

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

PERLİT AGREGALI POLİMER BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Ahmet Taha CİMİNLİ

Danışman: Doç. Dr. H. Alperen BULUT

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Doç. Dr. Ahmet BENLİ

Doç. Dr. H. Alperen BULUT

Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2025

Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. H. Alperen BULUT danışmanlığında, Ahmet Taha CİMİNLİ tarafından hazırlanan bu çalışma 24/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Ahmet BENLİ

İmza:

Üye : Doç. Dr. H. Alperen BULUT

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun / / 2025 tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Perlit Agregalı Polimer Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezini tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 24/02/2025

(İmza)

Ahmet Taha CİMİNLİ

ÖZET

PERLİT AGREGALI POLİMER BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

AHMET TAHA CİMİNLİ

**Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. H. Alperen BULUT

2025, 85 sayfa

Bu çalışma, hafif polimer beton üretimi için yeni bir yaklaşım sunarak farklı reçine ve perlit tiplerinin polimer betonun mekanik performansına etkisini belirleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, polimer betonlarda kuvars agregası yerine ince agregalar ve genişletilmiş perlitler %0, %5 ve %10 oranlarında kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak doymamış polyester reçinesi ile vinilester reçine seçilmiştir. Polimer betonlar üzerinde; taze yoğunluk, basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımları ile UPV, elastisite modülü ve tokluk deneyleri, 7, 28 ve 90 gün sonunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri sonucunda polimer betonların içyapılarındaki değişimler incelenmiştir. Son olarak içerisinde perlit bulunmayan kontrol betonlarının da üretimleri yapılarak deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır. Ham perlit agregası ile polyester reçinesi birleşimi, tüm günler için kontrol betonundan bile daha yüksek basınç dayanımı sonuçlarına ulaştırmıştır. 90 gün sonunda %5 ham perlit agregalı polyester reçineli polimer betonun (PRNP5/90) eğilme dayanımı kontrol betonuna (PRP0/90) göre yaklaşık %13 artış göstermiştir (bu değerler sırasıyla 7.26 MPa ile 6.41 MPa). Yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre vinilester reçineye göre polyester reçinenin, genişletilmiş perlit agregasına göre de ham perlitin kullanıldığı polimer betonlardan daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bağlayıcı reçine tipi, perlit tipi ve oranı, kür süresi gibi parametreler, polimer betonların UPV sonuçları üzerinde etkili olmuştur. Ham perlit agregalı vinilester reçineli polimer betonların elastisite modülü değerleri ile toklukları, polyester reçineli polimer betonlardan daha yüksek elde edilmiştir. SEM analiz sonuçları ile deney sonuçları birbirleriyle uyum göstermiştir. Tüm deneysel sonuçlar göz önüne alındığında ideal perlit tipi ve oranının %5 ham perlit agregası olduğu ortaya çıkarılmıştır. Literatürden farklı ve özgün bir şekilde çok daha düşük reçine oranı ile (%15)

mekanik performansı yüksek polyester/vinilester reçineli özellikle ham perlit agregalı hafif polimer betonlar retilenbilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer beton, Perlit, Reçine, Mekanik zellikler, UPV, Gerilme-şekil değiştirme eğrisi, SEM



ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF PERLITE AGGREGATE POLYMER CONCRETES

Ahmet Taha CİMİNLİ

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

Department of Civil Engineering

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

2025, 85 pages

This study was conducted to determine the effect of different resin and perlite types on the mechanical performance of polymer concrete by presenting a new approach for the production of lightweight polymer concrete. For this purpose, natural and expanded perlites were used as fine aggregate instead of quartz aggregate in polymer concretes at ratios of 0%, 5% and 10%. Unsaturated polyester resin and vinylester resin were selected as binder materials. Fresh density, compressive, flexural, splitting tensile strength, UPV, elasticity modulus and toughness tests were carried out on polymer concretes after 7, 28 and 90 days. In addition, changes in the internal structures of polymer concretes were examined as a result of SEM (scanning electron microscope) analyses. Finally, control concretes without perlite were also produced and experimental results were compared. The combination of natural perlite aggregate and polyester resin achieved higher compressive strength results than the control concrete for all days. At the end of 90 days, the flexural strength of 5% natural perlite aggregate polyester resin polymer concrete (PRNP5/90) increased by approximately 13% compared to the control concrete (PRP0/90) (these values are 7.26 MPa and 6.41 MPa, respectively). According to the splitting tensile strength results, better results were obtained from polymer concretes in which polyester resin was used compared to vinylester resin and natural perlite was used compared to expanded perlite aggregate. Parameters such as binder resin type, perlite type and ratio, and curing time were effective on the UPV results of polymer concretes. The elasticity modulus values and toughness of vinylester resin polymer concretes with natural perlite aggregate were higher than those of polyester resin polymer concretes. SEM analysis results and experimental results are consistent with each other.

Considering all experimental results, it was revealed that the ideal perlite type and ratio was 5% natural perlite aggregate. Different from the literature and uniquely, lightweight polymer concretes with high mechanical performance polyester/vinylester resin, especially natural perlite aggregate, could be produced with a much lower resin ratio (15%).

Keywords: Polymer concrete, Perlite, Resin, Mechanical properties, UPV, Stres-strain curve, SEM



TEŞEKKÜR

Çalışmam sürecinde benden desteklerini esirgemeyen, her zorlandığım konuda bana bir ışık olan, değerli bilgi ve birikiminden yararlandığım kadar insani ilişkilerde de sonsuz desteğiyle gelişimime katkı sağlayan kıymetli danışman hocam Doç. Dr. H. Alperen BULUT'a en derin saygılarımla teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez çalışmam sürecinde, sağladığı katkılar için yanımda bulunan değerli ailem ve arkadaşlarıma verdikleri destekler için minnettarım. Son olarak bu tez çalışması, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FYL-2024-972 proje kapsamında desteklenmiştir.

Ahmet Taha CİMİNLİ

Şubat, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı ve Özgünlüğü.....	4
1.2. Araştırmanın Önemi	4
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Polimerler ve Tarihi Gelişim Süreci.....	5
2.2. Polimerlerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması.....	6
2.2.1. Termoplastikler.....	7
2.2.2. Termosetler	7
2.2.3. Elastomerler.....	8
2.3. Polimer Malzemelerin Diğer Bileşenleri.....	10
2.3.1. Solvent.....	10
2.3.2. Plastifiyanlar.....	11
2.3.3. Stabilizanlar	11
2.3.4. Dolgu Maddeleri.....	11
2.3.5. Pigmentler.....	12
2.3.6. Katkı Maddeleri.....	12
2.4. Polimerlerin Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	12
2.5. İnşaat Mühendisliği Alanında Polimerler	13
2.5.1. Polimer emdirilmiş beton (Polymer impregnated concrete: PIC)	15
2.5.2. Polimer ile modifiye edilmiş beton (Polymer modified concrete: PMC).....	16
2.5.3. Polimer beton (Polymer concrete: PC).....	17
2.6. Polimer Beton Ürünlerinin İmalat Teknolojisi.....	20
2.6.1. Kalıplar	20
2.6.2. Polimer betonun yoğunlaştırılması.....	21
2.7. Polimer Betonun Kullanım Alanları.....	21

2.7.1. Onarım.....	21
2.7.2. Prekast polimer betonlar.....	21
2.7.3. Yollar.....	22
2.8. Bağlayıcı Malzemeler.....	22
2.9. Perlit	25
2.10. Perlitin Yapısal Uygulamaları	28
2.11. Genleştirilmiş perlit	28
2.12. Kaynak Özetleri.....	30
3. YÖNTEM	35
3.1. Materyal.....	35
3.1.1. Reçineler.....	35
3.1.2. Agregalar	35
3.1.3. Doğal ve genleştirilmiş perlit agregaları	37
3.1.4. Sertleştirici ve hızlandırıcı malzemeler	39
3.2. Beton Karışım Hesabı.....	39
3.3. Polimer Beton Üretimi ve Deney Prosedürü	41
4. BULGULAR	44
4.1. Taze Yoğunluk	44
4.2. Basınç Dayanımı	45
4.3. Eğilme Dayanımı.....	47
4.4. Yarmada Çekme Dayanımı	51
4.5. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)	54
4.6. Elastisite modülü ve Tokluk.....	58
4.7. Polimer Betonların İçyapıları	63
5. SONUÇLAR.....	66
KAYNAKÇA	68

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Epoksi reçinenin özellikleri.....	23
Tablo 2. Polyester reçinenin özellikleri.....	24
Tablo 3. Ham perlitin fiziksel özellikleri.....	27
Tablo 4. Ham perlitin kimyasal özellikleri.....	27
Tablo 5. Genleştirilmiş perlitin tipik kimyasal analizi	29
Tablo 6. Reçine özellikleri.....	35
Tablo 7. Kuvvars agregasının özellikleri.....	37
Tablo 8. Perlit agregasının özellikleri.....	38
Tablo 9. Sertleştirici ve hızlandırıcı özellikleri	39
Tablo 10. Beton karışım hesabı (kg/m ³).....	40
Tablo 11. Deney prosedürü	42
Tablo 12. Polimer betonların basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanım sonuçları	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Termoplastik polimer zinciri	7
Şekil 2. Termoset plastik polimer zinciri	8
Şekil 3. Termoplastikler ve termosetlerin molekül yapıları	8
Şekil 4. Elastomer zincirlerinin çekme kuvveti altındaki davranışı	9
Şekil 5. Termosetler ve elastomerler arasındaki çapraz bağ yoğunluk farkı.....	9
Şekil 6. Polimerlerin betonda üç farklı kullanımı	14
Şekil 7. Polimer malzeme ile kaplanan fabrika sahası ve stadyum	22
Şekil 8. Kayaç haldeki perlit (A), ham perlit (B) ve genleştirilmiş perlitin (C) görünümü.....	26
Şekil 9. Granülometri eğrisi.....	36
Şekil 10. Elek analizi sonrası kuvars agregaları ve çakılın görüntüleri.....	36
Şekil 11. Kuvars agregalarının SEM görüntüsü	37
Şekil 12. Elek analizi sonrası perlit agregalarının görüntüleri	38
Şekil 13. Doğal perlit (a) ve genleştirilmiş perlit (b) agregalarının SEM görüntüleri.....	39
Şekil 14. Üretim sonrası polimer betonların görüntüleri	41
Şekil 15. Taze yoğunluk (a), basınç dayanımı (b), eğilme dayanımı (c), yarmada çekme dayanımı (d), UPV (e) ve elastisite modülü (f) deney görüntüleri	42
Şekil 16. Polimer betonların taze yoğunlukları	44
Şekil 17. Polimer betonların basınç dayanımları.....	46
Şekil 18. Polimer betonların eğilme dayanımları	48
Şekil 19. VREP5/7' nin kırılma modu	50
Şekil 20. Polimer betonların taze yoğunluk ve dayanım sonuçları arasındaki ilişkiler...	50
Şekil 21. Polimer betonların yarmada çekme dayanımları.....	51
Şekil 22. PRNP5/7' nin kırılma modu.....	53
Şekil 23. Polimer betonların UPV değerleri	55
Şekil 24. Polimer betonların UPV ve dayanım sonuçları arasındaki ilişkiler a) Basınç dayanımı - UPV, b) Eğilme dayanımı - UPV, c) Yarmada çekme dayanımı - UPV.	56
Şekil 25. Polimer betonların elastisite modülleri	58
Şekil 26. Polimer betonların toklukları	60
Şekil 27. Polyester reçineli polimer betonların gerilme-şekil değiştirme eğrisi	61
Şekil 28. Vinilester reçineli polimer betonların gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	62

Şekil 29. Polyester reçineli polimer betonların SEM görüntüleri, a: Kontrol betonu (PRP0),
b: %10 ham perlitli polimer beton (PRNP10), c: %10 genleştirilmiş perlitli polimer beton
(PREP10).....63

Şekil 30. Vinilester reçineli polimer betonların SEM görüntüleri, a: Kontrol betonu (VRP0),
b: %10 ham perlitli polimer beton (VRNP10), c: %10 genleştirilmiş perlitli polimer beton
(VREP10). 65



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde
°C	Derece
kg	Kilogram
m	Metre
MPa	Mega pascal
UPV	Ultras ses geçiş hızı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
RILEM	Uluslararası Malzeme ve Yapılar Araştırma ve Test Laboratuvarları Birliğı
N	Newton
mm	Milimetre
dm	Desimetre
kN	Kilonewton
cal	Kalori
g	Gram
D _{max}	Betonda kullanılan agrega çapının en yüksek boyutu
cm	Santimetre
s	Saniye
GPa	Giga pascal

1. GİRİŞ

Çimento, agrega ve sudan oluşan geleneksel betonlardan farklı bir şekilde, polimerik bağlayıcılar ile agregaların bir araya getirilerek üretildiği kompozit malzemeler, polimer beton olarak adlandırılmaktadır (Bărbuță vd., 2010; Juenger vd., 2011; Manda vd., 2024). Polyester (Loos, M., 2015; Ouahim vd., 2019), vinilester (Mullins vd., 2012; Ohama, Y., 1995) ve epoksi (Lithner vd., 2011; Wang vd., 2019) reçine gibi bağlayıcıların, sertleştirici ve hızlandırıcı kimyasal malzemeler eşliğinde agregalar ile birleşerek çapraz bağlı bir kompozitin üretilmesi ile polimer betonlar elde edilmektedir (Gorninski vd., 2004; Nodehi vd., 2024). Polimer betonların geleneksel betonlara göre üstün mukavemet, gelişmiş dayanıklılık, kimyasal etkilere karşı yüksek direnç gibi avantajları, yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Aydın, 2024; Yin vd., 2016; Zhang vd., 2021). Ayrıca ekonomik fayda açısından polimer betonların sahip oldukları hızlı kür süresi sayesinde proje sürelerinde önemli ölçüde azalmalar meydana gelmiştir (Salami vd., 2024). Polimer betonlar; kanalizasyon ve yer altı borulama uygulamalarında, onarım, güçlendirme ve rehabilitasyon gibi inşaat endüstrisinin pek çok alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Haddad ve Kobaisi, 2012; Holthausen ve Raupach, 2015; Tabatabaeian vd., 2019).

Hafif agregalar, düşük birim hacim ağırlıkları ile beton üretimlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Jagarapu vd., 2018). Betonun ölü ağırlığını azaltması, durabilite, akustik ve termal özellikleri iyileştirmesi gibi avantajlar, hafif agregalar sayesinde mümkün olabilmektedir (Bulut, 2024; Polat vd., 2010). Literatürde hafif betonlar üretebilmek amacıyla kullanılan hafif agrega çeşitleri arasında genleştirilmiş perlit (Top vd., 2020), scoria (Islam vd., 2022), diatomit (Haddadian vd., 2023), pomza (Numan vd., 2019), vermikülit (Neto vd., 2023), arduvaz (Omar ve Hassan, 2021) ve genleştirilmiş şist (Khan vd., 2018) gibi malzemeler yer almaktadır. Volkanik kökenli silisli bir yapıya sahip olan perlitler, 900 ile 1200 °C sıcaklık seviyelerinde ısı işleme tabi tutulduklarında hacimsel olarak genişleyerek genleştirilmiş perlite dönüşürler (Nodehi, 2021). Yoğunluğu yaklaşık 240 kg/m³ olan genleştirilmiş perlitlerin %35 civarında su emmeye sahip oldukları bilinmektedir (Kumar vd., 2023). Hafif bir malzeme olan perlitler, özellikle üstün performanslı ısı yalıtımı özellikleri ve kimyasal olarak inert bir malzeme oluşları nedeniyle harç ve betonlarda çokça tercih edilmektedir (Yoon vd., 2015).

Polimer betonların mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar, literatürde gün geçtikçe artmaktadır (Gao vd., 2019; Hashemi vd., 2018; Yang vd., 2024). Örneğin, geleneksel betona göre polyester reçineli polimer betonların yaklaşık 4 kat daha fazla çekme dayanımlarının elde edildiği (Chen vd., 2018), benzer hasar durumlarına rağmen daha dar çatlakların oluştuğu (Abbasnejadfar vd., 2022), basınç dayanımlarının önemli ölçüde arttığı (Cai vd., 2022) bildirilmiştir. Vipulanandan ve Paul (Vipulanandan ve Paul, 1990) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda, polimer betonların mekanik özelliklerinden basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü arasında güçlü bir bağın olduğu ortaya çıkarılmıştır. %15 uçucu kül kullanılarak üretilen polimer betonların basınç ve eğilme dayanımlarının sırasıyla %30 ve %15 arttığı, bir başka çalışmada belirtilmiştir (Rebeiz vd., 2004). Gorninski ve arkadaşları (Gorninski vd., 2007), polimer betonların mekanik özellikleri üzerinde ortoftalik bazlı polyesterin izoftalige göre daha iyi performans sergilediğini ifade etmiştir.

Bir diğer çalışmada (Jo vd., 2008), geri dönüştürülmüş agregalı polimer betonların mekanik özellikleri incelenmiş, geri dönüştürülmüş agrega oranı arttıkça polimer betonların basınç dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir. Jamshidi ve Pourkhorshidi (Jamshidi ve Pourkhorshidi, 2012), polyester ve modifiye polyester reçineleri ile ürettiği polimer betonların mekanik özelliklerini kıyaslamıştır. Buna göre modifiye polyester reçineli polimer beton %15 daha yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. Metakaolin ve uçucu kül kullanımının polimer betonların basınç dayanımı ile elastisite modülünü iyileştirdiği başka bir çalışmada vurgulanmıştır (Shicong ve Chi-Sun, 2013).

Epoksi, polyester ve vinilester reçine ile üretilen polimer betonların her üç reçine tipi içinde 100 MPa basınç dayanımına ulaştığı, Lokuge ve Aravinthan (Lokuge ve Aravinthan, 2013) tarafından bildirilmiştir. Reçine içeriği %20'den %30'a artırıldığında polimer betonların mekanik özelliklerinin tamamında iyileşmelerin gerçekleştiği bir diğer çalışmada belirtilmiştir (Hameed ve Hamza, 2019). Martínez-López ve arkadaşları (Martínez-López vd., 2022), %30 reçine/%70 dolgu maddesi kullanılarak üretilen polimer betonların en yüksek elastisite modülü ve basınç dayanımı ile en düşük deformasyonu yaptığını deneysel çalışma sonucunda rapor etmiştir. Her ne kadar reçine içeriği arttıkça polimer betonların dayanımlarında bir artış gözlemlense de yüksek reçine içeriği sonucu rötrede oldukça yüksek artışlar gerçekleştiği, bir başka çalışmada ifade edilmiştir (Lv vd., 2023).

Perlitin beton teknolojisinde agrega olarak değerlendirilerek mekanik özelliklerin incelendiği çalışmalar, literatürde henüz gelişim aşamasındadır. Örneğin, genleştirilmiş perlit kullanılarak üretilen hafif betonların basınç dayanımlarında azalmaların gerçekleştiği belirtilmiştir (Sengül vd., 2011). Türkmen ve Fındık (Türkmen ve Fındık, 2013), harç içerisinde belirli oranlarda cüruf ile birlikte genleştirilmiş perlitlerin kullanımının harçların 28 günlük basınç dayanımını iyileştirdiğini ortaya çıkarmışlardır. Normal ve yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen hafif betonlarda scoria kullanımına kıyasla perlit kullanımının daha düşük basınç dayanımına sahip betonlar elde edilmesine neden olduğu bir diğer çalışmada bildirilmiştir (Aslani ve Ma, 2018). Wan ve arkadaşları (Wan vd., 2018) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda ise perlit oranı arttıkça kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerinde azalmalar meydana gelmiştir. Grzeszczyk ve Janus (Grzeszczyk ve Janus, 2021), reaktif pudra betonu üretiminde yer alan genleştirilmiş perlitin, bu betonların dayanımı üzerinde etkisinin sınırlı olduğunu ifade etmiştir. Özellikle genleştirilmiş perlitin çimentolu kompozitlerin dayanım parametreleri üzerinde olumsuz bir etki yarattığını ortaya koyan çalışmalar da mevcuttur (Jiang vd., 2022; Khan vd., 2021). Doğal perlitin beton üretiminde ince agrega yerine farklı oranlarda kullanıldığı bir çalışma sonucunda (Ragul vd., 2022), %15 oranının sınır değer olduğu ve bu oran aşıldığında kontrol betonuna göre basınç dayanımı kaybının %13 olarak bulunduğu bildirilmiştir. Bakhshi ve arkadaşları (Bakhshi vd., 2023a) yaptığı çalışma sonucunda her ne kadar genleştirilmiş perlit kullanımının betonun basınç dayanımını düşürse de betonun enerjiyi dağıtma potansiyelini geliştirerek çatlak yayılmasını kontrol ettiğini ifade etmiştir. Bulut (Bulut, 2024), hafif beton üretebilmek amacıyla doğal perlitli %0'dan %100'e kadar agrega olarak kullanmış ve 90 günlük en yüksek basınç dayanımına %10 perlitli hafif betonda 62.42 MPa ile ulaşmıştır. Ayrıca perlitli betonlar ile UPV (ultrases geçiş hızı) değerleri açısından üstün nitelikli betonların üretilebileceğini ortaya çıkarmıştır. Genleştirilmiş perlit agregalarının çimento harcının dayanımı ile dinamik elastisite modülü üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışma sonucunda (Alexa-Stratulat vd., 2024), genleştirilmiş perlit oranı arttıkça harçların basınç ve eğilme dayanımlarının sırasıyla %30.71 ile %50 kadar azaldığı belirtilmiştir. Dinamik elastisite modülü değerlerinin ise %20 genleştirilmiş perlit oranına kadar kontrol karışımıyla benzer elde edildiği vurgulanmıştır.

Yukarıda belirtilen hususlar doğrultusunda, bu çalışma, farklı reçine tiplerine sahip polimer beton üretimlerinde iki farklı tip perlitli agrega olarak çeşitli oranlarda kullanarak mekanik özelliklere etkisini derinlemesine değerlendirebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, polimer betonlarda kuvars agregası yerine ince agrega olarak ham perlit ile genleştirilmiş

perlitler %0, %5 ve %10 oranlarında kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak doymamış polyester reçinesi ile vinilester reçine seçilmiştir. Elde edilen polimer betonlar üzerinde; taze yoğunluk, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, UPV, elastisite modülü ve tokluk deneyleri, 7, 28 ve 90 gün sonunda kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri sonucunda polimer betonların içyapılarındaki değişimler incelenmiştir. Son olarak içerisinde perlit bulunmayan kontrol betonlarının da üretimleri yapılarak deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır.

1.1. Araştırmanın Amacı ve Özgünlüğü

Öncelikle hem ham perlit hem de geliştirilmiş perlitlerin agrega olarak polimer beton üretimlerinde değerlendirildiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmanın birçok yönden çığır açıcı ve özgün olduğunu gösteren yanları aşağıda verilmiştir.

1. İlk kez bu çalışma sayesinde ham perlit ve geliştirilmiş perlit agregalarının polyester ve vinilester reçineler ile sergileyebilecekleri uyum sonucu elde edilen polimer betonların mekanik özellikleri üzerinde etkileri incelenecektir.
2. Perlit agregaları farklı oranlarda kullanılacağından dolayı hangi perlit tipi ve oranının hangi reçine ile daha iyi performans göstereceği belirlenerek, bu çalışmanın literatüre bir referans çalışma olarak gireceği değerlendirilmektedir.
3. Üretilecek farklı parametrelere sahip polimer betonların erken (7 gün), orta (28 gün) ve ileri (90 gün) yaştaki mekanik özelliklerinin detaylı incelenmesi sonucunda bu betonların her yaşa dair kıyaslaması literatüre ilk kez kazandırılacaktır.
4. Hafif agrega kapsamına giren ham perlit ile geliştirilmiş perlit agregaları sayesinde hafif polimer betonlar elde edilerek bu alana yönelik çalışmaların artacağı düşünülmektedir.

1.2. Araştırmanın Önemi

Literatürde perlitlerin agrega olarak beton üretimlerinde değerlendirildiği sınırlı sayıdaki çalışma göz önüne alındığında, bu kapsamlı çalışmadan elde edilecek sonuçların literatüre katkısının son derece önemli olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Polimerler ve Tarihi Gelişim Süreci

Polimer malzeme ilk olarak, bitki özü ve hayvan bağırsağından ortaya çıkmıştır (Cowie, 2000). Fakat modern anlamda polimer malzemenin kökenleri, 19. Yüzyılın sonlarına dayanmaktadır (Paul ve Newman, 2013). Bu bağlamda ilk sentetik polimer malzeme bu dönemde keşfedilmiştir (Aydın, 2024).

Polimer malzemeler ilk olarak 1839'da Simon'un stiren ve 1863'te Schönbein'in selüloz nitratlar üzerinde yaptıkları çalışmaları ile bilim tarihinde yerini almıştır (Pişkin, 1987). Hyatt J. W. 1800'lü yılların sonuna gelindiğinde, pamuk selülozunu ve nitrik asiti karıştırarak yarı sentetik ilk polimer malzemeyi ortaya çıkarmıştır (Ateş, 1994). Tam anlamıyla bakalit ilk sentetik polimer malzeme olarak Baekeland L.H. tarafından 1900'lerin başında bulunmuştur (Saçak, 2005). Polimer malzeme de çığır açacak bir buluş 1924 yılında Staudinger H. tarafından ortaya çıkarılmıştır (Yıldırım, 2019). Polimer kimyasına, Staudinger H. tarafından ortaya atılan "makro molekül hipotezi" büyük bir katkı sağlamıştır. Ayrıca Staudinger, bu çalışmasıyla Nobel ödülü kazanmıştır (Ateş, 1994).

Staudinger'in makro molekül hipotezi ilerleyen yıllarda polimer üretiminin ortaya çıkışına öncü olmuştur. 1900' lü yılların ilk çeyreğinde polivinil klorür, selüloz asetat, üreformaldehid ve polimetilmetakrilat reçineleri üretilmiştir (Ateş, 1994). 1930'lara gelindiğinde başlangıçta ortaya çıkarılan polistiren ve devamındaki süreçte butadien-stiren kopolimer ürünleri polimer kimyasında önemli malzemeler olarak yerlerini almışlardır. Farklı bir sentetik kauçuk malzeme olan neopren 1930'lu yılların başında üretilmiştir (Özden Akkaya, 2010). Polimerizasyonun doğrusal kondenzasyonu ile poliamid ve poliester üretimi konusundaki çalışmayı ilk kez Carothers W. gerçekleştirmiştir (Ateş, 1994). 1937 ve 1947 yılları arasında poliüretan, politetrafloroetilen ve doymamış polyester üretimleri başlamıştır. 1947 yılına gelindiğinde epoksi reçineler ortaya çıkarılmıştır (Bulut, 2016).

Polimerlerin tarihçesine inşaat mühendisliği perspektifinden bakıldığında, 1950'li yıllardan itibaren az da olsa polimer beton ve polimer ile yenilenmiş betonun kullanıldığı görülmektedir. 1970'lere gelindiğinde ise polimer emdirilmiş betonların geliştirilmesi neticesinde, polimer malzemelerin tanınırlığı önemli ölçüde artış göstermiştir (Bulut, 2016).

Betonda polimer malzemeler alanında uluslararası ilk kongre Londra’da gerçekleştirilmiştir. Devamındaki süreçte polimerlerin beton kullanımı ile ilişkili uluslararası birçok kongre düzenlenmiştir. Bugüne gelindiğinde ACI’nın oluşturduğu “Beton için Polimerler ve Yapıştırıcılar” adlı bilim komitesi bulunmaktadır. Bu komite betonda polimer malzeme kullanımıyla ilgili standart belirlemeye yönelik çalışmalar yapmaktadır (Bulut, 2016). Polimer malzemelerin yapısı kimyasal açıdan zincir moleküllerinden meydana gelmektedir (Mark, 1996). Doğal veya yapay şekilde üretilebilmektedir ayrıca pek çok alanda kullanılabilirler (Hillmyer, 2014). Bu malzemeler, esneklikleri, dayanıklılıkları, hafif olmaları ve boyutları farklı bir şekilde üretilebilme yetenekleri sayesinde geniş uygulama yelpazesine sahip olmuşlardır (Aydın, 2024).

İlerleyen polimer sektörü günümüzde yeni polimer keşiflerine ışık tutmaktadır. Yenilenebilir enerji sektöründe depolama malzemeleri ve polimer uygulamalarının olduğu alanlarda araştırmalar sürdürülmektedir (Okamoto, 2013). Ayrıca inşaat, otomotiv vb. gibi farklı sektörlerde bu materyallerin kullanımı giderek artmaktadır. Bu materyallerin ortaya çıkması ve geliştirilmesi, polimer sektörünün büyümesine katkı vermektedir (Seymour vd., 2003).

2.2. Polimerlerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması

Polimer kelimesi, çok anlamına karşılık gelen “poli” ve birim molekül manasına gelen “mer” kelimelerinin birleşiminden ortaya çıkmıştır (Ateş, 1994; Özden Akkaya, 2010). Küçük moleküllerin birbiri ardına eklenmesiyle ortaya çıkan yapıya polimer adı verilmektedir (Akman, 1987). Polimeri meydana getiren bağların herhangi birisinde, binlerce veya yüz binlerce monomer bulunmaktadır. Bu küçük moleküllerin ortaya çıkardığı zincirler birbirleri arasında olan kimyasal bağları ve polimer malzemenin karakteristik özellikleri ile ilgili bilgi sağlamaktadır (Oktar, 2023). Küçük moleküllerden oluşan zincirler düz bir yapıda olabileceği gibi çapraz bir yapıda da olabilir. Günümüzde kullanılan polimer malzemelerin çoğunluğu çapraz bağ şeklindedir. Bu şekilde olan polimerler farklı solventlerde çözünmezler, fakat sıvıları absorbe ederek jel ortaya çıkarırlar (Akın, 2017).

Polimerler; organik ve inorganik olmalarına, molekül ağırlıklarına, doğada yer alıp almamasına, sentez biçimine (yapay ve doğal), sentezleme tepkilerine (zincir ya da basamaklı), ısıya karşı davranışına, zincirin yapısına (kopolimer veya homopolimer olarak)

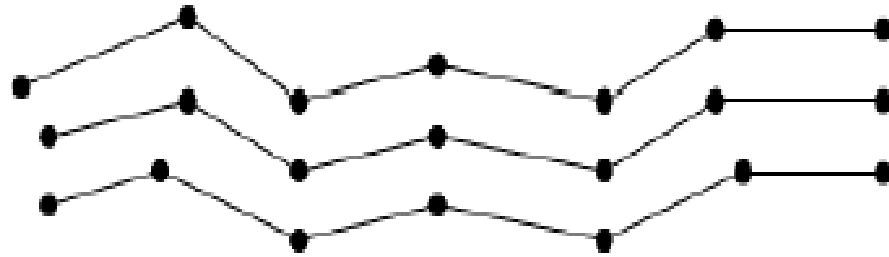
ayrıca zincirin fiziksel ve kimyasal yapısına (çapraz bağlı, dallanmış ve ya lineer) bağlı olarak ayrılabilir (Akın, 2017; Bulut, 2016; Diyarbakır, 2024; Özden Akkaya, 2010; Öztürk, 2013; Uzunboy, 2024). Nihayetinde, polimerlerin işlenme şekline karşı davranışlarına göre de bir ayırım yapılabilir. Bu bağlamda polimerler termosetler ve termoplastikler olarak sınıflandırılmaktadır (Akkovalı, 1993; Akman, 1987; Bulut, 2016).

2.2.1. Termoplastikler

Termoplastik, ısıda eritilen birçok formda biçimlendirilebilen polimer tipleri için ortaya konulan bir kavramdır. Termoplastikleri, lineer polimerler olarak adlandıran kaynaklarda bulunmaktadır (Akın, 2017). Termoplastiklerin en önemli özellikleri,

- Esneklik,
- Şeffaflık,
- Kimyasal direnç,
- Düşük yoğunluk
- Dayanıklılık,
- Isıya karşı dirençli oluşudur (Diyarbakır, 2024; Kandelbauer vd., 2022).

