresi ilerledikçe reçineleri bozarak agregaları ufalaması ve parçalaması sonucunda olası bir kimyasal reaksiyondan kaynaklanmış olabilir (Ataabadi vd., 2021). Her ne kadar iki

farklı tipte reçine ve perlit agregaları kullanılarak üretilen polimer betonların, asit saldırısı sonrası basınç dayanımlarında kayıplar meydana gelse de geleneksel çimentolu betonlardaki asit maruziyeti sonrası oluşan tahribatı ve bozulmayı artırıcı ürünler (alçı taşı, kalsiyum sülfat vb.) meydana gelmemektedir (ACI Committee, 2008; Bassuoni & Nehdi, 2007). Böylece asit direnci daha yüksek polimer betonların uygulama alanlarında kullanılması için tercih sebebi olabileceği, bu çalışmadan elde edilen veriler ile rahatlıkla söylenebilir.

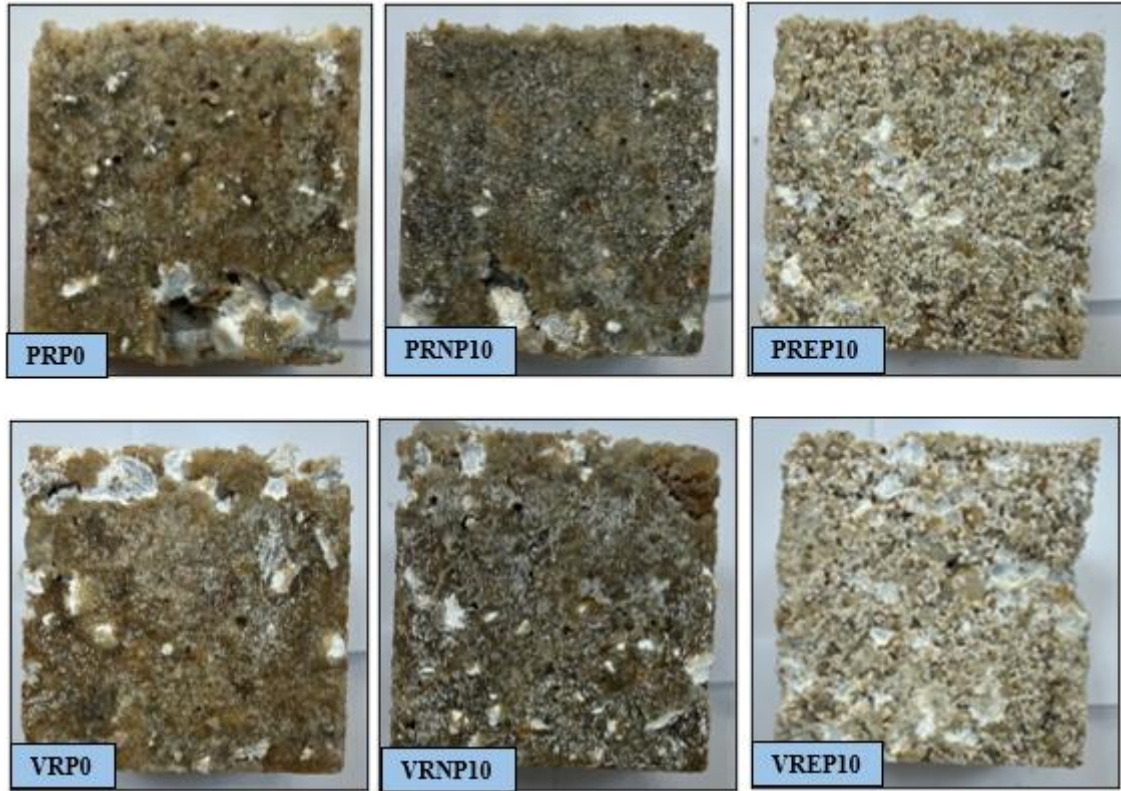


Şekil 20. Asit saldırısı sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları

4.2.3. Asit saldırısına maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirilmesi

Şekil 21’de, 90 gün boyunca asite maruz bırakılan perlit agregalı polyester ve vinilester reçineli polimer betonların görselleri verilmiştir. Polyester reçineli polimer betonlar incelendiğinde, %10 doğal perlitli polimer beton ile (PRNP10) kontrol polimer betonların (PRP0) asit saldırısını minimum hasarla atlattığı tespit edilmiştir. Bu iki polimer betonda yer yer soyulmalar ve beyaz lekeler oluşsa da diğer betonlar ile kıyaslandığında bu durum kabul edilebilir düzeyde gerçekleşmiştir. Ayrıca reçinenin agregalar üzerinde homojen bir dağılım gösterdiği de görülmektedir. Polyester reçineli polimer betonda %10 genleştirilmiş perlit agregası (PREP10) kullanıldığında ise çok ciddi görsel hasarların oluştuğu (aşınma, ufalanma, kapak atma, soyulma, beyaz lekelerde ciddi artış vb.) belirlenmiştir. Sülfürik asidin etkisiyle

mikroçatlaklar oluşarak numune yüzeyi diğerlerine kıyasla daha pürüzlü hale gelmiştir. Görsel değerlendirme sonuçları, ağırlık ve basınç dayanımı kaybı sonuçları ile paralellik göstermiştir.



Şekil 21. Asit saldırısı sonrası polyester/vinilester reçineli polimer betonların görüntüleri

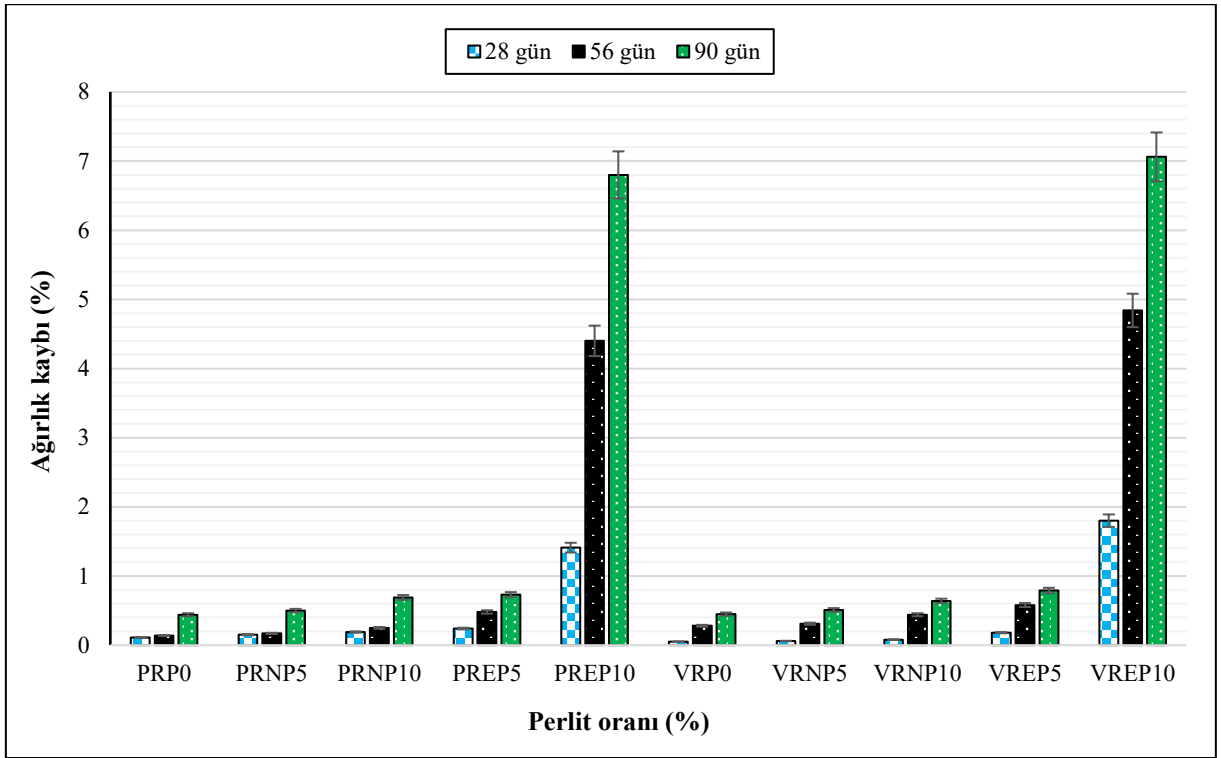
Vinilester reçineli polimer betonlar incelendiğinde ise asit saldırısına karşı VRP0 ile VRNP10 numunelerinin benzer davranış sergilediği, asit maruziyetine karşı numunelerde daha az tahribat olduğu gözlemlenmiştir. VREP10 polimer betonlarında ise hem numunenin boyutsal stabilitesi ciddi hasar almış hem de parçalanma, kırılma, ufalanma, renk değişimi gibi problemler ortaya çıkmıştır. Sülfürik asit iyonlarının kimyasal konsantrasyonunun ve reçineleri çözebilme etkisinin, numunelerin yapısal bozulmaları üzerinde önemli bir rol oynadığı değerlendirilmektedir (Mathews vd., 2021; Mathews vd., 2023). VREP10 polimer betonunun yüzeylerinde yoğun bir şekilde meydana gelen CaSO_4 oluşumunun, reçine ile sülfürik asit çözeltisinin birleşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir (Ataabadi vd., 2021). Vinilester reçineli doğal ve genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonların 90 günlük asit saldırısı sonrası görsel sonuçları ile ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları birbiriyle örtüşmüştür.

4.3. Sülfat Saldırısı

İki farklı reçine ve perlit tipleri ile üretimi gerçekleştirilen polimer betonların, 28, 56 ve 90 günlük sülfat saldırısı sonrası uğradıkları ağırlık kaybı ve basınç dayanımı kayıpları ile birlikte görsel değerlendirme sonuçları ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

4.3.1. Sülfat saldırısına maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı

Şekil 22’de çok net görülebildiği gibi polimer beton üretimlerinde reçine tipi farketmeksizin tüm günler için agrega olarak doğal perlitlerin %5 ve %10, genleştirilmiş perlitlerin ise %5 oranında kullanımı, sülfat maruziyeti sonrası ağırlık kayıplarında hem kontrol polimer betonlarına çok yakın hem de neredeyse sıfır kayıp olacak şekilde gerçekleşmiştir. Örneğin 56 günlük ağırlık kayıpları değerlendirildiğinde, polyester reçineli polimer betonlarda PRP0 için %0,4, PRNP5 için %0,17, PRNP10 için %0,25 ve PREP5 için de %0,48 kayıplar elde edilmiştir. Aynı gün dikkate alındığında ağırlık kayıpları VRP0 için %0,28, VRNP5 için %0,31, VRNP10 için %0,44 ve VREP5 için de %0,58 olarak bulunmuştur. Bu değerler, sülfat saldırısına maruz kalacak inşaat uygulamalarında, doğal perlitlerin %5 ve %10, genleştirilmiş perlitlerin ise %5 oranında agrega olarak kullanılabileceğini, ilk kez ortaya çıkarmıştır. Bu sonuçlar literatür için heyecan verici ve dikkat çekici bir nitelik taşımaktadır. Literatürde geleneksel çimentolu betonlarda bile agregaların polimer ile kaplanarak sülfat saldırısına karşı bozulmayı azaltmada çok yararlı olduğunun bildirilmesi (Tuncer vd., 2025) gözönüne alındığında, sülfat direnci yüksek polimer betonların farklı tip reçine ve perlit agregaları ile üretilebilirliğinin bu çalışma ile ortaya çıkarılışı gelecekteki araştırmalar için umut vericidir. Bununla birlikte, genleştirilmiş perlit agregalarının %5’ten %10’a yükselmesi beraberinde dramatik ağırlık kayıpları getirmiştir. Örneğin 90 gün sülfat saldırısına uğrayan polyester reçineli polimer betonlarda, kontrol polimer betonun ağırlık kaybı %0,44 olurken, bu kayıp %10 genleştirilmiş perlit kullanımında (PREP10) 15 kat artarak %6,8’e çıkmıştır. Benzer durum vinilester reçineli polimer betonlarda da gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit agregalarının %10 oranına yükselmesi sonucu gözlemlenen dramatik ağırlık kayıpları üzerinde artan gözenekliliğin etkili olduğu düşünülmektedir. %10 genleştirilmiş perlitli numuneler, Na_2SO_4 çözeltisine uzun süreli maruz bırakıldığında muhtemelen sülfat iyonları aderansı düşük agrega-reçine arayüzeyinden sızarak ağırlık kayıplarını artırmıştır. Bu durum ilerideki görsel değerlendirme sonuçlarında da (Şekil 24) gözlemlenerek teyit edilmiştir.



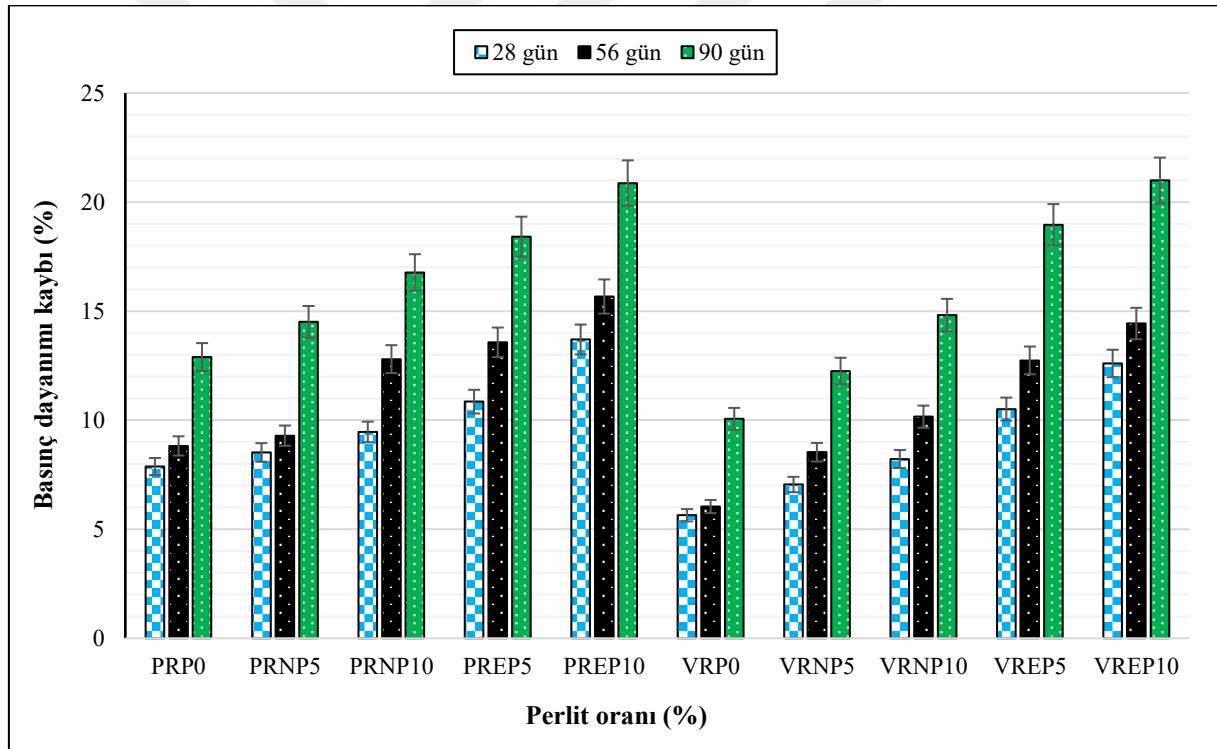
Şekil 22. Sülfat saldırısı sonrası polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları

4.3.2. Sülfat saldırısına maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı

Betonların durabilite performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olan sülfat saldırısı, karmaşık bir mekanizmanın fiziksel, kimyasal ve mekanik süreçlerinden oluşmaktadır (Ikumi vd., 2019; Kandil & Bulut, 2024; Tanyildizi, 2016). Sülfat saldırısı sonucu betonlar parçalanabilir, çatlayabilir veya genleşebilir (Elyamany vd., 2018). Sülfat saldırısı sonrası polimer betonlarda meydana gelen basınç dayanımı kayıpları, Şekil 23'te verilmiştir. Buna göre karışımlarda artan perlit kullanımıyla birlikte basınç dayanım kayıplarında da artışlar yaşanmıştır. Yalnızca doğal perlitin %5 oranında kullanımı, kontrol polimer betonlarına yakın basınç dayanımı kayıpları sergilemiştir. Örneğin 28 günlük sülfat saldırısı sonrası vinilester reçineli polimer betonlarda meydana gelen basınç dayanımı kayıpları, VRP0 için %5,64 iken VRNP5 için az bir artışla %7,05 olmuştur. Bu kayıplar polyester reçineli polimer betonlarda da birbirine yakın gerçekleşecek şekilde PRP0 için %7,87 ve PRNP5 için de %8,52 olarak elde edilmiştir. %5 oranındaki doğal perlitli polimer betonlar, diğer gruplara göre daha yoğun ve kompakt bir yapı kazanarak kontrol betonuna yakın kayıplar göstermiştir. Hem gün parametresi hem de perlit oranları arttığında, basınç dayanımı kayıpları da yükselmiştir. Sülfat saldırısına maruz kalan perlit agregalı betonlarda benzer sonuçların elde edildiği, literatürde yer alan az sayıdaki çalışmada da gözlemlenmiştir (Bulut, 2024). Sülfat çözültisinin agrega-reçine arayüzeyine saldırarak bağ mukavemetini zayıflattığı, mikroçatlak oluşumunu hızlandırıp

dayanım kayıplarını artırdığı söylenebilir (Ghassemi & Toufigh, 2020; Griffiths & Ball, 2000). En fazla basınç dayanımı kaybı, her iki reçine tipine sahip polimer betonlarda %10 genişletilmiş perlit agregasının kullanıldığı seride yaklaşık %20 olarak gerçekleşmiştir. Perlitin alümina volkanik kökenli oluşunun, sülfat saldırısına karşı daha duyarlı ve reaktif olmasına neden olduğu, gözlemlenen sonuçlar üzerinde önemli bir etken olarak değerlendirilebilir (Vargas vd., 2018).

Son olarak, geleneksel çimentolu kompozitlerde sülfat saldırısı sonucu içyapıda genişleyerek parçalanmaya neden olan etrenjit ve/veya alçıtaşı gibi oluşumlar meydana gelmektedir (Bayraktar vd., 2024; Xiao vd., 2022). Polimer betonlarda ise çimento yerine reçinelerin bağlayıcı görevini üstlenmesi nedeniyle bu tür oluşumlar meydana gelemez ve böylece özellikle vinilester reçineli polimer beton kompozitlerinin sülfata maruz kalacak inşaat uygulamalarında çok daha üstün performanslar gösterebileceği bu çalışmadan elde edilen veriler ile söylenebilir.