Termoplastikler, “*tıp alanında, plastik kullanımında, otomobil sektöründe, oyuncaklarda ve ambalaj malzemeleri*” gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Aydın, 2024).

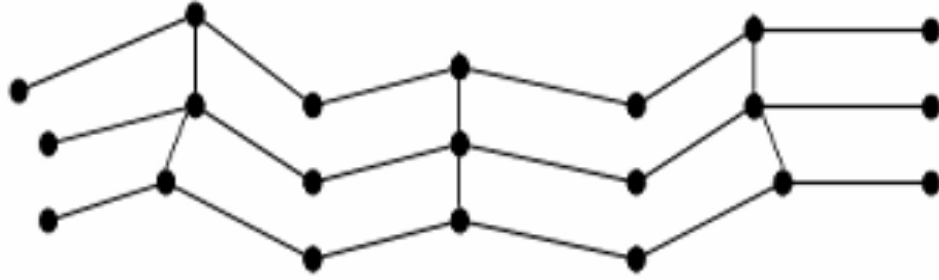


Şekil 1. Termoplastik polimer zinciri (Öztürk, 2013)

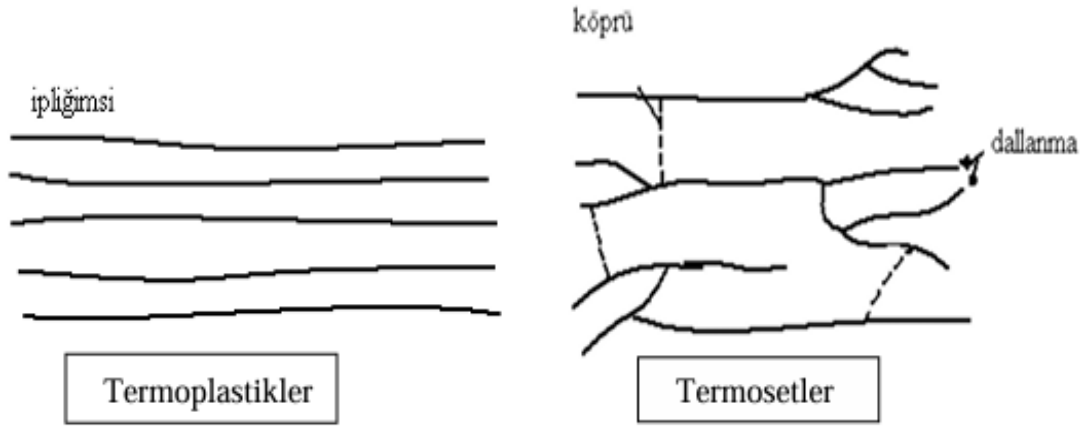
2.2.2. Termosetler

Termosetler, ısı işlem görererek ortaya çıkarılan fakat ısı işlemine tabi tutulduktan sonra tekrar şekil verilemeyen ve geri dönüştürülemeyen bir plastik türüdür (Baydar, 2016). Diğer

taftan, erime niteliğine sahip bulunmaması da termoplastiklere benzer şekilde akıcılık özelliğini elde etmesini engeller (Öztürk, 2013).



Şekil 2. Termoset plastik polimer zinciri (Pişkin, 2010)



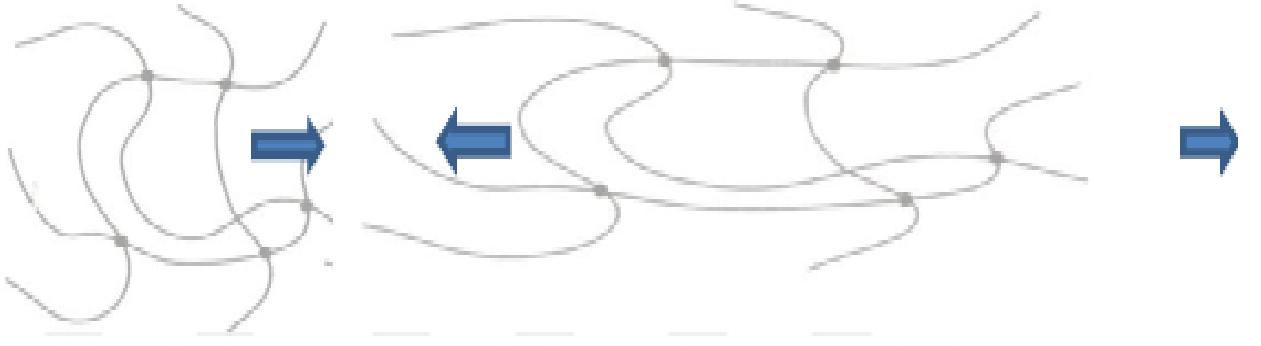
Şekil 3. Termoplastikler ve termosetlerin molekül yapıları (Akman, 1987; Bulut, 2016)

Termosetler, tekerrür edilerek ısı işlem uygulanılsa bile yumuşatılamazlar (Aydın, 2024). Bu kategoriye giren polimerler ise poliüretan, fenoplastlar, poliesterler ve aminoplastlardır (Kurugöl, 1997). En çok tercih edilen termosetler ise amino reçineler, silikonlar, epoksiler, fenolikler, polimideler, polyesterler ve bismaleimidelerdir (Pişkin, 2010).

2.2.3. Elastomerler

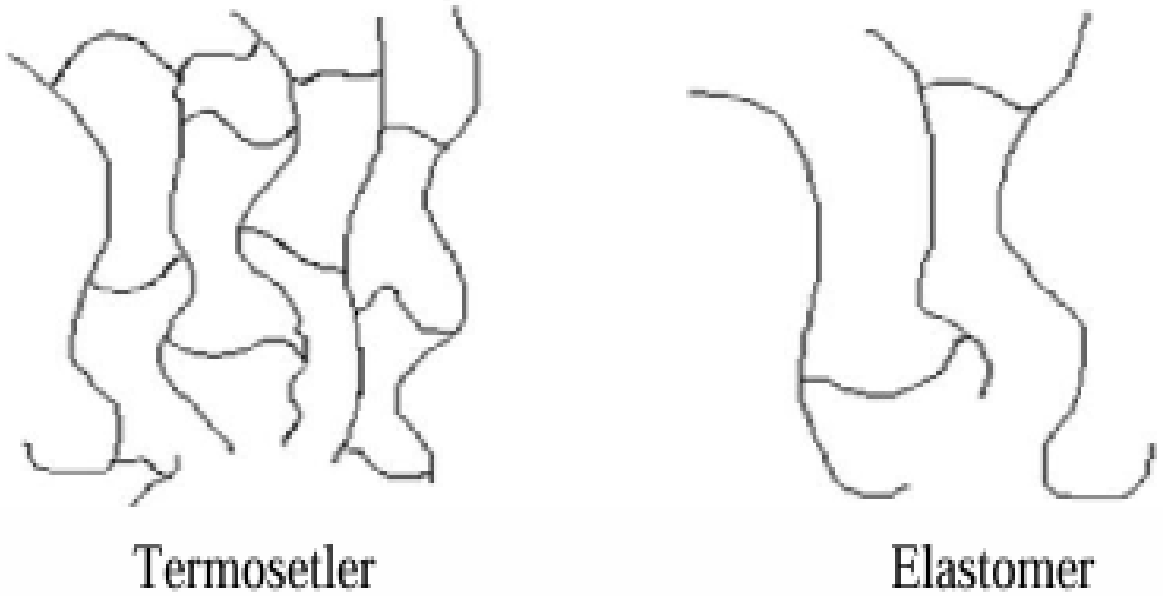
Zincir moleküllerinin yapıları düşük ağırlardan oluşan ve belirli bir şekil alan elastomerlerin zincir molekülleri primer bağlarla geniş açıklıklı ağırlardan meydana gelir. Bu şekilde zincirlerin kayması imkansız olur, ancak zincirlerin yapısında bulunan ağ düğüm noktaları kendi içinde uzanabilir (Topsakal, 2013; Ünal, 2016). Yapı birleşiminin ardından sıvılaşamayan elastomerlerin aynı zamanda ergime nitelikleri de bulunmamaktadır (Ünal,

2016). Bunun yanı sıra yumuşak elastik olan elastomerlerin ilk şeklini alma yeteneği de yüksektir (Akın, 2017; Oktar, 2023). Elastomerler gaz ve sıvıları soğurarak içlerine katabilirler. Elastomerler de kauçuk, polibütadien poliüretan ve poliolefin kauçuk önemli elastomerler arasına girer (Ünal, 2016).



Şekil 4. Elastomer zincirlerinin çekme kuvveti altındaki davranışı (Akın,2017)

Elastomerler ve termosetlerin çapraz bağ yoğunluğundaki farklar Şekil 5.'te sunulmuştur. Şekil 5.'te de görülebileceği gibi, termosetlerde çapraz bağ yoğunluğu oldukça yüksekken, elastomerler ise daha düşük bir yoğunluk oranına sahiptir (Oğian, 2004).



Şekil 5. Termosetler ve elastomerler arasındaki çapraz bağ yoğunluk farkı (Akın, 2017)

2.3. Polimer Malzemelerin Diğer Bileşenleri

Genellikle farklı malzemelerin birleşimiyle meydana gelen kompleks yapılar polimer malzemeleri oluşturur. Polimerin bileşenleri, özelliklerini değiştirmek ve performansını yükseltmek ya da seçili uygulamalar için optimum düzeye getirmek amacıyla kullanılır ve bunların kullanım alanlarını tayin eden önemli unsurlardır. Solventler, stabilizatörler, plastifiyanlar, pigmentler ve dolgu maddeleri bu bileşenler arasında bulunmaktadır (Utracki, 1998). Malzemelerin dayanıklılığını ve kalitesini uygun bileşen kullanımı artırırken, uygun olmayan bileşenlerin kullanımı ise negatif etkiler yaratabilir (Aydın, 2024; Pilato & Wicks, 2012). Dolayısıyla bu malzemelerin tasarım ve üretim süreçlerinde bileşenlerin özenle seçilmesi büyük önem taşır (Agrawal ve Dhami, 2012). Teknikte kullanım hedeflerine uygun bir şekilde birden fazla yan malzemeye karıştırılırlar (Aydın, 2024; Bayram, 2015).

2.3.1. Solvent

Solventler, polimer malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan maddelerdir ve genellikle polimerin çözünürlüğünü artırmak ve reaksiyon sürecinde malzemenin viskozitesini azaltmak amacıyla kullanılırlar (Aydın, 2024). Ayrıca, solventler kaplama, boyama ve baskı gibi çeşitli uygulamalarda da önemli bir rol oynar (Agrawal & Dhami, 2012). Aseton, metanol, etanol, kloroform ve asetik asit en çok kullanılan solventler arasındadır (Aydın, 2024). Ancak, solventlerin bazı olumsuz yönleri de vardır. Özellikle yüksek yanıcılık ve toksisite gibi özellikleri, çalışanlar ve çevre açısından önemli riskler taşımaktadır (Utracki, 1998).

Solventler, renksiz ve berrak özellikte olup, işlem süreçlerinde büyük kolaylık sağlayan maddelerdir. Bu maddeler buharlaşma hızlarına göre üç gruba ayrılabilirler (Özden Akkaya, 2010; Öztürk 2013). Bu gruplar şu şekildedir:

- ❖ Yavaş buharlaşan solventler; glycol, cyclohexanol
- ❖ Orta hızda buharlaşan solventler; cyclohexanone, butanol, xilen
- ❖ Hızlı buharlaşan solventler; benzin, eter, aseton (Bulut, 2016; Diyarbakır, 2024; Öztürk, 2013).

2.3.2. Plastifiyanlar

Bu maddeler, akışkanlığı az olan sıvı ya da katı formda olup plastiklere esneklik özelliği vererek düşük sıcaklıklarda bile elastik kalma imkanı sağlar (Diyarbakır, 2024). Kaliteli plastifiyanlar karışım içerisinde homojen bir şekilde dağılır ve buharlaşmazlar (Özden Akkaya, 2010). Sulandırıcılar da bu grupta yer almakta olup solvent değildirler; polimerin çökmesini engelleyerek solüsyonu sulandırır. Bir örnek olarak bu malzemelere klorlanmış parafin verilebilir (Akman, 1987).

Ftalatlar, adifatlar ve trimellititler, en yaygın kullanılan plastifiyanlar arasında yer alır. Ancak, bazı plastifiyanlar insan sağlığı açısından zararlı olabildiğinden, çevreye ve sağlığa olumsuz etkileri nedeniyle yasaklanmıştır (Aydın, 2024; Crawford, 2002).

2.3.3. Stabilizanlar

Stabilizanlar, çok düşük oranlarda (yüzde veya binde) eklenerek ultraviyole ışınlarının etkisiyle ve yüksek sıcaklığa maruz kalan plastik malzemelerin bozulmasını önlemek amacıyla kullanılan maddelerdir (Bulut, 2016). Bu maddeler genellikle metallerin organik tuzları olup, toksik özellik taşırlar (Öztürk, 2013). Örneğin kadmiyum, baryum, stronsiyum, kalay ve kurşun gibi metaller stabilizan olarak kullanılır (Özden Akkaya, 2010).

2.3.4. Dolgu maddeleri

Dolgu maddeleri, polimer malzemelerin maliyetlerini azaltmak ve niteliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan katkı maddeleridir ayrıca polimer matrisin mukavemetini, aşınma direncini, yangın dayanımını, ısı iletkenlik, sertlik vb. özelliklerini iyileştirmek için kullanılırlar (Aydın, 2024; Pilato & Wicks, 2012).

Polimer matrisine bağdaşık olarak dağıtılabilen veya makul oranlarla karıştırılarak eklenen dolgu maddeleri, karıştırılan malzemenin niteliklerinde farklılaşmaya yol açar. Farklı türleri olan dolgu maddelerinin doğal halde bulunan örneklerine saman, ahşap unu, kenevir, mısır koçanı ve çeltik kabuğu gibi malzemeler verilebilirken, sentetik dolgu maddelerine ise fiber silika kalsiyum karbonat, cam elyafı, karbon fiber, titanyum dioksit, talk vb. maddeler örnek olarak verilebilir (Aydın, 2024; Sperling, 2006).

2.3.5. Pigmentler

Çoğunlukla boya sanayisinde tercih edilen pigmentler genel olarak renklendirme işlemlerinde fayda sağlanan maddelerdir. Ancak, pigmentlerin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için bu maddelerin sıcaklık ve ultraviyole ışınlarına karşı korunması önemlidir. Mineral kökenli pigmentler, kararlılıklarını koruyarak üstün örtme kabiliyetleri sayesinde uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir (Bulut, 2016; Özden Akkaya, 2010; Öztürk, 2013).

2.3.6. Katkı maddeleri

Kimyasal veya fiziksel halde olan katkı maddeleri bir malzemeye ya da bileşiğe eklenerek bu malzemeleri iyileştirmek ve niteliklerini değiştirmek amacıyla katılır. Bu maddeler, malzemelerin radyasyon koruması, ısı iletkenlik, sertlik, yangın direnci, mukavemet ve esneklik gibi niteliklerini olumlu ya da olumsuz etkileyebilir (Jones, 1999).

Betonda istenilen özellikleri sağlamak amacıyla kullanılan kimyasal katkı maddelerinin yanı sıra, plastik uygulamalarında da çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri arasında:

- Lübrifanlar (yağlayıcılar): Malzemenin daha kolay şekil almasını sağlamak için eklenir. Bu malzemelere örnek olarak mumlar ve metal sabunlar verilebilir
- Fungicide katkıları: Yosunlara ve mantarlara karşı koruma sağlamak amacıyla kullanılır. Bu malzemelere örnek olarak bakır organik tuzları ve civa verilebilir.
- Kalıp sektöründe kullanılan maddeler: Malzemenin kalıptan kolayca ayrılmasını sağlamak için teflon ve silikon vernik malzemeleri kullanılır.
- Ignifugane katkıları: Ateşin yayılmasını engelleyen maddelerdir. Örnek olarak, klorlanmış parafinler ve antimon tuzları (Bulut, 2016; Diyarbakır, 2024; Özden Akkaya, 2010; Öztürk, 2013).

2.4. Polimer Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Polimer malzemeler farklı niteliklere sahip olan materyallerdir. Bu malzemelerin başta gelen özellikleri iyi işlenebilir ve kullanımı kolay olmalarıdır (Akkurt, 1991). Genellikle düşük yoğunluğa sahip olan bu malzemelerin suya karşı dayanıklılıkları yüksek fakat yüksek sıcaklıklara dayanıklılıkları ise sınırlıdır (Akman, 1987). İç kovalent bağına sahip olup

elektrik ve ısı yalıtkanlığı özellikleri bulunmaktadır. Düşük kayma dirençleri vardır ve kimyasal etkilere, asitlere ve bazlara karşı dayanıklılıkları yüksek olmasına karşın organik solventlere dayanıklı değildirler (Aydın, 2024). Sertlikleri ise metal, seramik ve cama göre daha azdır (Öztürk, 2013).

Polimerlerin yaygın kullanılmasının en önemli nedeni öteki materyallere kıyasla çok kolay ve hızlı bir şekilde üretilibilmeleri, çeşitli kombinasyonların yapılabilmesi ve minimum enerji harcamaları avantaj sağlar. Bu sayede farklı alanlarda kullanılabilirler. Bunun yanı sıra hızlı bir şekilde kür yapılabilmeleri birçok alandaki kullanımını yaygınlaştırmaktadır (Bulut, 2016). Diğer malzemelerle kıyaslandığında polimerler oldukça hafiftir. Bu nitelik, baştaki üretimden taşıma ve enerji kullanımına dek birçok sahada kolaylık sağlar. Mukavemetleri yüksek olmasının yanı sıra hafif bir malzeme olan bazı polimer ürünler kırılmaz özellik göstermektedir (Özden Akkaya, 2010). Basit bir şekilde renklendirilebilir olması sayesinde çeşitli türlerinin oluşturulması mümkündür. Birtakım türleri dışında suya karşı dayanıklılıkları fazlasıyla yüksektir. Kimyasal etkilerine karşı dayanımları yüksek olan polimer malzemeler bu malzemeleri avantajlı materyal haline getirir (Akın, 2017).

Polimer malzemelerin dezavantajlarına gelecek olursak düşük geçirgenliğe sahip olan polimer malzemelerin maliyeti geleneksel betonla kıyaslandığında oldukça yüksektir. Bu maliyet artışı yaklaşık 10-100 kat arasında değişmektedir ve bu durum polimer malzemelerin çok daha küçük ve özel uygulama alanlarında kullanılmasına neden olmaktadır (Aydın, 2024; Bulut, 2016). Yüksek sıcaklıklara karşı zayıf dirençleri vardır. Sıcaklık yükseldikçe bu materyallerde kalıcı hasarlar ortaya çıkabilir; bu gibi olaylarda polimer malzemelerin yaşamsal ortamlardaki taşıyıcı sistemlerde kullanılmasını azaltmaktadır (Özden Akkaya, 2010). Polimer materyallerin oluşturulma aşamasında ki, zehirliliği, alev alabilirliği ve kokusu dezavantajlar arasında yer almaktadır (Fowler, 1999; Ohama, 2008; Rarani vd., 2014; Rebeiz, 1996).

2.5. İnşaat Mühendisliği Alanında Polimerler

İnşaa edilen yapıların uzun süre ayakta kalması ve gerekli dayanıklılıkta olması inşaat mühendisliğinin en kritik unsurlarındandır. İnsanlar bu hedeflere ulaşmak için birçok farklı bağlayıcı özellikleri barındıran materyallerden faydalanarak yapılar kurmuşlardır (Diyarbakır, 2024). Çimentonun icadı, yapı sektöründe bu niteliklerin daha pratik ve hızlıca elde

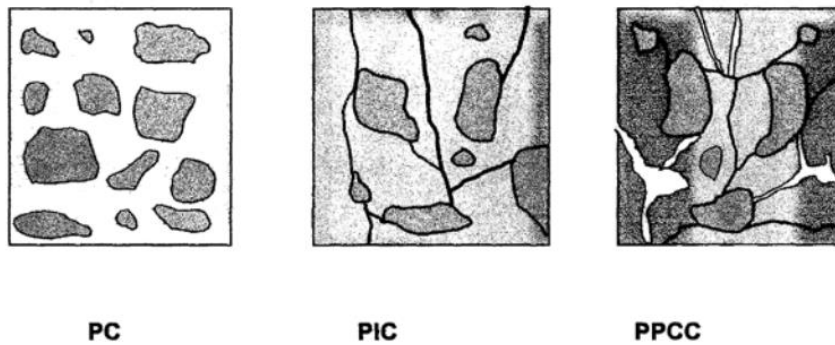
edilmesine olanak sağlamıştır. Fakat 1950’li yıllardan itibaren çimento yerine kullanılabilecek malzemeler üzerine yoğun çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (Bulut, 2016).

Polimerler, öncelikle gövde malzemeleri (pompalar, borular, takım tezgahları) gibi alanlarda kullanılmıştır (Aydın, 2024). Zamanla, gelişen teknoloji sayesinde çimento ile birlikte veya çimento kullanılmadan tamamen polimer bazlı beton üretimine geçilmiştir (Akman, 1987). İnşaat alanında birçok farklı uygulamalarda polimerler tercih edilmektedir. Polimerlerin kullanılmasıyla çekme dayanımı düşük olan betonun geliştirilmesi amaçlanmaktadır (Yıldırım, 2019).

Betonda polimer kullanımı üç ana kategori altında incelenebilir:

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

Polimer emdirilmiş beton, sertleşmiş Portland çimentolu betona bir monomerin emdirilip polimerize edilmesiyle üretilmektedir (Agrawal ve Dhami, 2012). Polimer ile modifiye edilmiş betonların ise en iyi örneği, sıklıkla tercih edilen lateks modifiye betonudur. Beton yapımında karışım suyunun bir miktarı yerine lateks isimli polimerik emülsiyonları katılmasıyla bu malzeme ortaya çıkar (Diyarbakır, 2024). Beton yapımında bağlayıcı için yalnızca polimer materyalin kullanıldığı çimento ve su olmayan beton türüne polimer beton denir. Bu malzemeler bağlayıcı polimer materyal ve agreganın reaksiyonu ile ortaya çıkar (Bulut, 2016). Üç farklı polimer beton grubunu en iyi biçimde özetleyen şekil aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. Polimerlerin betonda üç farklı kullanımı (Bulut, 2016; Özden Akkaya, 2010; Yıldırım, 2019)

Görselde beyaz kalan kısımlar polimer fazını, taralı alanlar agregaları, siyah çizgili kanallar polimerle doldurulmuş boşlukları ve taralı alanlar ise agregaları temsil etmektedir. Polimer beton (PC) uygulamasında, agregaları kuşatan matris komple polimer ile kaplanmıştır ve bu beton türünde çimento hamuru bulunmamaktadır. Polimer emdirilmiş beton (PIC) örneğinde, kılcal boşlukların yanı sıra jel boşluklarının bir miktarı ise polimerle doldurulmuştur. Polimer ile modifiye edilmiş betondaysa (PMC) kılcal yapıya sahip yolların bir miktarıyla birlikte agregaların etrafı polimer filmi ile kaplanmıştır. Bu tür betonda çimento kullanımı da söz konusudur (Bulut, 2016; Özden Akkaya, 2010; Öztürk, 2013).

2.5.1 Polimer emdirilmiş beton (Polymer impregnated concrete: PIC)

Bu beton, sertleştirilmiş halde bulunan çimento betonuna monomerin emdirilmesinin ardından polimerizasyona uğraması sonucu gerçekleşen betondur (Akın ve Polat, 2022; Bulut, 2016). Genellikle matrisin güçlendirilmesi ve çimento agrega bağının güçlendirilmesi için basınçla emdirme, vakum, kurutma, radyasyon ve monomer gibi yöntemler kullanılır (Öztürk, 2013). Polimer Emdirilmiş Beton (PIC), standart betonun dayanıklılığını ve mekaniğini geliştirir (Salami vd., 2024). Bir diğer belirleyici özellik, betondaki polimerleşme sürecinin katılma yöntemiyle gerçekleştirilmesidir; bu sayede kompozit yapıya zarar verebilecek yan ürünlerin oluşumunu engelleyen basamaklı polimerleşmeden kaçınılmış olur (Akın, 2017; Bulut, 2016).

Polimerle doymun hale getirilmiş betonlarda, önceden dökülmüş betona polimer maddesi emdirilerek kılcal boşluklar doldurulmuş ve su geçirmez, yüksek dayanımlı betonlar elde edilmiştir (Pişkin, 2010). İstenilen kalitede polimer emdirilmiş betonu üretmek için fazla miktarda polimer emdirilmeli ve uygulama olarak polimerizasyonun etkin bir şekilde yapılması gereklidir (Yıldırım, 2019).

Polimerle doymun beton üzerine öncüt çalışmalar, ABD’de 20. yüzyılın ortalarında başlamıştır. Betonun dayanıklılığı 35 N/mm²’den 140 N/mm²’ye çıkarılabilmektedir (Fowler, 1999). Bu işlem için beton örnekleri kurutulmuş, vakum yöntemiyle hava boşaltılmış ve en önemlisi PMMA (polimetilmetakrilat) adlı maddeler enjekte edilmiştir. Örnekler, hacimlerinin yaklaşık %8’i kadar PMMA emmiştir. Elde edilen sonuçlarda deformasyon sıfıra inmiş, elastik modül ise normal betona kıyasla iki kat artmıştır (Akkoyalı, 1993). Yukarıdaki çalışmada belirtildiği gibi, polimerle doymun beton hazırlanırken monomer seçimi en kritik

unsurdur. Bugüne gelindiğinde en sık tercih edilen monomerler sıvı halde bulunmaktadır. Özellikle Metilmetakrilat (MMA) kullanılmak üzere vinil asetat, vinil klorür, kolorstiren, stiren vb. monomerler tercih edilmektedir. Kolay polimerleşmeleri, yüksek kaynama noktalarına sahip olmaları ve düşük toksisiteleri bu maddelerin önemli niteliklerindendir (Bulut, 2016). Polimer emdirilmiş betonlar basınç dayanımını 3-4 kat yükseltir ve çekme, eğilme dayanımını artırarak yüksek durabilite sağlarlar. Malzemenin bu özellikleri sayesinde düşük geçirgenlik, donma-çözünme ve asit direnci özellikleri ön plana çıkar bu da malzemeyi inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmasını sağlar (Chen vd., 2006). Kullanım alanına örnek olarak, zararlı atıkların depolanması için yapılan tesisler, köprü tabliyeleri, zemin döşemeleri, borular ve cephe kaplamalarına benzer birçok alanda uygulanmaktadırlar. Bu beton türünün dezavantajları arasında üretim süreçlerinin karmaşıklığı yer alır (ACI, 1993). Ayrıca, Polimerle emdirilmiş betonun inşaat malzemesi olarak kullanımını engelleyen bazı nedenler şunlardır:

- Üretim teknolojileri oldukça karmaşıktır. Ayrıca, harç ve betonun kuruması ile polimerizasyon süreçlerinde yüksek miktarda termal enerji tüketilmekte ve bu da maliyetleri artırmaktadır.
- Performans ile fiyat arasında iyi bir denge sağlanamamaktadır.
- Kalite kontrolü zor olup, yapısal uygulamalardaki güvenilirlikleri zayıftır (Berberoğlu, 2019; Young, 1981).

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

Polimer ile modifiye edilmiş beton (PMC), beton sırasında polimer katkıların eklenmesiyle yapılan standart betona dayanıklı bir alternatiftir (Hammodat, 2021) ve polimer reçine, portland çimentosu ve agregaların harmanlanması ile ortaya çıkar (Esmaeili vd., 2021; Nodehi vd., 2024). Polimerle modifiye edilmiş betonun başka bir kullanım şekli de polimer çimento betonu olarak bilinir. Bunun nedeni, beton henüz taze iken çimentoya polimer malzeme eklenip karıştırılmasıdır (Bulut, 2016). Gerçekleşen olayda, istenilen sertleşmenin ardından monomerin polimerleşmesi, içyapının başta gerçekleştirilen uygulamasına nazaran daha düzgün olmasını sağlamaktadır. Bu yöntemlerden herhangi biri uygulandığında ve sertleşme tamamlandığında, malzemenin permabilitesini azaltır. Hidrokarbon ve nem karşısında direncini artırır. Bunun yanı sıra mukavemet ve gerilmesinde de artış görülür. Ancak birden fazla polimer ve onarım monomeri, agrega, su ve çimento karışımlarıyla uyum göstermeyebilir (Ünal, 2016). Daha önce PVA (polivinil asetat) kullanılarak (stabilizan ve

katkı maddeleri ile) bu uyumsuzluk aşılmaya çalışılsa da, PVA'nın çimentodaki oranı %20 olarak belirlendiğinde, geçirimsizlik ve süneklik sağlansa da dayanım ve elastikiyet modüllerinde kaydadeğer azalmalar görülebilmektedir (Akman, 1987; Ateş, 1994).

PMC'ler, en fazla onarım-yalıtım malzemelerinde, kaldırım taşlarında, kaplamalarda, astar işlemlerinde ve su yapılarında kullanılır. Yerinde döküm uygulaması Polimer ile Modifiye edilmiş betonun pozitif yönlerinden biridir (Bulut, 2016). Yürütülen tetkikler neticesinde her sene 1.2 milyon m²'e yakın donatılar polimer malzemenin kullanımıyla geliştirilmiş beton ile kaplanmaktadır (ACI Manual of Concrete Practice, 1993).

2.5.3 Polimer beton (Polymer concrete: PC)

PC, bir monomer/agrega karışımının polimerizasyonu olan kompozit bir malzeme olup epoksi, polyester veya vinilester gibi ana bağlayıcı madde olarak işlev gören polimerik bir maddenin kullanımını ifade eder (Bedi vd., 2013; Nodehi vd., 2024). Polimerize edilmiş monomer, agregalar için bağlayıcı görevi görür ve ortaya çıkan kompozite "Beton" adı verilir. Polimer beton alanındaki gelişmeler, bu malzemelerin bazı özel uygulamalarda çimento betonunun yerini almak üzere geliştirildiği 1950'lerin sonlarına kadar uzanır (Akman, 1987; Ünal, 2016). Polimer betonun erken kullanımı, bina kaplaması ve benzeri amaçlar için bildirilmiştir. Daha sonra, hızlı kürlenmesi, çimento betona ve çelik takviyeye mükemmel bağlanması, yüksek mukavemeti ve dayanıklılığı nedeniyle onarım malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmıştır (Fowler, 1999). Önceden dökülmüş polimer beton, asit tankları, rögarlar, drenajlar, otoyol orta bariyerleri vb. gibi çeşitli ürünler üretmek için kullanılmıştır (Öztürk, 2013; Pişkin, 2010).

Polimer betonun özellikleri, hazırlama koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Belirli bir polimer beton türü için özellikler, bağlayıcı içeriğine, agregaya boyut dağılımına, mikro dolguların doğasına ve içeriğine, kürlenme koşulları vb. şartlara bağlıdır (Kırlıkovalı, 1981). Polimer beton malzemeler üzerine araştırmanın önemi, 1971 yılında ACI Komitesi 548—Betonda Polimerler'in kurulmasıyla kabul edildi. Komite, polimer betonun özellikleri hakkında geniş bir veri tabanı geliştirmekten sorumluydu. Komite ayrıca polimer beton hakkında son teknoloji raporlar ve kullanıcı kılavuzları yayınladı. RILEM (Uluslararası Malzeme ve Yapılar Araştırma ve Test Laboratuvarları Birliği), TC-105-CPC (Beton Polimer Kompozitler) ve TC-113-CPT (Beton Polimer Kompozitler için Test Yöntemleri) Teknik

Komitelerini kurarak bu malzemeler için çeşitli test yöntemlerinin hazırlanmasında etkili oldu. Japonya Malzeme Bilimi Derneği (JSMS) de Sentetik Reçineler-Beton Komitesi'nin yardımıyla polimer beton malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulundu. Japonya Malzeme Bilimi Derneği ayrıca polyester beton yapılar için tasarım önerileri ve bir karışım tasarım kılavuzu yayınladı. Polimer beton kompozitleri kullanan ülkeler arasında, çeşitli test yöntemleri ve uygulamaları üzerinde standardizasyon çalışmaları esas olarak Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık, Almanya ve eski Sovyetler Birliği tarafından üstlenilmiştir (Bedi vd., 2013). Karmaşık şekiller oluşturma yeteneği, hızlı kürlenme, yüksek özgül sertlik ve basınç dayanımı, mükemmel titreşim sönümleme, kimyasallara ve korozyona karşı direnç nitelikleri polimer beton malzemelerinin ilk uygulamalarının dışında da yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır (Bulut, 2016; Pişkin, 2010).

Polimer betonun kullanımı 70'lerin sonlarından bu yana elektrik yalıtım sistemlerinde (Gunasekaran, 2000; Pratap, 2002) ve takım tezgahı uygulamalarında bildirilmiştir ve takım tezgahı tabanları için dökme demir gibi geleneksel malzemelerin yerini almak üzere kullanılmıştır (Koblischek, 1975; McKeown ve Morgan, 1979; Paderewski, 1984). Son birkaç on yılda, polimer betonun ümit verici uygulamalarını, yani takım tezgahı yapılarında kullanımını geliştirmek için çok sayıda araştırma yürütülmüştür (Cortes ve Castillo, 2007; Orak, 2000). Ancak, bu malzemelerin alternatif bir malzeme olarak potansiyeli tam olarak değerlendirilmeden önce, uzun vadeli özelliklerin değerlendirilmesi için bir metodoloji mevcut olmalıdır (Bedi vd., 2013).

Polimer beton (PC) son yıllarda en çok uygulanabilir yapay malzemelerden biridir (Ataabadi vd., 2021). Özellikle hızlı sertleşme gibi uygun mekanik özellikler (Hyun ve Yeon, 2012; Ohama, 1997), aşındırıcı ortamlara ve kimyasal koşullara karşı iyi direnç (Jamshidi vd., 2013; Vipulanandan vd., 1988) ve uygun dayanıklılık gibi iyi özellikleriyle bilinir (Jamshidi vd., 2013; Shokrieh vd., 2011). Bu nedenle, PC, diğer yapı malzemelerinin hizmet ömrünü artırmak için onarım (Mahdi vd., 2010) ve işlevsel malzeme gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Shokrieh vd., 2011). Genel olarak, PC, ana bağlayıcılar olarak %70-90 çeşitli agrega ve %10-30 polimer reçinelerinin birleşimiyle üretilir (Vipulanandan ve Paul, 1993). PC'leri üretmek için çok çeşitli agregalarla birlikte bir dizi polimer türü uygulanmıştır. Epoksi reçine, doymamış polyester reçine, furan, akrilik reçine, poliüretan ve üre-formaldehit, doğal malzemeler veya mineral ve pomza, geri dönüştürülebilir agregalar ve hafif

genişletilmiş kil agregası gibi yapay agregalar gibi çeşitli maddelerle bileşik oluşturmak için kullanılan en yaygın polimerlerdir (Ataabadi vd., 2021).

Karışımında kullanılan polimer türü, agrega dağılımı, kürlenme koşulu ve test sıcaklığı, PC'lerin özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir (Abdel-Jawad ve Abdullah, 2002; Ataabadi vd., 2021; Hong, 2017). Polimer bazlı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmak için çok sayıda çalışma yürütölmüştür. PC'lerin performansı ve işlenebilirliği, saldırgan ortamlara maruz kalma, donma durumu ve termal araştırmalar gibi çeşitli bozulma koşullarında da incelenmiştir. Tüm bu etkileyen durumlar arasında, sıcaklığın etkisi diğerk durumlara göre daha ciddi olabilir. Bunun nedeni, sıcaklığın polimer esaslı maddelerin mikro yapısı üzerindeki yüksek etkisinin, genellikle mekanik özelliklerin azalmasına yol açmasıdır (Ataabadi vd., 2021).

Geleneksel betona kıyasla polimer beton dayanıklılık ve mukavemet özellikleri bakımından daha iyidir. Polimer betonun bu avantajlı özellikleri yapı alanındaki uygulanabilirliğini artırmakta ve yapılarının ömrünü uzatmaktadır (Ataabadi vd., 2021; Aydın, 2024; Jo vd., 2008; Ribeiro vd., 2004).

Polimer betonlarda yüksek çekme, basınç ve eğilme dayanımı olması, -18 °C ve -40 °C arasında dış ortamlarda hızlı kürlenme yapılabilmesi, kimyasallara karşı dirençli olması, suya ve solventlere karşı düşük permabilite özelliğı bulunması, donma-çözünme şartlarında uzun süre dayanıklılığına sahip olması ve düşük rötire özellikleri bu malzemeyi avantajlı kılar (Diyarbakır, 2024; Kwan vd., 2014; Madhuri vd., 2021; Topsakal, 2013).

Polimer betonlar beton yüzeylerde kaymaya ve aşınmaya karşı engelleyici olarak, portland çimentolu betonlara katkı malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca havuz, güverte gibi deniz yapılarında, çevresel etkilere karşı dayanıklılık gereken yerlerde, yapısal ve dekoratif konstrüksiyon panellerinde, jeotermal uygulamalarda elik ve karbon boruların astarlanmasında, barajlar, hendekler, rezervuar ve iskeleler gibi hidrolik yapılarda ve drenaj kanallar, yer altı yapıları, kanalizasyon borularında kullanılmaktadır (Agrawal ve Dhimi, 2012; Calderón-Morales vd., 2021; Diyarbakır, 2024; Fischer vd., 2019; Madhuri vd., 2021; Pişkin, 2010; Zheng vd., 2022).

Polimer betonlarda sürekli faz (polimer), üretim aşaması sırasında bazı boşluklar ve dağılı faz (agregalar) olmak üzere üç faz sistemi görülür (Pişkin, 2010). Geleneksel betonlarda ortaya çıkan rötre çatlakları polimer betonlarda görülmez çünkü polimer betonda bağlayıcı olarak çimento ve su kullanılmaz (Yıldırım, 2019).

Polimer betonların eğilme dayanımı 8-35 MPa, basınç mukavemeti 40-140 MPa, su emme oranı %1 ve elastisite modülü 700-35000 MPa arasında elde edilmiştir (Aydın, 2024; Berberoğlu, 2019; Dikeou& Fowler, 1981).

Polimer betonlarda bağlayıcı görevini yerine getirmesi amacıyla çimento ve suyun yerine, reçine ile birlikte işlenebilirlik sağlamak için silis dumanı, uçucu kül ve kalsit benzeri mineral katkı malzemeleri kullanılır (Öztürk, 2013). Bağlayıcı özelliğindeki polimer miktarı, polimer beton ve harçlarda genellikle ağırlığın %9'u ile %25'i arasındadır. Polimer betonlar genel olarak güçlü karıştırıcılarla üretilir ve buna benzer metotlarla kalıplara yerleştirilip şekil verilir (Pişkin, 2010). Ancak inşaat alanında polimer materyallerinin yaygınlaşmamasının temel sebepleri şunlardır;

- Polimerler, sıcaklık, elastikiyet ve kimyasal özellikleri bakımından çok geniş bir malzeme yelpazesine sahiptir ve maliyetleri geleneksel betonun 5 ila 10 katı kadar yüksektir.
- Karışım hesaplama metodu bulunmamakla birlikte yalnızca spesifik araştırmalarda agrega ve reçine için reçeteler kullanılmaktadır (Berberoğlu, 2019).

2.6. Polimer Beton Ürünlerinin İmalat Teknolojisi

Polimer betonun üretim aşamasında karışım yapılırken, harcın homojen özellikler göstermesi oldukça dikkat edilmesi gereken husustur. Homojenliğin sürekliliğinin devam ettirilmesi gerekir (Berberoğlu, 2019). Özelliklerin korunması için döküm makinelerinden yararlanılır. Polimer beton, üretilen malzemenin ebatları ve teknolojiye bağlı olarak farklı değişkenlerle donatılmış döküm makineleriyle üretilir (Kaya, 1983).

2.6.1. Kalıplar

Kalıpların, karışımın olabildiğince hızlı kalıba alınmasını engellememesi ve belirli geometrik biçime uygun olması gerekmektedir. Kalıbın etrafı, karışımın akış hızını kısıtlamamalıdır.

Titreşim işlemi beton üzerinde etkili olacağından yararlanılan kalıplar çok önemli bir elemandır (Yıldırım, 2019).

2.6.2. Polimer betonun yoğunlaştırılması

Polimer betonlar uygulanan işlemler sonucunda yoğunluğu artar. Bu sebeple üretim sırasında titreşimle yoğunlaştırma yöntemi seçilmektedir. Ancak vibrasyon süresi dolgu malzemesinin boyutunu ve reçinenin homojenliğini olumsuz etkileyebileceğinden dolayı uzun olmamalıdır (Vlack, 1972).

2.7 Polimer Betonun Kullanım Alanları

2.7.1 Onarım

Yol yapılarında ve beton onarımında polimer kompozitlerden yararlanılır. Polimer betonlar, polyester, vinilester ve epoksi gibi reçinelerle formüle edilebilir. Düşük akışkanlığı olan metakrilat, yapıdaki agregaların yerleşmesine avantaj sağlar. Yapılan işlemlerde, dolgu malzemeleri ile karıştırılmış polimer harçlar derin ve büyük çatlaklarda kullanılırken, kılcal çatlaklar polimer enjeksiyonu ile tamir edilir (Yıldırım, 2019). Ayrıca, birçok uygulamada üretim sonunda fiziksel özellikleri geliştirmek için plastikleştiriciler ve çapraz bağlayıcılar eklenmektedir (Fowler, 1995). Polimer betonların kullanım ömrü kullanılan hızlandırıcılar ve konsantrasyonun miktarına bağlı olarak değişir (ACI Manual of Concrete Practice, 1993).

2.7.2 Prekast polimer betonlar

Yüksek dayanım, ince kesitlerde düşük geçirgenlik ve çabuk kür gibi avantajlar prekast polimer betonların tercih edilmesini sağlar. Elektrik yalıtkanları, astarlar, borular, çatı kemerleri ve drenaj kanalları prekast polimer betonların uygulama alanlarına örnektir (Berberoğlu, 2019; Yıldırım, 2019). Genellikle bu beton türünde styren/polyester kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda aside karşı direnç ve paslanma oldukça önemlidir; bu sebeple vinilester, sülfür ve furan reçineli betonlarda tercih edilmektedir (Akın, 2017; Pişkin, 2010).

2.7.3 Yollar

Bu betonlar, yollar ve havalimanlarında kullanılmaktadır. Klor ve su geçirgenliği az olduğundan dolayı donma çözünme olayları neticesiyle ortaya çıkan çatlakları ve yolların tahribe uğramasını önlerler. Bazı çeşitli yöntemler yol kaplamalarında kullanılır; bunlar arasında self leveling sistemi, mala ile uygulama ve önceden karıştırma işlemleri bulunmaktadır (Akın, 2017; Yıldırım, 2019). Bu beton ve harçlar, aside ve suya karşı dayanıklı yapılarda, stadyumlarda, köprü döşemelerinde ve atölye zeminlerinde ve bunun gibi birçok alanda kullanılabilir. Yapılan bilimsel çalışmalar ısıнын değişmesi ile yol yüzeyindeki kayma gerilmesi ve basınç gerilmesinin farklı değerler aldığını göstermektedir (Öztürk, 2013; Pişkin, 2010).



Şekil 7. Polimer malzeme ile kaplanan fabrika sahası ve stadyum (Yıldırım, 2019)

2.8. Bağlayıcı Malzemeler

Bağlayıcı malzeme olarak kullanılan reçineler, kimyasal bileşimlerinde polimer yapılar barındıran malzemelerdir. Daha küçük moleküllerin bir araya gelmesi sonucu bu polimerler meydana gelir. Sıvı ya da yarı katı formlarda bulunabilen reçineler, sertleştirici bir madde eklenerek katı hale getirilebilir (Sarde ve Patil, 2019). Çoğunlukla sentetik yollarla üretilen reçineler bazı durumlarda doğal kaynaklardan da elde edilir. Bu malzemeler pek çok kullanım alanında yarar sağlar. Buna örnek verecek olursak reçineler hafif olmalarının yanı sıra yüksek dayanıklılıkları sayesinde birçok sanayi uygulamasında tercih edilmektedir (Aydın, 2024). Bunun yanı sıra, reçinelerin şekillendirme yetenekleri oldukça fazladır ve çeşitli formlarda üretilebilirler (Singh vd., 2019). Fakat bu malzemelerin diğer malzemelere göre negatif yönleri de bulunmaktadır. Reçinelerin çoğunlukla diğer materyallere kıyasla maliyetleri daha yüksektir ve üretim sürecinde etrafa zararlı kimyasallar yayabilirler (Hashemi ve Jamshidi,

2015). Bunun yanı sıra, birtakım reçinelerin yanması toksik gazlar açığa çıkabilir ve bu da canlı sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Aydın, 2024). Bu özellikleriyle beraber reçineler, farklı türlere sahip olup bunların kendine özgü özellikleri bulunur. Şöyle ki, epoksi reçineler sağlamlıklarıyla bilinirken, polyester reçineler diğer reçinelere göre uygun fiyatlı olup şekil verilmesi kolaydır (Kiruthika vd., 2021). Poliüretan reçinelerin ise diğer reçine türlerine oranla esneklikleri daha yüksektir. Reçinelerin bu nitelikleri kullanılacakları alan ve amaçlara göre değişkenlik gösterebilir (Farooq ve Banthia, 2022).

Doymamış polyester reçine, epoksi reçine ve termoset reçineler polimer beton üretimlerinde bağlayıcı olarak uygulanır. Genellikle, bisfenol A tipi, epoksi reçine ile ultra yüksek dayanımlı polimer beton hazırlamak için uygulanır ve sırasıyla sınırlı kullanım ve karıştırmada zorlukla sonuçlanır (Tabatabaeian vd., 2019). Bisfenol B daha yüksek bir piyasa değerine ve daha iyi mekanik özelliklere sahiptir (Nodehi vd., 2024; Tabatabaeian vd., 2019). Ancak, genel olarak, epoksi reçineleri, polyester ve vinilester muadilleriyle karşılaştırıldığında nispeten yüksek bir viskozite ve daha iyi termal ve mekanik özelliklere sahip yarı sıvı, sıvı ve katı halde bulunabilir (Nodehi vd., 2024; Wang vd., 2019). Epoksi reçineler çoğunlukla dayanımı yüksek olan inşaat materyallerinde tercih edilen polimerlerdir. Reçine ve sertleştirici gibi bileşenlerden meydana gelen bu malzeme bileşenlerin bir araya gelmesi sonucu kimyasal reaksiyona başlar ve sonuç olarak malzeme sertleşir. Kimyasala dayanım, su izolasyonu, yüksek sıcaklık dayanımı ve mukavemet benzeri nitelikler epoksi reçinelerin pek çok endüstriyel alanlarda, denizcilik ve yapı materyalleri gibi sektörlerde fazlaca kullanılmasını sağlar (Singh vd., 2019).

Tablo 1.'de epoksi reçinenin özellikleri gösterilmiştir (Sevinç ve Durgun, 2021).

Tablo 1. Epoksi reçinenin özellikleri

Renk	Nötr
Görünüm	Sarımsı sıvı
Yoğunluk (g/cm ³)	1,20
Vizkozite (cP)	1500-200

Polyester reçineler termoset özelliklere sahip polimerlerdir ve çoğunlukla kompozit ve fiberglas malzemelerin üretiminde tercih edilmektedir. Bu reçineler, boyama, otomobil ve denizcilik endüstrisi uygulamalarında en yaygın kullanılan reçinelerdir ve glikol ve doymamış bir dibazik asidin yoğunlaşması sonucu üretilir (Nodehi vd., 2024; Ouarhim vd., 2019).

Toplam kompozit endüstrisinin reçine kullanımlarının yaklaşık %75'ini oluşturan bu reçine izoftalik reçine ve ortoftalik reçine halinde iki ana formda bulunabilir (Nodehi vd., 2024; Tabatabaeian vd., 2019). Ortoftalik form genellikle korozyona ve daha yüksek sıcaklıklara karşı büyük direnç gerektirmeyen amaçlar için kullanılır. Buna karşılık, izoftalik form daha iyi termal ve mekanik özelliklere sahip nispeten daha yüksek bir pazar değerine sahiptir (Kandelbauer vd., 2014; Loos, 2015; Nodehi vd., 2024; Ouarhim vd., 2019).

Pazar sınıflandırmalarına göre, izoftalik polyester doymuş ve doymamış formlarda bulunabilir, doymamış form çoğunlukla polyester adıyla ilişkilendirilir ve çoğunlukla polimer beton üretmek için inşaat sektöründe bağlayıcı olarak kullanılır (Nodehi vd., 2024; Rebeiz vd., 2004). Bu malzeme, sertleştiricilerle karıştırılarak farklı şekillerde sertleştirilebilir. Polyester reçineler, kolayca şekil alabilme, dayanıklılık ve hafiflik özellikleri ile öne çıkar (Singh vd., 2019). Tablo 2.'de, polyester reçinenin özellikleri verilmiştir (Akın ve Polat, 2022; Akman, 1987; Aydın, 2024; Bulut, 2016).

Tablo 2. Polyester reçinenin özellikleri

Fiziksel hal	Sıvı
Koku	Karakteristik stiren kokusu
Çözünürlük	Suda çözünmez
Kaynama noktası (°C)	146 (Stiren)
Erime noktası (°C)	33(Stiren)
Vizkozite (cP)	200-1500
Parlama noktası (°C)	32
Ateşleme noktası (°C)	490
Patlama limitleri (çözücü)	Alt sınır %1,1; üst sınır %7 (hacimce)
Eğilme dayanımı (MPa)	120
Sertlik (Barcol)	42
Yoğunluk (kg/dm ³)	1,1~ 1,15
Eğilme Mukavemeti (N/mm ²)	55~120
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	22~70
Basınç Mukavemeti (N/mm ²)	150
Elastisite Modülü (N/mm ²)	2500~3500

Vinilester reçine, polyester reçinesiyle hemen hemen aynı moleküler zincire sahiptir, ancak vinilester, azaltılmış su emilimine ek olarak daha yüksek termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Yine de, epoksi ve polyester muadillerinin aksine, vinilester daha yüksek genel büzülme ve kırılma eğilimine sahiptir (Loos, 2015; Mullins vd., 2012; Nodehi vd., 2024; Rebeiz vd., 2004) ve yanıcıdır, bu da geniş uygulamalarını daha da sınırlar (Loos, 2015). Bir bağlayıcı olarak, vinilesterin nispeten yüksek bir tokluğa ve titreşim ve darbe yüklerine karşı dirençli olduğu bildirilmiştir (Andrew, 2016; Nodehi vd., 2024). Yine de, sert moleküler bağları nedeniyle, agregalar gibi diğer malzemelerle nispeten zayıf bir arayüz geçiş bağı üretirler ve bu da onları delaminasyona eğilimli hale getirir (Fowler ve Whitney, 2012; Nodehi, 2024).

Furan reçineleri, fenoplast termosetlerine bir örnek teşkil eder. Bakalitler bu gruba örnek olarak verilebilir. Bu malzeme, katı ya da sıvı formda pazarlanabilmektedir (Akman, 1987). Maddi açıdan bakıldığında formaldehit haricinde yaygın olarak kullanılan aldehit furfuraldır. Bu ürün, arpa ve mısır yapraklarının fermante işlemine tabi tutularak elde edilir (Pişkin, 2010). Furfural çoğunlukla birinci ile üçüncü tür polimerize işleminin aşamalarına göre reçine betonunda uygulanmaktadır. Estetik görünümünden yoksun olan furan reçine betonları, siyah renkli malzemelerdir. Kimyasal dirençleri asitli ortamlarda yüksektir (Özden Akkaya, 2010). Bu tür betonlar, genellikle aşınmaya karşı dayanıklı betonları oluşturmak için tercih edilir. Bundan dolayı sıcaklığın aşırı yükselmediği ortamlarda kaplama maddesi şeklinde tercih edilmektedir (Akar, 1991; Ünal, 2016).

2.9. Perlit

Dünya genelindeki perlit rezervlerinin yaklaşık %74'ü Türkiye'de bulunmaktadır. Perlitin en yaygın kullanımı, hem dünyada hem de ülkemizde inşaat sektöründe görülmektedir. Bu nedenle, inşaat sektöründeki olumsuz durumlar perlit tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir (Kaya, 2019). Perlit maddesinin iyi bir izolasyon özelliğine sahip olduğu ve özel amaçlı betonlarda kullanımı gibi önemli avantajları, inşaat sektörüne ekonomik açıdan olumlu katkılar sağlayacaktır (Azizi, 2007). Perlit, yüksek miktarda SiO_2 ve yaklaşık %12-18 oranında Al_2O_3 içeren, hızla yumuşama noktasına (900-1200°C) kadar ısıtıldığında orijinal hacminin 20 katına kadar genişleyebilen camsı bir volkanik kayadır (Karein vd., 2019; Leong vd., 2020). Perlit, pomzadan, yani hafif su içeriğine sahip riyolit magmasının camsı bir formundan türetilir. Perlit yaklaşık 900 derecede ısıtıldığında genişler ve 30–240 kg/m³'lük bir

yığın yoğunluğuna sahip agregalara dönüşür. Perlit yaklaşık %80 cam fazına sahiptir (Loghmani ve Esfandiari, 2019). Magmanın hızlı soğuması kristal bir yapı ve dolayısıyla perlite karşı düşük reaktivite gerektirir. Puzolanik malzemelerin düşük reaktivitesi bir dezavantajdır ve erken yaşlarda zayıf mekanik ve dayanıklılık özelliklerine yol açabilir (Balapour vd., 2018; Karein vd., 2018). Perlitin birçok uygulaması göz önüne alındığında, dünya çapındaki üretimi son on yılda istikrarlı bir şekilde artmıştır (Olteanu vd., 2024). Ham perlit, genişleştirilmiş perlit ve kayaç haldeki perlit Şekil 8.'de görölmektedir. Şekil 8.'de göröldüğü gibi perlitin ham hali gri tonlarında olup genişleştirilmiş hali beyaz renkte bulunmaktadır.



Şekil 8. Kayaç haldeki perlit (A), ham perlit (B) ve genişleştirilmiş perlitin (C) görünümü (Azizi, 2007)

Ham Perlitin Fiziksel Özellikleri Tablo 3.'te verilmiştir.

Tablo 3. Ham perlitin fiziksel özellikleri (Kaya, 2019; Örüç, 2022)

Renk	Siyah, gri ve grinin tonları
Yumuşama	800 – 1100 °C
Noktası	
Erime Noktası	1325 – 1390 °C
PH	6,6 – 8, 0
Sertlik	-
Özgül Isı	0,2 kcal/ kg°C
Özgül Ağırlık	2200 – 2400 kg/m ³
Isıl İletkenliği	-
Asitte Çözülme	Sıcak konsantre alkali, mineral konsantre asitlerde az erirken, seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erirler.

Ham perlitin kimyasal özellikleri Tablo 4.'te verilmiştir.

Tablo 4. Ham perlitin kimyasal özellikleri (Baba, 2018)

Bileşen	Ham Perlit(%)
SiO ₂	73,8
Al ₂ O ₃	13,9
Fe ₂ O ₃	0,9
Ca	0,9
MgO	0,3
Na ₂ O	4,7
K ₂ O	4,3
H ₂ O	<1,0
As	<0,001
Ba	<0,1
B	<0,01
Cl	<0,0005
Cr	<0,007
Cu	<0,0015
Ga	<0,05
Pb	<0,001

Tablo 4. Devamı

Mn	<0,3
Mo	<0,002
Ni	<0,02
S	<0,2
Ti	<0,1
Zr	<0,003

2.10. Perlitin Yapısal Uygulamaları

Perlit malzemesinin ülkemizdeki Erzincan, Nevşehir ve Ankara çevresindeki sahalarında büyük rezervler bulunmaktadır. Genleştirilmiş perlit, ısı yalıtımı sağlayan özelliklere sahip bir toz dolgu malzemesi grubunu meydana getirir (MTA, 2019).

Perlit malzemesi yapı alanında sıvalarda, kiremitlerde, tuğlalarda, spesifik betonlarda ve izolasyon malzemelerinde, tarım sektöründe toprağı havalandırmak ve fidelerin üreme ortamını oluşturmak amacıyla da kullanılır (Azizi, 2007). Perlit ayrıca sanayi sektöründe örneğin kimya sanayisinde filtre yardımcı maddesi olarak, ilaç ve gıda alanında ise dolgu malzemesi olarak kullanılır. Bunun yanında seramik ve cam sanayinde katkı maddesi olarak, metalürjide, yalıtıcı refrakterler üretiminde, gemi diplerini kaplama ve yalıtımında, ambalajlamada ve hafif plastik mobilya yapımında dolgu malzemesi olarak yararlanılır (Kara, 2019; Kaya, 2019).

2.11. Genleştirilmiş Perlit

Genleştirilmiş perlit (EP), erişilebilirliği (dünya çapında yılda yaklaşık 2,53 ve 2,68 milyon ton perlit üretilmiştir), kolay işlenebilirlik özellikleri ve puzolanik aktivitesi nedeniyle yaygın olarak bulunan bir yapı malzemesidir (Wang vd., 2021). Genleştirilmiş perlit pürüzlü ve gözenekli bir yapıya sahiptir ve gözenekli yapısı hafiflik özelliğine katkıda bulunur (Jiang vd., 2022; Leong vd., 2020). Genleştirilmiş perlit agregası kararlı fizikokimyasal özelliklere ve iyi emilebilirliğe sahip, gözenekli bir malzemedir (Jiang vd., 2022).

Portland çimentosuna benzer puzolanik aktivite gösterir. Genleştirilmiş perlit veya perlit tozu, beton endüstrisinde agrega veya çimento esaslı malzemelerde katkı maddesi veya

ikamesi olarak aynı zamanda inşaat malzemesi, tarım, kimya ve tıbbi endüstri gibi farklı uygulamalarda kullanılabilir (Loghmani ve Esfandiari, 2019; Soda vd., 2022). Hafif agrega yerine geliştirilmiş perlit agregası tercih edildiğinde, az yoğunluklu oluşan ürünün ısı izolasyonu, içsel kürlenme tesiri, donma-çözülme döngülerine ve yangına karşı direnci gibi özelliklerde, standart beton ya da harçlara oranla daha yüksek performans sergilenmektedir (Demirboğa vd., 1999; Kabay ve Kızıllkanat, 2019; Polat vd., 2015). Fakat mekanik nitelikleri söz konusu olduğunda, bu bağlam geçersiz duruma düşer. Agrega yerine %5-10 oranında geliştirilmiş perlit kullanılması, basınç dayanımını çok değiştirmezken; yer değiştirme miktarı %12-16 ve daha fazla seviyelere (örneğin, % 35) çıktığında, düşen yoğunlukla birlikte basınç dayanımında belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir (Kabay ve Kızıllkanat, 2019; Różycka ve Pichór, 2016).

Genleştirilmiş perlit; kullanım alanlarında düşük ısı ve ses iletkenliği, kimyasal tepkimesizliği, düşük yoğunluğu, fiziksel esnekliği ve ateşe dayanıklılık özellikleri ile ön plana çıkmaktadır (Arslan, 2022). Bu malzemeler sıcak konsantre alkali ve hidrolik asitte çözünürken, mineral konsantre asitlerde az, seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erirler (Kaya, 2019; Örüç, 2022).

Genleştirilmiş perlitin tipik kimyasal özellikleri ise Tablo 5.'te verilmiştir.

Tablo 5. Genleştirilmiş perlitin tipik kimyasal analizi (Gunning, 1994; Ensarioğlu, 2021)

Bileşim	İçerik(%)	Bileşim	İçerik(%)
SiO ₂	71.0 – 75.0	FeO	0.0 – 0.1
Al ₂ O ₃	12.5 – 18.0	Cr	0.0 – 0.1
Na ₂ O	2.9 – 4.0	Ba	0.0 – 0.5
K ₂ O	0.5 – 5.0	PbO	0.0 – 0.3
CaO	0.5 – 2.0	NiO	İhmal edilebilir
Fe ₂ O ₃	0.1 – 1.5	Cu	İhmal edilebilir
MgO	0.02 – 0.5	B	İhmal edilebilir
TiO ₂	0.03 – 0.2	Be	İhmal edilebilir
H ₂ O	2.0 – 5.0	Serbest Silika	0.0 – 0.2
MnC>2	0.0 – 0.1	Toplam Klorürler	0.0 – 0.2
SO ₃	0.0- 0.2	Toplam Sülfatlar	Yok

2.12. Kaynak Özetleri

Bu tez konusunun içeriğinde yer alan polimer beton ve perlit üzerine yapılan çalışmalara aşağıda değinilmiştir.

Ülkemiz, deprem kuşağı üzerinde yer aldığından, yüksek şiddette ve mal ile can kayıplarıyla sonuçlanan depremler sıkça yaşanmaktadır. Gelişmiş ülkeler olan Amerika ve Japonya’da ise depremlerin büyük kayıplara yol açmamasının sebepleri arasında inşaat teknolojisindeki ilerlemelerin uygulanması ve hafif malzemeler, örneğin perlit ve gazbeton, gibi maddelerin kullanılması yer almaktadır. Bu malzemeler, bina yükünü önemli ölçüde azaltarak yapıların kendi ağırlıklarıyla çökmesini önlemekte ve depremin yıkıcı etkilerini azaltmaktadır. Ayrıca, deprem sırasında meydana gelen yer hareketleri, gazbeton ve perlit benzeri boşluklu materyallerle sönümlenmekte, bu sayede binalar sarsılmasına rağmen yıkılmamaktadır (Doğan ve Şener, 2004). Puzolanik bir madde olan perlit, genişlemiş formuyla orijinal hacminin yirmi katına kadar büyüeyebilen, bu sayede son derece hafif bir yapıya sahip olan, aynı zamanda mükemmel ses ve ısı yalıtım özellikleri taşıyan bir kayadır (Azizi, 2007).

Hossain (2003), volkanik kül ve volkanik perlit tozu kullanılarak üretilen çimentonun uygunluğunu araştırdığı çalışmada, %0 ve %20 katkı seviyesi aralığında daha düşük seviyelerde hidratasyon ısısı gerçekleşmesini sağlayan ve priz süresini artıran katkı malzemesi kullanılmış, Portland volkanik küllü, çimento ve perlit çimentosunu oluşturmada önemli etken bulunduğunu ifade etmiştir.

Erdem (2005), yaptığı araştırmada perlitin silika ve alüminyum içeriği nedeniyle önce yeterli dozda puzolanik nitelikleri bulundurup bulundurmadığını incelemiştir. Sonrasında ise katkılı çimento imal edilmesinde perlitin puzolanik özellik taşıyan bir katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini deneylerle ortaya koymuştur. Deney sonuçları, Türkiye’deki perlitlerin beton ve çimento sektöründe gerekli puzolanik özellikleri barındırdığını göstermektedir. Bunun yanı sıra, gerçekleştirilen deneylerde test edilen özelliklerin, katkı malzemesi içeren çimentolarla alakalı genel şartlarda aranan kriterleri karşıladığı vurgulanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, %20 veya daha yüksek oranda perlit kullanımıyla perlit ilaveli harçların mukavemetinin artırılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.

Erdem vd. (2007), doğal perlit kullanarak katkılı çimento üretmeyi hedefledikleri çalışmalarında, perlitin puzolanik özelliklerinden faydalanarak çimentoda katkı malzemesi şeklinde uygulanabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Bulgurcu (2009), yapmış olduğu çalışmada, genleştirilmiş perlitin beton içindeki oranının %10 seviyesinden %80 değerine kadar yükseltilmesiyle termal iletkenlik değerlerinin azaldığı ve bundan dolayı betonların ısı özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, birim hacim ağırlıklarında da benzer bir azalma yaşanmış, bu durum yapıların ölü yükünü azaltmıştır. Bununla birlikte, eğilme ve basınç dayanım özelliklerinde düşüş ve su emme niteliklerinde yükseliş olduğu görülmüştür.