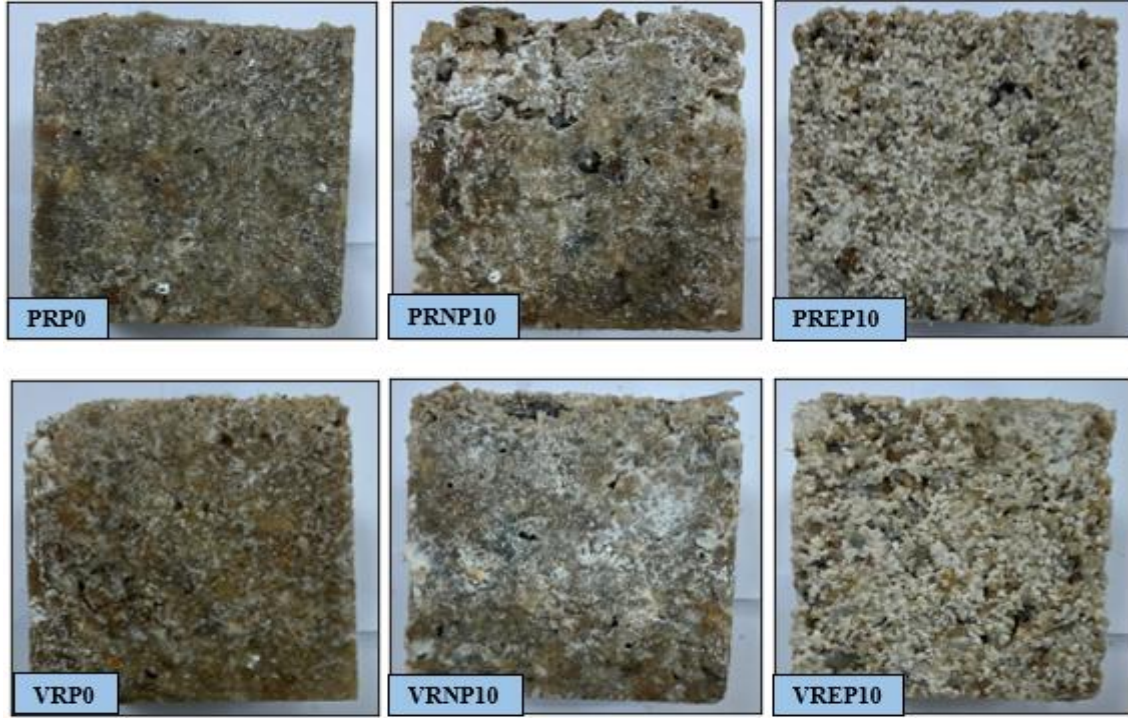


Şekil 23. Sülfat saldırısı sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları

4.3.3. Sülfat saldırısına maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirilmesi

Şekil 24, 90 günlük sülfat saldırısı sonrası farklı tipte perlit ve reçinelerin kullanılarak üretildiği polimer betonların görsellerini vermektedir. Buna göre polyester reçineli polimer betonlarda %10 oranında doğal perlit kullanımı (PRNP10), sülfat saldırısı sonrası bir miktar

hasar oluşturmış (köşelerde parçalanma, beyaz leke oluşumu), %10 oranında genişletilmiş perlit kullanımında (PREP10) ise hasar derecesi artarak agrega-reçine aderansı azalmış ve beyaz lekelenmeler artış göstermiştir. Ayrıca boşlukların sayısında ve yüzey pürüzlülüğünde artış ile dramatik renk değişimleri gerçekleşmiştir.



Şekil 24. Sülfat saldırısı sonrası polyester/vinilester reçineli polimer betonların görüntüleri

Vinilester reçineli polimer betonlarda da polyesterle benzer şekilde perlit tipi değişikçe hasarın derecesi de değişmiştir. 90 gün sülfat saldırısı sonrası VRNP10 numunesi VRP0 numunesi ile benzer davranış sergilerken, VREP10 numunesinde soyulmalar, boşluk ve beyaz leke oluşumunda artış, ufalanma gibi hasarlar meydana gelmiştir. Görsel sonuçlar ile ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları arasında uyum yakalanmıştır.

4.4. Yüksek Sıcaklık Deney Sonuçları

4.4.1. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polimer betonların ağırlık kaybı

Polimer betonların, yüksek sıcaklık ve donma-çözünme deneylerinden önce ilgili standartlara göre ölçülen basınç dayanımı sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

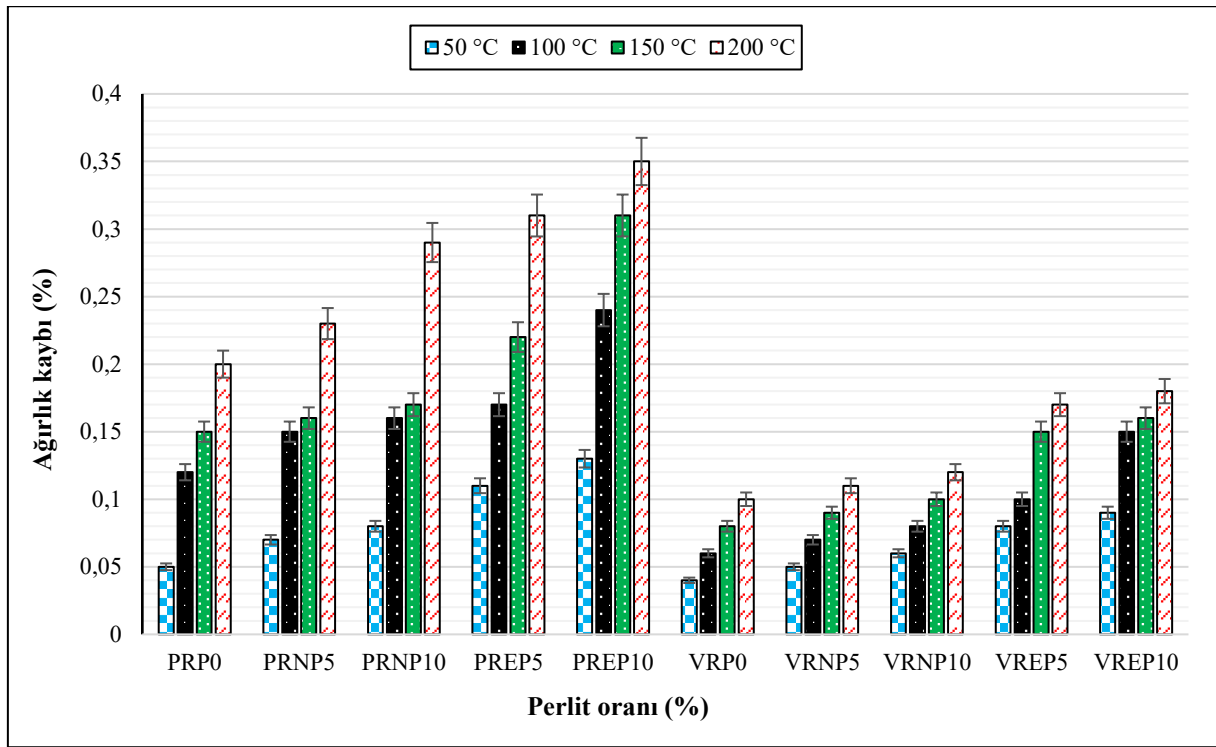
Tablo 10. Termal ve donma-çözünme döngüsü öncesi referans basınç dayanımı sonuçları

Kod	Basınç Dayanımı (MPa)	Kod	Basınç Dayanımı (MPa)
PRP0	65,72	VRP0	73,38

PRNP5	48,29	VRNP5	63,45
PRNP10	40,31	VRNP10	58,63
PREP5	33,20	VREP5	45,93
PREP10	22,69	VREP10	32,14

Tablo 10. (Devamı)

Şekil 25'te polyester/vinilester reçineli polimer betonların hem perlit oranı hem de sıcaklık derecesi arttıkça ağırlık kayıplarının da yüzdesel olarak arttığı görülmektedir. Her iki reçine tipi için de genişletilmiş perlitli polimer betonlarda en yüksek ağırlık kayıpları meydana gelmiştir. Örneğin 100°C sonunda ağırlık kayıpları, PRP0 için %0,12 iken PREP5 için %0,17 ve PREP10 için de %0,24 olarak kontrol polimer betonundan 2 kat fazla gerçekleşmiştir. Aynı sıcaklık derecesinde (100°C) vinilester reçineli polimer betonlardaki ağırlık kayıpları ise VRP0 için %0,06 iken VREP5 için %0,1 ve VREP10 için de %0,15 olarak elde edilmiştir. Bu kayıpların elde edilmesi, polimer bağlayıcılar ile agregalar arasındaki bağın zayıflayarak aderansın kaybolması ile polimer malzemelerin oksidatif termal bozulmasına yol açan termal genleşme katsayılarındaki tutarsızlıklara atfedilebilir (Salami vd., 2024; Ataabadi vd., 2021). Ayrıca termal direnci düşük kabul edilen polimerik malzemelerde yüksek sıcaklık maruziyetiyle birlikte oluşan matris bozulması ve gaz emisyonlarının da ağırlık kayıpları üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir (Niaki vd., 2018). Doğal perlit kullanılarak üretilen polimer betonlarda nispeten kontrol polimer betonlarına yakın ağırlık kayıpları oluşmuştur. Bu çalışmada ortaya çıkarılan dikkat çekici ve önemli bir sonuç, vinilester reçineye sahip polimer betonların polyestere göre neredeyse tüm sıcaklık dereceleri ve gruplar için %50 daha az ağırlık kayıpları yaşanmasıdır. Örneğin 200°C sıcaklığa maruz bırakılan polimer betonların ağırlık kayıplarına bakıldığında, PRP0, PRNP5, PRNP10, PREP5 ve PREP10 için sırasıyla %0,2, %0,23, %0,29, %0,31 ve %0,35 iken, VRP0, VRNP5, VRNP10, VREP5 ve VREP10 için bu değerler yarı yarıya azalarak %0,1, %0,11, %0,12, %0,17 ve %0,18 olarak bulunmuştur. Bu durumun meydana gelmesinde vinilester reçinenin polyestere göre daha yüksek cam geçiş sıcaklığına (Tg) sahip olmasının etkili olduğu düşünülmektedir (Ferdous vd., 2016). Çünkü cam geçiş sıcaklığında betonların sert veya camsı durumdan esnek, yumuşak bir duruma dönüştüğü bilinmektedir (Ferdous vd., 2018). Yüksek sıcaklığa maruz kalacak yapılarda özellikle %5 oranında doğal perlit agregası ile birlikte vinilester reçinenin polimer beton üretimlerinde tercih edilebilirliği, literatür için bu çalışmadan çıkan ilgi çekici bir sonuç olmuştur.

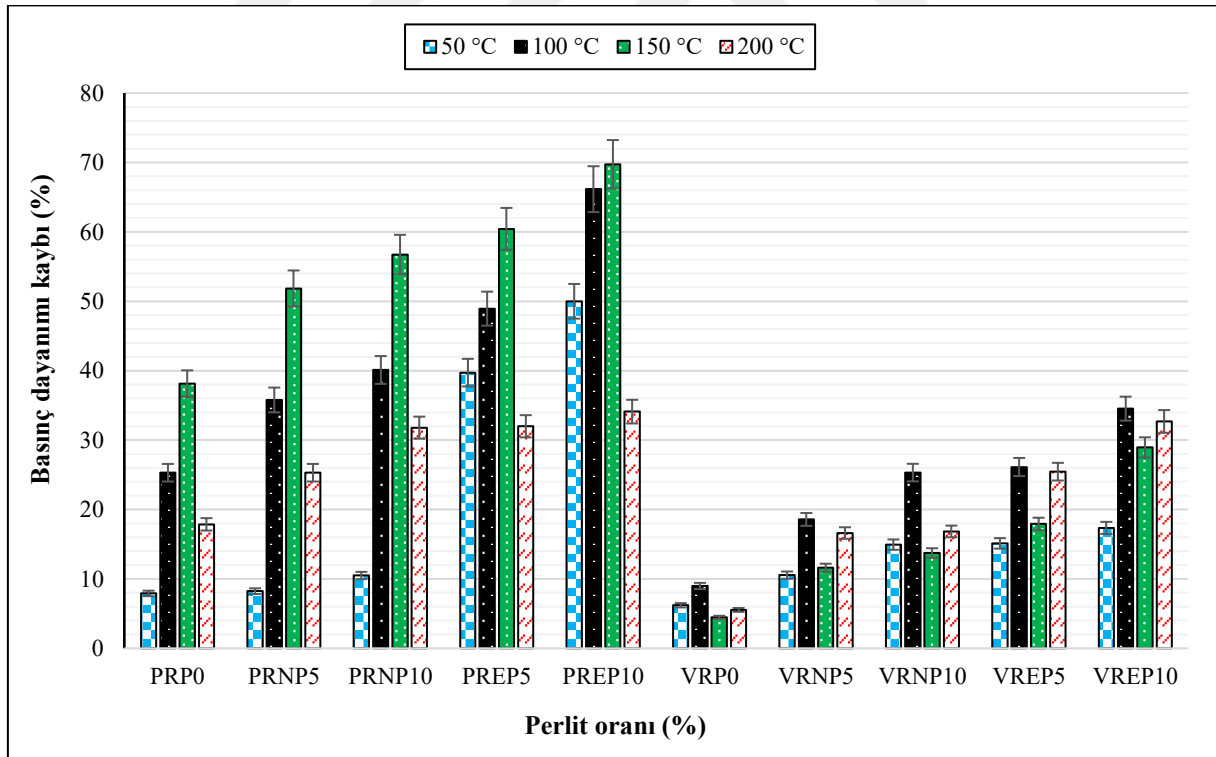


Şekil 25. Yüksek sıcaklık sonrası polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları

4.4.2. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polimer betonların basınç dayanımı kaybı

Yüksek sıcaklıklar sonrası polimer betonlarda meydana gelen basınç dayanımı kayıpları, Şekil 26’da verilmiştir. Bu deneyden elde edilen ilginç sonuçlardan birisi polyester reçineli polimer betonlarda 200°C sıcaklık durumunda doğal perlit agregalı gruplarda 100°C’den bile daha az, genleştirilmiş perlit agregalı gruplarda ise 50°C’den bile daha az basınç dayanımı kayıplarının elde edilmesidir. Bu durum, polyester reçineli polimer betonların basınç dayanımı kaybı üzerinde 150°C’nin eşik değeri olduğunu göstermektedir. Çünkü sıcaklık 150°C’ye kadar yükseldiğinde polyester reçineli tüm gruplar için basınç dayanımı kayıpları artmış, 150°C aşıldıktan sonra sıcaklık 200°C olduğunda basınç dayanımı kayıpları beklenen oranda artmamıştır. Bu derecede bir toparlanma görüldüğü söylenebilir. Bünyesel toparlanma üzerinde sıcaklığın moleküler hareketliliği artırarak polimerik reçinenin sertleştirici kimyasal malzeme ile daha çok reaksiyona girmesini sağlayıp çapraz bağ yoğunluğunu artırmasının etkili olduğu düşünülmektedir (Dębska vd., 2024). Ayrıca genleştirilmiş perlit agregasının kullanımı doğal perlitten daha fazla kayıplar yaşanmasına sebep olmuştur. Bu durum, genleştirilmiş perlit agregalarının sahip olduğu çok sayıda gözeneye ve düzensiz yüzey dokusu ile reçine-agrega arayüzeyini olumsuz etkilemesine bağlanabilir (Alexa-Stratulat vd., 2024; Tasdemir vd., 2017). Son olarak genleştirilmiş perlit agregalarının düşük basınç dayanımlarının polimer betonların yüksek sıcaklık maruziyetinden daha fazla basınç dayanımı kaybı yaşayarak çıkmasına neden

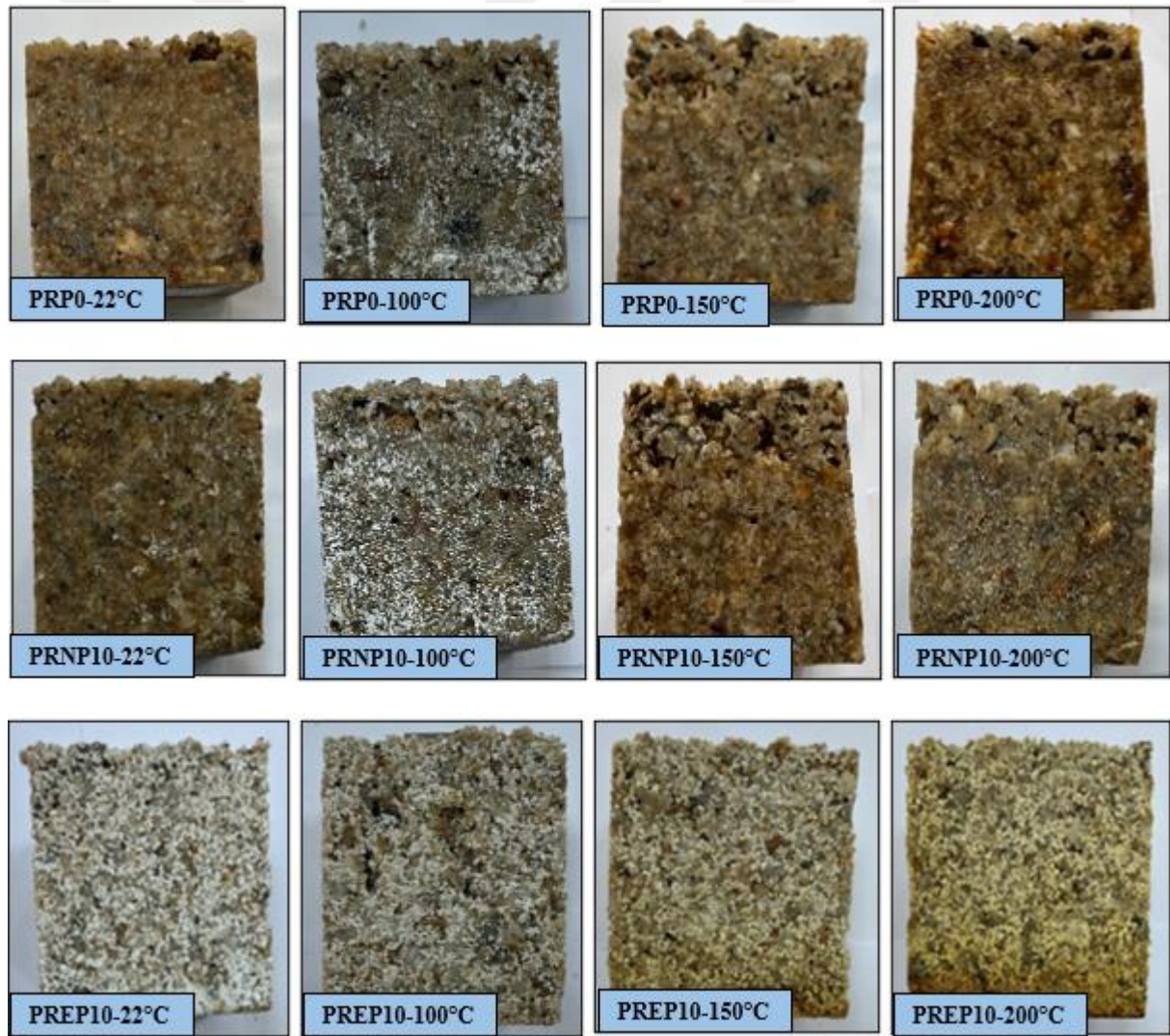
olduğu, geliştirilmiş perlitlerin artan oranlarda kullanımı ile birlikte bu malzemelerin yüksek hacimlerini bağlayabilecek yeterli reçine miktarının olmamasının da kayıpların artışında etkili olduğu değerlendirilmektedir (İbrahim vd., 2020). Bir diğer ilginç sonuç, vinilester reçineli polimer betonlarda benzer durumların 200°C yerine 150°C’de gerçekleşmesi olmuştur. 100°C eşiğine kadar basınç dayanımı kayıpları artmış, 100°C aşılp sıcaklık 150°C olduğunda daha az kayıplar gerçekleşmiştir. 200°C sıcaklığa ulaşıldığında ise yine 100°C’deki kadar olmasa da basınç dayanımı kayıpları bir miktar artış göstermiştir. Eşik sıcaklık derecelerinin ortaya çıkmasında, post-retikülasyon sonrası 150°C ve 200°C’de sürecin gerçekleşerek hem reçinelerin çapraz bağlanma yoğunluğunu artırdığı hem de zincir hareketliliğinde azalma ve basınç dayanımlarında nispeten daha az kayıpların meydana gelmesine sebep olduğu düşünülmektedir (Oussama vd., 2012). Ayrıca eşik sıcaklık derecelerinin termoset kökenli iki tip reçine için termal direnç noktasında önemli bir rol oynadığı (Aghdam vd., 2023; Ataabadi vd., 2021), bu çalışmadan elde edilen bulgularla doğrulanmıştır. Tıpkı ağırlık kayıplarında olduğu gibi, reçine açısından vinilesterin poliestere göre daha üstün performansa sahip olduğu, agrega kullanımı açısından ise %5 doğal perlit oranının kontrol polimer betonlarına daha yakın performans sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 26. Yüksek sıcaklık sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları

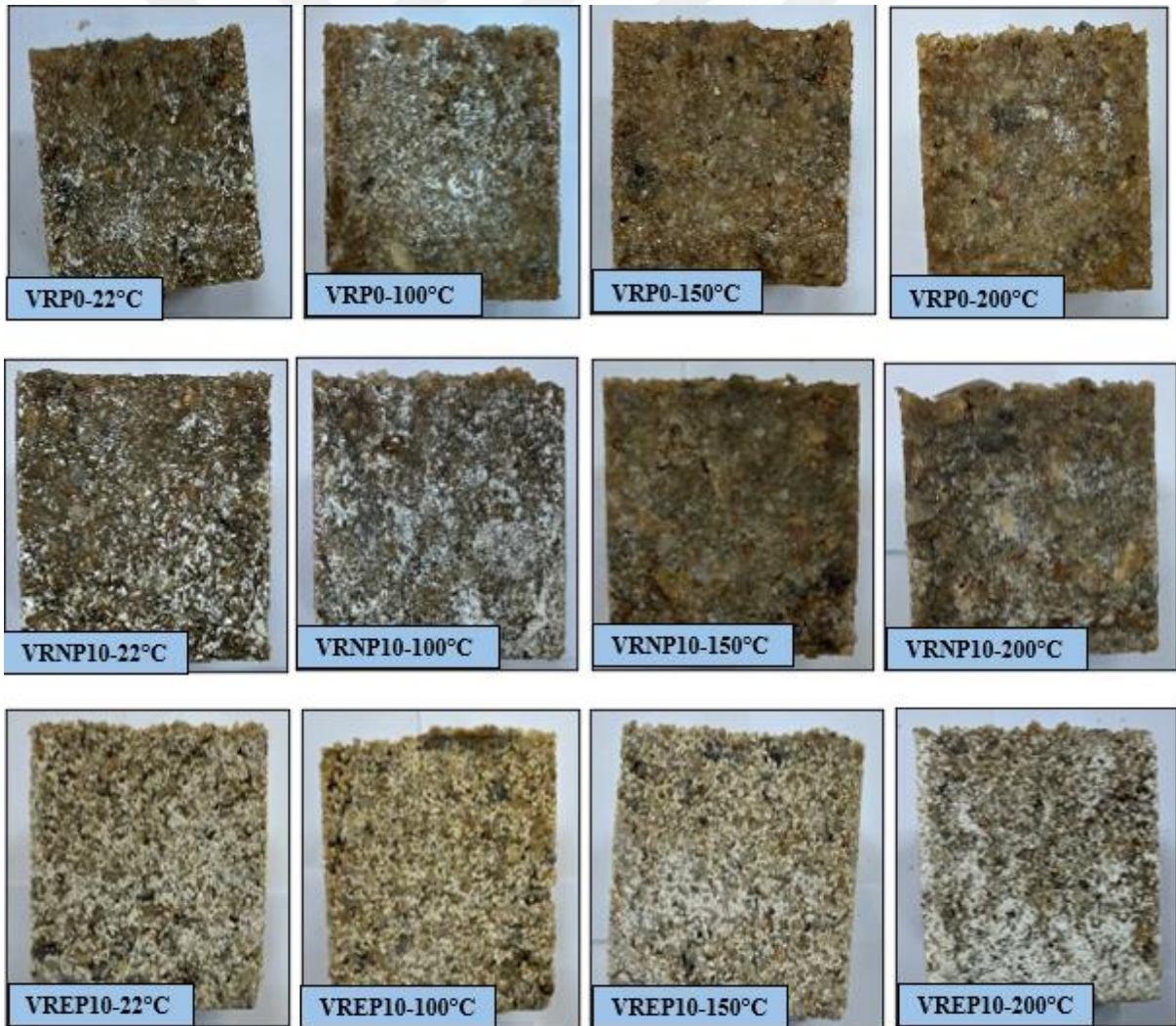
4.4.3. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polimer betonların görsel değerlendirilmesi

Şekil 27’de polyester reçineli %10 oranında doğal ve genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonların oda sıcaklığı (22°C), 100°C, 150°C ve 200°C sıcaklık maruziyetinden sonraki görüntüleri verilmiştir. Numuneler, 150°C’ye kadar beyaz lekelenme, artan çatlak oluşumu, agrega-reçine bağının zayıflaması, kapak atma gibi hasarlara uğramıştır. Özellikle %10 genleştirilmiş perlit agregalı polyester reçineli polimer betonlarda 150°C ile birlikte yanık durumu da meydana gelmiştir. Polimer betonlarda yüksek sıcaklık maruziyeti sonucu gerçekleşen çatlakların oluşumu ve yayılması, literatürdeki az sayıda yer alan çalışma ile benzerdir (Ataabadi vd., 2021). Sıcaklık 200°C’ye yükseldiğinde ise hasarlar 100°C ve 150°C’deki kadar gerçekleşmemiştir. Bu durum, görsel değerlendirme sonuçlarının basınç dayanımı kayıpları ile benzer şekilde elde edildiğinin bir kanıtıdır.



Şekil 27. Yüksek sıcaklık sonrası polyester reçineli polimer betonların görüntüleri

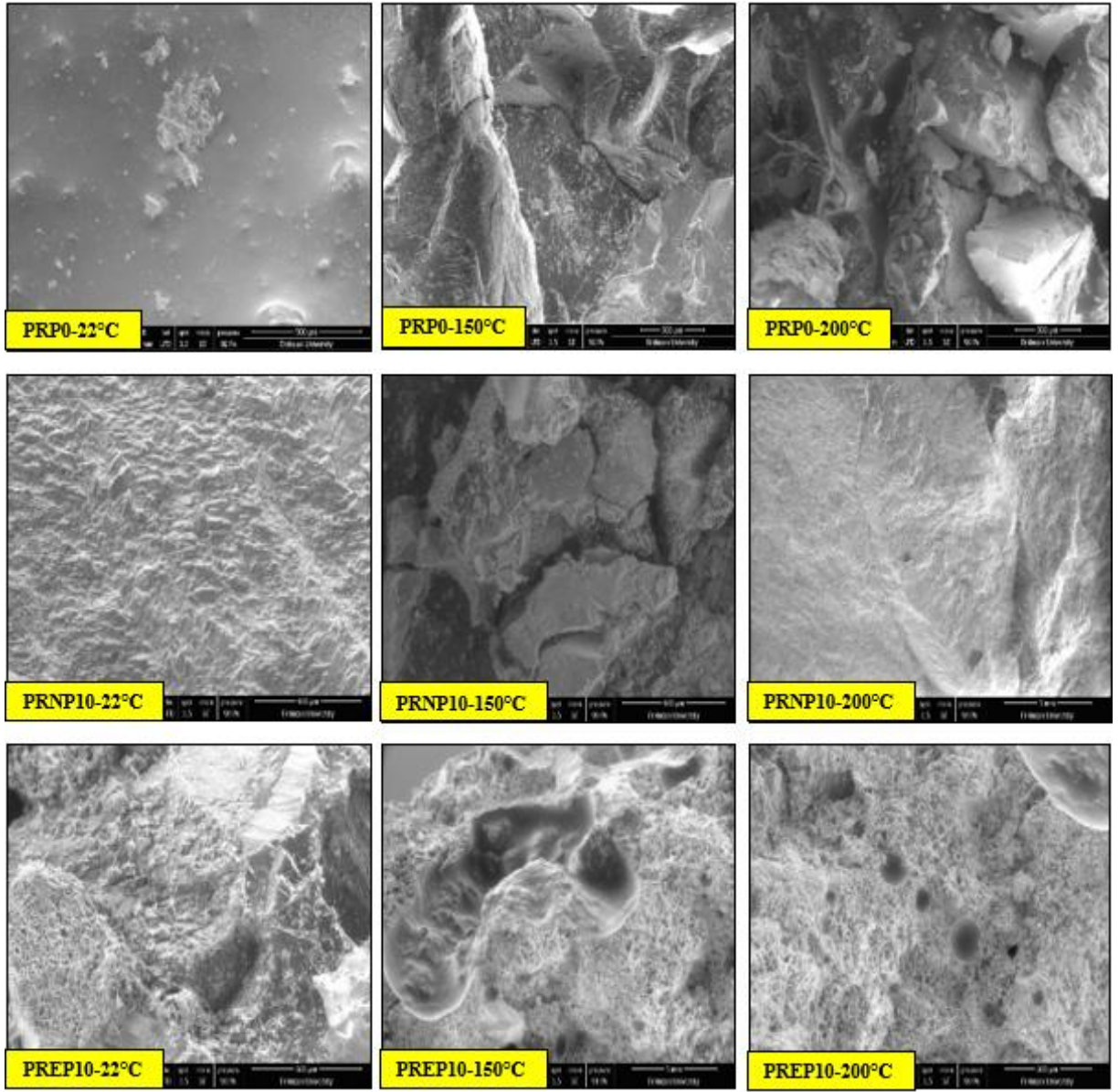
Vinilester reçineli %10 doğal ve genişletilmiş perlit agregalı polimer betonların yüksek sıcaklık deneyi sonrası görselleri ise Şekil 28’de verilmiştir. Buna göre numunelerde sıcaklık artışıyla birlikte aşınma, soyulma, boyut stabilitesinin bozulması, renk değişimi, yanık oluşumu gibi hasarlar meydana gelmiştir. Bu durum, 150°C’de numunelerde bir toparlanma şeklinde gözlemlenerek nispeten daha az hasarların olduğu görsel ortaya çıkmıştır. Sıcaklık 200°C’ye yükseldiğinde ise tahribatların devam ettiği, Şekil 30’da görülebilmektedir. Yüksek sıcaklık maruziyetinden olumsuz anlamda en çok etkilenen polimer betonlar, genişletilmiş perlit agregasının kullanıldığı betonlar olmuştur. Bu durum, hacimsel olarak artan oranlarda kullanılan ve yüksek gözenekliliğe sahip genişletilmiş perlit agregalarının varlığında, reçine matrislerinin yüksek sıcaklıklarla birlikte kimyasal olarak bozulması ve çatlamasından kaynaklanmış olabilir (Elalaoui vd., 2018). Görsel değerlendirme sonuçları ile basınç dayanımı kayıplarından elde edilen verilerin birbirleriyle örtüşmesi, literatür açısından dikkat çekici ve heyecan verici bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 28. Yüksek sıcaklık sonrası vinilester reçineli polimer betonların görüntüleri

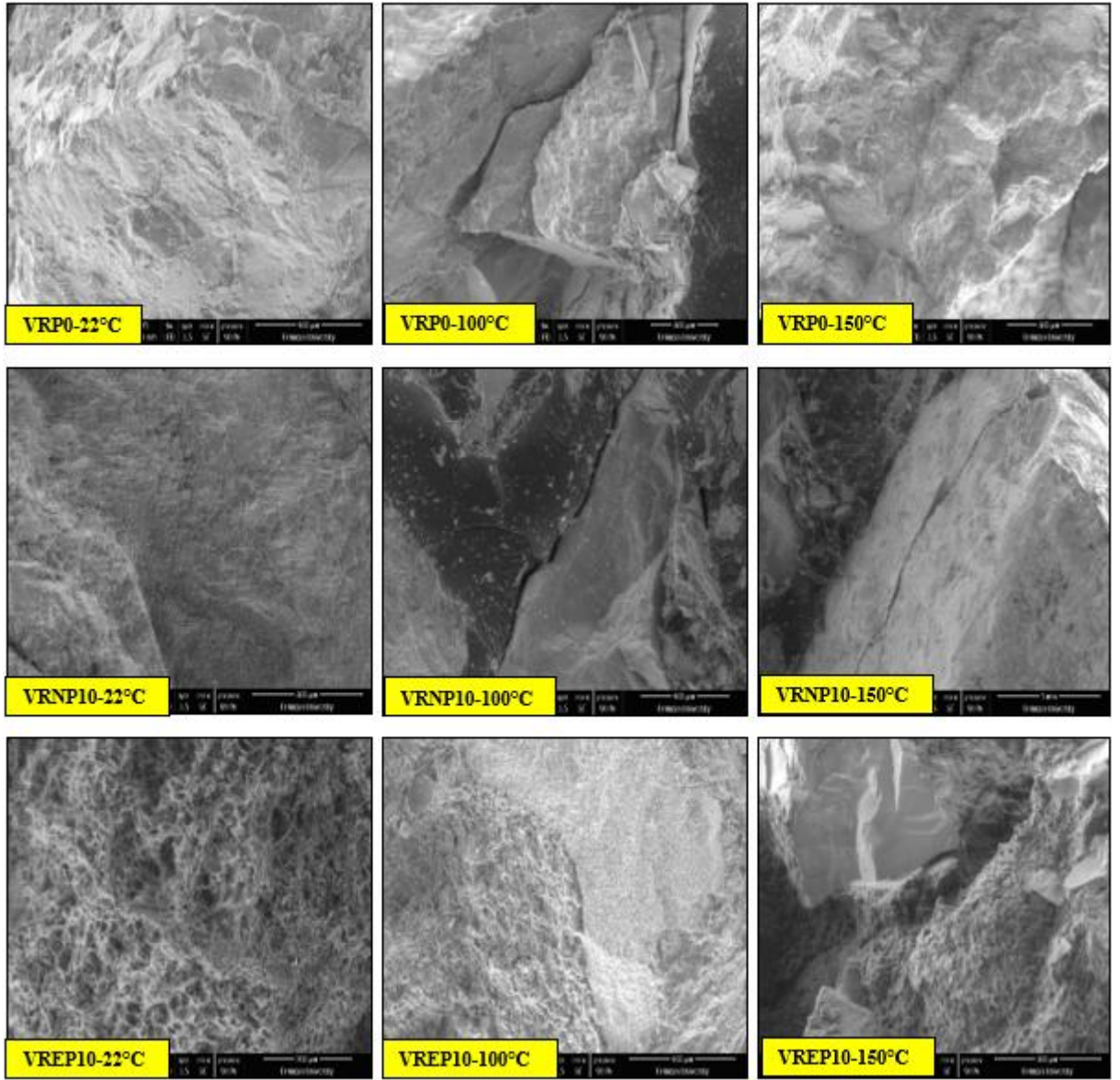
4.4.4. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan polimer betonların SEM analiz sonuçları

Polyester reçineli polimer betonların yüksek sıcaklık deneyinden sonra içyapılarında meydana gelen değişiklikler, SEM analizi (büyütme oranı/ölçek 100-250 arasındadır) ile araştırılarak Şekil 29’da sunulmuştur. Kontrol polimer betonu (PRP0), %10 doğal perlit agregalı polimer beton (PRNP10) ve %10 genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonlar (PREP10), oda sıcaklığı (22°C), 150°C ve 200°C sıcaklıklara tabi tutularak hasar mekanizmaları incelenmiştir. Oda sıcaklığında (22°C), polyester reçineli polimer betonların tümünde reçinenin kütle içerisinde homojen olup agregaları örttüğü görülebilmektedir (Agavrioloaie vd., 2012). Yüksek sıcaklık deneyi sonrası elde edilen ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları ile görsel değerlendirme sonuçlarını teyit edecek şekilde SEM analizi sonuçları değerlendirildiğinde, PRP0, PRNP10 ve PREP10 kodlu polyester reçineli polimer betonlarda, 150°C en fazla çatlak, ayrışma, erime ve yapısal bozulma gibi tahribatların meydana geldiği sıcaklık derecesi olmuştur. 200°C’de ise polimer betonlarda nispeten toparlanma net bir şekilde Şekil 29’da görülebilmektedir. Hasar boyutu bakımından yüksek sıcaklıklardan olumsuz anlamda en çok etkilenen polyester reçineli polimer betonlar, %10 genleştirilmiş perlit agregası kullanılan PREP10 kodlu polimer betonlar olmuştur. SEM incelemeleri, gözlemlenen hasarların yüksek sıcaklık etkisiyle polyester reçine bağlayıcının termo-oksidatif ayrışmaya uğraması ve polimer matris-agrega ara yüzeyindeki bağın zayıflaması sonucu meydana geldiğini ortaya koymuştur (Niaki et al., 2018; Jacobsen vd., 1997). Buna ek olarak, polimer beton içerisinde yüksek oranda perlit agregası kullanılması, reçine ile agregası arasında aderansı düşük bir geçiş bölgesi oluşturarak yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı düşürmüş olabilir (Ahmad vd., 2023). Özellikle genleştirilmiş perlit agregalarının var olan içi hava dolu fazla sayıdaki gözeneklerinin yüksek sıcaklık etkisiyle genişleşip basınç oluşturarak mikroçatlaklara neden olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 29. Yüksek sıcaklık sonrası polyester reçineli polimer betonlara ait SEM görüntüleri

Şekil 30’da, vinilester reçineli polimer betonların SEM analizi (büyütme oranı/ölçek 100-250 arasındadır) ile birlikte yüksek sıcaklıklar sonrası içyapılarında gerçekleşen değişimler ele alınmıştır. Kontrol polimer betonu (VRP0), %10 doğal perlit agregalı polimer beton (VRNP10) ve %10 genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonlar (VREP10), farklı sıcaklık derecelerine (oda sıcaklığı (22°C), 100°C ve 150°C) maruz bırakılarak değişimler incelenmiştir. Oda sıcaklığında (22°C), polimer beton gruplarının tümünde pürüzsüz bir yüzeye sahip olan sürekli bir polimer matrisi ile farklı tipteki agregaların homojen bir yapıya büründüğü görülmektedir. Bu durum, az sayıda bulunan önceki çalışmalar ile tutarlıdır (Alahmad vd., 2025).



Şekil 30. Yüksek sıcaklık sonrası vinilester reçineli polimer betonlara ait SEM görüntüleri

Vinilester reçineli polimer betonlarda da tıpkı polyester reçinelilerde gerçekleştiği gibi yüksek sıcaklık deneyi sonuçlarına paralel bir şekilde içyapı hasarları meydana gelmiştir. En şiddetli tahribatlar, 100°C’de yaşanmış, 150°C’de ise vinilester reçineli polimer betonlarda bir miktar toparlanma gerçekleşmiştir. 100°C’de reçine-agrega arayüzünde bile çatlaklar oluşurken 150°C’de bu durum aynı boyut ve şiddette gerçekleşmemiştir. Gözlemlenen belirgin hasarların; reçinenin kimyasal yapısının bozulması, agreg-a-matris ara yüzeyindeki aderans dayanımının düşmesi ve kompozit bileşenlerinin birbirinden farklı termal genişleme karakteristikleri nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir (Ataabadi vd., 2021; Elalaoui vd., 2018; Rashid vd., 2019). Ayrıca, matrisin yüksek sıcaklık etkisiyle polimer zincirlerinin parçalanmasına bağlı olarak termal bozunma yaşadığı ortaya konmuştur (Aghdam et al., 2023). Son olarak, doğal

perlite kıyasla geliştirilmiş perlit agregalarının yoğun gözenekli yapısının reçineyi emerek aderansı zayıflatabileceği, böylece reçinenin yüzeyde sürekli bir film oluşturmak yerine gözeneklere çekilip arayüzeyi heterojen hale getirebileceği değerlendirilmektedir.

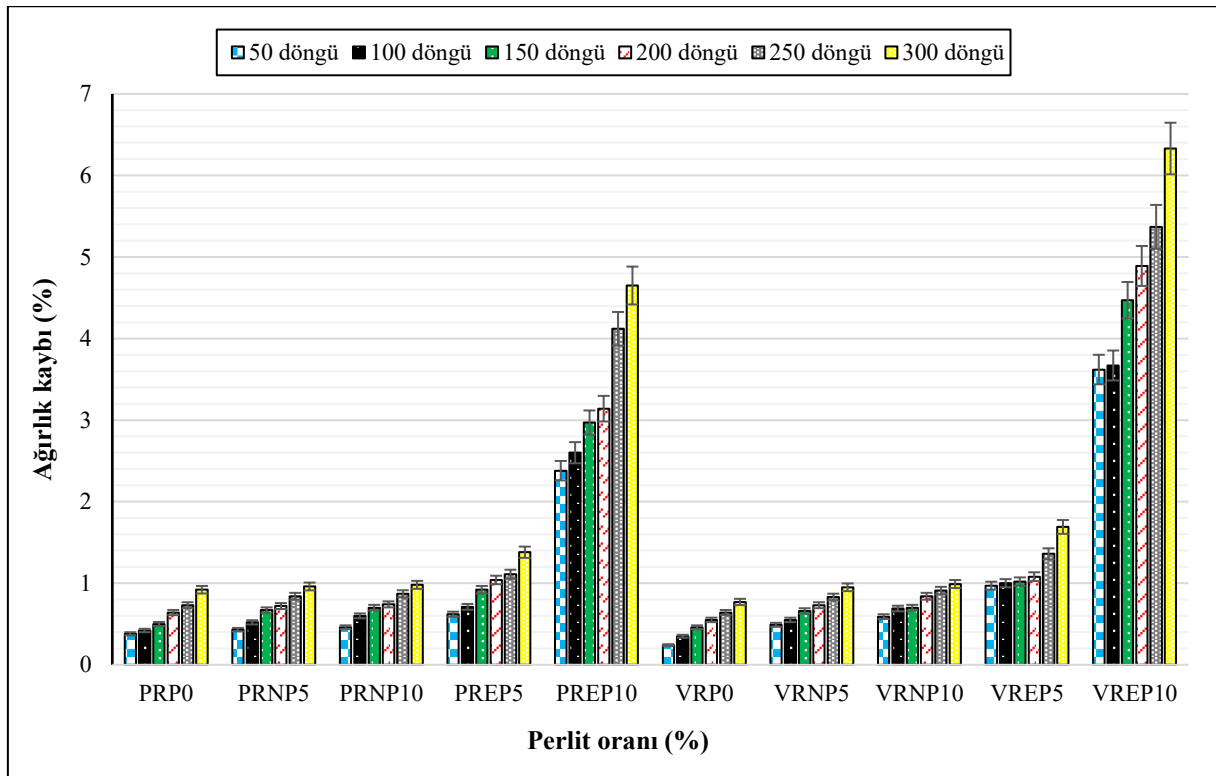
Yüksek sıcaklık deneyi sonrası SEM analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, perlit agregalarının vinilester reçine ile poliestere göre daha iyi uyum sergilediği, ayrıca doğal perlitlerin geliştirilmiş perlitlere göre reçineler ile bağının daha güçlü olduğu belirlenmiştir. Son olarak poliestere reçineli polimer betonlarda 150°C, vinilester reçineli polimer betonlarda ise 100°C en çok içyapı tahribatının gerçekleştiği kritik bozulma sıcaklık dereceleri olmuştur.

4.5. Donma-çözünme Deney Sonuçları

4.5.1. Donma-çözünme döngüleri sonrası polimer betonların ağırlık kaybı

Polyester ve vinilester reçineli doğal ve geliştirilmiş perlit agregalarının farklı oranlarda kullanıldığı polimer betonların, donma-çözünme deneyi sonucu uğradıkları ağırlık kayıpları (yüzdesel), Şekil 31’de verilmiştir. Polyester reçineli polimer betonlarda doğal perlitin %5 ve %10 oranlarında agrega olarak kullanımı, kontrol polimer betonları ile neredeyse benzer donma-çözünme ağırlık kayıpları meydana getirmiştir. Örneğin 150 döngü sonunda PRP0, PRNP5 ve PRNP10 kodlu polimer betonlarda ortaya çıkan ağırlık kayıpları sırasıyla %0,5, %0,67 ve %0,7 olmuştur. Diğer döngülerde de benzer davranış gözlemlenmiştir. Bu sonuç, donma-çözünmeye maruz kalacak inşaat uygulamalarında polimer betonların dolgu malzemesinde agrega olarak doğal perlitlerin %5 ve %10 oranlarında rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Doğal perlit agregalı polimer betonların sergilediği olumlu performans, sıcaklık değişimleri boyunca kararlı ve yoğun bir matris meydana getirecek olan reçine ve ince parçacık içeriğinden kaynaklanmış olabilir (Seco vd., 2020). %5 geliştirilmiş perlitli polyester reçineli polimer betonlarda ağırlık kayıpları kontrol ve doğal perlitlilere göre az da olsa artmış, asıl dramatik ağırlık kayıpları %10 geliştirilmiş perlit agregalı polimer betonlarda gerçekleşmiştir. Öyleki 300 döngü sonunda PRP0 numunesinin ağırlık kaybı %0,92 iken bu kayıp PREP10’da 5 kat artarak %4,65 olarak elde edilmiştir. Aynı reçine (polyester) fakat iki farklı tipte (doğal ve geliştirilmiş perlit) agregalarından kaynaklanan farklı davranışlara sebep olan faktörlerin; doğal perlitin daha az gözenekli, daha sıkı ve matris ile daha iyi aderans sağlayan bir agrega gibi davranarak genel gözenekliliği ve su girişini azalttığı, geliştirilmiş perlitlerin ise yüksek iç gözeneklilik (Türkmen vd., 2006), düşük tane dayanımı ve yüksek su emme özellikleri nedeniyle donma-çözünme döngüleri boyunca iç basınç, mikro çatlak ve segregasyon yaratmış olabileceği değerlendirilmektedir. Vinilester reçineli polimer

betonlarda da polyester re inelilere benzer şekilde %5 ve %10 doğal perlit kullanımı sonucunda kontrol polimer betonları ile paralel ağırlık kayıpları gerçekleşmiştir. Genle tirilmi  perlitin %5 oranında kullanımı ağırlık kayıplarını artırmış, %10 oranında genle tirilmi  perlit agrega olarak kullanıldığında ise vinilester reçineli polimer betonlarda tüm gruplar arasında en yüksek ağırlık kayıplarına ulaşılmıştır. 300 döngü sonunda VRP0 ile VREP10 arasında yaklaşık 82 kat fazla ağırlık kaybı ya anmı tır (bu değerler sırasıyla %0,77 ve %6,33'tür). Bu kayıpların, agrega şekli, boyutu, dağılımı, reçine içeriği ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Ateş & Barnes, 2012; Gao vd., 2019). Böylece yüksek dirence sahip polimer matrislerde süreksizlikler meydana gelmiş olabilir (Shigang vd., 2013). Zhang ve Singh (Zhang & Singh, 2004), bu s reksizlerin artı ının kullanılan agregaların reçineye zayıf yapı masından kaynaklandığını bildirmiştir. Doğal perlit agregaları, hem polyester hem de vinilester reçineli polimer betonlarda donma-çözünme maruziyeti sonrası benzer davranış ortaya çıkartırken, genle tirilmi  perlitler vinilester reçineli polimer betonlarda polyestere kıyasla daha çok ağırlık kayıpları yaşanmasına neden olmuştur. Vinilester reçine ile genle tirilmi  perlit agregaları kullanıldığında, malzemenin gözenekli yapısı ve düşük dayanımı, suyun donma-çözünme döngülerinde kritik iç gerilmeler ve çatlak oluşumuna yol açmaktadır. Bu nedenle donma-çözünme performansının d  t    söylenebilir. Donma-  z nme döngüleri arttıkça polimer beton gruplarının tamamında ağırlık kayıpları artmıştır. Döngü sayısının artı ının, polimer betonların içyapısında daha fazla ve daha büyük boşluk ve çatlak oluşturup ağırlık kayıpları üzerinde olumsuz durum yaratmasının önemli bir faktör olduğu düşünülmektedir (Bulut & Kandil, 2025). Son olarak her ne kadar donma-çözünme deneyi sonrası polimer betonların tümünde ağırlık kayıpları meydana gelse de bu kayıpların 300 döngü sonrası %0,77 ila %6,33 oranları arasında çok düşük seviyelerde gerçekleştiği dikkat çekicidir. Bu durumun hem polimer betonların geleneksel betonlara göre üstün donma-çözünme direncine sahip olu undan hem de özellikle doğal perlit agregalarının reçineler ile sergilediği yüksek uyumdan kaynaklandığı söylenebilir.

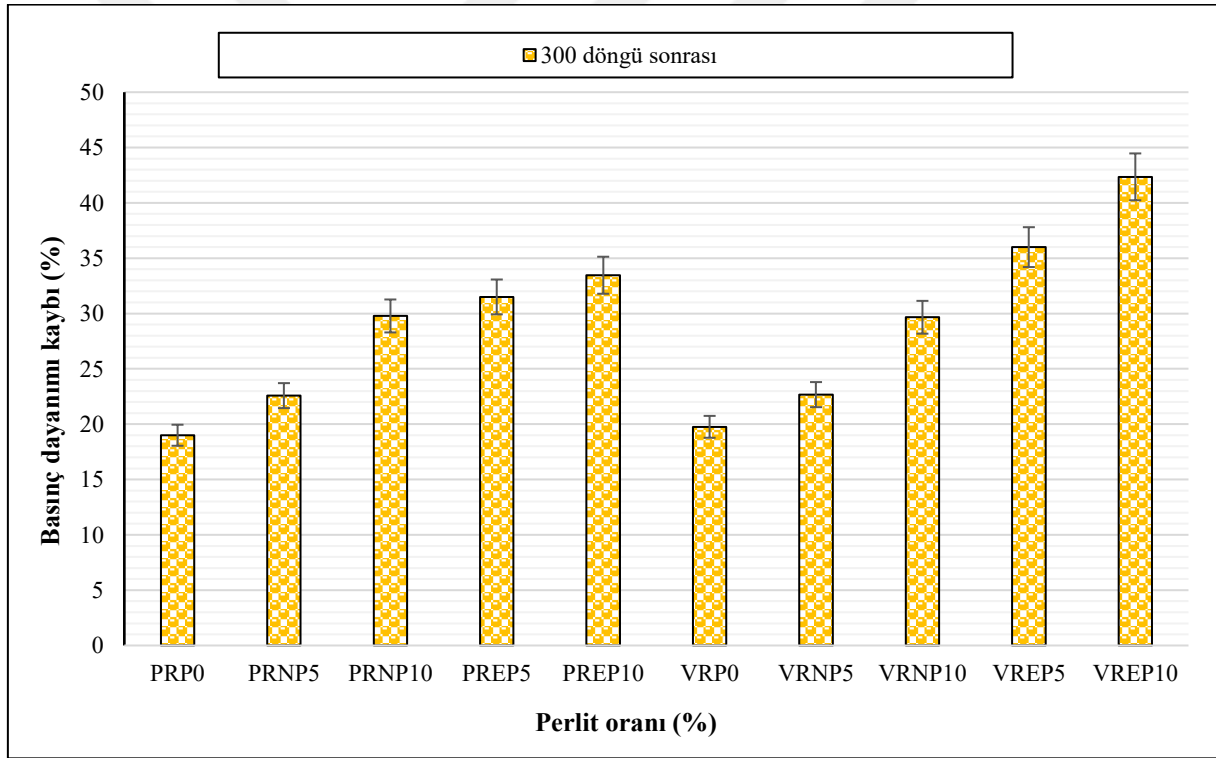


Şekil 31. Donma-çözünme sonrası polimer betonların ağırlık kaybı sonuçları

4.5.2. Donma-çözünme döngüleri sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı

300 döngü donma-çözünme sonrası polimer beton gruplarında meydana gelen basınç dayanımı kayıpları, Şekil 32’de verilmiştir. Buna göre ağırlık kayıplarına benzer şekilde özellikle %5 oranında doğal perlit agregalı polyester reçineli polimer betonlar, kontrol polimer betonlarına çok yakın basınç dayanımı kaybı yaşamıştır. Bu kayıplar PRP0 için %19 iken PRNP5’te %22,58 olarak gerçekleşmiştir. Polyester reçinesi ile genişletilmiş perlit agregalarının birlikte kullanımı beraberinde ağırlık kayıplarını artırarak PREP10 numunesinde %33,46’ya çıkarmıştır. Vinilester reçineli polimer betonlar, tıpkı polyester reçineliler gibi davranış sergilemiş, doğal perlitli polimer betonlar kontrol polimer betonlarına yakın (özellikle %5 oranında doğal perlit kullanımında) basınç dayanımı kayıpları yaşamış ve genişletilmiş perlit kullanımı ile birlikte VREP10 numunesinde bu kayıplar %42,35’e ulaşmıştır. Bu sonuçlar, farklı dolgu malzemelerinin kürlenmiş polimer betonların dayanım özellikleri üzerinde son derece etkili olduğunu belirten Fink (Fink, 2005) ile tutarlı elde edilmiştir. Ayrıca donma-çözünme döngüleri sonrası basınç dayanımı kayıplarının, betonun karakteristik özelliklerinden birisi olan heterojen yapısıyla da ilişkili olabileceği varsayılmaktadır (Tuncer vd., 2025). Genleştirilmiş perlitlerin gözenekli ve nispeten daha zayıf yapıları ile birlikte normal agregalardan çok daha düşük basınç dayanımına sahip oluşları,

donma-çözünme döngüleri sonrası farklı reçinelere sahip polimer betonların basınç dayanımı kayıplarını artırmış olabilir (Polat vd., 2010; Karakoç & Demirboğa, 2010). Donma-çözünme döngülerinin artışı, betonda kümülatif hasarlar meydana getirerek dayanım kayıplarına neden olduğu değerlendirilmektedir (Karagöl vd., 2018). Bu durum, literatürdeki polimer betonların donma-çözünme döngü sayısı arttıkça dayanım kayıplarının sürekli arttığı bulgusuyla uyumludur (Hong vd., 2016). Ağırlık kayıplarında elde edilen doğal perlit-polyester/vinilester reçine uyumu ile vinilester-genleştirilmiş perlit uyumsuzluğu, basınç dayanımı kayıpları sonuçlarında da tespit edilmiştir. Doğal perlitlerin, daha yoğun ve daha düşük gözenekli yapısı sayesinde reçine ile iyi bir arayüz oluşturduğu, bu da uyumu artırdığı düşünülmektedir. Genleştirilmiş perlitlerin ise aşırı gözenekliliği, su tutma eğilimi ve mekanik zayıflığı nedeniyle vinilester reçine ile uyumsuzluk gösterip donma-çözünme dayanımını düşürdüğü ifade edilebilir.

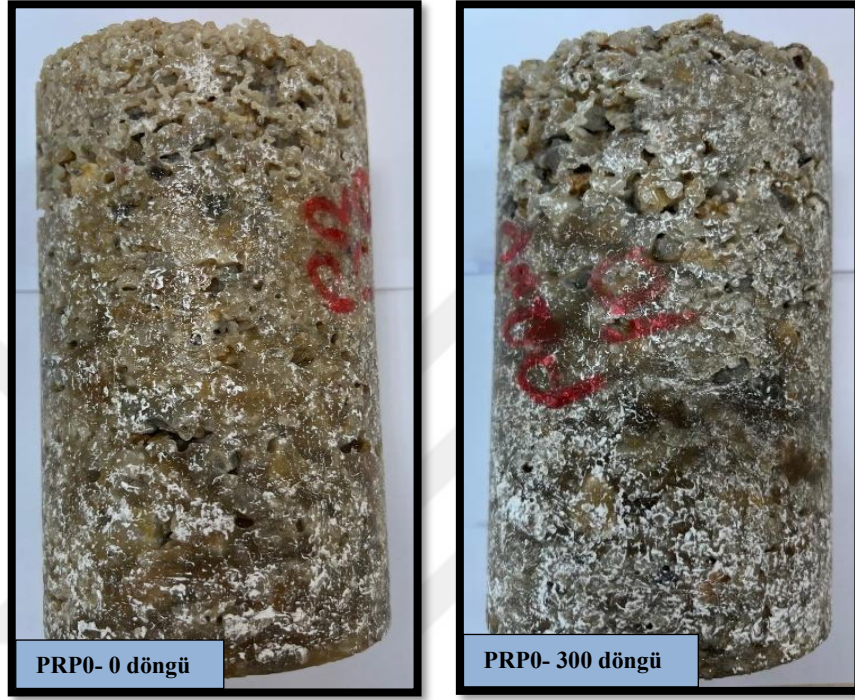


Şekil 32. Donma-çözünme sonrası polimer betonların basınç dayanımı kaybı sonuçları

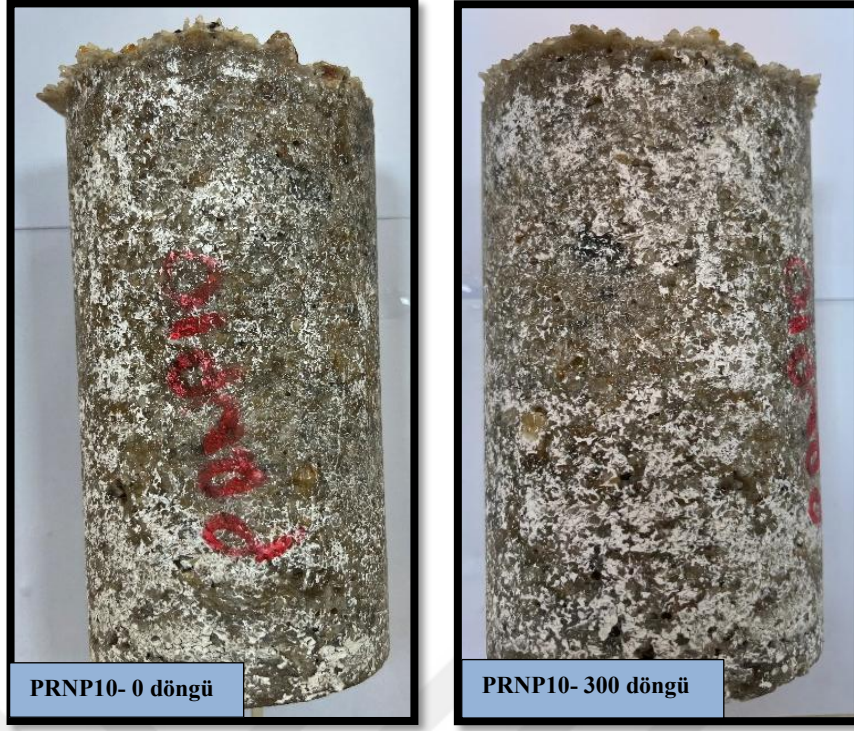
4.5.3. Donma-çözünme döngüleri sonrası polimer betonların görsel değerlendirilmesi

Şekil 33-35’de, donma-çözünme deneyi öncesi (0 döngü) ve 300 döngü sonrası polyester reçineli polimer betonlara ait görseller verilmiştir. Buna göre, PRP0 ve PRNP10 kodlu numunelerde tıpkı ağırlık ve basınç dayanımı kayıplarını teyit eder nitelikte donma-çözünme deneyi öncesi ve sonrasında dikkate değer bir görsel değişim gerçekleşmemiştir. Bu

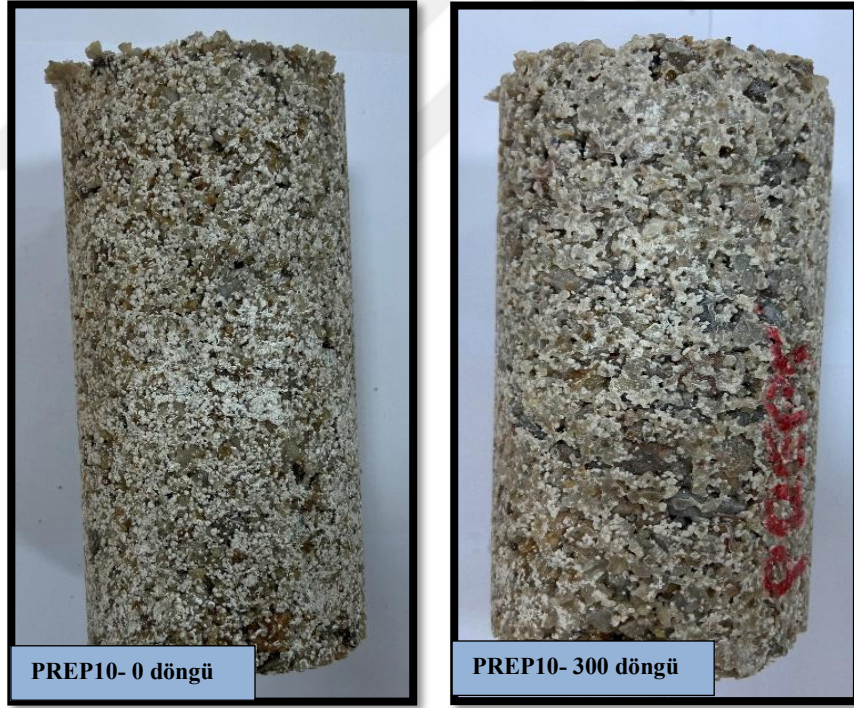
görsel değerlendirme sonucu da %10 doğal perlit agregası kullanımının polyester reçineli polimer betonların donma-çözünme direnci üzerinde olumlu bir katkı sunduğunu göstermektedir. %10 genleştirilmiş perlit agregası (PREP10) kullanımında ise çatlak sayısı, lekelenme, soyulma artışıyla birlikte agrega-reçine aderansındaki zayıflama net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu durum, donma-çözünme deneyi sonrası gerçekleştirilen ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları sonuçlarını doğrulamıştır.