Gökçe vd. (2010), yapmış oldukları incelemede, beton malzemesi içerisindeki genleştirilmiş perlit oranının artışının ısı özellikler ve ağırlık açısından iyileşmelere yol açtığı görülmektedir. Fakat, bu betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin ise kötüleştiği gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu sonuçları iyileştirmek amacıyla su/çimento oranının azaltılması, kimyasal ve mineral katkıların kullanılması ve farklı doğal perlit karışımlarının ortaya çıkarılması tavsiye edilmiştir.

Chihaoui vd. (2016), tarafından yapılan çalışmada, %20 oranında ham perlit tozu içeren çimento ve bu malzemeye ortaya çıkarılan harçların, portland çimentosu içeren örneklerle oldukça yakın mekanik ve fiziksel davranışlar sergilediği ve perlit tozunun çimento oluşumunda puzolanik katkı maddesi şeklinde kullanabileceğini belirtmişlerdir.

Bulut (2016), elektronik atıkların polimer betonda kullanımının mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Deney sonuçları, e-atık oranı arttıkça basınç, yarmada ve eğilmede çekme dayanımlarının düştüğünü, ancak süneklik seviyesinin arttığını göstermiştir. En uygun oranlar olarak, reçine oranının %15 ve e-atık oranının %5 ile %15 arasında olduğunu gözlemlemiştir.

Sanchez vd. (2018), tarafından yapılan araştırmada, portland çimento harçlarındaki hem doğal perlit hem de genleştirilmiş perlitin yeterli yüzdelik ikamesinin ve en verimli oranının %5 olduğu sonucuna varmışlardır.

Kabay ve Kızılkanaat (2019), yapmış oldukları çalışmalar neticesinde blok malzemesinin üretiminde geliştirilmiş perlit agregasının uygulanabileceğini göstermişlerdir. Bunun yanı sıra, bağlayıcı malzeme şeklinde uygulanan çimentonun hacimce yarısının uçucu külle yer değiştirilmesiyle blok materyalinin mekanik ve fiziksel performansını kayda değer şekilde etkilemediğini, bu sayede daha az çimento kullanımıyla iyi bir çevresel malzeme elde edildiğini göstermişlerdir. Bu malzemeye ortaya çıkarılan bloğun mekanik ve fiziksel özellikleri göz önüne getirildiğinde, gaz betonla mukayese yapılabilecek kalitede bir malzeme ortaya çıktığı, başta termal iletkenlik katsayısı ve su emme yönünden daha ileri derecede performans verdiği belirlenmiştir.

Kaya (2019), yapmış olduğu çalışmada, geliştirilmiş perlit ve doğal perlit ikamesinin Portland çimentosundaki rötreyi azalttığını belirlemiştir. Çimentolarda geliştirilmiş perlit kullanımının vermiş olduğu dayanım sonuçları oldukça az çıktığından dolayı bu malzemenin çimento üretiminde uygulanmasının olumsuz olduğu ifade edilmiştir; ancak ham perlit ikamesinin %5 ve %10 oranında, çimentoda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Şanlıtürk (2019), yapmış olduğu çalışma sonucunda, geliştirilmiş perlit miktarının artışıyla birlikte harç numunelerinin birim ağırlığının azaldığını ve fiziksel ile mekanik özelliklerinin değişkenlik gösterdiğini bildirmiştir. Ayrıca, ısı iletkenlik miktarının düşmesiyle numunelerin ısı izolasyon özelliklerine daha olumlu yönde katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Güzelküçük (2020), yapmış olduğu çalışmada, geopolimer harçlarda ham perlitin öğütülmüş halinde bağlayıcı şeklinde yararlanılabileceği ve hafif kompozit malzeme üretiminde geliştirilmiş perlitin ideal bir malzeme seçeneği olduğu görülmüştür.

Atlı (2023), yapmış olduğu çalışmada, betonarme kolonlarda kullanılan perlitin taşıma gücü kapasitesine pozitif yönde etki ettiği görülmüştür. Ancak, perlit malzemesi kullanılan kolonların enerji yutma kapasiteleri, süneklik ve rijitlik açısından geleneksel yöntemle oluşturulmuş betonarme kolonlara kıyasla performansının düştüğü tespit edilmiştir.

Genleştirilmiş perlit agregalı köpük betonun termodinamik ve dayanıklılık özellikleri adlı çalışmada, geliştirilmiş perlit agregasının köpüklü betonda ısı yalıtım malzemesi olarak uygulanabilirliği incelenmiştir. Mekanik, termo-mekanik ve dayanıklılık özellikleri

değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçları, perlit oranının artmasıyla köpük betonun basınç dayanımının azaldığını, perlit içeriğinin artmasıyla eğilme mukavemeti ve kopma modülünün düştüğünü göstermiştir. Ayrıca, genleştirilmiş perlitin kuvars kumunun etkili bir ikamesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Sharook vd., 2023).

Soykan ve Özel (2014), polimer betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde kür şartlarının ve sürelerinin etkilerini incelemek için deneyler yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, numunelerin kürlendiği oda koşulları ve kür süresinin, basınç ve eğilme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Öztürk (2019), yapmış olduğu çalışmada, kükürt betonları ve kükürt polimer betonların erken mukavemetlerinin standart betona göre fazla ve priz sürecinin daha az olduğunu göstermiştir.

Polimer betonun aşınmaya karşı dayanımlarını tespit etmek için gerçekleştirilen bilimsel çalışmada aşınmanın ağırlıkça oranı %0.643, aşınmanın hacimsel oranı ise %0.613 seviyelerinde bulunduğu tespit edilmiştir. Ağırlıkça bu betonun aşınma oranı, geleneksel betonla karşılaştırıldığında C30/37 betonunun 28 günlük mukavemetine benzer değerler çıktığı görülmüştür (Berberoğlu, 2019).

Yıldırım (2019), yapmış olduğu çalışmada, cam tozu ve cam lifi katılan polimer betonların, katkı oranına göre basınç ve eğilme mukavemetlerinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, yapılan finansal değerlendirmelere göre polimer betonların, geleneksel betonlara nazaran daha yüksek maliyetli olduğu görülmüştür.

Alganad (2020), yapmış olduğu çalışmada, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada dayanımının maksimum değerlerine, %75 oranında atık döküm kumu ve %25 epoksi oranında ulaşıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, bu mekanik özelliklerin %10 çeltik külü eklendiğinde önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir.

Polat vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda, polimer betonun basınç dayanımı açısından en yüksek değer, %0 ve %10 barit minerali içeren örneklerde elde edilirken, en düşük değer ise %40 barit minerali içeren numunelerde gözlemlenmektedir. Barit minerali oranı arttıkça, ultrases geçiş hızının azaldığı gözlemlenmiştir. Polimer betonun eğilme dayanımının, içeriğindeki barit mineral oranına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Öte yandan, basınç dayanımının ise barit mineral oranı ile ters orantılı olduğu saptanmıştır.

Çelik lifli polimer betonların mekanik davranışı üzerine geri dönüştürülmüş araç lastiği parçacıkları ve liflerinin birleşik etkisi adlı çalışma sonucunda, en yüksek basınç dayanımının 83 MPa ve en yüksek eğilmede çekme dayanımının 18.4 MPa olarak belirlendiği görülmüştür. Ayrıca, atık araç lastiği parçacıkları ve çelik lif içeren polimer betonların sünek kırılma özellikleri gözlemlenmiş, ancak atık lastik kullanımı polimer betonun dayanımını azaltmıştır (Gökbaşı, 2021).

Kaplan (2021), yapmış olduğu çalışma sonucunda, reçine ile agrega tipi ve oranının polimer betonların özelliklerini değiştirdiğini göstermiş; ayrıca reolojik parametreler ile mekanik davranışlar ve radyasyon zırhlama performansı arasında sıkı bir bağ olduğu görülmüştür.

3. YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Reçineler

Polimer beton üretiminde, çalışmanın özgünlüğünü ve kapsamını genişletmek için bağlayıcı malzeme olarak hem doymamış polyester reçinesi hem de vinilester reçinesi kullanılmıştır. Bu doğrultuda CE 80 döküm tipi ortoftalik esaslı doymamış polyester reçinesi ile Polives 701 vinilester reçinesi Baran Boya (Ankara/TR) firmasından temin edilmiştir. Reçinelere ait detaylı bilgiler Tablo 6.' da verilmiştir.

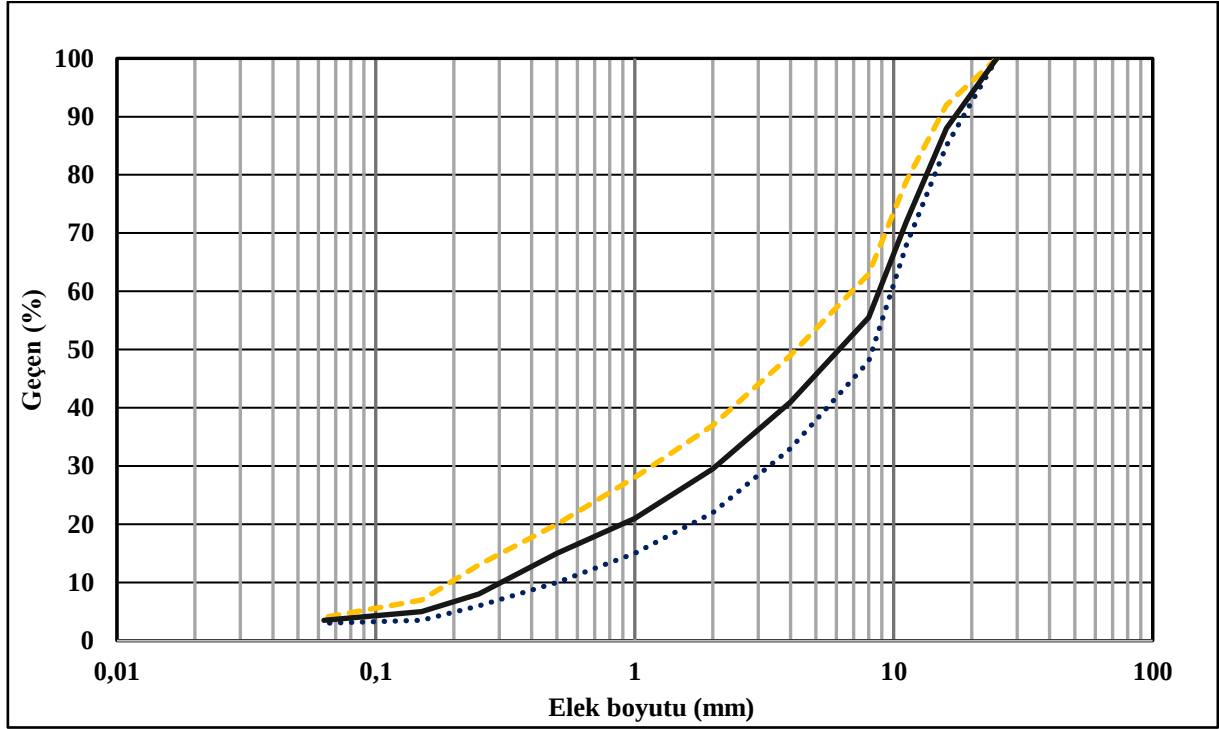
Tablo 6. Reçine özellikleri

Özellikler	Doymamış Polyester Reçine	Vinilester Reçine
Doymamış polyester reçine	~ 60	-
Stiren	~ 40	-
Fiziksel durum	SIVI	SIVI
Monomer oranı (%)	33-36	41-43
Asid indeksi	10-14	Maks. 10
Su emme (%)	0.17-0.19	0.15
Özgül ağırlık	1.1 gr/cm ³	1.044 gr/cm ³
Viskozite	550-600 cP	400-500 cP
Jelleşme süresi (23°C)	7-14 dk	20-25 dk
Sertlik	42 Barcol	35 Barcol
Eğilme dayanımı	125 MPa	160 MPa
Çekme dayanımı	63 MPa	80 MPa
Elastisite modülü	3020-3700 MPa	3300-4360 MPa

3.1.2. Agregalar

Polimer betonların dolgu malzemesi, bu çalışma kapsamında kuvars agregası, ham perlit, genleştirilmiş perlit ve çakıldan oluşturulmuştur. Agregaların üniform ve homojen bir şekilde boyut dağılımlarının yapılabilmesi için TS EN 933-1 (TS EN 933-1, 2012) ve TS 802 (TS 802, 2016) standartlarına göre elek analizleri gerçekleştirilmiştir. D_{max} 16 mm olacak şekilde karışımların granülometri eğrisi ideal eğriler (A16/B16) arasında yer almıştır (Şekil 9.). Karışımlarda ince agrega olarak kuvars agregası, ham ve genleştirilmiş perlitler yer alırken, iri

agrega kuvars agregası ile akıldan oluşmuştur. Kuvars agregası ile çakılların özgül ağırlıkları sırasıyla 2.64 g/cm³ ve 2.61 g/cm³'tir.



şekil 9. Granülometri eğrisi

Kuvars agregaları ile çakılın elek analizi sonrası görselleri, şekil 10.'da verilmiştir.

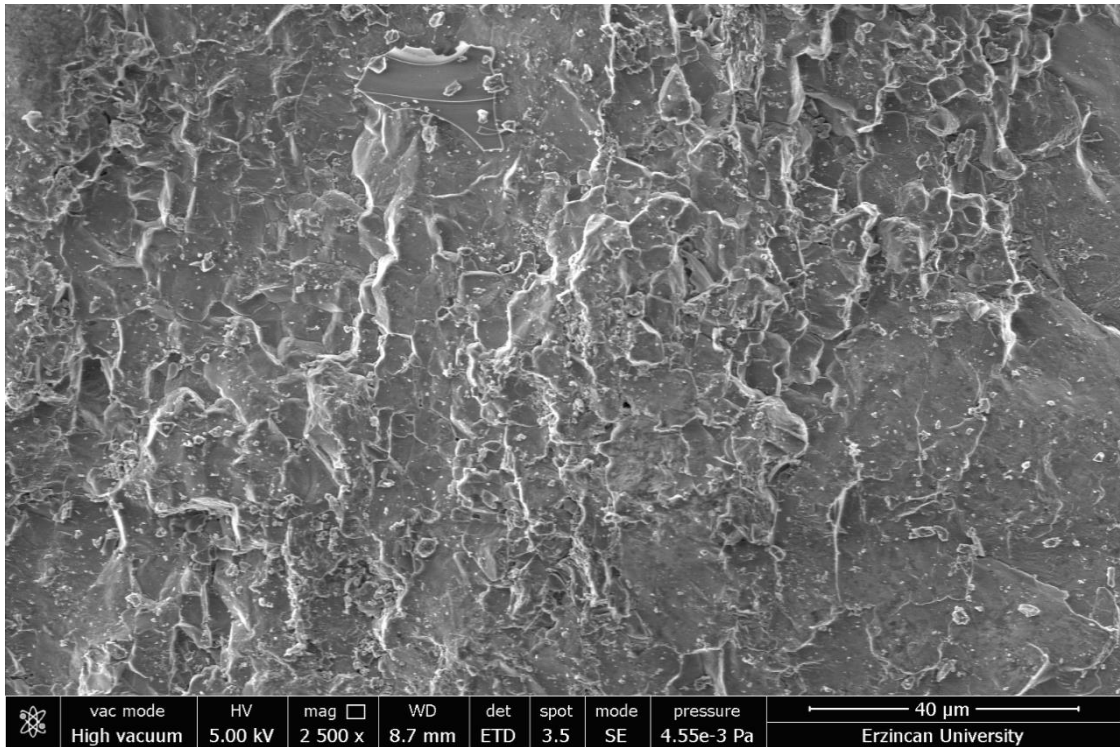


şekil 10. Elek analizi sonrası kuvars agregaları ve çakılın görüntüleri

Kuvars agregasına ait detaylı bilgiler, Tablo 7.'de verilmiştir. Son olarak kuvars agregalarının içyapısını gösteren SEM görüntüsü, şekil 11.'de verilmiştir.

Tablo 7. Kuvars agregasının özellikleri

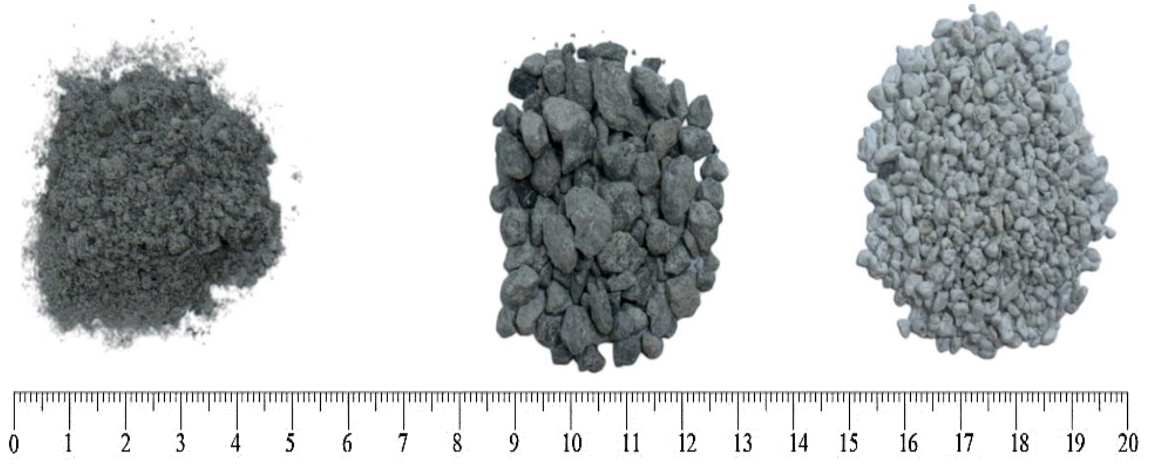
SiO ₂	%95
Al ₂ O ₃	%4.29
Fe ₂ O ₃	%0.070
MgO	%0.04
CaO	%0.03
Na ₂ O	%0.06
K ₂ O	%0.11
Kızdırma Kaybı	%0.40
Sertlik	7
Erime Sıcaklığı	1785°C



Şekil 11. Kuvars agregasının SEM görüntüleri

3.1.3. Doğal ve genleştirilmiş perlit agregaları

Polimer beton üretimlerinde ince agrega yerine sırasıyla 1.96 g/cm³ ve 1 g/cm³ özgül ağırlığa sahip ham ve genleştirilmiş perlit agregaları yer almıştır. Bu agregaların elek analizi sonrası görüntüleri Şekil 12.'de verilmiştir.

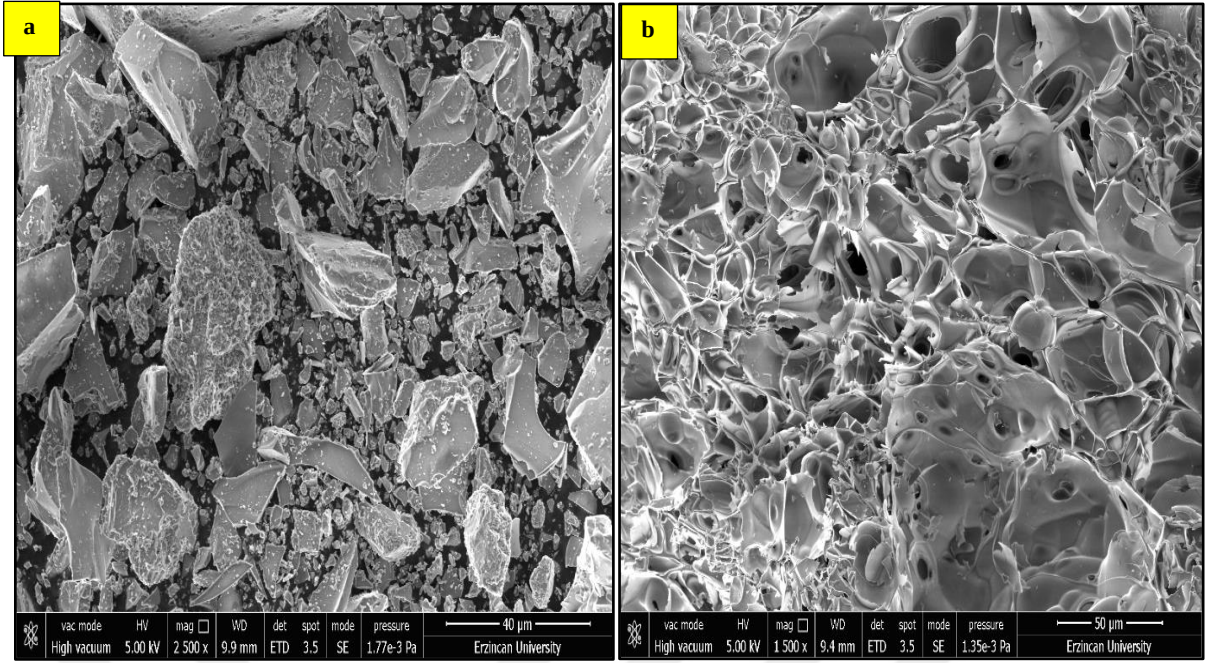


Şekil 12. Perlit agregalarının elek analizi görüntüleri

Ham ve genleştirilmiş perlit agregalarına ait detaylı bilgiler, Tablo 8.'de yer almaktadır. Perlit agregalarına ait SEM görüntüleri ise Şekil 13.'te sunulmuştur.

Tablo 8. Perlit agregalarının özellikleri

Özellikler	Doğal ve Genleştirilmiş perlit
SiO ₂	%71–%75
Al ₂ O ₃	%12–%16
Fe ₂ O ₃	%0.5–%1.45
MgO	%0.05–%0.2
CaO	%0.2–%0.5
Na ₂ O	%2.9–%4
K ₂ O	% 4–%5
TiO ₂	%0.03–%0.2



Şekil 13. Doğal perlit (a) ve genişletilmiş perlit (b) agregalarının SEM görüntüleri

3.1.4. Sertleştirici ve hızlandırıcı malzemeler

Hızlandırıcı ve sertleştirici kimyasal malzemeler, polimer beton üretimlerinde kimyasal reaksiyonları başlatıp hızlandırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu kimyasal malzemelere ait detaylı bilgiler, Tablo 9.'da verilmiştir.

Tablo 9. Sertleştirici ve hızlandırıcı özellikleri

Özellikler	Sertleştirici	Hızlandırıcı
Ürün kodu	AKPEROX A1	AKCOBALT %6
Ürün açıklaması	Metil Etil Keton Peroksit karışımı	-
Yoğunluk	1.16 gr/cm ³	0.93 gr/cm ³
Renk	Renksiz	Menekşe mavi sıvı
Aktif Oksijen içeriği	%9.4–%9.6	-
Peroksit İçeriği	%33–%37	-
Kobalt İçeriği	-	%5.9–%6.1
Katı İçerik	-	25.5 ± 0.5

3.2. Beton Karışım Hesabı

Polimer beton üretimlerinde ince agrega yerine hem ham perlit hem de genişletilmiş perlitin %0, %5 ve %10 oranlarında kullanımı, çalışmanın ilk parametresini oluşturmaktadır. Doymamış polyester reçine ile vinilester reçinelerin polimer betonların bağlayıcı malzemesi

olarak seçildiği çalışmada, bu reçinelerin perlit tipleri ve oranları ile sergileyecekleri uyumun polimer betonların mekanik özelliklerini nasıl etkileyeceği, bu çalışmanın ikinci parametresidir. Ayrıca polimer betonların 7, 28 ve 90 günlük deney sonuçlarının erken, orta ve ileri yaş için kıyaslanabilecek olması da bir diğer parametre olarak değerlendirilmektedir. İçerisinde hiçbir şekilde perlit bulunmayan kontrol betonları da üretilmiştir. Ön deneyler sonucunda polimer betonların üretim sürecinde %1.5 oranında sertleştirici ile %0.2 oranında hızlandırıcı kimyasal malzemeler kullanılmıştır. Reçine/dolgu oranı tüm polimer betonlar için sabit olup %15-%85'tir. Tüm parametreler gözönüne alındığında toplam 45 adet küp (150x150 mm), 45 adet silindir (100x200 mm) ve 45 adet prizma (100x400x400 mm) numuneler kullanılarak polimer betonlar üretilmiş ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Numunelerin kodlanmasında; reçine ve perlitlerin kısaltmaları ilk harflerle, perlitlerin oranları harflerden sonra gelen sayılarla (% işareti kullanılmadan), deney günleri ise '/' işaretinden sonra gelen sayılarla ifade edilmiştir. Örneğin, VRNP10/28 kodu %10 ham perlit içeren vinilester reçineli polimer betonun kodu olup bu betonun deneylerinin 28. günde yapıldığını belirtmektedir. PRP0 ile VRP0, içerisinde perlit yer almayan kontrol betonlarını temsil etmektedir. Beton karışım tasarımı, deney günlerini ifade eden sayılar çıkarıldıktan sonra Tablo 10.'da detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 10. Beton karışım hesabı (kg/m³)

Kod	Doğal Perlit	Genleştirilmiş Perlit	İnce Ag.	İri Ag.	Polyester Reçine	Vinilester Reçine
PRP0			836.68	1204	360.11	
PRNP5	41.84		794.84	1204	360.11	
PRNP10	83.68		753	1204	360.11	
PREP5		41.84	794.84	1204	360.11	
PREP10		83.68	753	1204	360.11	
VRP0			832	1197.20		358.1
VRNP5	41.6		790.40	1197.20		358.1
VRNP10	83.20		748.80	1197.20		358.1
VREP5		41.6	790.40	1197.20		358.1
VREP10		83.20	748.80	1197.20		358.1

3.3. Polimer Beton Üretimi ve Deney Prosedürü

Polimerizasyon sürecinden meydana gelen polimer beton üretimlerinde, farklı tipteki reçineler, agregalar ve kimyasal malzemeler (sertleştirici ve hızlandırıcı) biraraya getirilerek bu süreç tamamlanmaktadır. İlk olarak beton mikserine yerleştirilen agregalar (ham perlit, genişletilmiş perlit, kuvars agregaları ve çakıl) 1 dk karıştırılmıştır. Reçineler ile hızlandırıcı kimyasal malzeme biraraya getirilmiş, mikserdeki dolgu malzemeleri üzerine bu karışım dökülerek yaklaşık 5 dk karıştırılmıştır. Son olarak sertleştirici kimyasal malzemesi miksere ilave edilerek tüm karışım 3 dk boyunca karıştırılmıştır. Polimer beton karışımları masa tipi vibratör yardımıyla yaklaşık 3 dk boyunca vibrasyona tabi tutulmuştur. Elde edilen polimer betonlar 1 gün kalıpta bekletilerek test günlerine kadar hava kürüne maruz bırakılmıştır. Polimer betonların üretim aşamasından sonraki görüntüleri, Şekil 14.'te verilmiştir.



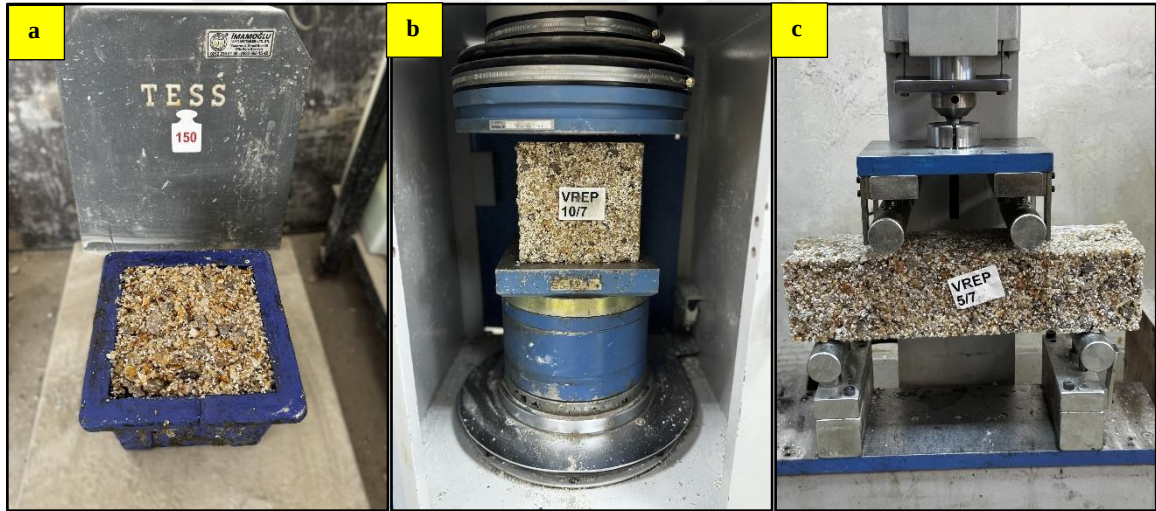
Şekil 14. Üretim sonrası polimer betonların görüntüleri

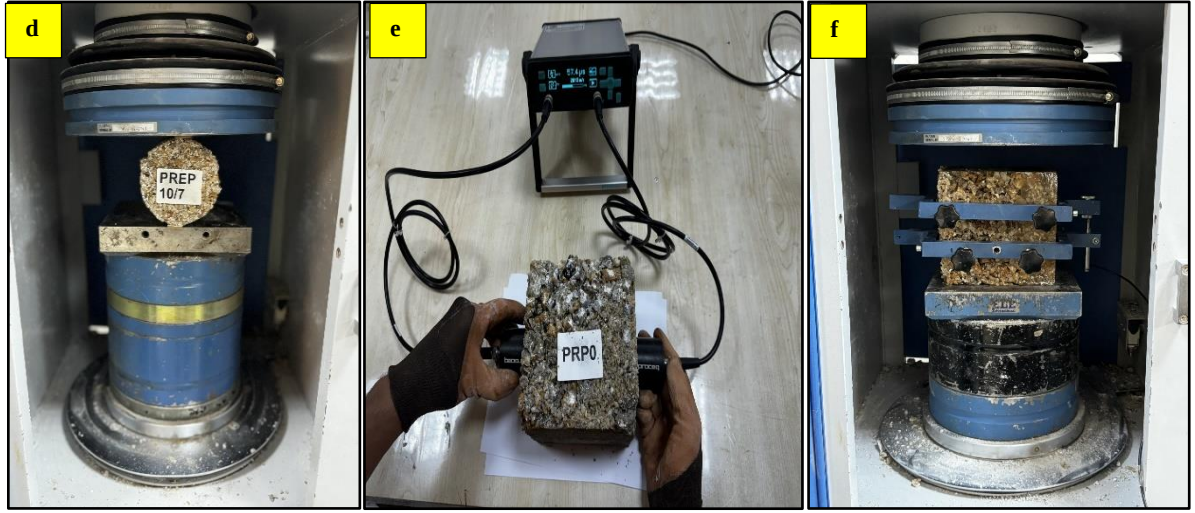
Ham perlit ve genişletilmiş perlit agregalarının farklı oranlarda kullanıldığı polyeester ve vinilester reçineli polimer betonlar üzerinde taze yoğunluk, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, UPV, elastisite modülü ve tokluk deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca polimer betonların mikroyapısal analizleri, SEM ile belirlenmiştir. Polimer betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneylerin standartları, numune boyutları, gün parametreleri vb. bilgiler Tablo 11.'de verilmiştir.

Tablo 11. Deney prosedürü

Deneyler	Standartlar	Numune şekli	Numune boyutları	Gün parametresi
Taze yoğunluk	TS EN 12350-6 (2019)		150 x 150 x 150 mm, küp	-
Basınç dayanımı	TS EN 12390-3 (2019)		150 x 150 x 150 mm, küp	7, 28 ve 90 g.
Eğilme dayanımı	ASTM C78 (2010)		100 x 100 x 400 mm, kiriş	7, 28 ve 90 g.
Yarmada çekme	ASTM C496 (2017)		100 x 200 mm, silindir	7, 28 ve 90 g.
UPV	ASTM C597 (2023)		150 x 150 x 150 mm, küp	7, 28 ve 90 g.
Elastisite Modülü	ASTM C469 (2010)		150 x 150 x 150 mm, küp	28 g.