Şekil 33. Donma-çözünme sonrası PRP0 kodlu numuneye ait görüntüler



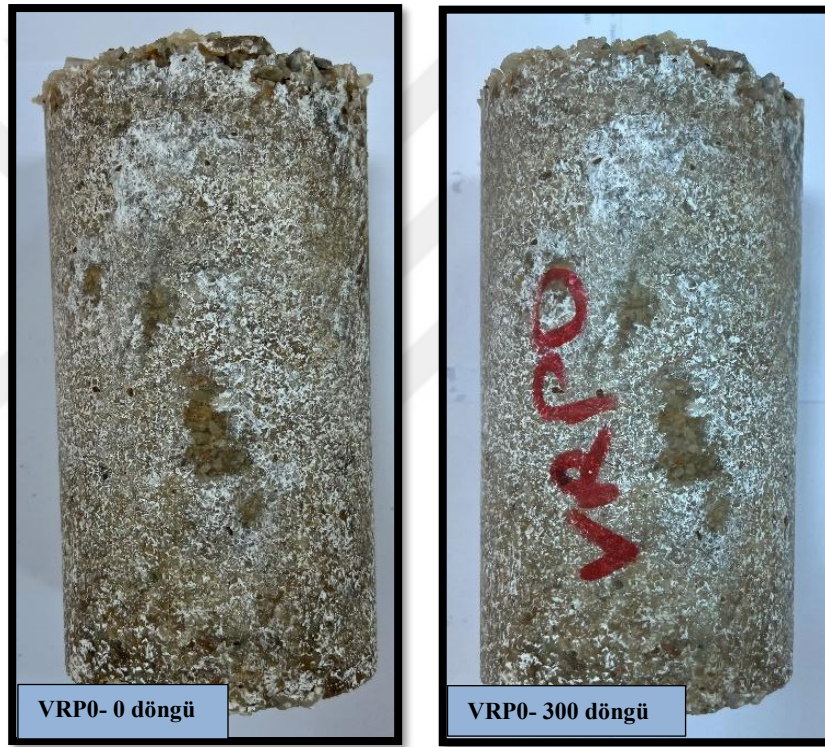
Şekil 34. Donma-çözünme sonrası PRNP10 kodlu numunelere ait görüntüler



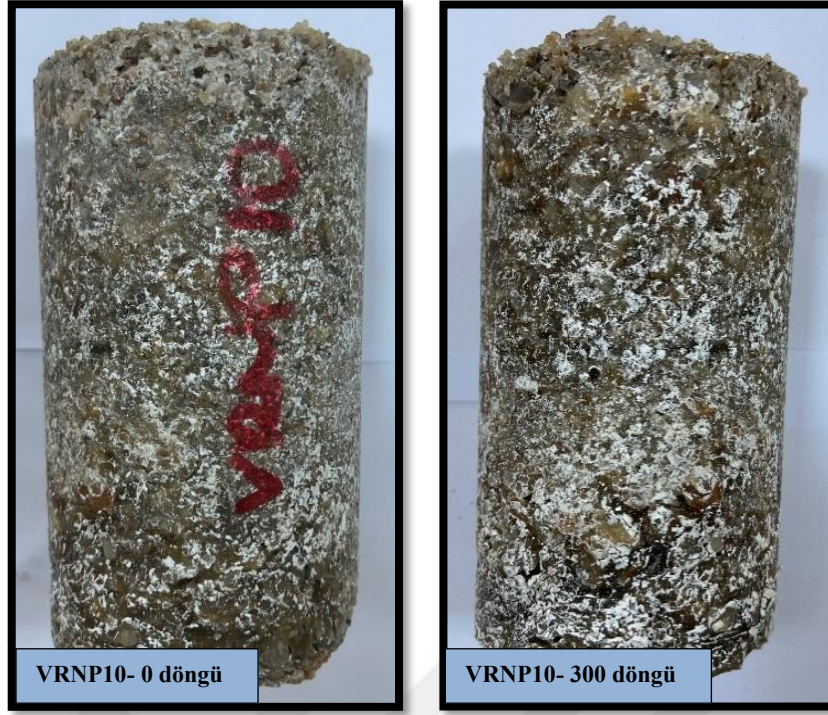
Şekil 35. Donma-çözünme sonrası PREP10 kodlu numunelere ait görüntüler

Vinilester reçineli polimer betonların hem donma-çözünme deneyi öncesi (0 döngü) hem de 300 döngü sonrası görselleri, Şekil 36-38’de verilmiştir. Kontrol polimer betonunda (VRP0) donma-çözünme deneyi boyunca herhangi bir görsel değişim meydana gelmemiştir. Benzer şekilde %10 doğal perlit agregalı vinilester reçineli polimer betonda da (VRNP10) az da olsa

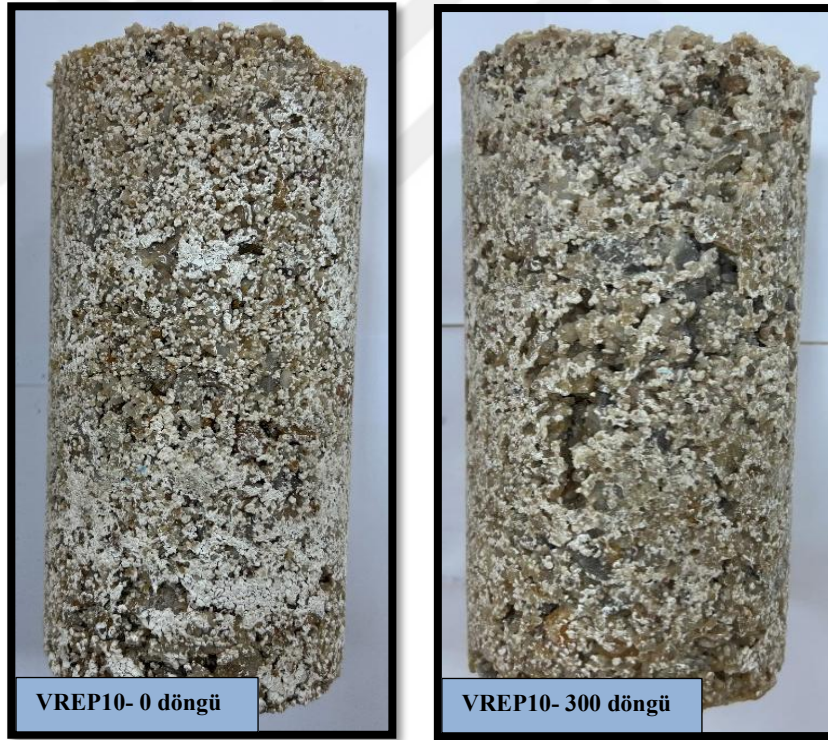
lekelenme artışı dışında dramatik bir değişim yaşanmamıştır. VREP10 kodlu numunede ise belirgin bir şekilde çatlaklar oluşmuş, parçalanma, oyulma, kapak atma gibi hasarlar ortaya çıkmıştır. Polyester reçineli polimer betonlarda olduğu gibi donma-çözünme direnci üzerinde polimer beton üretimlerinde %10 oranında doğal perlit agregası kullanımı olumlu, genişleştirilmiş perlit agregası kullanımı ise olumsuz sonuçlar elde edilmesine neden olmuştur. Genleştirilmiş perlit agregalarının yüksek oranda kullanımı (bu çalışma için %10), polimer betonun donma-çözünme direncini negatif etkileyerek betonların sıkılığını azaltmış ve numunelerin belirgin bir şekilde bozulmasına neden olmuş olabilir (Barnat-Hunek vd., 2018). Görsel değerlendirme sonuçları ile ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları sonuçları birbirine paralel gerçekleşmiştir.



Şekil 36. Donma-çözünme sonrası VRP0 kodlu numuneye ait görüntüler



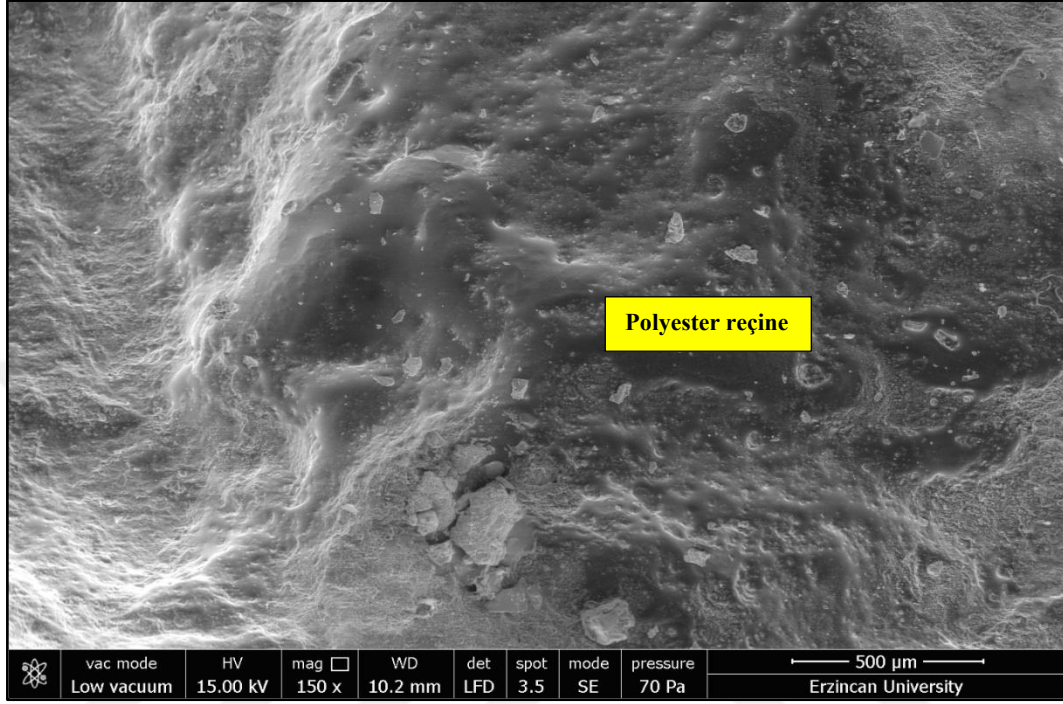
Şekil 37. Donma-çözünme sonrası VRNP10 kodlu numunelere ait görüntüler



Şekil 38. Donma-çözünme sonrası VREP10 kodlu numunelere ait görüntüler

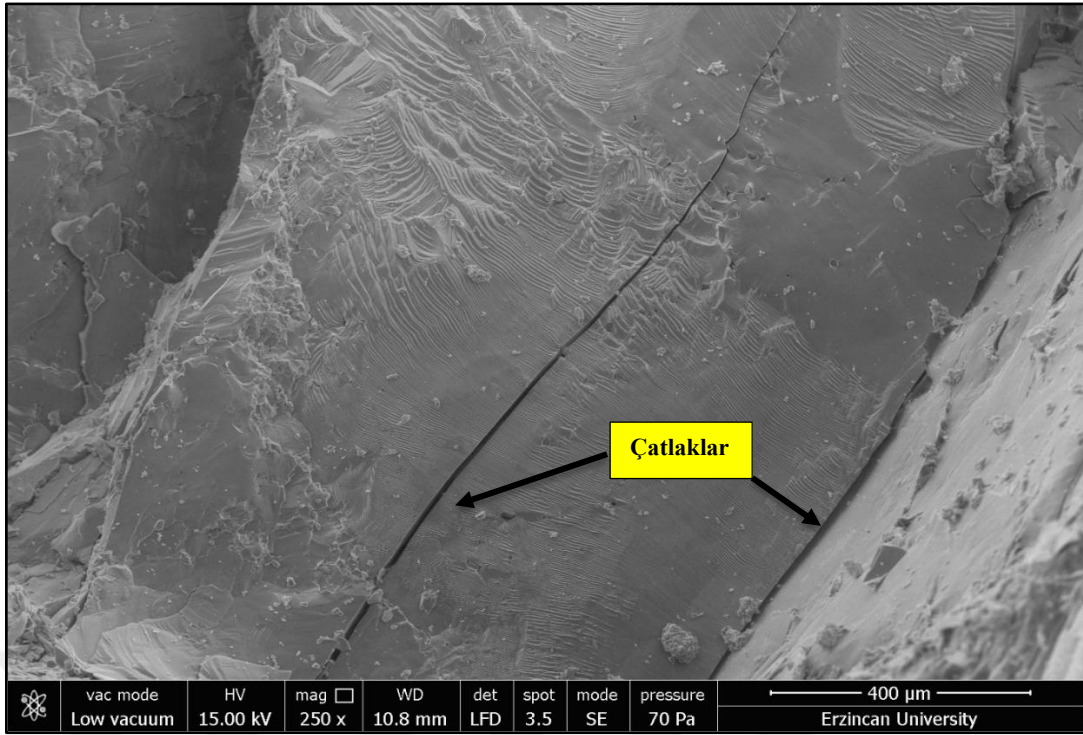
4.5.4. Donma-çözünme döngüleri sonrası polimer betonların SEM analiz sonuçları

Şekil 39’da 300 donma-çözünme döngüsü sonrasında polyester reçineli kontrol numunesine (PRP0) ait SEM görüntüsü gösterilmekte olup, mikroyapıda belirgin bir çatlak oluşumu tespit edilmemiştir.

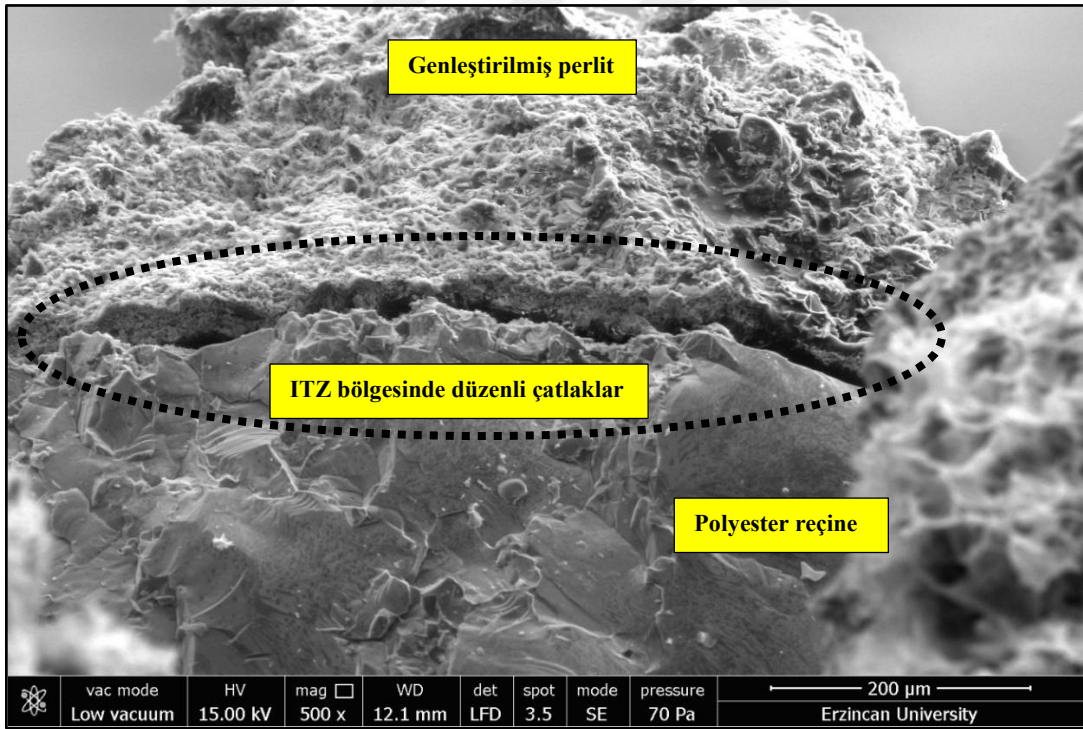


Şekil 39. 300 donma-çözünme sonrası PRP0 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü

%10 doğal perlit agregası içeren polimer beton numunesine ait SEM görüntüsü (Şekil 40) incelendiğinde, donma-çözünme döngülerinin etkisiyle iç yapıda çatlak oluşumlarının başladığı görülmektedir. Buna karşın, %10 genleştirilmiş perlit agregası kullanılan numuneye ait SEM görüntüsünde (Şekil 41), polyester reçine–genleştirilmiş perlit agregası arayüzey geçiş bölgesinde (ITZ) daha derin ve belirgin çatlakların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durumun oluşmasında, genleştirilmiş perlit agregalarının yüksek iç gözenekliliğe sahip yapısının matris–agrega bütünlüğünü zayıflatmasının etkili olduğu değerlendirilmektedir (Sharma vd., 2022). Donma-çözünme döngüleri boyunca agrega gözeneklerinde tutulan suyun donarak hacimsel genişlemeye uğraması ve bu genişleme basıncının ITZ bölgesinde çatlak oluşumunu hızlandığı düşünülmektedir. Öte yandan, çatlak oluşumu gözlemlenmiş olsa da (Şekil 40), daha kompakt bir yapıya sahip olan doğal perlit agregalarının polyester reçine ile daha güçlü bir arayüzey etkileşimi oluşturduğu ve dolayısıyla iç yapının korunmasına daha fazla katkı sağladığı sonucuna varılabilir.



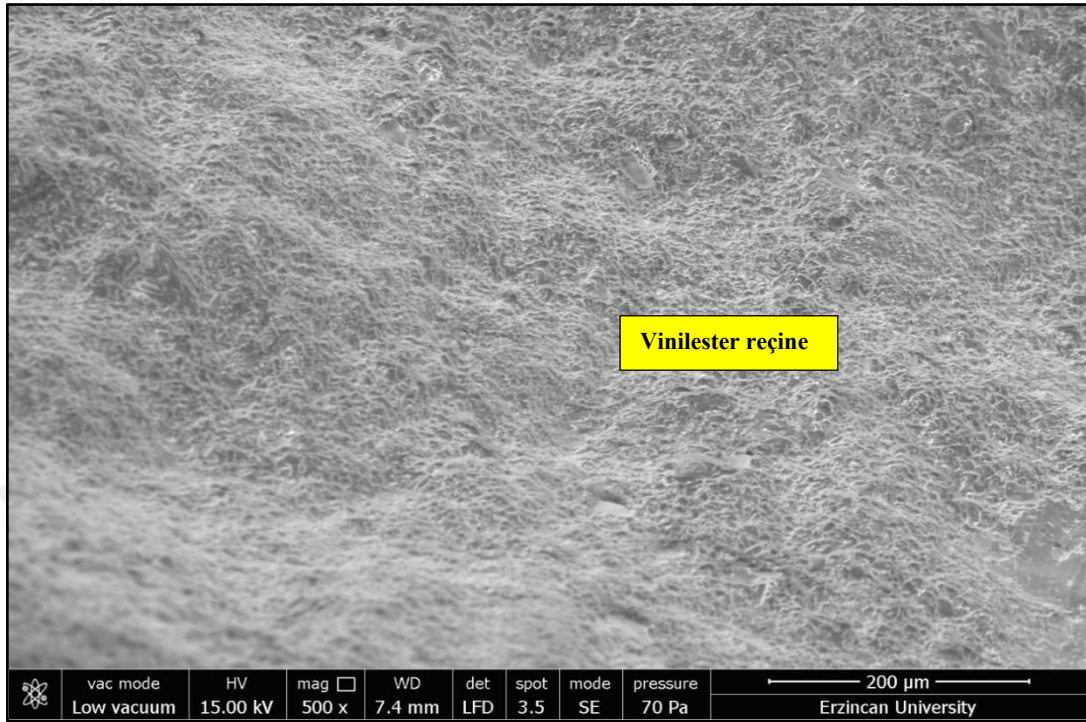
Şekil 40. 300 donma-çözünme sonrası PRNP10 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü



Şekil 41. 300 donma-çözünme sonrası PREP10 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü

Vinilester reçineli kontrol (VRP0) polimer betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrası iç yapısını gösteren SEM analizi sonuçları Şekil 42’de sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, donma-

çözünme döngülerinin ardından vinilester reçineli kontrol numunesinde belirgin bir çatlak oluşumunun gözlenmediği açıkça görülmektedir.