Polimer betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneylere ait görseller, Şekil 15.'te verilmiştir.



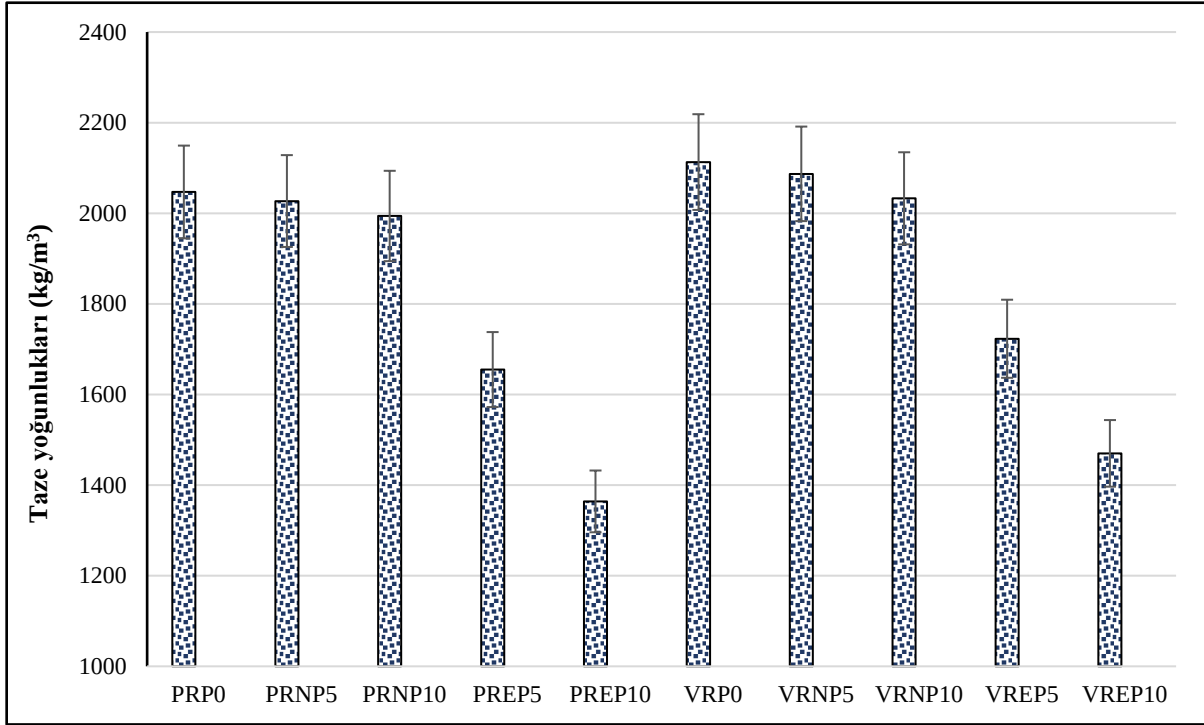


Şekil 15. Taze yoğunluk (a), basınç dayanımı (b), eğilme dayanımı (c), yarmada çekme dayanımı (d), UPV (e) ve elastisite modülü (f) deney görüntüleri

4. BULGULAR

4.1. Taze Yoğunluk

Şekil 16.'da farklı reçine tiplerinin bağlayıcı olarak kullanıldığı ve farklı oranlara sahip ham perlit ve genişletilmiş perlit agregalarından oluşan polimer betonların taze yoğunluk sonuçları verilmiştir.



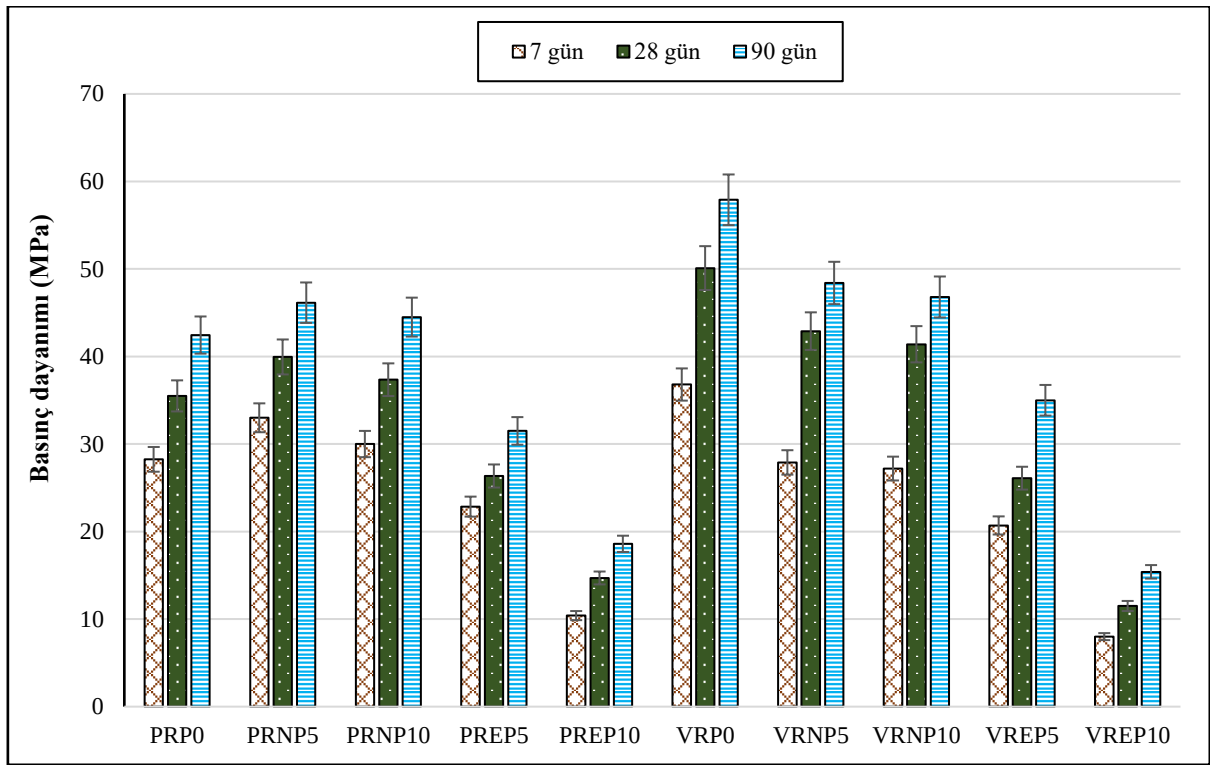
Şekil 16. Polimer betonların taze yoğunlukları

Polimer betonlarda perlit agregası kullanımı beraberinde taze yoğunluk değerlerinde azalma meydana getirmiştir. Bu azalmada perlitlerin gözenekli yapıya sahip oluşları ile birlikte ham perlit ile genişletilmiş perlit agregalarının özgül ağırlıklarının (sırasıyla 1.96 kg/m^3 ile 1 kg/m^3), kuvars agregası ile çakılın özgül ağırlıklarından (sırasıyla 2.64 kg/m^3 ile 2.625 kg/m^3) çok daha düşük oluşunun etkili olduğu değerlendirilmektedir (Bakhshi vd., 2023a; Bulut, 2024; Thillo vd., 2021). Tüm gruplar gözönüne alındığında, en yüksek taze yoğunluk 2113 kg/m^3 ile vinilester reçineli kontrol betonunda (VRP0), en düşük taze yoğunluk ise 1364 kg/m^3 ile %10 genişletilmiş perlit içeren polyester reçineli polimer betonda (PREP10) elde edilmiştir. Her iki reçine tipi içinde ham perlit agregasının genişletilmiş perlit agregasına göre kontrol betonlarına daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Örneğin polyester reçineli

kontrol betonunun (PRP0) taze yoğunluk değeri 2047 kg/m^3 iken bu değer %5 (PRNP5) ve %10 (PRNP10) ham perlitli polyester reçineli betonlarda sırasıyla 2027 kg/m^3 ve 1994 kg/m^3 olarak kontrol betonuna yakın elde edilmiştir. Ancak genleştirilmiş perlit agregalarının %5 (PREP5) ve %10 (PREP10) kullanımı sonucunda taze yoğunluk değerleri sırasıyla 1655 kg/m^3 ve 1364 kg/m^3 bulunarak polyester reçineli kontrol betonundan yaklaşık %19 ila %34 oranında daha az belirlenmiştir. Bu durum vinilester reçineli perlit agregalı polimer betonlarda da benzer şekilde gerçekleşmiştir.

4.2. Basınç Dayanımı

Polimer betonların mekanik özellikleri üzerinde etkili olan faktörlerin agregaların gradasyonu, tipi ve dayanımı, reçine tipi ve içeriği, dolgu maddesinin tipi ve miktarı olduğu ifade edilmiştir (Gorninski vd., 2007; Jafari vd., 2018; Shokrieh vd., 2011). Vinilester ve polyester reçineli ham ve genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları, Şekil 17.'de verilmiştir. Tablo 12.'de ise basınç dayanımları ile birlikte diğer dayanım sonuçları da kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Buna göre tüm gruplar arasında en yüksek basınç dayanımı 90 gün sonunda perlit içermeyen vinilester reçineli kontrol betonunda (VRP0/90) 57.9 MPa ile elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise %10 genleştirilmiş perlit agregalı vinilester reçineli polimer betonda 7 gün sonunda (VREP10/7) 8 MPa ile elde edilmiştir. Polyester reçineli polimer betonlarda gün parametresinden bağımsız bir şekilde ham perlitin agrega olarak kullanımı beraberinde kontrol betonundan daha yüksek basınç dayanımları getirmiştir. Örneğin 28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, polyester reçineli kontrol betonunun basınç dayanımı (PRP0/28) 35.5 MPa iken, bu değer %5 ham perlitli polyester reçineli polimer betonda (PRNP5/28) 39.95 MPa, %10 ham perlitli polyester reçineli polimer betonda (PRNP10) ise 37.35 MPa olarak elde edilmiştir. Diğer günlerde de benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Bu sonuç üzerinde polyester reçine-ham perlit agregası arasındaki güçlü aderansın sonucunda reçinenin agregaları daha iyi sarmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca deney esnasında polyester reçine ile ham perlit arasındaki bağlanmanın genleştirilmiş perlitten daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İleride verilecek SEM analizi bölümünde de bu durum teyit edilmiştir. Genleştirilmiş perlitin hem %5 hem de %10 oranlarında agrega olarak değerlendirilmesi ise basınç dayanımlarını tüm günler için düşürmüştür. Genleştirilmiş perlitin gözenekli yapısı ile düşük dayanımının bu duruma yol açtığı, literatürdeki diğer çalışmalarla uyum göstermiştir (Bakhshi vd., 2023a; Bakhshi vd., 2023b).



Şekil 17. Polimer betonların basınç dayanımları

Tablo 12. Polimer betonların basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanım sonuçları

Kod	Basınç day. (MPa)			Eğilme day. (MPa)			Yar. Çek. Day. (MPa)		
	7g	28g	90g	7g	28g	90g	7g	28g	90g
PRP0	28.25	35.5	42.45	3.75	5.51	6.41	3.15	4.3	4.6
PRNP5	33	39.95	46.15	4.59	6.28	7.26	4.45	5.4	5.65
PRNP10	30	37.35	44.5	3.83	5.02	6.15	3.8	4.8	5.1
PREP5	22.85	26.35	31.5	3.64	4.26	5.1	3	4	4.55
PREP10	10.4	14.7	18.6	2.57	3.28	3.98	2.4	2.6	2.9
VRP0	36.8	50.1	57.9	7.13	7.89	8.14	4.6	5.6	5.9
VRNP5	27.9	42.9	48.4	7	7.74	8.03	3.3	5.4	5.7
VRNP10	27.2	41.4	46.8	4.96	6.35	7.12	3.1	4.8	5.1
VREP5	20.7	26.1	35	3.7	4.68	5.54	2.8	3.9	4.1
VREP10	8	11.5	15.4	2.64	3.09	3.71	2.1	2.7	3.1

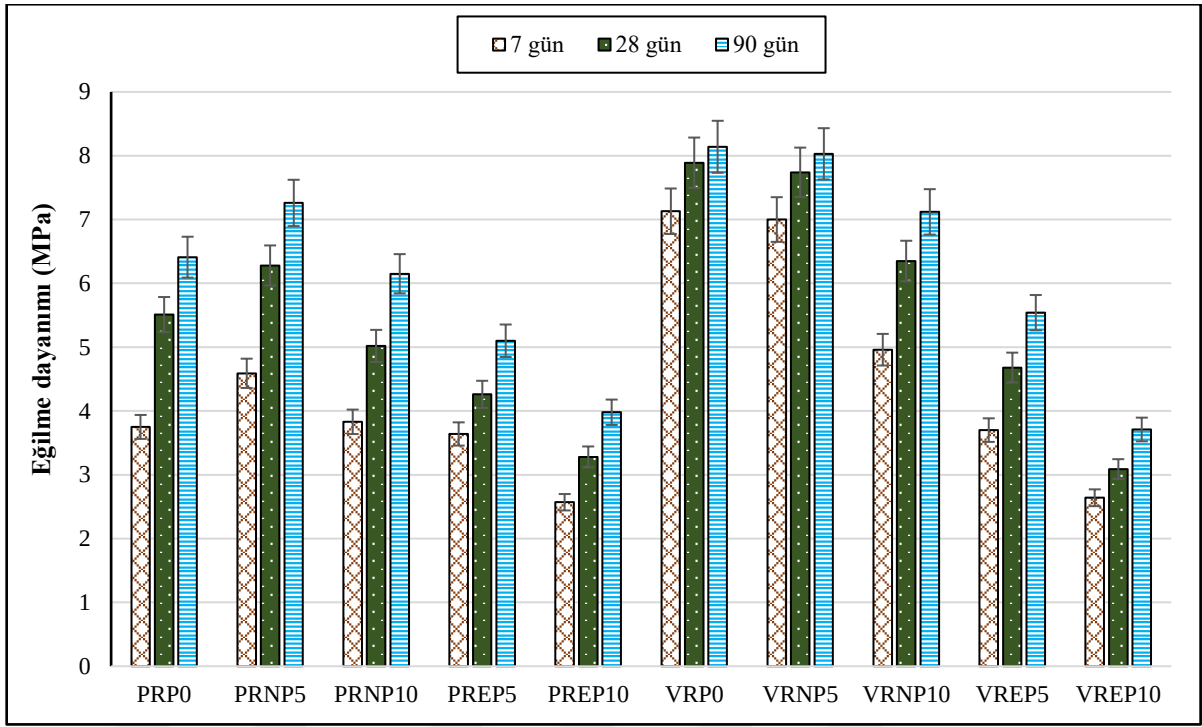
Vinilester reçineli polimer betonlarda hem ham perlit hem de genleştirilmiş perlit agregalarının artan oranlarda kullanımı sonucunda basınç dayanımları azalmıştır. Perlit agregaları-vinilester reçine arayüzeyindeki yapışmanın daha zayıf olması bu duruma neden olmuş olabilir (Sengül vd., 2011; Tasnim vd., 2021). Ayrıca vinilester reçinesi, dolgu malzemelerini kaplamada yetersiz kalarak düşük aderanslı ve reçine-perlit agregaları arasında zayıf gerilim transferi nedeniyle düşük dayanımlı polimer betonların elde edildiği değerlendirilmektedir (Akın ve Polat, 2022). Yine de gün parametresine bağlı olarak ham

perlitin geliştirilmiş perlite göre vinilester reçineli polimer betonlarda çok daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Örneğin 90 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, vinilester reçineli kontrol betonunun basınç dayanımı (VRP0/90) 57.9 MPa iken, bu değerler %5 ve %10 ham perlitli polimer betonlarda (VRNP5/90 ve VRNP10/90) sırasıyla 48.4 MPa ile 46.8 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ve %10 geliştirilmiş perlitli polimer betonlarda (VREP5/90 ve VREP10/90) ise bu değerler sırasıyla 35 MPa ile 15.4 MPa olmuştur. Son olarak özellikle vinilester reçineli perlit agregalı polimer betonlarda daha fazla gözlemlenen basınç dayanımı kaybına, tüm karışımlarda reçine/dolgu oranı sabit tutulup artan oranlarda perlit eklendiğinden, etkili reçine hacim içeriğinin kademeli olarak azalmasının neden olduğu söylenebilir (Nóvoa vd., 2004).

Muthukumar and Mohan (Muthukumar ve Mohan, 2004), beş farklı reçine tipi kullanarak ürettiği polimer betonların basınç dayanımlarının zamanla arttığını gözlemlemiştir. Bu çalışmada da benzer şekilde polimer betonların kür süresi arttıkça basınç dayanımlarında artışlar meydana gelmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, reçine tipi açısından vinilester reçinenin ve perlit tipi ve oranı olarak da özellikle polyester reçinesi ile birlikte üretildiğinde %5 oranında ham perlitin basınç dayanımı açısından ideal olarak değerlendirilebileceği, ilk kez bu çalışma sonucunda belirlenmiştir. Ayrıca polyester reçineli perlit agregalı polimer betonların 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarının %80'ine 7 günde ulaşılabilmesinin görülmesi, potansiyel olarak bu kompozitlerin prekast uygulamalarında kullanılabileceğini kanıtlamıştır (Chen vd., 2018; Lokuge ve Aravinthan, 2013).

4.3. Eğilme Dayanımı

Şekil 18.'de, farklı reçine tiplerinin bağlayıcı olarak kullanıldığı farklı oranlara sahip ham ve geliştirilmiş perlit agregalı polimer betonların gün parametresine göre eğilme dayanımı sonuçları verilmiştir. Şekil 18.'e göre en yüksek eğilme dayanımı 8.14 MPa ile vinilester reçineli kontrol betonunda (VRP0/90), en düşük eğilme dayanımı ise 2.57 MPa ile %10 geliştirilmiş perlit agregalı polyester reçineli polimer betonda (PREP10/7) elde edilmiştir. Polimer beton üretimlerinde bağlayıcı malzeme olarak polyester reçinesi ile birlikte özellikle %5 oranında ham perlit agregasının kullanımı, beraberinde kontrol betonundan her gün için daha yüksek eğilme dayanımları getirmiştir.

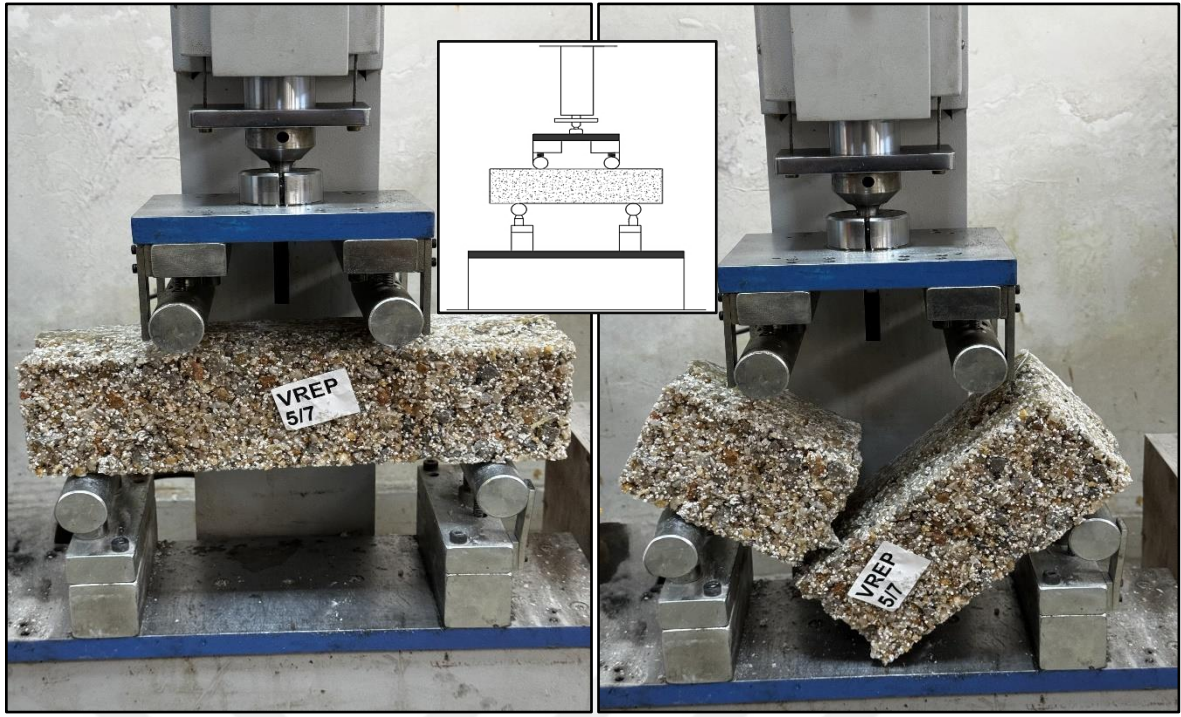


Şekil 18. Polimer betonların eğilme dayanımları

Örneğin 90 gün sonunda %5 ham perlit agregalı polyester reçineli polimer betonun (PRNP5/90) eğilme dayanımı kontrol betonuna (PRP0/90) göre yaklaşık %13 artış göstermiştir (bu değerler sırasıyla 7.26 MPa ile 6.41 MPa). 7 ve 28 günlük sonuçlarda da benzer davranış gözlemlenmiştir. Polyester reçinesi ile %5 ham perlit oranı arasındaki yüksek aderansın, eğilme dayanımı sonuçlarını olumlu etkilediği değerlendirilmektedir. Polyester reçinesi ile genişletilmiş perlit agregalarının birlikte kullanıldığı polimer betonların eğilme dayanımlarında ise diğer betonlara göre belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Bu durumun oluşması, polimer betonların eğilme dayanımı üzerinde doğrudan etkili olan agrega boyutu ile yapısına atfedilebilir (Saribiyik vd., 2013; Shokrieh vd., 2011). Çünkü boyut olarak daha büyük agregalarla hazırlanan polimer betonların, daha küçüklerle hazırlananlardan yaklaşık %10 daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu literatürde belirtilmiştir (Jafari vd., 2018). Bu çalışmada da ham perlitin genişletilmiş perlite göre daha büyük boyuta sahip olduğu bilinmektedir. Özellikle artan oranlarda genişletilmiş perlit agregalı polimer betonlarda matris ile dolgu malzemesi arasındaki zayıf yapışma nedeniyle eğilme dayanımlarının azalması beraberinde çatlak ve gevrek kırılmayla çok çabuk gerçekleşmiştir (Martínez-López vd., 2021). Bu durum hem deney esnasında gözlemlenmiş hem de ileriki bölümlerde bahsedilecek SEM analiz sonuçlarına da yansımıştır.

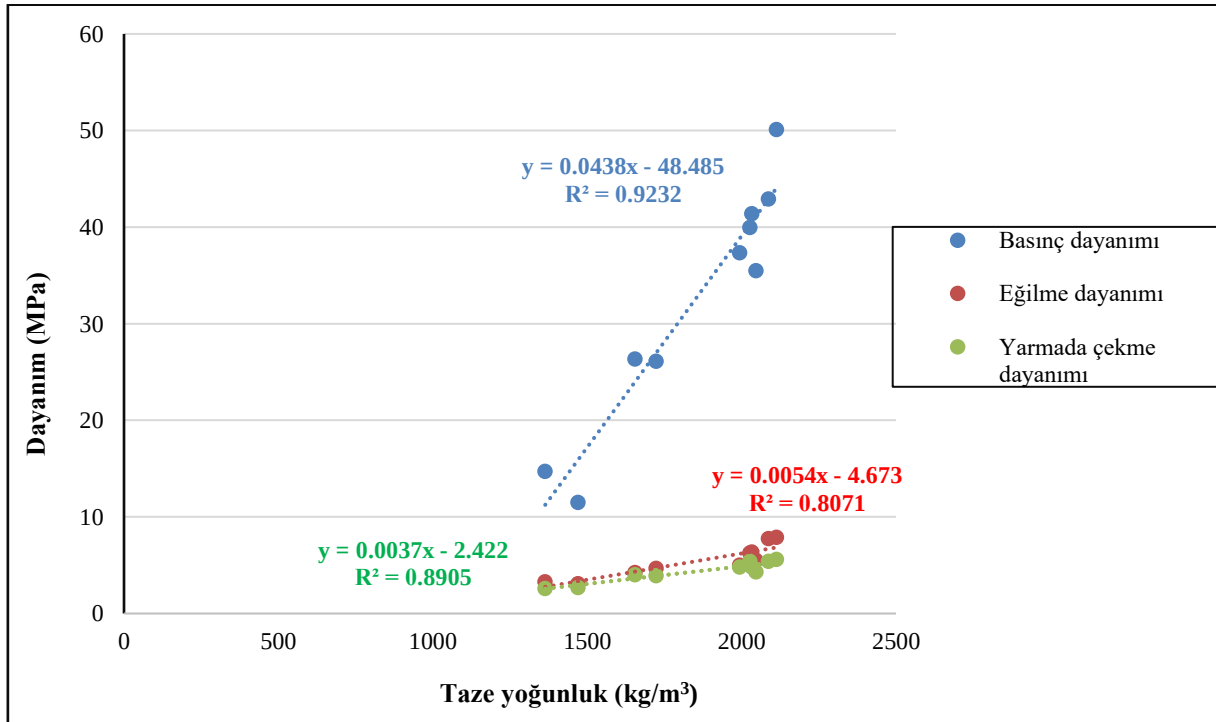
Her ne kadar perlitlerin agrega olarak kullanımı, vinilester reçineli polimer betonların eğilme dayanımlarını düşürse de özellikle %5 ham perlitli polimer betonlarda bu düşüş çok daha az gerçekleşmiştir. Örneğin 28 gün sonunda vinilester reçineli kontrol betonu (VRP0/28) ile %5 ham perlitli polimer betonun (VRNP5/28) eğilme dayanımları neredeyse birbirine eşit elde edilmiştir (bu değerler sırasıyla 7.89 MPa ile 7.74 MPa'dır). %5 ve %10 genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonlarda ise eğilme dayanımları 28 gün için dramatik bir şekilde azalarak sırasıyla 4.68 MPa ile 3.09 MPa düzeyine inmiştir. Tıpkı basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi eğilme dayanımlarındaki azalmalar, kuvars agregası (polimer beton üretimleri için doğal agregadır) içeriğinin azalmasıyla ilişkilendirilebilir (Jo vd., 2008). Özellikle genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonlarda diğer gruplara göre daha yüksek ince parçacığın varlığı, daha fazla gözeneklilik reçine ile uyumsuzluk yaratarak matriste süreksizler yaratmış olabilir (Alexa-Stratulat vd., 2024; Seco vd., 2020).

Tüm polimer beton grupları için kür süresinin artışının eğilme dayanımları üzerinde olumlu bir etkisi olmuştur. Basınç dayanımlarına benzer şekilde kür süreleri ile eğilme dayanımı kazanım oranları arasında pozitif bir ilişki sağlanmıştır (Moodi vd., 2018; Ragul vd., 2022; Tasnim vd., 2021). Bu çalışma sonucunda eğilme dayanımları gözönüne alındığında özellikle %5 ham perlit oranının iki reçine tipi için de uyum göstererek agrega olarak polimer beton üretimlerinde değerlendirilebileceği rahatlıkla söylenebilmektedir. Literatürde çalışmaların birçoğunda reçine oranlarının %70'lere kadar çıkması sonucu eğilme dayanımlarında yüksek sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir (Ataabadi vd., 2021; Ferdous vd., 2020; Hameed ve Hamza, 2019). Ancak bu çalışmada %15 sabit reçine oranı kullanılarak hem maliyet hem de işlenebilirlik dikkate alınarak üretimler yapılmış ve yine geleneksel betona göre yüksek seviyede eğilme dayanımlarına ayırt edici bir şekilde ulaşılmıştır. Son olarak vinilester reçineli %5 genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonun 7 günlük eğilmede çekme deneyine ait kırılma modu şematik çizim ile birlikte Şekil 19.'da sunulmuştur.



Şekil 19. VREP5/7' in kırılma modu

Üretimi gerçekleştirilen tüm polimer beton gruplarına ait 28 günlük dayanım sonuçları ile taze yoğunluk sonuçları arasındaki ilişki, Şekil 20.'de verilmiştir.

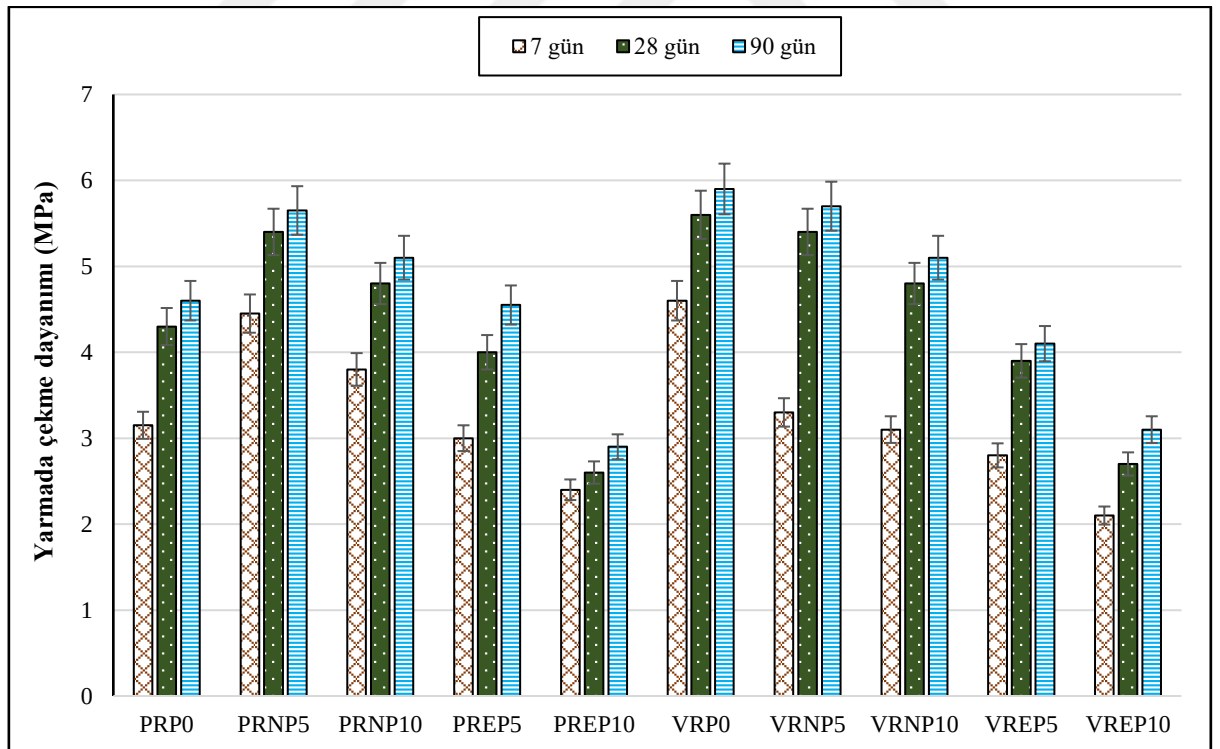


Şekil 20. Polimer betonların taze yoğunluk ve dayanım sonuçları arasındaki ilişkiler

Buna göre basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları ile taze yoğunluklar arasındaki ilişkiler için R^2 değerleri sırasıyla 0.92, 0.80 ve 0.89 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, dayanım sonuçları ile taze yoğunluklar arasında yüksek bir korelasyonun varlığını göstermektedir. Taze yoğunluk değerlerinin azalışı beraberinde dayanım sonuçlarını da düşürmüştür. Taze yoğunluk ile dayanım sonuçları arasındaki ilişkiye dair benzer davranış, Rochman ve arkadaşları (Rochman vd., 2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da elde edilmiştir.