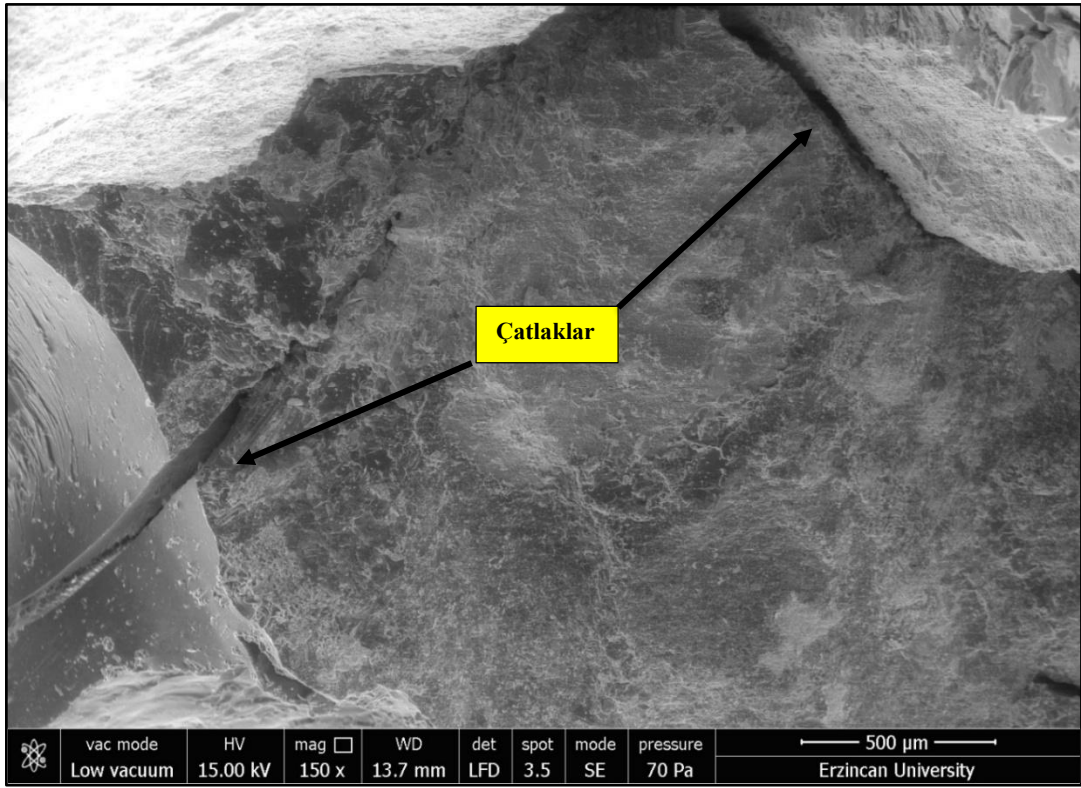


Şekil 42. 300 donma-çözünme sonrası VRP0 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü

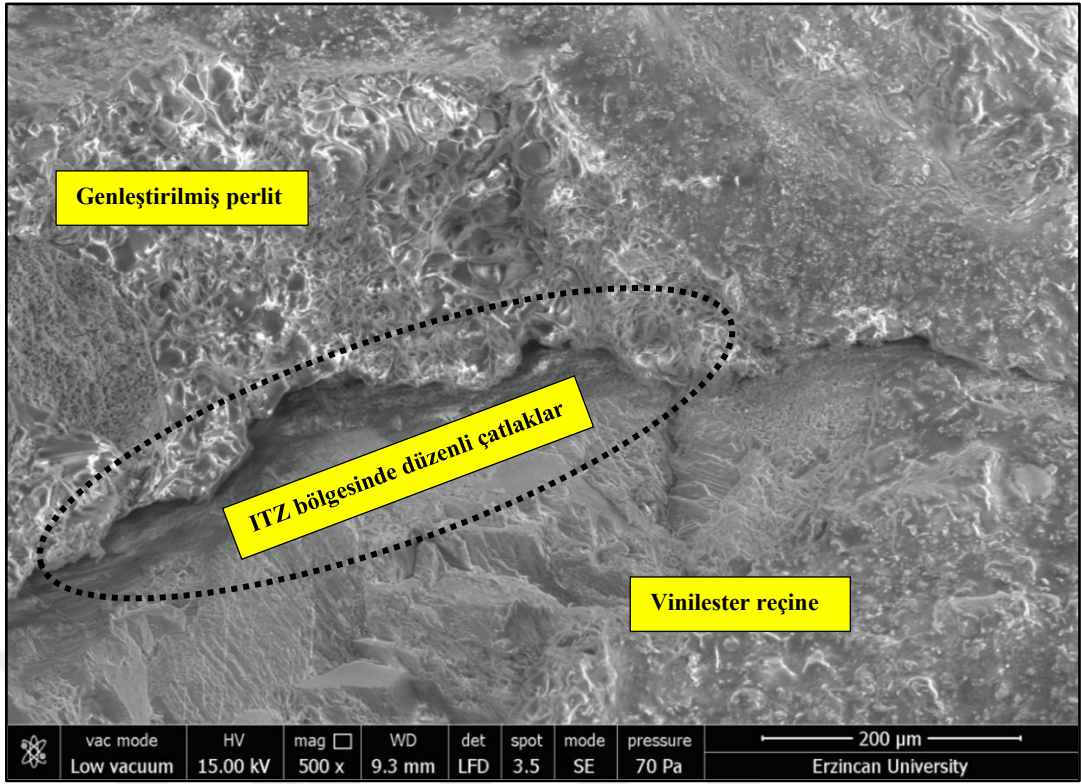
%10 doğal perlit agregası içeren vinilester reçineli polimer beton numunesine ait SEM görüntüsü (Şekil 43), donma-çözünme döngüleri sonrasında iç yapıda çatlak oluşumlarının başladığını göstermektedir. Ancak çatlakların gözlemlenmesine rağmen, %10 doğal perlit agregası içeren vinilester reçineli numunelerin iç yapılarının donma-çözünme çevrimleri sonrası nispeten daha bütüncül kaldığı anlaşılmaktadır. Buna karşılık, %10 genleştirilmiş perlit agregası içeren vinilester reçineli polimer beton numunesine ait SEM görüntüsünde (Şekil 44), vinilester reçine-genleştirilmiş perlit agregası arayüzey geçiş bölgesinde (ITZ) düzenli ve belirgin çatlakların olduğu tespit edilmiştir. Literatürde ITZ bölgesi, beton benzeri kompozit malzemelerin performansını belirleyen en zayıf alan ve çatlak oluşumunun ilk başladığı bölge olarak tanımlanmaktadır (Barnat-Hunek vd., 2018). Ayrıca geleneksel betona kıyasla hafif betonlarda ITZ morfolojisinin farklılık gösterdiği ve bu durumun, gözenekli yapıya sahip perlit agregasıyla ilişkilendirildiği bildirilmektedir (Nataraja vd., 2007). Bu kapsamda, %10 genleştirilmiş perlit agregası kullanımının vinilester reçineli polimer betonlarda gözlenen belirgin ITZ çatlaklarını artırarak, donma-çözünme döngüleri süresince su taşınımını artırdığı; buna bağlı olarak hidrolik basınç, nem değişimleri ve tekrarlayan çevrim etkisiyle düzenli çatlak ilerlemesine yol açtığı değerlendirilmektedir (Cwirzen & Penttala, 2005). Ayrıca

vinilester reçinelerin donma-çözünme çevrimlerinde su ile etkileşime polyster reçinelere kıyasla daha duyarlı olabileceği ve bu durumun genleştirilmiş perlit agregasının yüksek gözenekliliği ile birleşerek mikro boşluk, ITZ zayıflığı ve su geçişi mekanizmalarını daha kritik hale getirdiği ve böylece polimer beton performansını olumsuz yönde etkilediği düşünölmektedir.

Bu alışma kapsamında gerçekleştirilen SEM analizleri, donma-çözünme etkisi sonrası içyapı davranışının perlit tipi, agreg a oranı, reçine türü ve reçine-agrega aderansı tarafından belirlendiğini göstermektedir. Genel değerlendirmede, SEM analizlerinden elde edilen bulguların donma-çözünme deney sonuçları ile tutarlı olduğu görölmektedir.



şekil 43. 300 donma-çözünme sonrası VRNP10 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü



Şekil 44. 300 donma-çözünme sonrası VREP10 kodlu numuneye ait SEM görüntüsü

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

İki farklı reçine ve perlit agregalarının üretimi ile elde edilen polimer betonların durabilite performanslarının incelendiği çalışmadan elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir;

- ❖ Perlit agregalarının kullanımı, polyester ve vinilester reçineli polimer betonların durabilite performansını önemli ölçüde etkilemiştir.
- ❖ Doğal perlit agregaları, reçine–agrega ara yüzeyinde güçlü bir bağlanma sağlayarak su emme miktarını düşürmüş ve asit ile sülfat saldırılarına karşı direnci artırmıştır.
- ❖ Genleştirilmiş perlit agregaları, yüksek gözeneklilikleri ve düşük mukavemetleri nedeniyle geçirgenliği artırmış ve yüksek sıcaklık ile donma–çözünme koşullarında daha fazla bozulmaya neden olmuştur.
- ❖ SEM analizleri, polyester bazlı polimer betonlarda yaklaşık 150°C'nin, vinilester bazlı malzemelerde ise 100°C'nin kritik bozulma sıcaklığı olduğunu göstermiştir. Elde edilen bu değerlendirme, çalışmanın deneysel sınırları olan oda sıcaklığı ile 200°C arasındaki termal maruziyet aralığı için geçerlidir; daha yüksek sıcaklıklar metodolojik kapsam dışında tutulmuştur. Bu çerçevede bulgular, polimer betonların termal performansına ilişkin literatürde kontrollü aralık tanımlı yeni bir referans noktası oluşturmaktadır.
- ❖ Tüm karışımlar arasında (kontrol numuneleri hariç), %5 doğal perlit içeren vinilester reçineli polimer betonlar en yüksek dayanım ve durabilite performansını göstermiştir.
- ❖ Geleneksel betona kıyasla agresif ortamlara maruz kalıp daha yüksek dayanıklılık özellikleri gösteren perlit agregalı polimer betonların, yapısal uygulamalarda hem maliyet hem de daha uzun kullanım ömrü bakımından avantajlar sunacağı değerlendirilmektedir.
- ❖ Yerel bir mineral kaynak olan doğal perlitin polimer betonlarda değerlendirilmesi, hem performans hem de çevresel açıdan avantaj sağlayarak geleneksel agregalara olan bağımlılığı azaltmakta ve sürdürülebilir, düşük karbonlu inşaat uygulamaları için umut vadetmektedir. Böylece bu çalışma, yalnızca bilimsel bilgiye katkı sağlamakla kalmayıp, yerel kaynakların yüksek performanslı yapı malzemesi olarak değerlendirilmesine yönelik stratejik bir uygulama potansiyeli de sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abbasnejadfar, M., Bastami, M., & Hashemi, S. (2022). Experimental investigation on the stress-strain behavior of unsaturated polyester polymer concrete subjected to monotonic and cyclic loadings. *Journal of Building Engineering*, 48, 103966.
- AbdElmaseih, A. M., Nour, M. A., Mabrouk, M., & Ahmed, H. B. (2025). Nanohybrid of nanosilver and unsaturated polyester resin for enhancement the mechanical strength and chemical resistance of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04516.
- Abdul Ajeer, K., Varun Teja, K., & Meena, T. (2019). Experimental study on mechanical properties and micro structure of perlite powder concrete exposed to high temperatures. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6), 1350–1357.
- Acar, C. T. (2023). Perlit agregasının betonun dayanımı ve geçirimliliğine etkisi [Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- ACI Committee 548. (2003). Guide for the use of polymers in concrete. ACI International.
- ACI Committee 548. (2009). ACI 548.1R-09: Guide for the use of polymers in concrete (Vol. 83, Issue 5). American Concrete Institute. <https://doi.org/10.14359/10674>
- ACI Committee. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2013). ACI CT-13: ACI concrete terminology. ACI Standard.
- Agavrioloaie, L. (2012). Characterisation of polymer concrete with epoxy–polyurethane–acryl matrix. *Construction and Building Materials*, 37, 190–196.
- Agavrioloaie, L., Oprea, S., Barbuta, M., & Luca, F. (2012). Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix. *Construction and Building Materials*, 37, 190–196.
- Aghdam, A. A., Niaki, M. H., & Sakkaki, M. (2023). Effect of basalt fibers on fracture properties of nanoclay reinforced polymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 76, 107329.
- Ahiler Kalkınma Ajansı. (2021). Aksaray ili perlit geliştirme tesisi kurulumu: Ön fizibilite raporu. <https://www.yatirimadestek.gov.tr/pdf/assets/upload/fizibiliteler/aksaray-ili-perlit-genlestirme-tesisi-on-fizibilite-raporu-2021.pdf>
- Ahmad, Z., Alsulamy, S., Raza, A., Salmi, A., Abid, M., Deifalla, A. F., Khadimallah, M. A., & Elhadi, K. M. (2023). Life cycle assessment (LCA) of polypropylene fibers on mechanical, durability, and microstructural efficiency of concrete incorporating electronic waste aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01979.

- Akın, M. H. (2017). Polimer betonların özelliklerinde atık lastik kullanımının etkisi [Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Akinyemi, B. A. (2017). Engineering properties of acrylic emulsion polymer modified bamboo reinforced cement bonded composites. *Engineering Structures and Technologies*, 3, 126–131.
- Akkaya Özden, Ç. (2010). Polimer betonların donma-çözünme etkisine dayanıklılığı [Yüksek lisans tezi, Namık Kemal Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Akman, M. S. (1987). Yapı malzemeleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Ders Notları.
- Aktürk, Y. A. (2024). Beton yol kaplamadaki genleşmenin perlit kullanımı ile azaltılması [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Akyüncü, V., & Şanlıtürk, F. (2021). Investigation of physical and mechanical properties of mortars produced by polymer coated perlite aggregate. *Journal of Building Engineering*, 38, 102182.
- Alahmad, F., Abdallah, H. A., Maaddawy, T. E., & Abu-Jdayil, B. (2025). Development of unsaturated polyester mortar made with dune sand as a sustainable alternative in construction. *Results in Engineering*, 25, 104335.
- Alexa-Stratulat, S., Taranu, G., Toma, A., Olteanu, I., Pastia, C., Bunea, G., & Toma, I. (2024). Effect of expanded perlite aggregates and temperature on the strength and dynamic elastic properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 438, 137229.
- Alhazmi, H., Shah, S. A. R., Anwar, M. K., Raza, A., Ullah, M. K., & Iqbal, F. (2021). Utilization of polymer concrete composites for a circular economy: A comparative review for assessment of recycling and waste utilization. *Polymers*, 13(13), 2135.
- Alkhazaleh, A. H. (2020). Preparation and characterization of isopropyl palmitate/expanded perlite and isopropyl palmitate/nanoclay composites as form-stable thermal energy storage materials for buildings. *Journal of Energy Storage*, 32, 101679.
- Aliha, M. R. M., Heidari-Rarani, M., Shokrieh, M. M., & Ayatollahi, M. R. (2012). Experimental determination of tensile strength and K_{IC} of polymer concretes using semi-circular bending (SCB) specimens. *Structural Engineering and Mechanics*, 43(6), 823–832.
- Aliha, M. R. M., vd. (2019). Performance of lightweight granulated glass concrete beams reinforced with basalt FRP bars. *Engineering Solid Mechanics*.
- Aliha, M. R. M., Imani, D. M., Salehi, S. M., Shojaei, M., & Abedi, M. (2022). Mixture optimization of epoxy-based concrete to reach maximum fracture toughness and fracture energy values using Taguchi method. *Composites Communications*, 32, 101150.
- Almutairi, A. D., Alateyah, A. I., Saeed, M. K., Dahish, H. A., El-Garaihy, W. H., Alawad, M. O., & BaQais, A. (2025). Comprehensive investigation of the mechanical performance and evaluate

- the environmental impact of epoxy and polyester polymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04195.
- Andrew, R. M. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*, 11(4), 1675–1710.
- Ardhyananta, H., Puspawati, F. D., & Wicaksono, S. T. (2017). Mechanical and thermal properties of room temperature cured unsaturated polyester/vinyl ester blends. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 202(1).
- Asadiab, I., Shafigh, P., Hassan, Z. F. B. A., & Mahyuddin, N. B. (2018). Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering*, 20, 81–93.
- Assaad, J. (2017). Behaviour of structural polymer modified concrete containing recycled aggregate. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(8), 874–896.
- Assaad, J. J., El Mir, A., & Nehme, S. G. (2020). Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders. *Heliyon*, 6(1), e03165.
- ASTM C666/C666M-15. (2016). Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing. ASTM International.
- ASTM C1012. (2019). Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. ASTM International.
- ASTM C1585. (2020). Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. ASTM International.
- ASTM C267. (2020). Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes. ASTM International.
- ASTM International. (2020). ASTM C1585: Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. ASTM International.
- Åström, B. T. (1997). *Manufacturing of polymer composites*. Royal Institute of Technology.
- Ataabadi, H. S., Sedaghatdoost, A., Rahmani, H., & Zare, A. (2021). Microstructural characterization and mechanical properties of lightweight polymer concrete exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 311, 125293.
- Ataabadi, H. S., Zare, A., Rahmani, H., Sedaghatdoost, A., & Mirzaei, E. (2021). Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation. *Journal of Building Engineering*, 34, 101878.
- Ateş, E. (1994). Epoksi polimer betonun makine yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması [Doktora tezi, Balıkesir Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

- Ateş, E., & Barnes, S. (2012). The effect of high temperature curing treatment on the compression strength of composites with polyester resin matrix and quartz filler. *Materials & Design*, 34, 435–443.
- Atiwesh, G., Mikhael, A., Parrish, C. C., Banoub, J., & Le, T. T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon*, 7(9), e07918.
- Ayçiçek, M. (2021). Nano SiO₂ ve ZrO₂ katkılı polyester matriksli kompozit malzemelerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Aydın, M., & Bulut, H. A. (2024). Evaluation of the effect of E-waste on the permeability properties of polymer concrete composites and their behavior in aggressive environments. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24, 194. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-01006-4>
- Azizi, S. (2007). Perlit katkılı hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Badogiannis, E., Stratoura, M., Aspiotis, K., & Chatzopoulos, A. (2021). Durability of structural lightweight concrete containing different types of natural or artificial lightweight aggregates. *Corrosion and Materials Degradation*, 2(4), 554–567.
- Bageri, B., Ahmed, A., Jaber, J. A., Elkatatny, S., & Patil, S. (2021). Effect of perlite particles on the properties of oil well Class G cement. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 199, 108344.
- Baradan, B., & Aydın, S. (2013). Betonun durabilitesi. In *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi* (pp. 264–288). İstanbul.
- Baradan, B., Yazıcı, H., & Aydın, S. (2022). Beton. DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Bărbuță, M., Harja, M., & Baran, I. (2009). Comparison of mechanical properties for polymer concrete with different types of filler. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, 696–701.
- Bărbuță, M. (2016). Characterization of polymer concrete with different waste additions. *Procedia Technology*, 22, 407–412.
- Baskar, I., Prabavathy, S., Jeyasubramanian, K., Anuradha, R., & Awoyera, P. O. (2022). Thermal and mechanical characterization of microencapsulated phase change material in cement composites. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(2), 1141–1151.
- Barnat-Hunek, D., Góra, J., Andrzejuk, W., & Łagód, G. (2018). The microstructure–mechanical properties of hybrid fibres-reinforced self-compacting lightweight concrete with perlite aggregate. *Materials*, 11(7), 1093.

- Bassuoni, M. T., & Nehdi, M. L. (2007). Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1070–1084.
- Başar, F. S. (2023). Seramik çamurlarında perlit katkısının araştırılması ve uygulamaları [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Bayraktar, O. Y., Benli, A., Bodur, B., Öz, A., & Kaplan, G. (2024). Performance assessment and cost analysis of slag/metakaolin based rubberized semi-lightweight geopolymers with perlite aggregate: Sustainable reuse of waste tires. *Construction and Building Materials*, 411, 134655.
- Bayram, Y. (2015). Polimer betonların bazı termomekanik özelliklerinin araştırılması [Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Bedi, R., Chandra, A., & Singh, S. P. (2013). Mechanical properties of polymer concrete. *Journal of Composites*, 1, 948745.
- Beeldens, A. (2002). Effect of polymer modification on the behavior of concrete under severe conditions (Doctoral dissertation).
- Bi, C., Lang, J., & Gao, L. (2013). Effects of polymer on the properties of cement-based composite materials. *Journal of Hebei Energy Institute of Vocational Technology*, 13(2), 42–43.
- Biron, M. (2007). Thermoplastics and thermoplastic composites: Technical information for plastic users. Elsevier–Butterworth-Heinemann.
- Blankenship, L. T., White, M. N., & Puckett, P. M. (1989). Vinyl ester resins: For composites. Dow Chemical U.S.A.
- Bulut, H. A. (2016). Elektronik plastik atık içeren polimer betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Bulut, H. A., & Kandil, U. (2025). Investigation of freeze–thaw performance for sustainable rubberized concrete composites with different water to cement ratios. *Materiales de Construcción*, 75(357), e364.
- Bulut, H. A. (2024). Examination of mechanical, permeability, and durability properties of sustainable lightweight concrete composites with natural perlite aggregate. *International Journal of Civil Engineering*, 48, 1329–1352.
- Bulut, H. A. (2024). A different approach for green concrete production: Determination of the effect of e-waste and waste rubber powder on durability properties of concrete. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 15(3), 69–81.
- Bulut, H. A. (2024). Effect of natural perlite on mechanical properties of light-weight aggregate composites by alkali-silica reaction. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 13(3), 1009–1019.

- Bulut, H. A., & Şahin, R. (2017). A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste. *Composite Structures*, 178, 50–62.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Chelapandian, M., Ragul, P., Hari, M. N. T., & Arunachalam, N. (2022). An experimental study on the partial replacement of fine aggregate with perlite in cement concrete. *Journal name missing*, 68(5), 1219–1224.
- Chihaoui, R., Khelafi, H., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2016). Potential use of natural perlite powder as a pozzolanic mineral admixture in Portland cement. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(17), 1930–1944.
- Ciminli, A. T., & Bulut, H. A. (2025). A new approach for lightweight polymer concrete production: Determination of the influence of resin and perlite types on the mechanical performance of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 490, 142608.
- Collepari, M. (2003). A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(4–5), 401–407.
- Crawford, R. J. (1998). *Plastics engineering* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Çelik, A. G. (2010). Bor katkılı perlit karışımlardan hafif tuğla üretimi ve teknolojik özelliklerinin belirlenmesi [Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Çelik, S., Aile, R., & Mengüç, M. P. (2016). Analysis of perlite- and pumice-based building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 6, 105–111.
- Çimen, S. (2019). Bor atığı ve perlit katkılı üretilen tuğlanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi [Yüksek lisans tezi, Kastamonu Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- D.P.T. (2001). Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu yapı malzemeleri III (Pomza, perlit, vermikülit, flogopit, genleşen killer). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001–2005) Kalkınma Planı, DPT: 2617- ÖİK: 628, Ankara.
- Dai, Q., Wang, J., Guo, S., & Si, R. (2019). Mechanical and durability performance evaluation of crumb rubber-modified epoxy polymer concrete overlays. *Construction and Building Materials*, 203, 469–480.
- Dagshah, S. (2016). Improving impact resistance of polymer concrete using CNTs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(4), 539–553.
- Davraz, M., Kuru, M., Akdağ, A. E., Kılınçarslan, Y. E., Delikanlı, M., & Çabuk, M. (2020). Investigation of raw perlite use for the production of monolithic thermal insulation materials. *Construction and Building Materials*, 263, 120674.

- Debska, B., & Lichołai, L. (2014). A study of the effect of corrosive solutions on selected physical properties of modified epoxy mortars. *Construction and Building Materials*, 65, 604–611.
- Dębska, B., Almada, B. S., & Silva, G. J. B. (2024). Impact of different post-curing temperatures on mechanical and physical properties of waste-modified polymer composites. *Materials*, 17(21), 5301.
- Demir, İ., & Başpınar, M. S. (2008). Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of fly ash–lime–gypsum mixtures. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1204–1209.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., & Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627–1632.
- Demirboğa, R., & Karagöl, F. (2018). Effect of expanded perlite aggregate on compressive strength, linear autogenous shrinkage, restrained shrinkage, and heat of hydration of cementitious materials. *Structural Concrete*, 19(6), 1771–1781.
- D. Kramar, & Bindiganavile, V. (2011). Mechanical properties and size effects in lightweight mortars containing expanded perlite aggregate. *Materials and Structures*, 44, 735–748.
- DiCiccio, A. M., & Coates, G. W. (2011). Ring-opening copolymerization of maleic anhydride with epoxides: A chain extension approach to unsaturated polyesters. *Journal of the American Chemical Society*, 133(28), 10724–10727.
- Dodiuk, H., & Goodman, S. H. (2013). *Handbook of thermoset plastics* (3rd ed.). Elsevier.
- 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.
- Elhem, G., Oussama, E., Valerie, 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.
- Elyamany, H. E., Elmoaty, A. E. M. A., & Elshaboury, A. M. (2018). Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 184, 111–127.
- Engin, C. (2018). Farklı tane boyutlu genişletilmiş perlit agregası ile üretilen ultra hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi [Yüksek lisans tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Esfandiari, J., & Loghmani, P. (2019). Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder. *Measurement*, 147, 106846.

- Esteben, E. (2013). Dispersion and rheology of multi-walled carbon nanotubes in unsaturated polyester resin. *Macromolecules*, 46, 1642–1650.
- Etibank. (1995). Isı yalıtımında perlit. *Ege Mimarlık Dergisi*, 1(15).
<https://www.egemimarlik.org/cevirim-ici-okuma/15/323>
- Farahani, H. Z., Farahani, A., Fakharian, P., & Armaghani, D. J. (2023). Experimental study on mechanical properties and durability of polymer silica fume concrete with vinyl ester resin. *Materials*, 16(2), 757.
- Fédération internationale du béton. (2006). fib Bulletin No. 34: Model code for service life design. fib.
- Fédération internationale du béton. (2009). fib Bulletin No. 53: Structural concrete – Textbook on behaviour, design and performance, Volume 3: Design of durable concrete structures (2nd ed.). fib.
- Ferdous, M. W., Khennane, A., & Kayali, O. (2013, September). Hybrid FRP–concrete railway sleeper. In 6th International Conference on Advanced Composites in Construction (ACIC) (pp. 67–77). Belfast, UK.
- Ferdous, W., Manalo, A., Aravinthan, T., & Van Erp, G. (2016). Properties of epoxy polymer concrete matrix: Effect of resin-to-filler ratio and determination of optimal mix for composite railway sleepers. *Construction and Building Materials*, 124, 287–300.
- Ferdous, W., Ngo, T. D., Nguyen, K. T. Q., Ghazlan, A., Mendis, P., & Manalo, A. (2018). Effect of fire-retardant ceram powder on the properties of phenolic-based GFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 155, 414–424.
- Ferdous, W., Manalo, A., Van Erp, G., Aravinthan, T., & Ghabraie, K. (2018). Evaluation of an innovative composite railway sleeper for a narrow-gauge track under static load. *Journal of Composites for Construction*, 22(2), Article 04018006.
- Ferdous, W., Manalo, A., Wong, H. S., Abousnina, R., AlAjarmeh, O. S., Zhuge, Y., & Schubel, P. (2020). Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects. *Construction and Building Materials*, 232, 117229.
- Fındık, S. B. (2007). Yüksek sıcaklık etkisinde kalan mineral katkılı ve genleştirilmiş perlit agregalı harçların bazı özellikleri [Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Fink, J. K. (2005). Unsaturated polyester resins. In *Reactive polymers: Fundamentals and applications* (pp. 1–67).
- Fowler, D. W. (1999). Polymers in concrete: A vision for the 21st century. *Cement and Concrete Research*, 21, 449–452.

- Gand, A., et al. (2022). Performance of lightweight granulated glass concrete beams reinforced with basalt FRP bars. *Construction and Building Materials*, 317, 126139.
- Gao, Y., Romero, P., Zhang, H., Huang, M., & Lai, F. (2019). Unsaturated polyester resin concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 228, 116709.
- Gencel, O., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Arslan, O., Nodehi, M., Benli, A., Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties. *Construction and Building Materials*, 320, 126187.
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Öz, H. Ö., Taha, I., & Yasemin, M. T. (2015). Fracture properties of self-compacting concretes made with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 334–344.
- Ghassemi, P., & Toufigh, V. (2020). Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 234, 117887.
- Golewski, G. L., & Sadowski, T. (2006). Shear fracture toughness (Mode II) of concretes made of natural and crushed aggregates. In **Brittle matrix composites** (Vol. 8, pp. 537–546). Elsevier.
- Golewski, G. L., & Sadowski, T. (2012). Experimental investigations and numerical modeling of fracture processes under Mode II in concrete composites containing fly ash at early ages. *Solid State Phenomena*, 188, 158–163.
- 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). Strength degradation of polymer concrete in acidic environments. *Cement and Concrete Composites*, 29(8), 637–645.
- Gökbaşı, F. (2021). Çelik lifli polimer betonların mekanik davranışı üzerine geri dönüştürülmüş araç lastiği parçacıkları ve liflerinin birleşik etkisi [Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Griffiths, R., & Ball, A. (2000). An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete. *Composites Science and Technology*, 60(14), 2747–2753.
- Goodman, S. W. (1998). **Handbook of thermoset plastics** (2nd ed.). Noyes Publications.
- Gupta, V. B. (2007). **Handbook of thermoplastics** (pp. 1–30). CRC Press.
- Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C., & Roussel, N. (2010). Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 820–826.

- Haddid, H. (2017). Optimization of thermal and mechanical properties of unsaturated polyester resin as a binder in polymer concrete for precision machine tool bases. *Journal of Materials Science and Engineering*, 6, 395.
- Hamidi, A., Valizadeh, A., & Aslani, F. (2022). The effect of scoria, perlite and crumb rubber aggregates on the fresh and mechanical properties of geopolymer concrete. *Structures*, 38, 895–909.
- Hamer, G. D., & Russell, R. F. (1982). Unsaturated polyester resins (U.S. Patent No. 4,336,169).
- Harper, C. A. (2003). **Plastics materials and processes: A concise encyclopedia**. John Wiley & Sons.
- Hashemi, M. J., Jamshidi, M., & Aghdam, J. H. (2018). Investigating fracture mechanics and flexural properties of unsaturated polyester polymer concrete (UP-PC). *Construction and Building Materials*, 163, 767–775.
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2020). A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements—A clean technology option for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118762.
- Heidari-Rarani, M., Aliha, M. R. M., Shokrieh, M. M., & Ayatollahi, M. R. (2014). Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings – An experimental study. *Construction and Building Materials*, 64, 308–315.
- 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.
- Holden, G. (2000). **Understanding thermoplastic elastomers**. Hanser Verlag.
- Hong, S., Kim, H., & Park, S. (2016). Optimal mix and freeze-thaw durability of polysulfide polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 539–545.
- Ibrahim, M., Ahmad, A., Barry, M. S., Alhems, L. M., & Suhoothi, A. C. M. (2020). Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, 50.
- Ikumi, T., Cavalaro, S. H. P., & Segura, I. (2019). The role of porosity in external sulphate attack. *Cement and Concrete Composites*, 97, 1–12.
- IPS Madencilik. (2025). <https://www.ipsmakina.com.tr/tesisler/perlit-genlestirme-tesisleri/>
- Jacobsen, S., Sæther, D. H., & Sellevold, E. J. (1997). Frost testing of high strength concrete: Frost/salt scaling at different cooling rates. *Materials and Structures*, 30, 33–42.

- Jafari, K., Tabatabaeian, M., Joshaghani, A., & Ozbakkaloglu, T. (2018). Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 167, 185–196.
- Jamshidi, M., & Pourkhorshidi, A. R. (2012). Modified polyester resins as an effective binder for polymer concretes. *Materials and Structures*, 45(4), 521–527.
- Jamshidi, M. (2013). Application of polymer additives to modify concrete properties: Effects of polymer type and content. *Asian Journal of Civil Engineering*, 15(5), 779–787.
- Jamshidi, M., Alizadeh, M., Salar, M., & Hashemi, A. (2013). Durability of polyester resin concrete in different chemical solutions. *Advanced Materials Research*, 687, 150–154.
- Jamshidi, M., Hashemi, M. J., & Aghdam, J. H. (2018). Investigating fracture mechanics and flexural properties of unsaturated polyester polymer concrete (UP-PC). *Construction and Building Materials*, 163, 767–775.
- Jia, G., & Li, Z. (2021). Effect of aerogel/expanded perlite composite as thermal insulation aggregate on the properties and microstructure of cement-based materials: Preparation, characteristics and microstructure. *Construction and Building Materials*, 273, 121728.
- Jones, R. M. (1999). *Mechanics of composite materials* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- Kajorncheappunngam, S., Gupta, R. K., & GangaRao, H. V. S. (2002). Effect of aging environment on degradation of glass-reinforced epoxy. *Journal of Composites for Construction*, 6(1), 61.
- Kandil, U., & Bulut, H. A. (2024). Examination of the permeability of rubberized concrete with different water/cement ratios and their resistance against acid and sulfate attack. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 40(3), 320–339.
- Kapeluszna, E., Kotwica, Ł., Pichór, W., & Nocuń-Wczelik, W. (2020). Cement-based composites with waste expanded perlite – Structure, mechanical properties and durability in chloride and sulphate environments. *Sustainable Materials and Technologies*, 24, e00160.
- Kapeluszna, E., Kotwica, Ł., & Nocuń-Wczelik, W. (2021). Comparative study of the influence of ground waste expanded perlite and silica fume on hydration of cements containing various tricalcium aluminate contents. *Construction and Building Materials*, 303, 124434.
- Kaplan, A. N., & Özel, C. (2021). Perlit ve pomza agregalı polimer betonların radyasyon zırhlama performanslarının araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 16(1), 287–300.
- Kaplan, A. N., & Özel, C. (2023). Polimer bağlayıcılı hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(4), 1475–1485.
- Kara, Ç., Karacasu, M., Canbaz, M., & Akalın, K. (2015). Investigation of performance properties of asphalt concrete with expanded perlite aggregate. In *Proceedings of the 1st International*

Workshop on Construction and Electricity Applications on Vocational Education. Eskişehir, Türkiye.

- Karagöl, F., Yegin, Y., Polat, R., Benli, A., & Demirboğa, R. (2018). The influence of lightweight aggregate, freezing–thawing procedure and air entraining agent on freezing–thawing damage. *Structural Concrete*, 19(5), 1328–1340.
- Karakoç, M. B., & Demirboğa, R. (2010). HSC with expanded perlite aggregate at wet and dry curing conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(12).
- Karein, S. M. M., Balapour, M., & Karakouzian, M. (2019). Improving the hardened and transport properties of perlite incorporated mixture through different solutions: Surface area increase, nanosilica incorporation or both. *Construction and Building Materials*, 209, 187–194.
- Kasai, M., Kobayashi, Y., Togo, M., & Nakahira, A. (2019). Synthesis of zeolite surface-modified perlite and its heavy metal adsorption capability. *Materials Today: Proceedings*, 16(Part 1), 232–238.
- Kashi, A., Moodi, F., Ramezani-pour, A. A., & Pourebrahimi, M. (2018). Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes. *Construction and Building Materials*, 191, 145–154.
- Kaya, E. S. (2019). Availability of raw perlite and expanded perlite as pozzolanic material [Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Keinänen, K., & Wigington, G. (2001). Unsaturated polyester resin (U.S. Patent No. 6,268,464).
- Kępczak, N., Deredas, K., & Urbaniak, M. (2021). Influence of doping with styrene-butadiene rubber on dynamic and mechanical properties of polymer concrete. *Composite Structures*, 268, 113998.
- Khalid, N. H. A., Hussin, M. W., Ismail, M., Basar, N., Ismail, M. A., Lee, H., & Mohamed, A. (2015). Evaluation of effectiveness of methyl methacrylate as retarder additive in polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 449–456.
- Khalid, N. H. A., Hussin, M. W., Mirza, J., Ariffin, N. F., Ismail, M. A., Lee, H., Mohamed, A., & Jaya, R. P. (2016). Palm oil fuel ash as potential green micro-filler in polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 102(Part 1), 950–960.
- Khaloo, A., Tabatabaiean, M., & Khaloo, H. (2019). An innovative high performance pervious concrete with polyester and epoxy resins. *Construction and Building Materials*, 228, 116820.
- Khonsari, V., Eslami, E., & Anvari, A. (2010). Effects of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete. In *Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete & Concrete Structures (FramCoS-7)* (pp. 1354–1361). Jeju, Korea.

- Kibici, Y. (2018). İnşaat yapı hammaddeleri jeolojisi: Perlit (Ders notları, 7. Ünite) [Ders notu]. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Sanket, N., & Chandra, D. S. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721–740.
- Kolak, M. N., & Oltulu, M. (2025). Investigation of physical, mechanical and thermal properties of hemp and camelina reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials*, 487, 142066.
- Kopar, İ., & Polat, P. (2020). Molla Tepe (Mollaköy-Erzincan) perlitik volkan konisi'nin jeolojik-jeomorfolojik özellikleri ve Molla Tepe perlitinin endüstriyel madde olarak değerlendirilmesi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 24(3), 1529–1554.
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 622–627.
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2013). A novel polymer concrete made with recycled glass aggregates, fly ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 41, 146–151.
- Kukacka, L. E. (1972). Concrete-polymer materials: Fourth topical report (BNL 50328). Federal Center, Denver, CO.
- Lanzón, M., & García-Ruiz, P. A. (2008). Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1798–1806.
- Li, Z., Zhou, X., & Shen, B. (2004). Perlite fiber cement extrudates exposed to high temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 221–229.
- Li, Z., Wang, L., Liu, P., Jing, Q., Liu, Y., Wang, W., & Zhang, Y. (2018). Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel. *Construction and Building Materials*, 188, 747–757.
- Li, Z., Yan, Y., Liu, W., Jia, G., Zang, Y., & Gao, Y. (2023). Application of expanded perlite immobilized microorganisms in cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 76, 106834.
- Liu, C., Luo, C., Xu, T., Lv, P., & Rao, Z. (2019). Experimental study on thermal performance of capric acid–myristyl alcohol/expanded perlite composite phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy*, 191, 585–595.
- Liu, Y., Jiang, Z., Ma, D., Liang, Z., Liu, Z., & Zhou, L. (2021). Mesoscale modeling of epoxy polymer concrete under tension or bending. *Composite Structures*, 256, 113079.

- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S. J., & Ciais, P. (2024). Global carbon emissions in 2023. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5, 253–254.
- Lokuge, W. P., & Aravinthan, T. (2013). Mechanical properties of polymer concrete with different resin types. *Materials Science*, 1–6.
- Lv, J., Zhang, Y., Huang, J., Zhang, Q., Ma, X., & Guo, Y. (2023). Effects of waste rubber powder and resin content on the free shrinkage of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 381, 131307.
- Maherzi, W., Ennahal, I., Benzerzour, M., Mammindy-Pajany, Y., & Abriak, N. E. (2020). Study of the polymer mortar based on dredged sediments and epoxy resin: Effect of the sediments on the behavior of the polymer mortar. *Powder Technology*, 361, 968–982.
- Martínez-Barrera, G., Coz-Díaz, J. J., Martínez-Cruz, E., Martínez-López, M., Ribeiro, M. C. S., Velasco-Santos, C., Lobland, H. E. H., & Brostow, W. (2019). Modified recycled tire fibers by gamma radiation and their use on the improvement of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 204, 327–334.
- Mathews, M. E., Kiran, T., Naidu, V. C. H., Jeyakumar, G., & Anand, N. (2021). Effect of high-temperature on the mechanical and durability behaviour of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 42(Part 2), 718–725.
- Mathews, M. E., Kiran, T., Nammalvar, A., Anbarasu, M., Kanagaraj, B., & Andrushia, D. (2023). Evaluation of the rheological and durability performance of sustainable self-compacting concrete. *Sustainability*, 15(5), 4212.
- Maxim, L. D., Niebo, R., & McConnell, E. E. (2014). Perlite toxicology and epidemiology – A review. *Inhalation Toxicology*, 26(5), 259–270.
- MEGEP (2008). *Kimya teknolojisi*.
- Mehta, P. K. (1986). Beton: Yapısı, özellikleri ve malzemeleri. *International Journal of Cement Composites and Concrete*, 8(4).
- Mindess, S. (2019). *Developments in the formulation and reinforcement of concrete*. Woodhead Publishing.
- Mineral Commodity Summaries. (2022). US Geological Survey.
- Miller, M., & R. T. Limited. (2005). *Polymers in cementitious materials*. Rapra Technology Limited.
- Mo, K. H., Ling, T. C., Tan, T. H., Leong, G. W., Yuen, C. W., & Shah, S. N. (2021). Alkali–silica reactivity of lightweight aggregate: A brief review. *Construction and Building Materials*, 270, 121444.
- Mo, X., & Fournier, B. (2007). Investigation of structural properties related to alkali–silica reaction by macro- and micro-structural analysis. *Materials Characterization*, 58(2), 179–189.