4.4. Yarmada Çekme Dayanımı

Polimer betonlara ait yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 21.'de verilmiştir. Buna göre tüm gruplar arasında en yüksek yarmada çekme dayanımı vinilester reçineli kontrol betonunda (VRP0/90) 5.9 MPa ile elde edilmiştir. En düşük yarmada çekme dayanımı ise %10 genişletilmiş perlit agregalı vinilester reçineli polimer betonda (VREP10/7) 2.1 MPa ile elde edilmiştir.



Şekil 21. Polimer betonların yarmada çekme dayanımları

Ham perlitin %5 ve %10 oranlarında agrega olarak yer aldığı polyester reçineli polimer beto+nlarnın yarmada çekme dayanımı sonuçları, 7, 28 ve 90 gün için de kontrol betonundan yüksek çıkmıştır. Örneğin 7 günlük sonuçlar incelendiğinde, %5 ve %10 ham perlit agregalı polyester reçineli polimer betonların (PRNP5/7 ile PRNP10/7) yarmada çekme dayanımları sırasıyla 4.45 MPa ile 3.8 MPa iken polyester reçineli kontrol betonunda bu değer 3.15 MPa olarak bulunmuştur. Hem ham perlitin genleştirilmiş perlit agregasından daha iri oluşu hem de polyester reçine ile ham perlit arasındaki güçlü uyumun bu sonuçlar üzerinde etkili olduğu değerlendirilmektedir (Jafari vd., 2018; Moodi vd., 2018). Genleştirilmiş perlit agregasının polyester reçineli polimer betonda kullanımı ise yarmada çekme dayanımlarını tüm günlerde düşürmüştür. Bu durum; genleştirilmiş perlit agregaları ile reçine arasındaki zayıf bağlanma ve arayüzey geçiş bölgesinin düşük dayanımına atfedilebilir (Jafari ve Toufigh, 2017). Ayrıca ilerde SEM analiz bölümünde bahsedileceği gibi benzer gözlemler elde edilmiştir.

Vinilester reçine ile ham ve genleştirilmiş perlitlerin biraraya getirilerek üretildiği polimer betonların yarmada çekme dayanımlarında kontrol betonuna göre her gün için azalmalar meydana gelmiştir. Doğal agrega içeriğinin (bu çalışmada kuvars agregası) artan oranlarda perlit kullanımı sonucu azalması, yarmada çekme dayanım sonuçlarını olumsuz etkilemiş olabilir (Jo vd., 2008). Örneğin 28 gün sonunda vinilester reçineli polimer betonun (VRP0/28) yarmada çekme dayanımı 5.6 MPa iken, %10 ham perlitli polimer betonda (VRNP10/28) bu değer 4.8 MPa'a düşmüş, %10 genleştirilmiş perlitli polimer betonda (VREP10/28) ise 2.7 MPa'a kadar azalma devam etmiştir.

Kür süresi artışı tıpkı basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarında olduğu gibi yarmada çekme dayanımı sonuçlarını pozitif etkilemiştir. Genel olarak bu çalışmada üretilen polimer betonların örneğin 7 günlük kür sonucu yarmada çekme dayanımları, 28 günlük kürlenelerin yaklaşık %75 ila %80'i kadar elde edilmiştir. Benzer gözlemler Chen ve arkadaşları (Chen vd., 2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da belirtilmiştir. Yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre vinilester reçineye göre polyester reçinenin, genleştirilmiş perlit agregasına göre de ham perlitin kullanıldığı polimer betonlardan daha iyi sonuçlar alınmıştır. Literatürdeki çalışmalarda reçine oranlarının %70'e varacak şekilde kullanımı beraberinde polimer betonların yarmada çekme dayanımlarında artış getirmiştir. Örneğin Manda ve arkadaşları (Manda vd., 2023), %70 reçine kullanarak ürettiği polimer betonların yarmada çekme dayanımlarının ortalama 6.08 MPa olarak elde edildiğini rapor etmiştir. Hameed ve Hamza (Hameed ve Hamza, 2019) ise deneysel çalışmalarında polimer betonlar için en

yüksek yarmada çekme dayanımına %30 reçine oranı ile ulaştıklarını ifade etmişlerdir. Ataabadi ve arkadaşları (Ataabadi vd., 2021), %21 reçine oranı kullanarak ürettikleri polimer betonlarda 28 günlük kür süresi sonunda 5 MPa yarmada çekme dayanımı elde ettiklerini bildirmişlerdir. Bu çalışmada literatürden farklı ve özgün bir şekilde çok daha düşük reçine oranı ile (%15) polyester/vinilester reçineli ham perlit agregalı polimer betonlar üretilip yaklaşık 6 MPa yarmada çekme dayanımlarına ulaşılmıştır. 28 gün sonunda hem polyester hem de vinilester reçineli ham perlit agregalı polimer betonlar ile 5 MPa yarmada çekme dayanımı aşılmıştır. Maliyet, işlenebilirlik ve sürdürülebilirlik kriterleri gözönüne alındığında literatür açısından bu sonuçların çok değerli olduğu düşünülmektedir. Son olarak polyester reçineli %5 ham perlit agregalı polimer betonun 7 günlük yarmada çekme deneyine ait kırılma modu Şekil 22.'de sunulmuştur. Eğilmede çekme dayanım sonuçları, yarmada çekme dayanımlarından daha yüksek elde edilmiştir. Bu farklılık, numunelerin kırılma modlarındaki farklılıklara atfedilebilir (Ferdous vd., 2020). Şekil 19.'da kirişin çok küçük bir alanında yüksek basınç direnci nedeniyle eğilme kırılması gerçekleşmişken yarmada çekme deneyinde Şekil 22.'de görüldüğü gibi silindirin uzunluğunun tümü maksimum gerilme altında kalmıştır. Bu da çatlak başlaması ve yayılmasının gerçekleştiği yarıma kısmında zayıf nokta bulunma olasılığının daha yüksek olmasını beraberinde getirmiştir.



Şekil 22. PRNP5/7' nin kırılma modu

4.5. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)

Betonların iç yapısında meydana gelen kusurları, çatlakları ve boşlukları tahribatsız bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla kullanılan deneysel yöntemlerden birisi ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyidir (Aydın ve Bulut, 2024). Bu doğrultuda 7, 28 ve 90 gün kür süreleri sonucunda farklı tip reçine ve perlitlere sahip polimer betonların UPV deneyleri gerçekleştirilerek Şekil 23.'te sunulmuştur. Şekil 23.'ten bağlayıcı reçine tipi, perlit tipi ve oranı, kür süresi gibi parametrelerin polimer betonların UPV sonuçları üzerinde etkili olup farklı sonuçlara ulaşıldığını göstermektedir (Mohal vd.,2023).

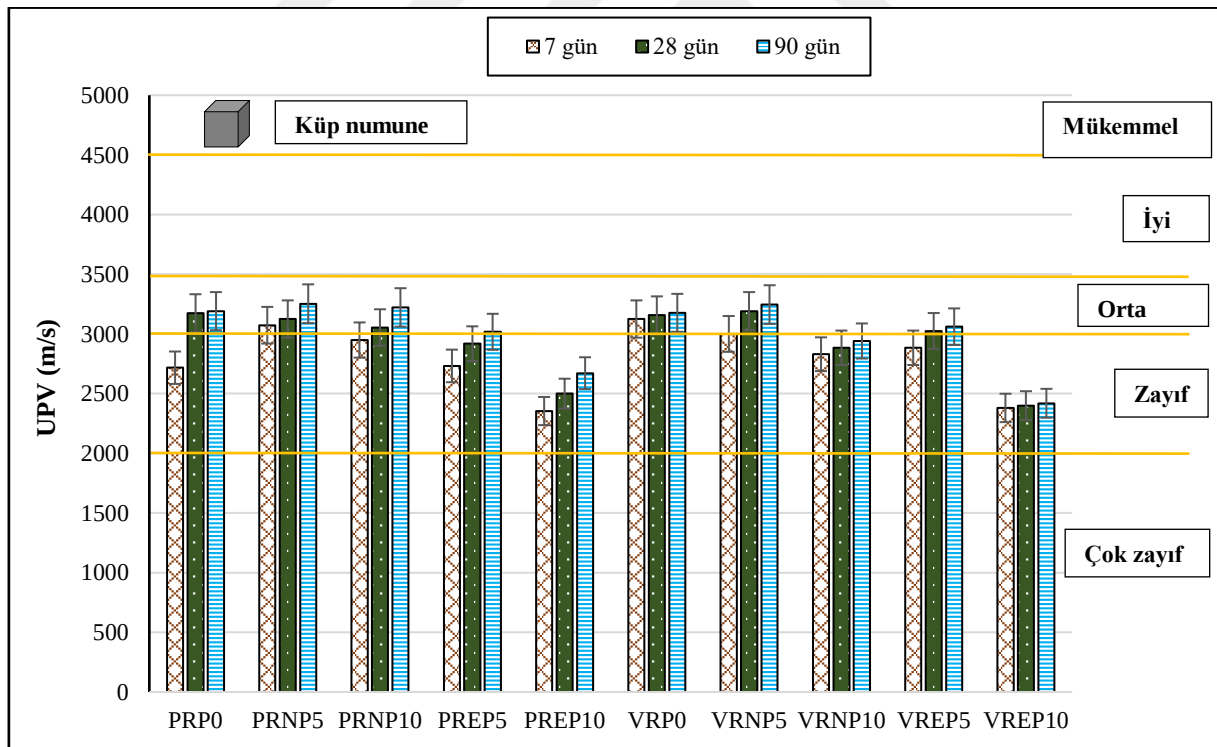
Polyester reçineli polimer betonlarda ham perlitin agrega olarak kullanılması, genleştirilmiş perlite göre daha yüksek UPV sonuçları elde edilmesine yol açmıştır. Örneğin, polyester reçineli kontrol betonunun (PRP0/7) 7 günlük UPV değeri 2717 m/s iken, bu değer %10 ham perlitli polyester reçineli polimer betonda (PRNP10/7) 2949 m/s'ye yükselmiş, %10 genleştirilmiş perlitli polyester reçineli polimer betonda (PREP10/7) ise 2354 m/s'ye kadar düşmüştür. Bağlayıcı tipinin vinilester reçine olduğu polimer betonlarda ise özellikle %5 ham perlit agregasının yer aldığı polimer betonlar diğer gruplardan daha yüksek UPV değerlerine ulaşmıştır. Örneğin 28 günlük sonuçlar incelendiğinde, vinilester reçineli kontrol betonunun (VRP0/28) UPV değeri 3157 m/s iken, %5 ham perlitli vinilester reçineli polimer betonda (VRNP5/28) bu değer 3191 m/s'ye yükselmiş, %5 genleştirilmiş perlitli vinilester reçineli polimer betonda (VREP5/28) ise 3024'e düşmüştür.

Ham perlitte var olan boşlukların hem polyester hem de vinilester reçine ile düzgün bir şekilde doldurularak agregalar sıkıca birbirine ve matrise yapıştığı için UPV değerlerine pozitif katkı sunduğu düşünülmektedir (Heidarnezhad vd., 2020). Perlit tipinin genleştirilmiş perlit olması ve artan oranlarda agrega olarak kullanımı sonucunda ise UPV değerlerinin düşmesi üzerinde genleştirilmiş perlitin iç yapısının çok gözenekli ve içi boş oluşunun oldukça etkili olduğu söylenebilir (Akyuncu ve Sanliturk, 2021). Özellikle %10 genleştirilmiş perlit agregası kullanımı beraberinde matriste hava boşluğunu artırarak gözenek hacmini artırmış ve UPV değerlerini azaltmış olabilir (Jafari ve Toufigh, 2017).

Literatürdeki çalışmalarda genellikle yüksek reçine oranları kullanıldığında polimer betonların UPV sonuçlarının da arttığı bildirilmiştir (Jafari vd., 2018). Örneğin Mohal ve arkadaşları (Mohal vd., 2023) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda polimer betonda

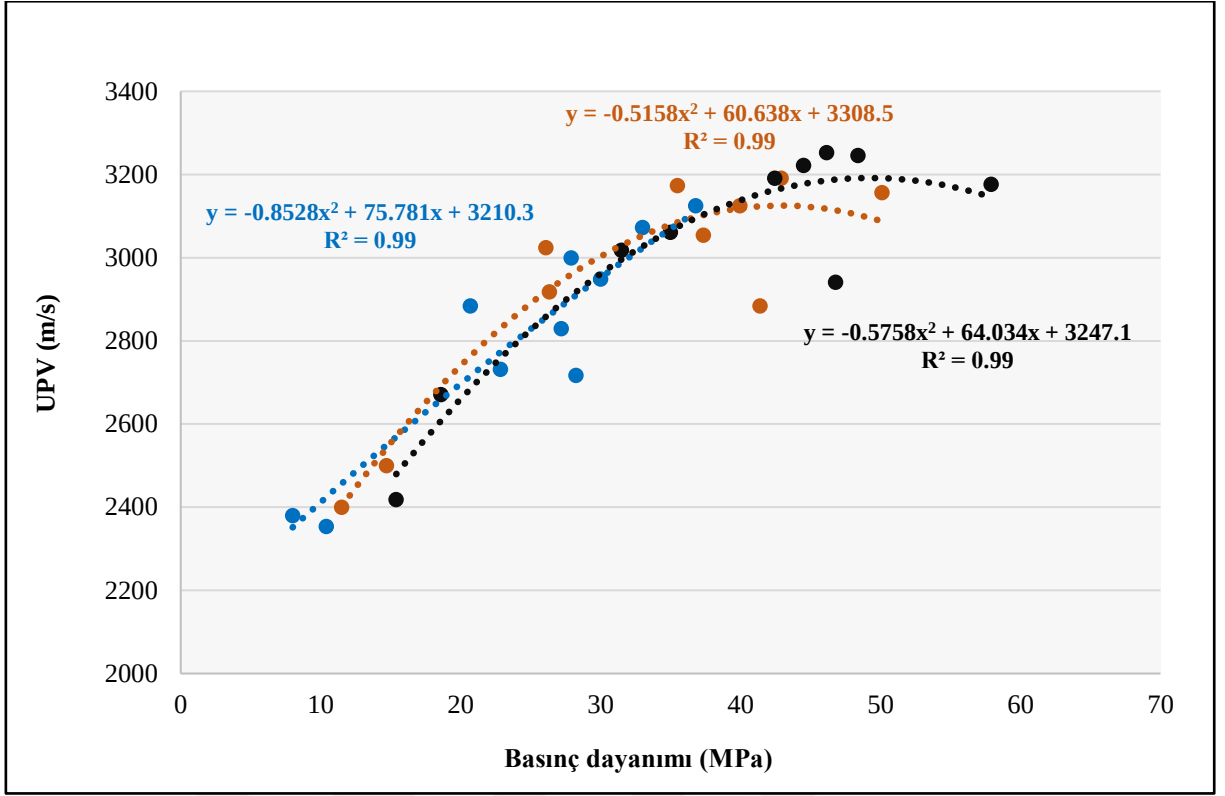
ideal reçine oranının %35 olduğu ve 3101 m/s UPV değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ise çok daha düşük reçine oranı (%15) kullanılarak üretilen hem perlitsiz hem de perlitli polyester/vinilester reçineli polimer betonlar ile 3100 m/s UPV değerinin üzerine çıkmıştır. Bu durumun, diğer deney sonuçlarında da görüldüğü gibi polimer betonlar alanında her açıdan literatüre özgün bir katkı sunacağı öngörülmektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında hem ham perlit hem de genleştirilmiş perlit agregalarının %10 oranında kullanımı UPV değerlerini oldukça azaltmıştır. Özellikle %5 ham perlitli hem vinilester hem de polyester reçineli polimer betonların UPV sonuçlarının tüm gruplar arasında daha yüksek değerler verdiği bu çalışma ile ortaya çıkarılmıştır. Kür süresinin artışı polimer betonların tamamında UPV artışlarını da beraberinde getirmiştir. Son olarak betonların UPV değerlerine göre sınıflandırıldığı IS 13311 (1992) standardı doğrultusunda oluşturulan Şekil 23'ten 28 ve 90 gün sonunda PRP0, PRNP5, PRNP10, PREP5, VRP0, VRNP5 ve VREP5 kodlu polimer betonların orta kalite sınıfına girdikleri görülebilmektedir.

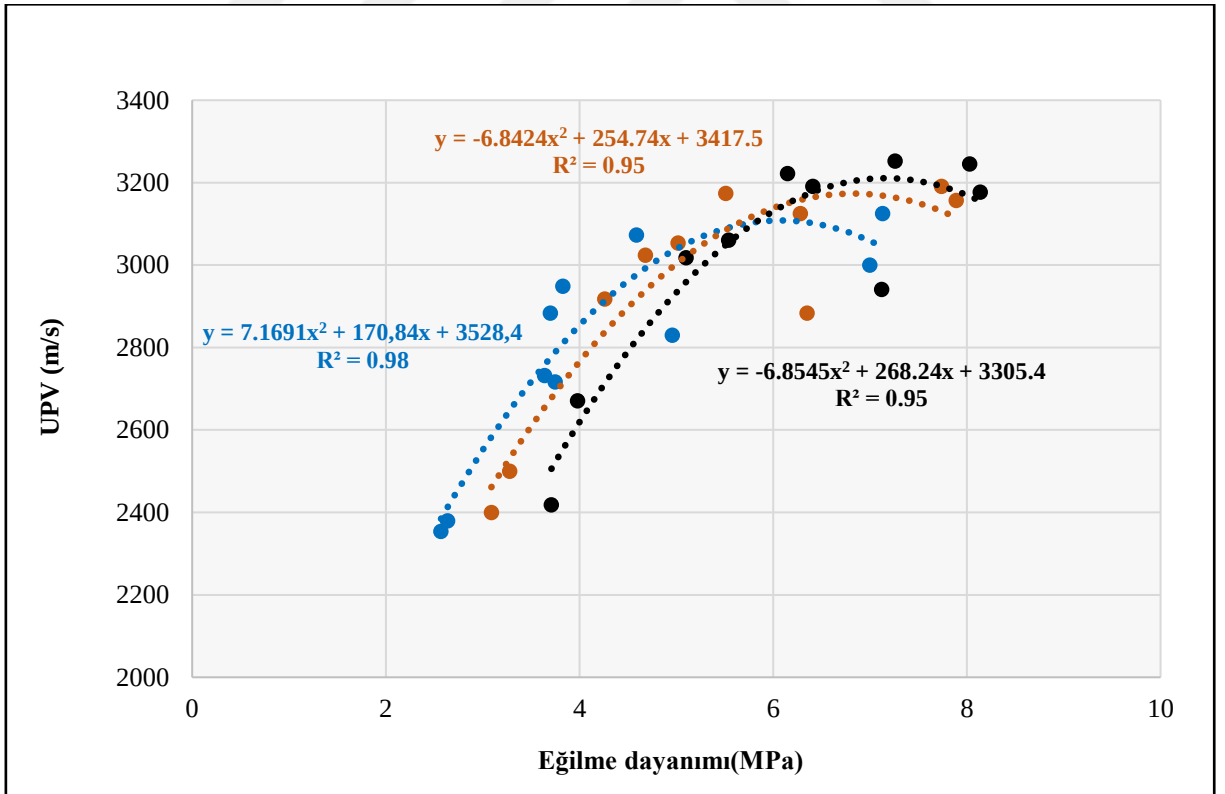


Şekil 23. Polimer betonların UPV değerleri

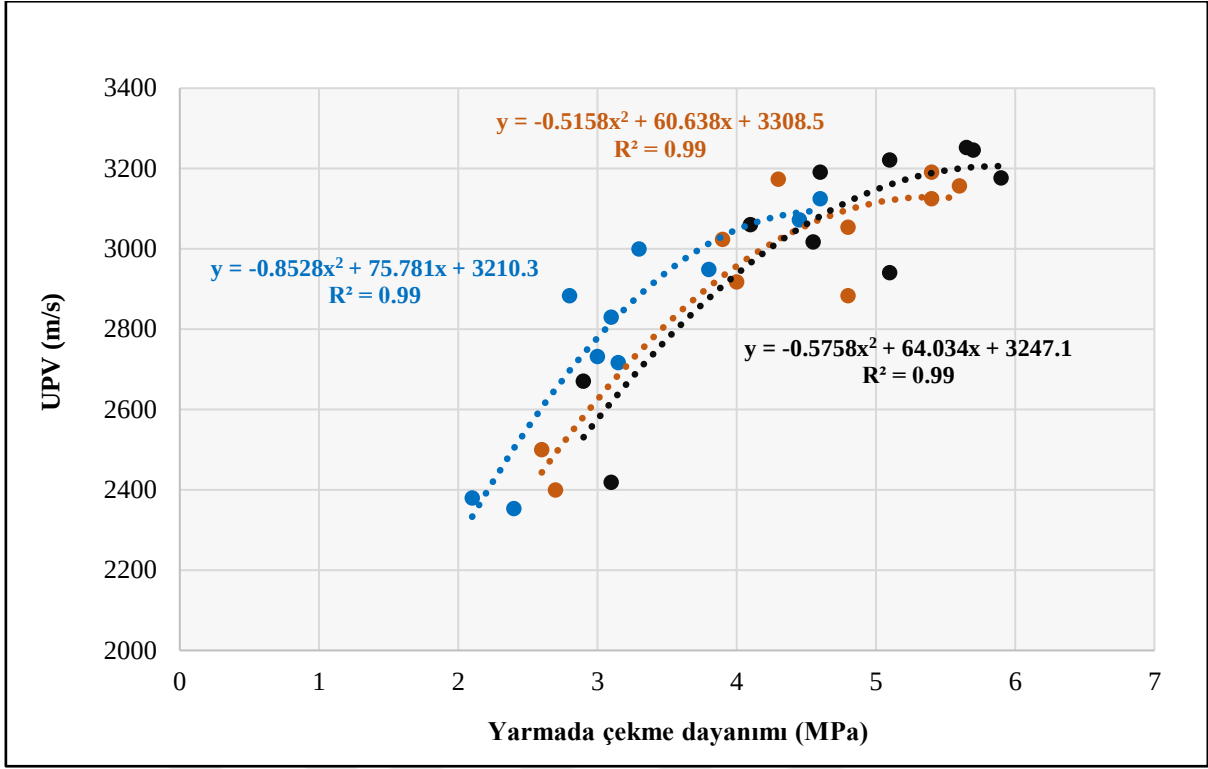
Şekil 24'de farklı reçine tipleri ile farklı perlit agregaları kullanılarak hazırlanan polimer betonlara ait dayanım sonuçları ile UPV değerleri arasındaki ilişkiler sunulmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 24. Polimer betonların UPV ve dayanım sonuçları arasındaki ilişkiler a) Basınç dayanımı - UPV, b) Eğilme dayanımı - UPV, c) Yarmada çekme dayanımı - UPV

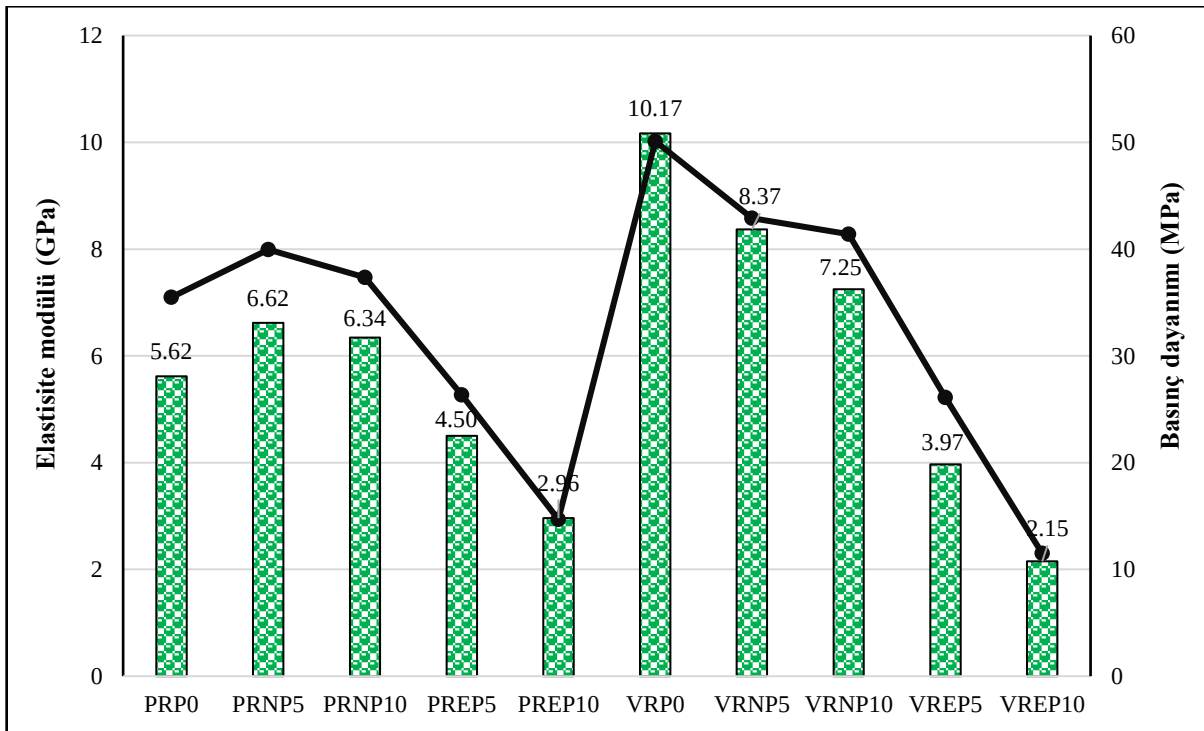
Şekil 24. (a)'da basınç dayanımı sonuçları ile UPV'ler arasında 7 (mavi renk), 28 (kırmızı renk) ve 90 (siyah renk) gün için de çok yüksek korelasyona sahip (R^2 değerleri 0.99'dur) polimer betonların üretilebildiği görülmektedir. Bu yüksek korelasyon, Şekil 24. (b) ve Şekil 24. (c)'de yer alan sırasıyla eğilme dayanımı-UPV ve yarmada çekme dayanımı-UPV ilişkilerinde de elde edilmiştir. Literatürde polimer betonların UPV değerleri ile dayanım sonuçları arasındaki ilişkilerin incelendiği sınırlı çalışmada da korelasyonun sağlandığı bildirilmiştir. Örneğin, Jafari ve Toufigh (Jafari ve Toufigh, 2017), kauçuklaştırılmış polimer betonda UPV-basınç dayanımı arasında R^2 değeri 0.99 olan korelasyon elde edildiğini belirtmiştir. Heidarnezhad ve arkadaşları (Heidarnezhad vd., 2020), hafif polimer betonda UPV-basınç dayanımı arasındaki ilişkiye ait R^2 değerini 0.95 bulmuştur. Bir diğer çalışmada (Akın ve Polat, 2022), atık lastik tozu ilave edilerek üretilen polimer betonun UPV-basınç dayanımı arasındaki ilişkide 0.76 R^2 değerine ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, ham perlit ve genişletilmiş perlit agregalı polyester/vinilester reçineli polimer betonların hem basınç hem eğilme hem de yarmada çekme dayanım sonuçlarını

tahmin edebilmek için UPV değerleri ile yüksek ilişkilerin elde edilmesi, literatür için değerli bulunmaktadır.

4.6. Elastisite modülü ve Tokluk

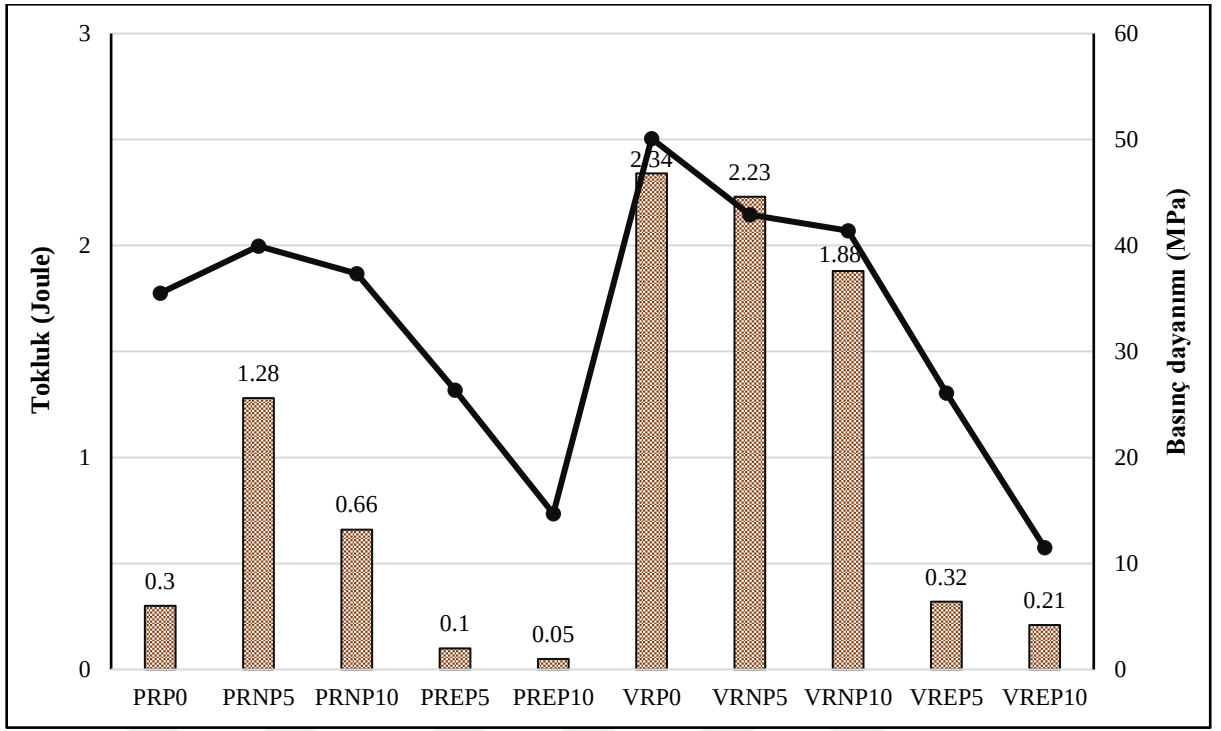
Beton/betonarme gibi malzemelerin deformasyon davranışını ve performanslarını tanımlayan öğelerden birisi de elastisite modülüdür (Gupta vd., 2016). Elastik deformasyon bölgesinde yer alan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi, elastisite modülünü vermektedir (Keleş vd., 2024). Literatürde elastisite modülü ölçümleri ile ilgili yapılan çalışmalarda tanjant ve sekant modülünün çokça kullanıldığı bilinmektedir (Galobardes vd., 2014). Bu çalışmada da sekant modülü ile ham ve genleştirilmiş perlit agregalarının farklı oranlarda kullanıldığı polyester ve vinilester reçineli polimer betonların yük-deplasman sonuçları doğrultusunda deformasyon kapasitelerindeki davranışsal değişiklikler araştırılmıştır. 28 günlük kür süresi sonucunda elde edilen elastisite modülü sonuçları ile basınç dayanımı sonuçlarına ait grafik, Şekil 25.'te verilmiştir. Buna göre %5 ve %10 oranlarında ham perlitin polyester reçineli polimer betonda agrega olarak kullanımı, kontrol betonuna (PRP0) göre beraberinde daha fazla sertlik getirerek elastisite modülünü artırmıştır. Genleştirilmiş perlit kullanımında ise bu durumun tam tersi yaşanarak elastisite modülü değerleri azalmıştır.