- Mohammed, H., Giuntini, F., Sadique, M., Shaw, A., & Bras, A. (2022). Polymer modified concrete impact on the durability of infrastructure exposed to chloride environments. *Construction and Building Materials*, 317, 125771.
- Moodi, F., Kashi, A., Ramezani pour, A. A., & Pourebrahimi, M. (2018). Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes. *Construction and Building Materials*, 191, 145–154.
- M.T.A. (1985). Türkiye perlit envanteri. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları No. 193, Ankara.
- M.T.A. (2016). Türkiye maden yatakları haritaları. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- M.T.A. (2022). Perlit. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/perlit>
- Mutlu, E. (2020). Perlit maden işletmelerinde çalışanların iş sağlığı ve iş güvenliği algı düzeylerinin araştırılması [Yüksek lisans tezi, Avrasya Üniversitesi]. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Muthukumar, M., & Mohan, D. (2004). Optimization of mechanical properties of polymer concrete and mix design recommendation based on design of experiments. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(3), 1107–1111.
- Muthukumar, M., & Mohan, D. (2004). Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mixture ratio. *European Polymer Journal*, 40(9), 2167–2177.
- Naguib, H. M., Zaki, E. G., Abdelsattar, D. E., Dhmees, A. S., Azab, M. A., Elsaeed, S. M., & Kandil, U. F. (2023). Environmentally friendly polymer concrete: Polymer treatment, processing, and investigating carbon footprint with climate change. *ACS Omega*, 8, 8804–8814.
- Najvani, M. A. D., Murcia, D. H., Soliman, E., & Taha, M. M. R. (2023). Early-age strength and failure characteristics of 3D printable polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 394, 13219.
- Nataraja, M. C., Nagaraj, T. S., Bhavanishankar, S., & Reddy, B. M. R. (2007). Proportioning cement based composites with burnt coal cinder. *Materials and Structures*, 40, 543–552.
- Naycı, G. (2019). *Keten lifi, kestane/gürgen talaşı dolgulu vinilester esaslı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*. Longman Scientific and Technical.
- Nguyen, H. G. (2013). Micromechanical modelling of the elastic behaviour of polymer mortars. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(2), 65–83.

- Niaki, M. H., Fereidoon, A. B., & 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.
- Niaki, M. H., Ahangari, M. G., Izadi, M., & Pashaian, M. (2023). Evaluation of fracture toughness properties of polymer concrete composite using deep learning approach. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 46(3), 603–615.
- Niaki, M. H. (2023). Fracture mechanics of polymer concretes: A review. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 125, 103922.
- Nin, N. J., vd. (2018). Strength developments and deformation characteristics of MMA-modified vinyl ester polymer concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*.
- Ohama, Y. (2011). Concrete–polymer composites – The past, present and future. *Key Engineering Materials*, 466, 1–14.
- Okucu, A. (1992). *Hafif inşaat malzemeleri (Anorganik)* (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi.
- Orak, S. (2000). Investigation of vibration damping in polymer concrete with polyester resin. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 171–174.
- Orhun, O. (1969). Perlit. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 8(4), 213–222.
- 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.
- Özgenç, İ. (1993). Perlitler içindeki suyun kimyasal yapısı ve bu yapının genleşme özelliğine etkisi. *Jeoloji Mühendisliği*, 42, 60–63.
- Öztürk, M. (2013). *Polimerle modifiye edilmiş hafif betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Palamarchuk, A., Yudaev, P., & Chistyakov, E. (2024). Polymer concretes based on various resins: Modern research and modeling of mechanical properties. *Journal of Composites Science*, 8(12), 503.
- Panagiotopoulou, C., Angelopoulos, P. M., Kosmidi, D., Angelou, I., Sakellariou, L., & Taxiarchou, M. (2022). Study of the influence of the addition of closed-structure expanded perlite

microspheres on the density and compressive strength of cement pastes. *Materials Today: Proceedings*, 54(1), 118–124.

Papa, E., Medri, V., Murri, A. N., Laghi, L., D'Aloysio, G., Bandini, S., & Landi, E. (2018). Characterization of alkali bonded expanded perlite. *Construction and Building Materials*, 191, 1139–1147.

Paşaoğlu Gül, K. (2021). *Perlit ve genleştirilmiş perlitin yapılarda kullanımının enerji verimliliği açısından incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Perlit Enstitüsü. (2016). *Çamur emici olarak perlit*. Perlit Enstitüsü A.Ş.

Pichór, W., Mozgawa, W., Król, M., & Adamczyk, A. (2014). Synthesis of zeolites on light aluminosilicate fillers. *Materials Research Bulletin*, 49, 210–215.

Pişkin, E. (1987). *Polimer teknolojisine giriş*. İnkılap Kitabevi.

Polat, R. (2007). *Genleştirilmiş perlit ve pomza ile hava sürükleyici katkının betonda kılcal geçirimsizlik ve don hasarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Polat, R., Demirboğa, R., Karakoç, M. B., & Türkmen, İ. (2010). The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 60(1), 51–56.

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

Qasim, O. A. (2018). Experimental investigation of the effect of SBR and steel fiber on the properties of different concrete types. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(2), 361–370.

Qiu, Q., & Lau, D. (2021). Defect detection of FRP-bonded civil structures under vehicle-induced airborne noise. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146, 106992.

Rarani, H. M., Aliha, M. R. M., Shokrieh, M. M., & Ayatollahi, M. R. (2014). Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings – An experimental study. *Construction and Building Materials*, 64, 308–315.

- Rashad, A. M. (2016). A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for civil engineer. *Construction and Building Materials*, 121, 338–353.
- Rashid, K., Wang, Y., & Ueda, T. (2019). Influence of continuous and cyclic temperature durations on the performance of polymer cement mortar and its composite with concrete. *Composite Structures*, 215, 214–225.
- 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.
- Reis, J. M. L. (2009). Effect of textile waste on the mechanical properties of polymer concrete. *Materials Research*, 12(1), 63–67.
- Reis, J. M. L. (2010). Fracture assessment of polymer concrete in chemical degradation solutions. *Construction and Building Materials*, 24, 1708–1712.
- Ribeiro, M. C. S., Tavares, C. M. L., & Ferreira, A. J. M. (2002). Chemical resistance of epoxy and polyester polymer concrete to acids and salts. *Journal of Polymer Engineering*, 22(1), 27–44.
- Robles, M., Galán, S., & Aguilar, R. (2008). Durability of polyester polymer concrete under variable temperature and humidity conditions. In *Excellence in Concrete Construction through Innovation* (p. 299). CRC Press.
- Rossignolo, J. A., & Agnesini, M. V. C. (2002). Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 329–334.
- Russell, R. F. (1983). Unsaturated polyester resins (U.S. Patent No. 4,387,171).
- Saçak, M. (2002). *Polimer kimyası*. Gazi Kitabevi.
- Saçak, M. (2010). *Polimer kimyası*. Gazi Kitabevi.
- Sağsöz, A. E. (2007). *Farklı kür şartlarının doğal perlit agregalı betonların mekanik özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Salami, B. A., Bahraq, A. A., Haq, M. M. U., Ojelade, O. A., Taiwo, R., Wahab, S., Adewumi, A. A., & Ibrahim, M. (2024). Polymer-enhanced concrete: A comprehensive review of innovations and pathways for resilient and sustainable materials. *Next Materials*, 4, 100225.
- Saran, G. A. (2007). *Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun betonun durabilite özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Sarde, B., & Patil, Y. D. (2019). Recent research status on polymer composite used in concrete: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3780–3790.
- Saribiyik, M., Piskin, A., & Saribiyik, A. (2013). The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties. *Construction and Building Materials*, 47, 840–844.
- 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.
- Sharma, B., Sharma, R., & Bansal, P. P. (2022). Effect of fine aggregate replacement with expanded perlite and pumice on the development of lightweight concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 20(1), 115–129.
- Sharook, S., Sathyan, D., & Madhavan, M. K. (2023). Thermo-mechanical and durability properties of expanded perlite aggregate foamed concrete. *Construction Materials*, 176(4), 141–149.
- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750–763.
- Shigang, A., Liqun, T., Yiqi, M., Yongmao, P., Yiping, L., & Daining, F. (2013). Effect of aggregate distribution and shape on failure behavior of polyurethane polymer concrete under tension. *Computational Materials Science*, 67, 133–139.
- Shiravi, M. M., & Eftekhari, M. R. (2023). Analyzing the bond strength between lightweight concrete and lightweight polyester–polymer concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 1–12.
- Shokrieh, M., Heidari-Rarani, M., Shakouri, M., & Kashizadeh, E. (2011). Effects of thermal cycles on mechanical properties of optimized polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3540–3549.
- Shu, K. H. (1978). *Interfacial bonding in basalt fiber polymer composite systems* (Doktora tezi). Washington State University.
- Singh, M. (2012). Effect of styrene-butadiene ratio on mechanical properties of concrete mixture. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(13), 1334–1339.
- Singh, G., Kumar, H., & Singh, S. (2019). Performance evaluation—PET resin composite composed of red mud, fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 214, 527–538.

- Son, S. W. (2012). Mechanical properties of acrylic polymer concrete containing methacrylic acid as an additive. *Construction and Building Materials*, 37, 669–679.
- Sun, L., Liang, L., Shi, Z., Wang, H., Xie, P., Dastan, D., Sun, K., & Fan, R. (2020). Optimization strategy for dielectric performance of topological structured polymer nanocomposites by rationally regulating the spatial distribution of nanofillers. *Engineering Science*.
- Şapcı, N., & Ceylan, H. (2021). Perlit agregalarının farklı sıcaklıklarda geniştirilmesi üzerine teknik bir analiz. *Teknik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 32–40.
- Tanyildizi, H. (2016). The investigation of microstructure and strength properties of lightweight mortar containing mineral admixtures exposed to sulfate attack. *Measurement*, 77, 143–154.
- Tanyildizi, H. (2017). Taguchi optimization approach for strengthening polypropylene fiber reinforced concrete with polymer after high temperature. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55, 529–534. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1517-0>
- Tasdemir, C., Sengul, O., & Tasdemir, M. A. (2017). A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. *Energy and Buildings*, 151, 469–475.
- Teja, K. V., Alexander, S., Manohar, S. J., John, S. S., & Meena, T. (2021). Mechanical and micro-structural properties of perlite powder incorporated SCC. *Materials Today: Proceedings*, 45(2), 3374–3382.
- Thanh, D. N., Singh, M., Ulbrich, P., Strnadova, N., & Štěpánek, F. (2011). Perlite incorporating β -Fe₂O₃ and α -MnO₂ nanomaterials: Preparation and evaluation of a new adsorbent for As(V) removal. *Separation and Purification Technology*, 82, 93–101.
- Thillo, L. V., Blom, J., Moreels, A., & Craeye, B. (2021). Influence of aggregates, glass fibre reinforcement and recycled aggregates on polyester mortar. *Construction and Building Materials*, 293, 123534.
- Tınmaz Özbek, B. (2024). *Deneyisel tasarım metodu kullanılarak doymamış polyester reçinenin özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Toma, A. M., Toma, I. O., Alexa-Stratulat, S. M., Taranu, G., Olteanu, I., Pastia, C., & Bunea, G. (2024). Effect of expanded perlite aggregates and temperature on the strength and dynamic elastic properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 438, 137229.

- Tonet, K. G. (2013). Polymer concrete with recycled PET: The influence of the addition of industrial waste on flammability. *Construction and Building Materials*, 40, 378–389.
- Topalömer, N. (2016). *Epoksi ve vinilester matris, E-camı dokuma ve keçe destekli kompozit malzemelerde üçüncü bileşen dolgu maddelerinin kürleme ve proses koşullarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Topçu, İ. B., & Işıkdag, B. (2007). High thermal conductivity resistant clay brick production with perlite additive. *Building and Environment*, 42(1), 3540–3546.
- Torgal, F. P., & Castro-Gomes, J. P. (2006). Effect of physical and geometrical properties of granite and limestone aggregates on durability of a C20/25 strength class concrete. *Construction and Building Materials*, 20(10), 1079–1088.
- Toufigh, V., Hosseinali, M., & Shirkhorshidi, S. M. (2016). Experimental study and constitutive modeling of polymer concrete's behavior in compression. *Construction and Building Materials*, 112, 183–190.
- Toufigh, V., Ghassemi, P., & Rajabi, H. (2020). Fatigue performance of polymer and ordinary cement concrete under corrosive conditions: A comparative study. *Engineering Failure Analysis*, 111, 104493.
- Tran, N. P., Nguyen, T. N., & Ngo, T. D. (2022). The role of organic polymer modifiers in cementitious systems towards durable and resilient infrastructures: A systematic review. *Construction and Building Materials*, 360, 129562.
- TS EN 933-1. (2012). *Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution, sieving method*. Turkish Standards Institution.
- TS 802. (2016). *Design of concrete mixes*. Turkish Standards Institution.
- Tsutura, T. (2001). *Polymer chemistry* (M. Mehmet, Çev.). Seç Yayın Dağıtım.
- Tuncer, M., Bideci, A., Çomak, B., Durmuş, G., & Bideci, Ö. S. (2025). Experimental investigation of durability properties of polymer coated pumice aggregate lightweight concretes. *Polymers*, 17(2), 253.
- Turanlı, L., & Dernek, C. (2021). Perlitin dünyada ve Türkiye’de çimento ve beton sistemlerinde kullanımı. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 4(2), 88–97.

- Turkish Standards Institution. (2016). *TS 802: Design of concrete mixes*. Turkish Standards Institution.
- Turgay, Ö. (1981). *Türkiye perlit envanteri* (MTA Rapor No: 6972). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2014). Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete containing coarse recycled concrete aggregate. *Materials & Design*, 53, 983–991.
- Türkmen, I., Demirboğa, R., & Gul, R. (2006). The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the freezing and thawing of concrete. *Computers and Concrete*, 3(2–3), 163–175.
- Türkmen, İ., & Kantarcı, A. (2007). Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, 42(6), 2378–2383.
- Tüzün, R. (1989). *Türkiye perlit zuhurları derleme ve değerlendirme çalışmaları* (MTA Rapor No: 9421). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- United States Geological Survey. (2023). *Mineral commodity summaries 2023*.
- Uygunoğlu, T., Yücel, K. T., & Yurteu, Ş. (2006). Betonun zararlı ortamlardaki durumu: Yer altı suyu etkisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 29–35.
- Uzel, İ. (2018). *Kapadokya perlit*. 17 Şubat 2022 tarihinde <http://www.kapadokyaperlit.com/perlit-blog/www-perlite-com-www-perlite-net-www-perlite-org-www-iperlit-com-www-yalitim-com> adresinden erişildi.
- Vahid, A., & Alireza, A. (2016). Graphene oxide/vinyl ester resin nanocomposite: The effect of graphene oxide, curing kinetics, modeling, mechanical properties and thermal stability. *RSC Advances*, 6, 22331–22340.
- Vargas, P., Marín, N. A., & Tobón, J. I. (2018). Performance and microstructural analysis of lightweight concrete blended with nanosilica under sulfate attack. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2715474.
- Vipulanandan, C., & Dharmarajan, N. (1988). Effect of temperature on the fracture properties of epoxy polymer concrete. *Cement and Concrete Research*, 18(2), 265–276.

- Wang, J., Dai, Q., Guo, S., & Si, R. (2019). Mechanical and durability performance evaluation of crumb rubber-modified epoxy polymer concrete overlays. *Construction and Building Materials*, 203, 469–480.
- Wang, Q., Zhang, J., Zhang, Z., Hao, Y., & Bi, K. (2020). Enhanced dielectric properties and energy storage density of PVDF nanocomposites by co-loading BaTiO₃ and CoFe₂O₄ nanoparticles. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3(1), 58–65.
- Williams, F., & Yang, A. (2024). Potential of reducing CO₂ emissions in cement production through altering clinker compositions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(40), 17158–17167.
- Wu, N., Bai, X., Pan, D., Dong, B., Wei, R., Naik, N., Patil, R. R., & Guo, Z. (2021). Recent advances in asymmetric supercapacitors. *Advanced Materials Interfaces*, 8, 2001710.
- Xiao, R., Shen, Z., Si, R., Polaczyk, P., Li, Y., Zhou, H., & Huang, B. (2022). Alkali-activated slag (AAS) and OPC-based composites containing crumb rubber aggregate: Physico-mechanical properties, durability and oxidation of rubber upon NaOH treatment. *Journal of Cleaner Production*, 367, 132896.
- Yan, X., Liu, J., Khan, M. A., Sheriff, S., Vupputuri, S., Das, R., Sun, L., Young, D. P., & Yan, Z. (2020). Effective solvent-free microwave irradiation synthesis of highly conductive polypropylene nanocomposites with low-loaded carbon nanotubes. *ES Materials & Manufacturing*.
- Yang, Y. S., & Lee, L. J. (1988). Microstructure formation in curing of unsaturated polyester resins. *Polymer*, 29(10), 1793–1800.
- Yang, D., Wang, P., Chen, W., Liu, L., Huang, Y., Xiang, X., Wang, G., & Wu, J. (2025). Effects of red mud, desert sand, and ground granulated blast furnace slag on the mechanical properties and microstructure of fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 468, 140471.
- Yin, P., Huang, L., Yan, L. B., & Zhu, D. J. (2016). Compressive behavior of concrete confined by CFRP and transverse spiral reinforcement. Part A: Experimental study. *Materials and Structures*, 49, 1001–1011.
- Zega, C. J., & Di Maio, Á. A. (2011). Recycled fine aggregate for structural concrete requirements of durability. *Waste Management*, 31(11), 2336–2340.

- Zegardło, B., Szeląg, M., Ogrodnik, P., & Bombik, A. (2018). Physico-mechanical properties and microstructure of polymer concrete with recycled glass aggregate. *Materials*, 11, 851.
- Zhang, M., & Singh, R. P. (2004). Mechanical reinforcement of unsaturated polyester by Al₂O₃ nanoparticles. *Materials Letters*, 58(3–4), 408–412.
- Zhang, X., Du, M., Fang, H., Shi, M., Zhang, C., & Wang, F. (2021). Polymer-modified cement mortars: Their enhanced properties, applications, prospects, and challenges. *Construction and Building Materials*, 299, 124290.
- Zhou, Y., Wu, S., Ma, Y., Zhang, H., Zeng, X., Wu, F., Liu, F., Ryu, J. E., & Guo, Z. (2020). Recent advances in organic/composite phase change materials for energy storage. *ES Energy & Environment*.
- Zhu, H., Shao, J., Zuo, X., Lei, W., Borito, S. M., Liang, J., & Duan, F. (2020). Effect of waste rubber particles on the mechanical performance and deformation properties of epoxy concrete for repair. *Construction and Building Materials*, 241, 118008.
- Zong, L., Fei, Z., & Zhang, S. (2014). Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. *Journal of Cleaner Production*, 70, 175–182.
- Zukowski, M., & Haese, G. (2010). Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation. *Energy and Buildings*, 42(10), 1402–1408.