Şekil 25. Polimer betonların elastisite modülleri

%5 ham perlit agregalı polyester reçineli polimer betonun (PRNP5) elastisite modülü 6.62 GPa iken %10 genleştirilmiş perlit agregalı polyester reçineli polimer betonun (PREP10) elastisite modülü %55 azalarak 2.96 GPa'a düşmüştür. Ham perlit ve genleştirilmiş perlit agregaları kullanarak üretilen polyester reçineli polimer betonlarda gerçekleşen farklı elastisite modülü değerlerinin; agrega boyutu ve dağılımı, hava içeriği, boşluk yapısı, reçine ile bağ mukavemeti gibi etkenlere atfedilebileceği düşünülmektedir (Heidarnezhad vd., 2020). Vinilester reçineli polimer betonların elastisite modülü değerleri, genleştirilmiş perlitli olanlar hariç, polyester reçineli polimer betonlardan daha yüksek elde edilmiştir. Vinilester reçinesi kullanarak üretilen polimer betonların daha iyi performans vermesinin, özellikle ham perlit üzerinde tüm agrega yüzeyinin kaplanması, boşlukların reçine ile homojen ve üniform dolabilmesi ve aderansın doğru bir şekilde kurularak reçine-agrega arayüzeyinin gelişiminden kaynaklandığı söylenebilir (Akın ve Polat, 2022). %5 ham perlitin vinilester reçine ile kullanıldığında (VRNP5) elastisite modülü değeri 8.37 GPa iken polyester reçine ile kullanıldığında (PRNP5) %20 azalarak 6.62 GPa sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle genleştirilmiş perlit kullanımı ile birlikte vinilester reçineli polimer betonların elastisite modülü değerleri dramatik bir şekilde düşmüştür. Vinilester reçineli kontrol betonundan (VRP0) yaklaşık 5 kat daha az elastisite modülü değeri, %10 genleştirilmiş perlit agregalı vinilester reçineli polimer betonda (VREP10) elde edilebilmiştir (bu değerler sırasıyla 10.17 GPa ve 2.15 GPa'dır). Uçucu kll vinilester reçineli polimer betonların literatürdeki bir çalışmada (Lokuge ve Aravinthan, 2013) elastisite modülü değerlerinin 7 ila 13 GPa arasında elde edildiği düşünüldüğünde, bu çalışma için sadece kontrol ile ham perlitli vinilester reçineli polimer betonlarla o aralıktaki değerlere ulaşıldığı belirlenmiştir. Son olarak basınç dayanımı sonları ile elastisite modülü sonları literatürde belirtildiği gibi benzer davranış sergilemiştir (Chen vd., 2018; Martnez-Lpez vd., 2022).

şekil 26., polimer betonların tamamı için 28 günlük tokluk sonları ile birlikte basınç dayanımlarını göstermektedir.

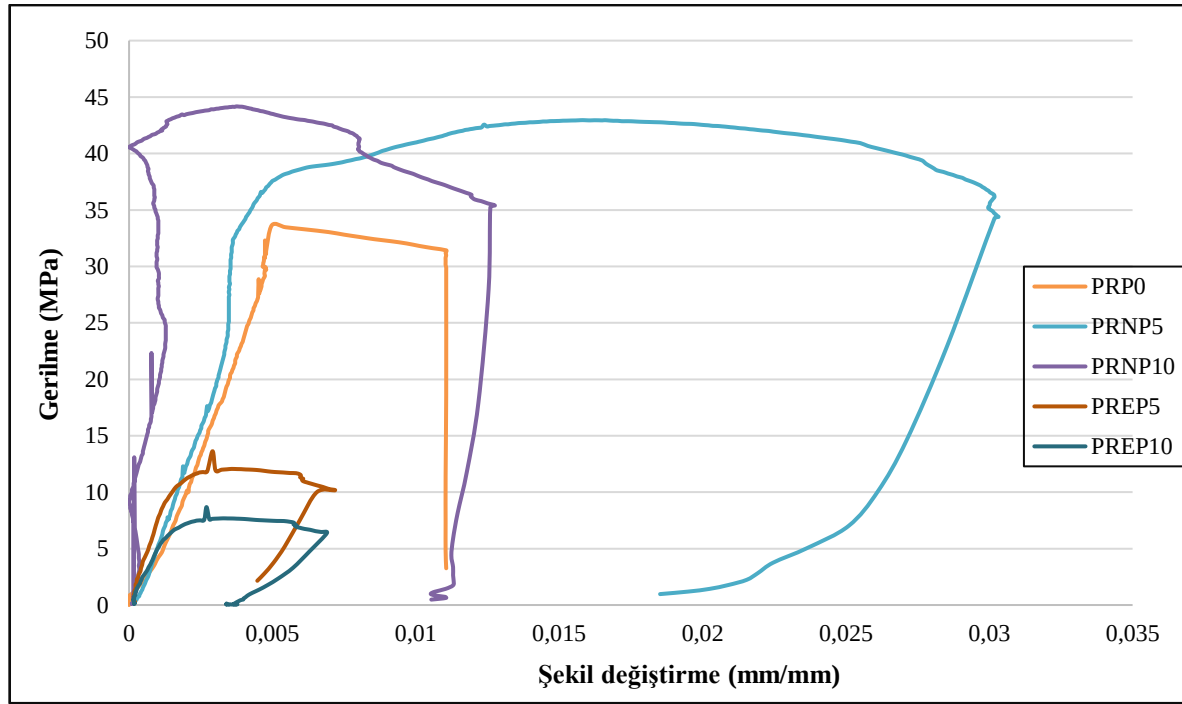


Şekil 26. Polimer betonların toklukları

Tıpkı elastisite modülünde olduğu gibi basınç dayanımı sonuçlarına paralel bir tokluk verileri elde edilmiştir. Ham perlit genişletilmiş perlite göre reçineler ile daha iyi uyum göstermiş, vinilester reçineli polimer betonlar poliestere göre daha yüksek tokluk sonuçlarına ulaşmıştır. Örneğin %10 ham perlitli vinilester reçineli polimer betonun (VRNP10) tokluk değeri 1.88 Joule iken polyester reçineli polimer betonların tamamı 0.05-1.28 Joule aralığında tokluk değerlerine sahip olabilmektedir. Genleştirilmiş perlit agregalarının nispeten daha gözenekli oluşu, reçineyi daha fazla emerek boşlukları artırmıştır. Ayrıca çok düşük özgül ağırlığa sahip olarak ikame için daha fazla hacim gerektirdiğinden reçine ile kaplanması gereken yüzey alanı artarak daha fazla boşluk oluşmuş ve bu da sonuçlara olumsuz yansımış olabilir (Al-Haydari vd., 2021).

Tokluğun bir diğer ifadesi olan enerji yutma kapasitesi bakımından polyester reçineli polimer beton kullanımında %5 ham perlitin kontrol betonundan bile daha yüksek sonuca ulaşarak polimer betonların tokluğunu iyileştirmesi, literatür açısından heyecan verici bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda vinilester reçineli polimer betonda da kontrol betonuna çok yakın değerler, %5 ve %10 ham perlit agregasının polimer beton üretiminde yer alması sonucu elde edilebilmiştir.

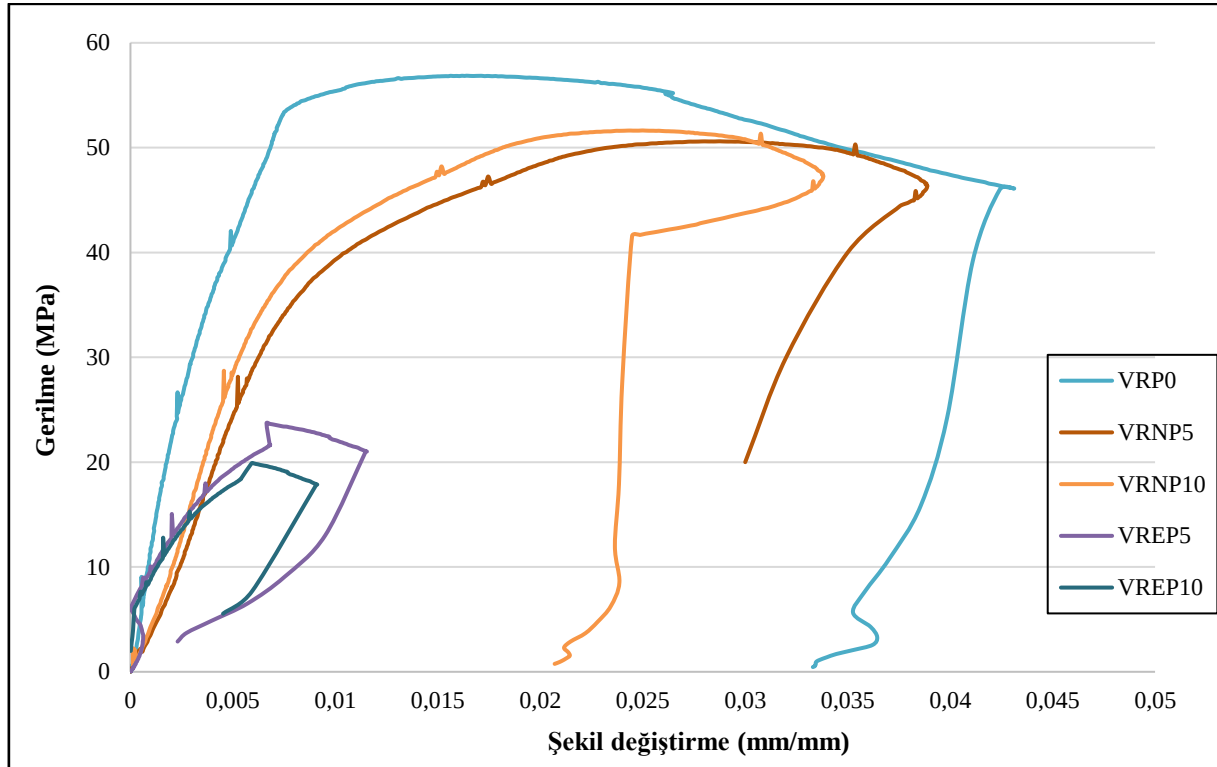
Şekil 27. ve Şekil 28., sırasıyla polyester ve vinilester reçineli perlit agregalı polimer betonların gerilme-şekil değiştirme davranışlarını gösteren eğrileri ifade etmektedir. Buna göre, elastisite modülü ve tokluk sonuçlarını teyit edecek nitelikte eğrilere ulaşılmıştır.



Şekil 27. Polyester reçineli polimer betonların gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Şekil 27.'den görülebileceği gibi, %5 ve %10 ham perlitli polyester reçineli polimer betonların (PRNP5, PRNP10) kontrol ve diğer betonlara göre sertlikleri daha yüksek ve eğrilikleri daha az elde edilmiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan ile ifade edilen enerji yutma kapasiteleri (Jahandari vd., 2022; Tasnim vd., 2021) açısından da bu iki polimer beton grubu diğerlerinden üstün özellik sergileyerek daha fazla enerji emmişlerdir. Örneğin, %5 ham perlit agregalı polyester reçineli polimer betonun (PRNP5) eğrisi incelendiğinde, gerilme-şekil değiştirme eğrisi elastik deformasyon yaparak zirveye çıkmış, gerilim genliği azalırken maksimum gerilme gerçekleşmiş ve plato aşamasından sonra geri dönülemez plastik deformasyon yaparak polimer betonun iç hasarının ilerleyen bir gelişim evresine girdiğini gösteren şekil değiştirmesini tamamlamıştır (Yang vd., 2024; Lin vd., 2024). Genleştirilmiş perlitli polyester reçineli polimer betonlar (PREP5 ve PREP10) ise çok düşük gerilme-şekil değiştirme eğrisine sahip olmuştur. Perlit tipi ve oranı, polyester reçineli polimer betonların gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerinde çok etkili olmuştur. Şekil 28.'de tıpkı Şekil 27.'e benzer şekilde davranışlar elde edilmiştir. Ham perlitin vinilester

reçine ile birlikte polimer betonda kullanımı ile enerji yutma kapasitesi yüksek polimer betonlar üretilebilmiştir.

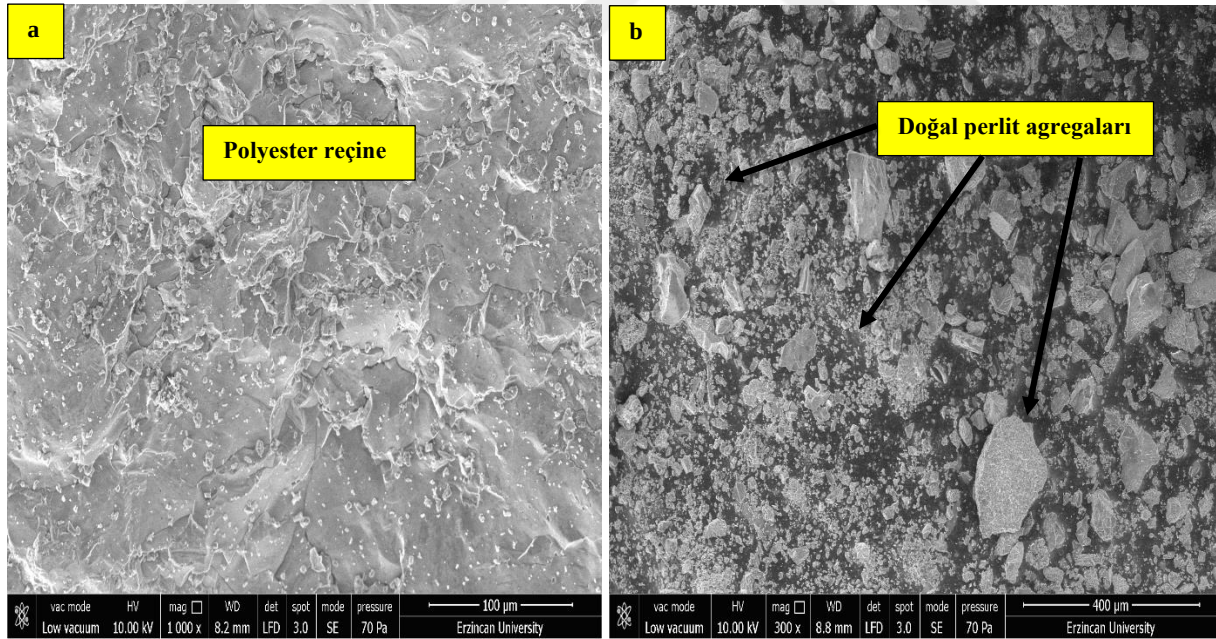


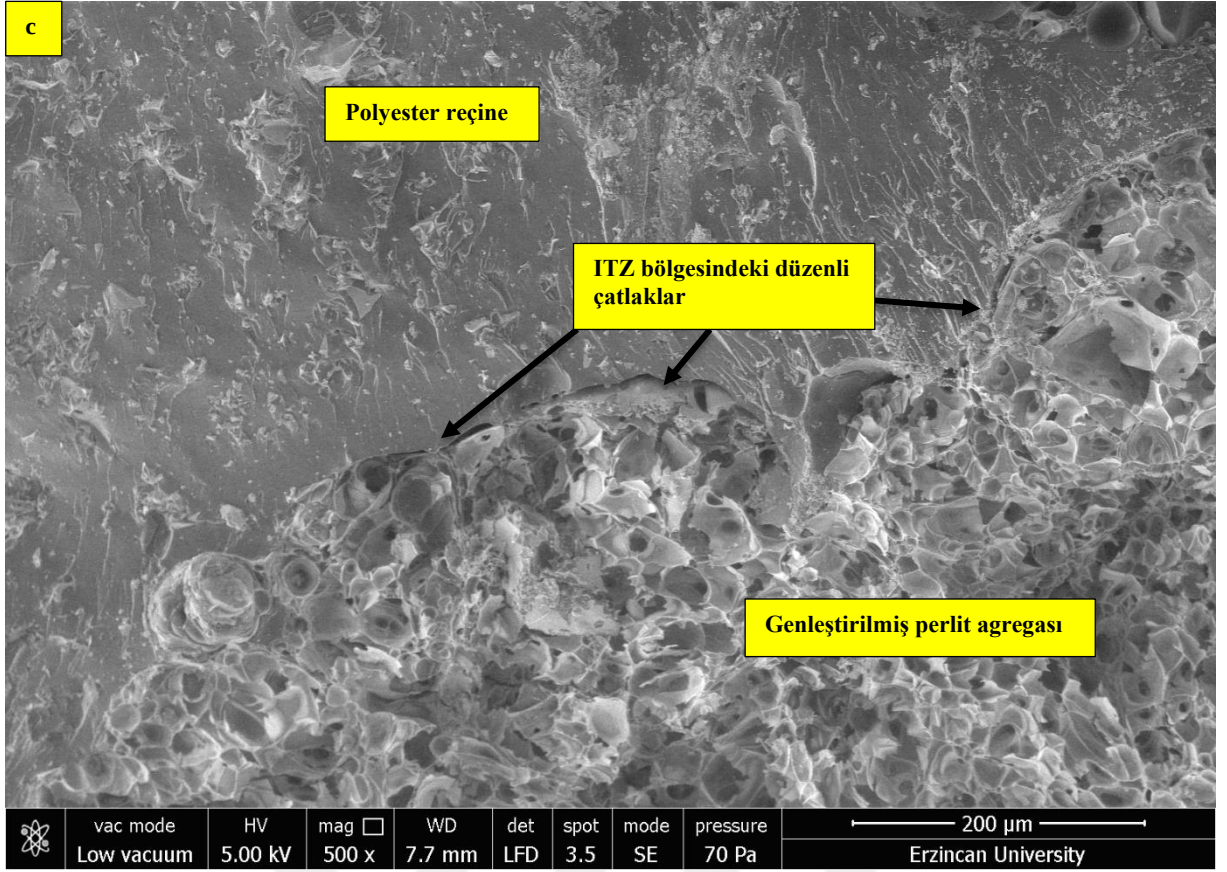
Şekil 28. Vinilester reçineli polimer betonların gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Genleştirilmiş perlit agregaları ise vinilester reçineli polimer betonların gerilme-şekil değiştirme davranışını olumsuz etkilemiş ve benzer desenler sergilemiştir. Ham perlit agregası ile reçineler arasındaki güçlü kohezyon (Abbasnejadfar vd., 2022) sayesinde genleştirilmiş perlitli polimer betonlardan daha sünek davranış sergileyen betonlar üretilebildiği Şekil 27. ve Şekil 28.'de açıkça görülebilmektedir. Tıpkı bu çalışmayı destekler nitelikte genleştirilmiş perlit agregası kullanım oranlarının artışının beraberinde betonların enerji dağılım kapasiteleri üzerinde olumsuz bir etki yarattığı literatürde de rapor edilmiştir (Bakhshi vd., 2023a). Polimer beton numunelerinin gerilme-şekil değiştirme, elastisite modülü ve tokluk değerleri üzerinde reçine tipi, agregası tipi ve boyutu, numune boyutu, çatlak uzunluğu ve açısı gibi parametrelerin etkili olduğu düşünülmektedir (Niaki, 2023). Bu çalışma sonucunda da özellikle reçine tipleri ile agregası tipleri ve kullanım oranlarının sonuçlar üzerinde oldukça etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır.

4.7. Polimer Betonların İçyapıları

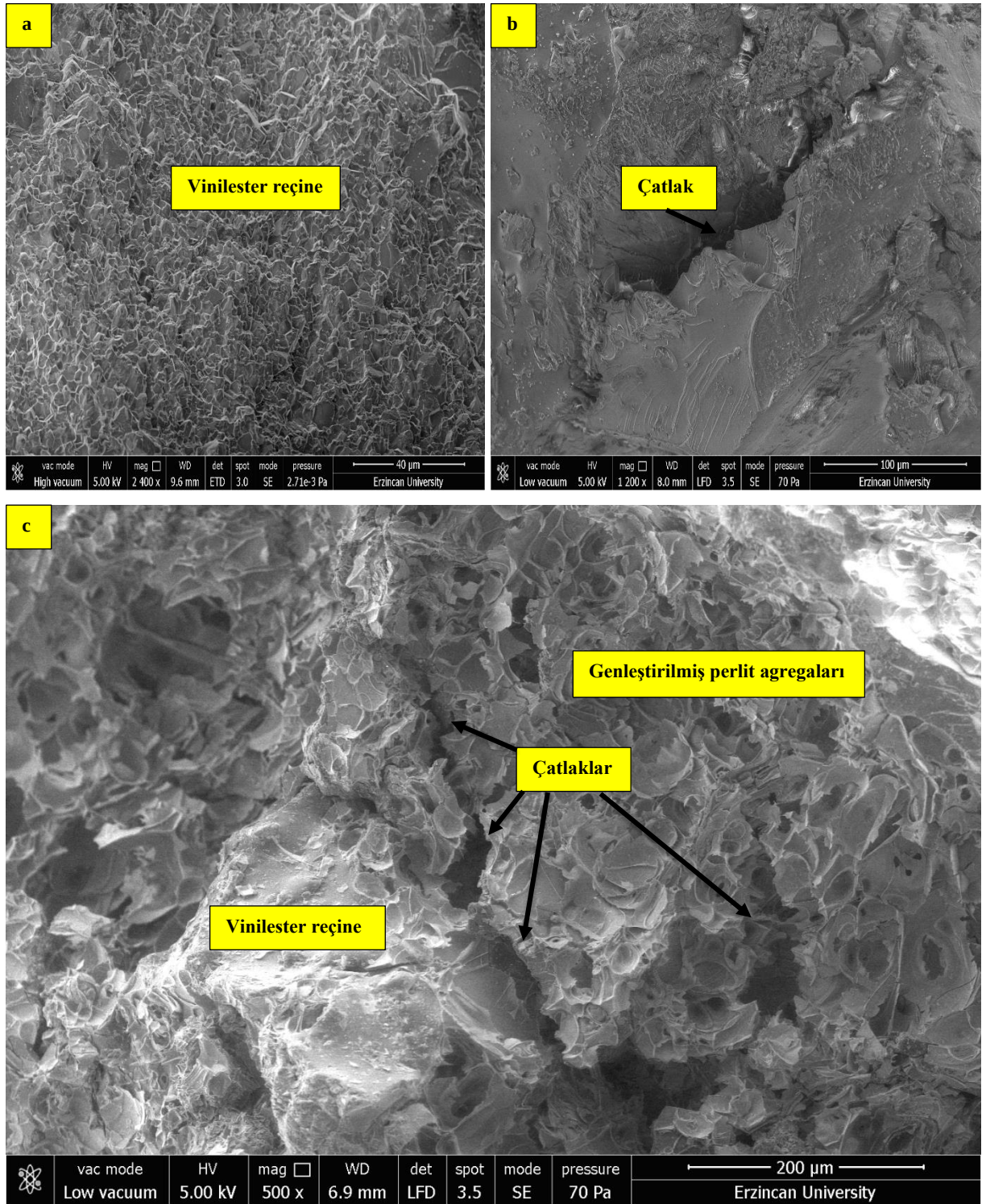
Şekil 29., 28 günlük krleme sonucunda polyester reçineli ham ve genleştirilmiş perlit agregalı polimer betonların SEM analizi sonrası içyapı görüntülerini göstermektedir. Buna göre polyester reçineli kontrol betonunda (a) herhangi bir dikkate değer çatlak yapısı gözlemlenmemiştir. %10 ham perlit agregalı polyester reçineli (b) polimer betonlarda ise reçine ile agregalar arasında çatlak oluşumu meydana gelmeyip nispeten daha yüksek uyumlu bir matris elde edildiği görülebilmektedir. Hashemi ve arkadaşları (Hashemi vd., 2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da SEM analizi sonucu doymamış polyester reçineli polimer betonlarda agrega-matris arasında yüksek yapışmanın sağlanabildiği ifade edilmiştir. %10 genleştirilmiş perlit agregalı polyester reçineli (c) polimer betonlarda ise ayırtedici bir şekilde reçine-agrega arayüzeyinde (ITZ bölgesi) düzenli çatlaklar meydana geldiği açıkça ortaya çıkmıştır. Guo ve arkadaşları (Guo vd., 2023), polimer beton kompozitlerinin SEM görüntülerini incelemiş ve mikro çatlakların reçine-agrega arayüzünde ve yakınında gerçekleştiğini bildirmiştir. Bu çalışmada da literatürü teyit edecek çatlak desenleri elde edilmiştir.





Şekil 29. Polyester reçineli polimer betonların SEM görüntüleri, a: Kontrol betonu (PRP0), b: %10 ham perlitli polimer beton (PRNP10), c: %10 genleştirilmiş perlitli polimer beton (PREP10)

Şekil 30.'da vinilester reçineli kontrol betonu (a) matrisinde çatlak yapısının bulunmadığı görülebilmektedir. Ayrıca homojen bir matris elde edildiği söylenebilmektedir (Byron vd., 2021). (b) görüntüsü %10 ham perlit agregalı vinilester reçineli polimer betonda genleştirilmiş perlit kadar olmasa da içyapıda çatlak oluştuğunu ortaya koymaktadır. %10 genleştirilmiş perlit agregalı vinilester reçineli (c) polimer betonda ise dikkat çekici bir şekilde hem genleştirilmiş perlit agregalarının kendi içerisinde hem de vinilester reçine-genleştirilmiş perlit agregası arayüzeyinde belirgin çatlakların meydana geldiğini göstermektedir. Aynı zamanda genleştirilmiş perlit agregalarının gözenekli yapısı da net bir şekilde (c) görüntüsünde belli olmaktadır. Gözenekli yapının varlığı, özellikle UPV deneyinden elde edilen bulgularla paralellik sergilemiştir. Ayrıca basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanım sonuçlarının çok düşük elde edilmesinin temel nedenlerinden birisi de (c) görüntüsündeki olumsuzluklardır. SEM görüntüleri ile mekanik deneylerden elde edilen veriler birbirleriyle örtüşmüştür.



Şekil 30. Vinilester reçineli polimer betonların SEM görüntüleri, a: Kontrol betonu (VRP0), b: %10 ham perlitli polimer beton (VRNP10), c: %10 genleştirilmiş perlitli polimer beton (VREP10)

5. SONUÇLAR

Ham perlit ve genleştirilmiş perlit agregalarının farklı oranlarda üretimde ilk kez yer aldığı polyester ve vinilester reçineli polimer betonların erken (7 gün), orta (28 gün) ve ileri (90 gün) yaş mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır:

1. Her iki perlit tipinin agrega olarak kullanımı, polimer betonların taze yoğunluk değerlerini düşürmüştür.
2. Ham perlit agregası ile polyester reçinesi birleşimi, tüm günler için kontrol betonundan bile daha yüksek basınç dayanımı sonuçlarına ulaştırmıştır. 28 gün sonunda kontrol (PRP0/28), %5 ham perlitli (PRNP5/28) ve %10 ham perlitli (PRNP10/28) polyester reçineli polimer betonların basınç dayanımları sırasıyla 35.5 MPa, 39.95 MPa ve 37.35 MPa olarak elde edilmiştir. Perlitlerin vinilester reçine ile değerlendirilmesi beraberinde polimer betonların basınç dayanımlarını azaltmıştır.
3. 90 gün sonunda %5 ham perlit agregalı polyester reçineli polimer betonun (PRNP5/90) eğilme dayanımı kontrol betonuna (PRP0/90) göre yaklaşık %13 artış göstermiştir (bu değerler sırasıyla 7.26 MPa ile 6.41 MPa). Genleştirilmiş perlit agregalı polyester ve vinilester reçineli polimer betonların eğilme dayanımlarında ise belirgin düşüşler elde edilmiştir.
4. Yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre vinilester reçineye göre polyester reçinenin, genleştirilmiş perlit agregasına göre de ham perlitin kullanıldığı polimer betonlardan daha iyi sonuçlar alınmıştır.
5. Bağlayıcı reçine tipi, perlit tipi ve oranı, kür süresi gibi parametreler, polimer betonların UPV sonuçları üzerinde etkili olmuştur. Kür süresinin 7 günden 90 güne artışı, polimer betonların mekanik özelliklerinin tamamı üzerinde olumlu etki göstermiştir. Taze yoğunluk-dayanım ve UPV-dayanım sonuçları arasında yüksek korelasyona sahip ilişkiler elde edilerek yüksek tahmin edilebilirlik düzeyine ulaşılabilmektedir.
6. %5 ham perlit agregalı polyester reçineli polimer betonun (PRNP5) elastisite modülü 6.62 GPa iken %10 genleştirilmiş perlit agregalı polyester reçineli polimer betonun (PREP10) elastisite modülü %55 azalarak 2.96 GPa'a düşmüştür. Vinilester reçineli polimer betonların elastisite modülü değerleri, genleştirilmiş perlitli olanlar hariç, polyester reçineli polimer betonlardan daha yüksek elde edilmiştir.
7. Ham perlit genleştirilmiş perlite göre reçineler ile daha iyi uyum göstermiş, vinilester reçineli polimer betonlar polyestere göre daha yüksek tokluk (enerji yutma kapasitesi) sonuçlarına ulaşmıştır.

8. SEM analiz sonuçları ile mekanik deneylerden elde edilen bulgular birbirleriyle örtüşmüştür. Polyester ve vinilester reçineli polimer betonların üstün mekanik özellikler sergilemesinde ideal oran ve perlit tipi, %5 ham perlit agregası olmuştur.
9. Bu çalışmada literatürden farklı ve özgün bir şekilde çok daha düşük reçine oranı ile (%15) mekanik performansı yüksek polyester/vinilester reçineli özellikle ham perlit agregalı polimer betonlar üretilebilmiştir. Maliyet, işlenebilirlik ve sürdürülebilirlik kriterleri gözönüne alındığında bu sonuçların çok değerli olduğu düşünülmektedir.
10. Hafif polimer beton üretiminde rahatlıkla kullanılabilir olan ham perlit agregası sayesinde hem bu alana yönelik araştırmaların artacağı hem de bu çalışmadan elde edilen bulguların literatürde bir referans çalışma olarak değerlendirileceği düşünülmektedir.



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.
- Abdel-Jawad, Y.A. & Abdullah, W.S. (2002). Design of maximum density aggregate grading. *Constr. Build. Mater.* 16 (8), 495–508.
- ACI Manual of Concrete Practice. (1993). Part-5. Detroit, Michigan.
- Agrawal, A. K. & Dhama, T. L. (2012). Thermoplastic elastomers: Synthesis and applications. *International Journal of Polymer Science*, (1), 1-19.
- Akar, A., (1991). Polimer Kimyasına Giriş, *İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları*, İstanbul.
- Akın, M. H. (2017). *Polimer Betonların Özelliklerinde Atık Lastik Kullanımının Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Akın, M. H. ve Polat, R. (2022). The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress–strain properties of polyester-based polymer concretes, *Construction and Building Materials* 325, 126741.
- Akkovalı, G. (1993). Polimer Ders Notları. ODTÜ, Ankara.
- Akkurt, S. (1991). Plastik Malzeme Bilgisi. *İTÜ Mak.Fak. Birsen Kitabevi*, İstanbul.
- Akman, M.S. (1987). Yapı Malzemeleri. *İTÜ İnşaat Fakültesi Ders Notları*, 121 s, İstanbul.
- Akyuncu, V. ve Sanlitürk, F. (2021). Investigation of physical and mechanical properties of mortars produced by polymer coated perlite aggregate, *Journal of Building Engineering* 38, 102182.
- Alexa-Stratulat, S., Taranu, G., Toma, A., Olteanu, I., Pastia, C., vd. (2024). Effect of expanded perlite aggregates and temperature on the strength and dynamic elastic properties of cement mortar, *Construction and Building Materials* 438, 137229.
- Alganad, A.A.A. (2020). *Atık Doküm Kumu Ve Çeltik Külünün Polimer Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Atılım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Al-Haydari, I. S., Masood, G. G., Mohamad, S. A., & Khudhur, H. M. (2021). Stress–strain behavior of sustainable polyester concrete with different types of recycled aggregate, *Materials Today: Proceedings* 46 (Part 10), 5160-5166.
- Andrew, W. (2016). *Modif. Polym. Prop.*

- Arslan, O., (2022). *Genleştirilmiş Perlit ile Üretilen Köpük Betonlarda Atık Camların Değerlendirilmesinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Aslani, F. & Ma, G. (2018). Normal and high-strength lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates at elevated temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering* 30 (12).
- ASTM C78. (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010.
- ASTM C469. (2010). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C496. (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- ASTM C597. (2023). Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Ataabadi, H. S., Mirzaei, E. & Sedaghatdoost, A. (2021). Effect of polypropylene and polyvinyl alcohol fibers on characteristics and microstructure of polymer composite. *Polym. Compos.* 42 (4), 1782–1794.
- 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, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Atlı, S. (2023). *Perlit İle Üretilmiş Betonarme Kolonların Tersinir Yük Etkisi Altında Yapısal Davranışlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan.
- Aydın, M. (2024). *Elektronik Atık Katkı Polimer Betonların Geçirimlilik Özellikleri ile Agresif Çözeltilere Karşı Direncinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan.

- Aydın, M. ve 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.
- Azizi, S. (2007). *Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Baba, E. (2018). *Hafiflik, Ekonomiklik, Isı Yalıtımı ve Yeterli Basınç Dayanımı Unsurları Taşıyan Kompozit Malzeme Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Bakhshi, M., Dalalbashi, A., & Soheili, H. (2023a). Energy dissipation capacity of an optimized structural lightweight perlite concrete, *Construction and Building Materials* 389, 131765.
- Bakhshi, M., Soheili, H., & Dalalbashi, A. (2023b). Optimization of a structural lightweight fiber-reinforced concrete for best performance under impact loading, *Cement and Concrete Composites* 136, 104875.
- Balapour, M., Hajibandeh, E., & Ramezani pour, A. (2018). Engineering properties and durability of mortars containing new nano rice husk ash (RHA). *High Tech Concr. Where Technol. Eng. Meet*, Springer, pp. 199–206.
- Bărbuță, M., Harja, M., & Baran, I. (2010). Comparison of mechanical properties for polymer concrete with different types of filler, *Journal of Materials in Civil Engineering* 22 (7), 696-701.
- Baydar, U. (2016). *Polimer Betonların Yüzey Yapışma Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bayram, Y. (2015). *Polimer Betonların Bazı Termomekanik Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bedi, R., Chandra, R. & Singh, P. (2013). Mechanical Properties of Polymer Concrete. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Composites*, Volume 2013, 948745, 12 pages.
- Berberoğlu, Y. (2019). *Polimer Betonun Mekanik Özelliklerine Etkiyen Parametrelerin Belirlenerek Isıl Ve Aşınma Performansının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- Bulgurcu, H. (2009). Genleşmiş Perlit İçeren Çimento ve Alçı Bağlayıcılı Yapı Malzemelerin Isıl ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Sivas, 24-27 Haziran.

- Bulut, H.A. (2024). Effect of natural perlite on mechanical properties of light-weight aggregate composites by alkali-silica reaction, *Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences* 13 (3), 1009-1019.
- Bulut, H.A. (2016). *Elektronik Plastik Atık İçeren Polimer Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bulut, H. A. (2024). Examination of mechanical, permeability, and durability properties of sustainable lightweight concrete composites with natural perlite aggregate, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 48, 1329-1352.
- Byron, D., Heitman, A. P., Neves, J., Souza, P. P. D., & Patricio, P. S. D. O. (2021). Evaluation of properties of polymer concrete based on epoxy resin and functionalized carbon nanotubes, *Construction and Building Materials* 309, 125155.
- Cai, H., Yuan, B., Yang, F., Chen, L., Feng, W., & Liang, Y. (2022). Dynamic three-point flexural performance of unsaturated polyester polymer concrete at different curing ages, *Journal of Building Engineering* 45, 103449.
- Calderón-Morales, B. R., García-Martínez, A., Pineda, P. & García-Tenório, R. (2021). Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: limits and potential in eco-efficient construction. *Journal Of Building Engineering*, 44, 102506.
- Chen, C., Huang, R., Wu, J.K. & Chen, C.H., (2006). Influence of soaking and polymerization conditions on the properties of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 20 (9), 706-712.
- Chen, D., Liu, F., Yang, F., Jing, L., Feng, W. vd. (2018). Dynamic compressive and splitting tensile response of unsaturated polyester polymer concrete material at different curing ages, *Construction and Building Materials* 177, 477-498.
- Chihaoui, R., Khelafi, H., Senhadji, Y. & Mouli, M. (2016). Potential Use of Natural Perlite Powder as a Pozzolan Mineral Admixture in Portland Cement. *Journal of Adhesion Science and Tecnology*, 30, 1930-1944.
- Cortes, F., Castillo, G. (2007). Comparison between the dynamical properties of polymer concrete and grey cast iron for machine tool applications, *Materials & Design*, vol.28,no.5,pp. 1461 1466.
- Cowie, J. M. G. (2000). *Polymers: chemistry and physics of modern materials*. CRC press, Scotland Uk, 1-487.
- Crawford, R. J. (2002). *Plastics engineering* (2nd ed.). Elsevier Science, Amsterdam, 1-352.

- Demirboğa, R., Şahin, R., Bingöl, F. ve Gül, R. (1999). The usability of blast furnace slag in the production of high strength concrete, *Proceedings of the Fifth International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Norway, 1083-1091.
- Dikeou, J.T. & Fowler, D.W. (1981). Polymer concrete uses, materials and properties. *ACI Special Publication*, 89, 44-45.
- Diyarbakır, A. (2024). *Polyester ve Vinilester Reçineli Farklı E-Atık Oranlarına Sahip Polimer Beton Kompozitlerinin Ekstrem Koşullar Altındaki Performansının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan.
- Doğan, H. ve Şener, F. (2004). Hafif Yapı Malzemeleri (Perlit - Perlit - Ytong - Gazbeton) Kullanımının Yaygınlaştırılmasına Yönelik Sonuç ve Öneriler, *M.T.A. Haber Bülteni*, 1, 51-53.
- Ensarioğlu, M. (2021). *Genleştirilmiş Perlitin Nanometrik Ve Mikronize Farklı Tane Boyutuna Sahip Taneciklerle Aktivasyonunun İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman.
- Erdem, T. K. (2005). *Investigation on the Pozzolanic Property of Perlite for Use in Producing Blended Cements*, Master of Science, The Graduate Scholl of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Civil Engineering, Ankara.
- Erdem, T. K., Meral, C., Tokyay, M. ve Erdoğan, T.Y. (2007). Use of Perlite as a Pozzolanic Addition in Producing Blended Cements. *Cement and Concrete Composites*, 29, 13-21.
- Esmaili, J., Andalibi, K. & Gencel, O. (2021). Mechanical characteristics of experimental multi-scale steel fiber reinforced polymer concrete and optimization by Taguchi methods. *Construction and Building Materials*, 313, 125500.
- Farooq, M. & Banthia, N. (2022). Strain-hardening fiber reinforced polymer concrete with a low carbon footprint. *Construction And Building Materials*, 314, 125705.
- Ferdous, W., Manalo, A., Wong, H. S., Abousnina, R., AlAjarmeh, O. S., vd. (2020). Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects, *Construction and Building Materials* 232, 117229.
- Fischer, J., Bradler, P. R., Schmidtbauer, D. Lang, R. W. & Wan-Wendner, R. (2019). Long-term creep behavior of resin-based polymers in the construction industry. *Materials Today Communications*, 18, 60-65.

- Fowler, D.W. (1995). Applications of Polymer Concrete, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, USA, 8th. Congress ICPIC Oostende (Belgium), pp 13 July 3-5.
- Fowler, D.W. & Whitney, D.W. (2012). Long -Term. Perform. Polym. Concr. *Bridge Decks*.
- Fowler, D.W. (1999). Polymers in concrete: a vision for the 21st century. *Cement and Concrete Composites*, 21, 449-452.
- Galobardes, I., Cavalaro, S. H., Aguado, A., & Garcia, T. (2014). Estimation of the modulus of elasticity for sprayed concrete, *Construction and Building Materials* 53, 48-58.
- Gao, Y., Romero, P., Zhang, H., Huang, M., & Lai, F. (2019). Unsaturated polyester resin concrete: A review, *Construction and Building Materials* 228, 116709.
- Gorninski, J. P., Molin, D. C. D., & Kazmierczak, C.S. (2004). Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete, *Cement and Concrete Research* 34 (11), 2091-2095.
- Gorninski, J. P., Molin, D. C. D., & Kazmierczak, C. S. (2007). Comparative assessment of isophthalic and orthophthalic polyester polymer concrete: Different costs, similar mechanical properties and durability, *Construction and Building Materials* 21 (3), 546-555.
- Gökbaşı, F. (2021). *Çelik Lifli Polimer Betonların Mekanik Davranışı Üzerine Geri Dönüştürülmüş Araç Lastiği Parçacıkları Ve Liflerinin Birleşik Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Gökçe, H. S., Durmuş, G. ve Şimşek, O. (2010). Alternatif Karışım Oranlarında Üretilen Doğal Perlit Agregalı Hafif Betonların Özelliklerine Su/Çimento Oranının Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 13(1), 55-63.
- Grzeszczyk, S., & Janus, G. (2021). Lightweight reactive powder concrete containing expanded perlite, *Materials* 14 (12), 3341.
- Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R. K. (2016). Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume, *Journal of Cleaner Production* 112 (Part 1), 702-711.
- Gunasekaran, M. (2000). Polymerconcrete: a versatile, low-cost material for Asian electrical infrastructure systems. in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 356–361, April.
- Gunning, D.F., Eng, P., McNeal & Associates Consultants Ltd., (1994). Perlite Market Study for British Columbia.

- Guo, C., Pei, L., Guan, H., Chu, X., Wang, H., vd. (2023). Experimental study on interfacial damage mechanisms of polymer-concrete composite structure, *Journal of Building Engineering* 75, 106968.
- Güzelküçük, S. (2020). *Isı Yalıtım Kabiliyetine Sahip Perlit Esaslı Geopolimer Bağlayıcı Harçların Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Haddadian, A., Alengaram, U. J., Ayough, P., Mo, K. H., & Alnahhal, A. M. (2023). Inherent characteristics of agro and industrial By-Products based lightweight concrete – A comprehensive review, *Construction and Building Materials* 397, 132298.
- Haddad, H. ve Kobaisi, M. A. (2012). Optimization of the polymer concrete used for manufacturing bases for precision tool machines, *Composites Part B: Engineering* 43 (8), 3061-3068.
- Hameed, A. M., & Hamza, M. T. (2019). Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials, *Energy Procedia* 157, 43-50.
- Hammodat, W. W. (2021). Investigate road performance using polymer modified concrete. *Mater. Today Proc.* 42, 2089–2094.
- Hashemi, M. J. & Jamshidi, M. (2015). Flexural behavior of polyester polymer concrete subjected to different chemicals. *International Journal Of Engineering*, 28(7), 978-983.
- Hashemi, M. J., Jamshidi, M., & Aghdam, J. H. (2018). Investigating fracture mechanics and flexural properties of unsaturated polyester polymer concrete (UP-PC), *Construction and Building Materials* 163, 767-775.
- Heidarnezhad, F., Jafari, K., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Effect of polymer content and temperature on mechanical properties of lightweight polymer concrete, *Construction and Building Materials* 260, 119853.
- Hillmyer, M. A. (2014). Introduction to polymer science and chemistry: A problem-solving approach. *CRC press*, London, 1-722
- Holthausen, R. S. ve Raupach, M. (2015). Sprayed polymer concrete for the rehabilitation of sewage systems, *Advanced Materials Research* 1129, 460-467.
- Hong, S. (2017). Influence of curing conditions on the strength properties of polysulfide polymer concrete. *Appl. Sci.* 7 (8), 833.
- Hossain, K. M. A. (2003). Blended Cement Using Volcanic Ash and Pumice. *Cement and Concrete Research*, 33, 1601-1605.

- Hyun, S.-H. & Yeon, J.H. (2012). Strength development characteristics of UP-MMA based polymer concrete with different curing temperature. *Constr. Build. Mater.* 37, 387–397.
- Islam, A. B. M. S., Walid, Al-Kutti, A., Nasir, M., Kazmi, Z. A., & Sodangi, M. (2022). Potential use of local waste scoria as an aggregate and SWOT analysis for constructing structural lightweight concrete, *Advances in Materials Research* 11 (2), 147-164.
- IS 13311. (1992). Part 1, Non-destructive testing of concrete: Methods of test-ultrasonic pulse velocity. Indian Standard.
- 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.
- Jafari, K., & Toufigh, V. (2017). Experimental and analytical evaluation of rubberized polymer concrete, *Construction and Building Materials* 155, 495-510.
- Jagarapu, D. C. K., Kumar, C., & Arunakanthi, E. (2018). The use of light weight aggregates for precast concrete structural members, *International Journal of Applied Engineering Research* 13 (10), 7779-7787.
- Jahandari, S., Mojtahedi, S. F., Zivari, F., Jafari, M., Mahmoudi, M. R., vd. (2022). The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils, *Geomechanics and Geoengineering* 17 (1), 269-281.
- Jamshidi, M., Ghasemi, M.J. & Hashemi, A. (2013). Effect of cyclic exposure of chemicals on compressive strength of polyester resin based polymer concrete. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, pp. 185–190.
- Jamshidi, M., & Pourkhorshidi, A. R. (2012). Modified polyester resins as an effective binder for polymer concretes, *Materials and Structures* 45, 521-527.
- Jiang, L., Lu, W., Wang, W., Zhang, Y., Han, Q., & Li, Z. (2022). Mechanical properties and frost resistance of self-healing concrete based on expended perlite immobilized bacteria, *Construction and Building Materials* 348, 128652.
- Jo, B., Park, S., & Park, J. (2008). Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials* 22 (12), 2281-2291.
- Jones, R. G. (1999). Polymers at surfaces and interfaces. *Cambridge University Press*, England, 127.186.
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders, *Cement and Concrete Research* 41 (12), 1232-1243.

- Kabay, N. ve Kızılkant, A.B. (2019). Mekanik Ve Fiziksel Özellikleri Bakımından Genleştirilmiş Perlit Agregalı Hafif Blok, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 3.
- Kandelbauer, A., Tondi, G., Zaske, O.C. & Goodman. S.H. (2014). Unsaturated Polyesters and Vinyl Esters, Third Edit, *Elsevier Inc*,4557-3107-7.00006-3.
- Kandelbauer, A., Tondi, G., Zaske, O. C. & Goodman, S. H. (2022). Unsaturated polyesters and vinylesters. In handbook of thermoset plastics, *William Andrew Publishing*, Norwich, 97-158.
- Kara, A. S. (2019). *Perlit/Epoksi Kompozitleri Özelliklerine Farklı Polimer Kaplamaların Etkisi*, Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- 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.
- Karein, S.M.M., Joshaghani, A., Ramezaniapour, A.A., Isapour, S., & Karakouzian, M. (2018). Effects of the mechanical milling method on transport properties of self-Compacting concrete containing perlite powder as a supplementary cementitious material. *Constr. Build. Mater.* 172,677–684.
- Kaplan, A.N. (2021). *Agrega Ve Reçine Tipinin Polimer Betonun Performansı Üzerine Etkileri*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kaya, E. S. (2019). *Ham Perlit Ve Genleştirilmiş Perlitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Kaya, F., (1983). Plastik Katkı Maddeleri ve İşleme Metodları, Yarımca.
- Keleş, Ö. F., Bayrak, O. Ü., ve Bayata, H. F. (2024). Experimental investigation on mechanical properties of sustainable roller compacted concrete pavement (RCCP) containing waste rubbers as alternative aggregates, *Construction and Building Materials* 424, 135930.
- Kirlikovali, E. (1981). Polymer/concrete composites—a review. *Polymer Engineering & Science*, vol.21,no.8,pp.507–509.
- Kiruthika, C., Prabha, S. L. & Neelamegam, M. (2021). Different aspects of polyester polymer concrete for sustainable construction. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1622-1625.

- Khan, M. B. E., Shen, L., & Dias-da-Costa, D. A. S. G. (2021). Self-healing behaviour of bio-concrete in submerged and tidal marine environments, *Construction and Building Materials* 277, 122332.
- Khan, S. U., Khan, F. H., & Ali, H. (2018). Study on utilization of different lightweight materials in the production of lightweight concrete bricks/blocks, *Thesis, University of Engineering and Technology*, Peshawar.
- Koblischek, P. (1975). Synthetic resin bound concrete, in *Proceedingsof the 1st International Congresson Polymer Concretes— Polymers in Concrete*, pp. 409–419, London, UK.
- Kumar, P., Pasla, D., & Saravanan, T. J. (2023). Self-compacting lightweight aggregate concrete and its properties: A review, *Construction and Building Materials* 375, 130861.
- Kurugöl, S. (1997). *Çelik Tel Donatı ve Polimer Katkının Normal ve Hafif Betonların Mukavemet Özelliklerine Etkileri*. Doktora Tezi, Mimar Sinan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kwan, W. H., Ramli, M. & Cheah, C. B. (2014). Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment. *Construction And Building Materials*, 63, 62-71.
- Leong, G. W., Mo, K. H., Loh, Z. P. & Ibrahim, Z. (2020). Mechanical properties and drying shrinkage of lightweight cementitious composite incorporating perlite microspheres and polypropylene fibers. *Constr. Build. Mater*, 246,118410
- Lin, Y., Liu, Y., Tang, L., Zhou, L., Jiang, Z., vd. (2024). Dynamic mechanical properties of epoxy polymer concrete under cyclic impact considering the effects of confining pressure and strain rate, *Journal of Building Engineering* 94, 109954.
- Lithner, D., Larsson, Å., & Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition, *Science of The Total Environment* 409 (18), 3309-3324.
- Loghmani, P. & Esfandiari, J. (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.
- Lokuge, W., & Aravinthan, T. (2013). Effect of fly ash on the behaviour of polymer concrete with different types of resin, *Materials & Design* 51, 175-181.
- Loos, M. (2015). Composites. Carbon Nanotube Reinforced Composites, *Elsevier*, pp. 37–72.

- 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.
- Madhuri, P. V., Rao, B. K. & Chaitanya, A. (2021). Improved performance of concrete incorporated with natural zeolite powder as supplementary cementitious material. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5369-5378.
- Mahdi, F., Abbas, H. & Khan, A. (2010). Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles. *Constr. Build. Mater.* 24 (1), 25–36.
- Manda, M. S., Rejab, M. R. M., Hassan, S. A., Wahit, M. U., & Amirnuddin, S. S. (2023). Splitting tensile strength study of tin slag polymer concrete, *Materials Today: Proceedings*, In Press.
- Manda, M. S. B., Rejab, M. R. B. M., Hassan, S. A., Wahit, M. U. B., vd. (2024). Tin slag polymer concrete strengthening by basalt and aramid fiber reinforced polymer confinement, *Journal of Polymer Materials* 39 (3-4), 241-253.
- Mark, J. E. (1996). Physical properties of polymers handbook. *Springer Science & Business Media*, Cincinnati, 197.
- Martínez-López, M., Martínez-Barrera, G., Salgado-Delgado, R., & Gencel, O. (2021). Recycling polypropylene and polyethylene wastes in production of polyester based polymer mortars, *Construction and Building Materials* 274, 121487.
- Martínez-López, Á., Martínez-Barrera, G., Vigueras-Santiago, E., Martínez-López, M., & Gencel, O. (2022). Mechanical improvement of polymer concrete by using aged polyester resin, nanosilica and gamma rays, *Journal of Building Engineering* 58, 105083.
- McKeown, P. A., Morgan, G.H. (1979). Epoxy granite: a structural material for precision machines, *Precision Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 227–229.
- Mohal, S., Singh, G., & Rachna. (2023). Ultrasonic pulse velocity of recycled polymer concrete composites, *Materials Today: Proceedings* In Press.
- 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.
- MTA. (2019). “Perlit”, Kaynak: <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/perlit>, (Erişim tarihi: 02.04.2019).

- Mullins, M. J., Liu, D., & Sue, H. -J. (2012). Mechanical properties of thermosets, *Thermosets, Structure, Properties and Applications*, 28-61.
- Muthukumar, M., & Mohan, D. (2004). Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion, *European Polymer Journal* 40 (9), 2167-2177.
- Neto, P. C. D. A., Sales, L. P. B., Oliveira, P. K. S., Silva, I. C. D., Barros, I. M. D. S. vd. (2023). Expanded vermiculite: A short review about its production, characteristics, and effects on the properties of lightweight mortars, *Buildings* 13 (3), 823.
- Niaki, M.H. (2023). Fracture mechanics of polymer concretes: A review, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 125, 103922.
- Nodehi, M. (2021). A comparative review on foam-based versus lightweight aggregate-based alkali-activated materials and geopolymer, *Innovative Infrastructure Solutions* 6, 231.
- Nodehi, M., Aguayo, F., Madey, N., & Zhou, L. (2024). A comparative review of polymer, bacterial-based, and alkali-activated (also geopolymer) binders: Production, mechanical, durability, and environmental impacts (life cycle assessment (LCA)), *Construction and Building Materials* 422, 135816.
- Nóvoa, P. J. R. O., Ribeiro, M. C. S., Ferreira, A. J. M., & Marques, A. T. (2004). Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates, *Composites Science and Technology* 64 (13-14), 2197-2205.
- Numan, H. A., Yaseen, M. H., & Al-Juboori, H. A. M. S. (2019). Comparison mechanical properties of two types of light weight aggregate concrete, *Civil Engineering Journal* 5 (5).
- Odian, G. (2004). Principles of Polymerization. A. John Wiley – Sons, inc, publication, fourth Edition, 812p, Canada.
- Ohama, Y. (1995). Handbook of polymer-modified concrete and mortars, *Properties and Process Technology*, 1-236.
- Ohama, Y. (1997). Recent progress in polymer mortar and concrete in Japan. *Proceedings of the Second East Asia Symposium on Polymers in Concrete (II-EASPIC)*, pp. 21–30.
- Ohama, Y. (2008). Polymer Concrete. *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, 256-269.
- Okamoto, M. (2013). Polymer science: A comprehensive reference. Elsevier, United States of America, 1- 875.
- Oktar, M. (2023). *Floresans Özellik Gösteren Florofor Katkılı Polimer Malzemelerin Mekanik, Termomekanik ve Mekanokromik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

- Olteanu, I. Taranu, G., Bunea, G. vd. (2024). Effect of expanded perlite aggregates and temperature on the strength and dynamic elastic properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 438, 137229.
- Omar, A. T., & Hassan, A. A. A. (2021). Behaviour of expanded slate semi-lightweight SCC beams with improved cracking performance and shear capacity, *Structures* 32, 1577-1588.
- Orak, S. (2000). Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 2, pp. 171–174, 2000.
- Ouarhim, W., Zari, N., Bouhfid, R., & Qaiss, A. E. K. (2019). Mechanical performance of natural fibers-based thermosetting composites, *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 43-60.
- Örücü, B. (2022). *Genleştirilmiş Perlit ve Genleştirilmiş Kil Agregalı Hafif Geopolimer Harcın Üretimi ve Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Özden Akkaya, Ç. (2010). *Polimer Betonların Donma-Çözülme Etkisine Dayanıklılığı*. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Öztürk, M. (2013). *Polimerlerle Modifiye Edilmiş Hafif Betonun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Öztürk, O. (2019). *Kükürt Ve Kükürt Polimer Betonların Mekanik Ve Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Paderewski, K. (1984). Use of polymer concretes in machine tool construction, *Przeglad Mechaniczny*, vol. 43, no. 13, pp. 12–15.
- Paul, D. R. & Newman, (2013). Polymer blends and composites: chemistry and technology. *John Wiley & Sons*, New York, 65-78.
- Pilato, L. A. & Wicks, Z. W. (2012). Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design. *CRC Press*, New York, 65-78.
- Pişkin, A. (2010). *Polimer Beton Üretiminde Cam Tozu Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Pişkin, E. (1987). *Polimer Teknolojisine Giriş*, Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği, *İnkilap Kitabevi Yayını*, İstanbul.

- Polat, R., Demirboğa, R., Karakoç, M.B., ve 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., Demirboğa, R. ve Khushefati W.H. (2015). Effects of nano and micro size of CaO and MgO, nano-clay and expanded perlite aggregate on the autogenous shrinkage of mortar, *Construction and Building Materials*, 81, 268-275.
- Polat, H., Demirel, B., Kolak, M. N., ve Oltulu M. (2020). Polimer betonlarda barit minerali kullanımının araştırılması. *Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 1(1), 25-32.
- Pratap, A. (2002). Vinylester and acrylic based polymer concrete for electrical applications, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, vol.45, no.1-2, pp.117–125.
- Ragul, P., Hari, M. N. T., Arunachalam, N., & Chellapandian, M. (2022). An experimental study on the partial replacement of fine aggregate with perlite in cement concrete, *Materials Today: Proceedings* 68 (Part 5), 1219-1224.
- 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.
- Rebeiz, K.S. (1996). Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste. *Construction and Building Materials*, 10 (3), 215-220.
- Rebeiz, K. S., Serhal, S. P., & Craft, A. P. (2004). Properties of polymer concrete using fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering* 16 (1), 15-19.
- Ribeiro, M. C. S., Nóvoa, P. R., Ferreira, A. J. M. & Marques, A. T. (2004). Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions. *Cement And Concrete Composites*, 26(7), 803-809.
- Rochman, T., Arifi, E., Cahya, E. N., & Wicaksono, A. M. (2023). The performance of novel polymer mortar containing vinyl ester resin reinforced by fly ash and iron sand under compressive, tensile, dan flexural test, *Journal of Building Engineering* 76, 107205.
- Różycka, A. ve Pichór, W. (2016). Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete, *Construction and Building Materials*, 120, 65-71.
- Saçak, M., 2005. Polimer Teknolojisine Giriş. 975-8895-82-6, *Gazi Kitabevi*, Ankara.
- Salami, B.A., Bahraq, A.A., Haq, M. M. U., Ojelade, O. A., vd. (2024). Polymer-enhanced concrete: A comprehensive review of innovations and pathways for resilient and sustainable materials, *Next Materials* 4, 100225.

- Sanchez, M.A., Molina, W.M., García, H.L.C., Guzman, E.M.A., Acosta, A.A.T. & Ortega, J.M.C. (2018). Properties of Portland Cement Mortar with Substitutions of Natural and Expanded Perlite. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62, 508-516.
- 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. ve 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.
- Sengül, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F. ve Tasdemir, M.A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete, *Energy and Buildings* 43 (2-3), 671-676.
- Sevinç, A. H. & Durgun, M. Y. (2021). A novel epoxy-based composite with eggshell, pvc sawdust, wood sawdust and vermiculite: an investigation on radiation absorption and various engineering properties. *Construction And Building Materials*, 300, 123985.
- Seymour, R. B., Carraher, C. E. & Carraher Jr, C. E. (2003). Polymer chemistry: An introduction. *CRC press*, New York, 1-902.
- Sharook, S., Sathyan, D. & Madhavan, M.K. (2023). Thermo-mechanical and durability properties of expanded perlite aggregate foamed concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Construction Materials* 176(4): 141-149.
- Shicong, K., & Chi-Sun, P. (2013). A novel polymer concrete made with recycled glass aggregates, fly ash and metakaolin, *Construction and Building Materials* 41, 146-151.
- Shokrieh, M. M., Heidari-Rarani, M., Shakouri, M., & Kashizadeh, E. (2011). Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete, *Construction and Building Materials* 25 (8), 3540-3549.
- 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.
- Soda, P. R. K., Chakravarthi, E. K., Mogal, A. & Mini, K.M. (2022). Statistical and experimental investigation on self-healing of microcracks in cement mortar by encapsulation of calcite precipitating bacteria into expanded perlite. *Constr. Build. Mater*, 342, 127985.

- Soykan, O. ve Özel, C. (2014). Polimer Betonlarda Kür Süresinin Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklere Etkisi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi (CFD)*, 35 (2), 1300-1949.
- Sperling, L. H. (2006). Introduction to physical polymer science. *John Wiley & Sons*.
- Şanlıtürk, F. (2019). *Kaplamalı Ve Kaplamasız Perlit Agregasıyla Üretilen Harçların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Tabatabaeian, M., Khaloo, A., & Khaloo, H. (2019). An innovative high performance pervious concrete with polyester and epoxy resins, *Construction and Building Materials* 228, 116820.
- Tasnım, S., Shaikh, F. U. A., & Sarker, P. K. (2021). Mechanical properties and microstructure of lightweight polymer composites containing mono and hybrid fillers sourced from recycled solid wastes, *Construction and Building Materials* 277, 122369.
- Thillo, L. V., Blom, J., Moreels, A., & Craeye, B. (2021). Influence of aggregates, glass fibre reinforcement and recycled aggregates on polyester mortar, *Construction and Building Materials* 293, 123534.
- Top, S., Vapur, H., Altiner, M., Kaya, D., ve Ekicibil, A. (2020). Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as aggregates, *Journal of Molecular Structure* 1202, 127236.
- Topsakal, A. (2013). *Polimer Betonların Bazı Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 125.
- TS EN 12350-6. (2019). Testing Fresh Concrete Part 6: Density. *Turkish Standards Institution*. Ankara, Turkey, (Turkish Codes).
- TS EN 12390-3. (2019). Testing Hardened Concrete Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, *Turkish Standards Institution*, Ankara, Turkey, (Turkish Codes).
- TS 802. (2016). Design of Concrete Mixes, *Turkish Standards Institution*, Ankara, Turkey, (Turkish Codes).
- TS EN 933-1. (2012). Tests for Geometrical Properties of Agregates Part 1: Determination of Particle Size Distribution Sieving Method, *Turkish Standards Institution*, Ankara, Turkey, (Turkish Codes).
- Türkmen, İ., ve Fındık, S.B. (2013). Several properties of mineral admixed lightweight mortars at elevated temperatures, *Fire and Materials* 37 (5), 337-349.
- Utracki, L. A. (1998). Polymer alloys and blends: Thermodynamics and rheology. *Hanser Publishers*.

- Uzunboy, T. (2024). *Atık Briket Tozu Katkılı Polimer Betonların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl.
- Ünal, B. (2016). *Renklendirici Katkılarının Polimer Beton Özelliklerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Vipulanandan, C., Dharmarajan, N. & Ching, E. (1988). Mechanical behaviour of polymer concrete systems. *Mater. Struct.* 21 (4), 268–277.
- Vipulanandan, C. & Paul, E. (1993). Characterization of polyester polymer and polymer concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 5 (1), 62–82.
- Vipulanandan, C. & Paul, E. (1990). Performance of epoxy and polyester polymer concrete, *ACI Materials Journal* 87 (3), 241-251.
- Vlack, L.H. V., (1972). *Malzeme Bilimine Giriş*, (Çeviren R.A Safoğlu), Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- Wan, D. S. L. Y., Aslani, F., & Ma, G. (2018). Lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering* 30 (8).
- 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, X., Wu, D., Geng, Q., Hou, D., Wang, M., Li, L., Wang, P., Chen, D. & Sun, Z. (2021). Characterization of sustainable ultra-high performance concrete (UHPC) including expanded perlite. *Constr. Build. Mater.*, 303, 124245.
- Yang, F., Hua, Y., Feng, W., Zheng, J., & Yang, Y. (2024). Failure criterion and constitutive model for unsaturated polyester polymer concrete under true tri-axial compression, *Construction and Building Materials* 435, 136875.
- Yıldırım, Y.F. (2019). *Cam Lifi Ve Cam Tozunun Polimer Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- Yin, P., Huang, L., Yan, L., & Zhu, D. (2016). Compressive behavior of concrete confined by CFRP and transverse spiral reinforcement. Part A: experimental study, *Materials and Structures* 49, 1001-1011.
- Yoon, J. Y., Kim, J. H., Hwang, Y. Y., & Shin, D. K. (2015). Lightweight concrete produced using a two-stage casting process, *Materials* 8 (4), 1384-1397.
- Young, R.J., (1981). Introduction to Polymers. *Chapman & Hall*, 331p, London.

- Zhang, X., Du, M., Fang, H., Shi, M., vd. (2021). Polymer-modified cement mortars: Their enhanced properties, applications, prospects, and challenges, *Construction and Building Materials* 299, 124290.
- Zheng, Y., Zhang, Y., Zhuo, J. Zhang, Y. & Wan, C. (2022). A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Construction And Building Materials*, 359, 129360.

