

Polimer Kompozitlerde Siderit Mineralinin Takviye Malzemesi Olarak Kullanımının Fiziksel, Mekanik ve Kalıcılık Özelliklerine Etkisi

Hasan POLAT¹, Adnan TAYGAR²

¹Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Bingöl, Türkiye

²Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Bingöl, Türkiye

✉: hpolat@bingol.edu.tr  ¹[0000-0003-1521-0695](https://orcid.org/0000-0003-1521-0695)  ²[0009-0007-3166-4095](https://orcid.org/0009-0007-3166-4095)

Geliş (Received): 14.01.2025

Düzeltilme (Revision): 20.02.2025

Kabul (Accepted): 03.03.2025

ÖZ

Bu çalışma, siderit mineralinin polimer esaslı kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak kullanımının fiziksel, mekanik ve kalıcılık özelliklerine etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, farklı oranlarda (%0, %25, %50, %75 ve %100) siderit içeren kompozit numuneler üretilmiş ve bu numuneler üzerinde yoğunluk, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi temel özellikler incelenmiştir. Ayrıca, çevresel dayanım açısından önem arz eden sülfat etkisi (SS) ve donma-çözülme (DÇ) döngüleri sonrası basınç dayanımı da değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, artan siderit oranının kompozitlerin yoğunluğunu ve ultrases geçiş hızını belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Kontrol numunesine kıyasla %108.94'e varan yoğunluk ve %46.92'ye ulaşan ultrases geçiş hızı artışı tespit edilmiştir. Mekanik dayanımda genel bir düşüş gözlenmiş olsa da özellikle %75 ve %100 siderit içeren numunelerde bu azalmaların sınırlı düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, uygun oranlarda kullanıldığında siderit minerali, polimer kompozitlerin fiziksel ve çevresel performansını artırabilecek potansiyele sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Kalıcılık, mekanik özellikler, polimer kompozitler, siderit mineral

Effect of Using Siderite Mineral as a Reinforcement Material on the Physical, Mechanical, and Durability Properties of Polymer Composites

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effects of using siderite mineral as a filler in polymer-based composite materials on their physical, mechanical, and durability properties. Composite specimens were produced by incorporating siderite at varying ratios (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%) into the polymer matrix. These samples were tested for density, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, and flexural strength. Durability was assessed by measuring compressive strength after sulphate exposure (SS) and freeze-thaw (FT) cycles. The results indicated that increasing the siderite content led to a notable rise in both density and ultrasonic velocity. Compared to the control specimen, density increased by up to 108.94%, and ultrasonic velocity by 46.92%. Although mechanical strength showed an overall decline, the reduction was relatively limited in specimens containing 75% and 100% siderite, indicating a more balanced structure. In conclusion, siderite, when used at appropriate proportions, can effectively improve the physical performance and environmental durability of polymer composite materials.

Keywords: Durability, mechanical properties, polymer composites, siderite mineral

GİRİŞ

Polimer kompozitler, kimyasal ve fiziksel olarak farklı, iki veya daha fazla tipik olarak bir polimer matris ve takviye edici bir dolgudan oluşan ve tek tek bileşenlerle elde edilemeyen üstün özellikler elde etmek için bir araya getirilen malzemelerdir [1].

Polimer matris ve takviye malzemesi birleştirildiğinde, bileşenlerinden farklı özelliklere sahip, yorulma ömrü, mukavemet, aşınma direnci, korozyon direnci, sertlik, ısı iletkenlik, ısı yalıtımı bakımından üstün bir ürün elde edilir [2-3].

Polimer kompozitler, konveksiyonel beton ile benzer şekilde, fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı agregaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir malzeme grubudur. Ancak bu kompozitlerde bağlayıcı malzeme olarak polimerik malzemeler, özellikle termoset reçineler, kullanılır [4]. En yaygın kullanılan termoset reçineler arasında polyeater ve epoksi bulunur [5]. Bu tür polimer kompozitlerin karıştırılması ve üretilmesinden önce, reçineye genellikle katalizör veya sertleştiriciler eklenir. Konveksiyonel betonda su önemli bir rol oynarken, polimer kompozitlerde su bulunmaz [6-7].

Polimer kompozitler, düşük yoğunlukları, uygun maliyetleri, yüksek korozyon dirençleri ve kolay işlenebilirlikleri gibi avantajları sayesinde hem günlük yaşamda hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [8-10]. Yapılan literatür çalışmasında, birçok yazarın farklı türde ve yoğunlukta takviye malzemesi kullanarak polimer kompozit üretimi gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir [11-13].

Mermer tozu, tuğla tozu atığı, kil tozu, gaz beton atıkları ve kireç tozu gibi farklı türde atık malzemelerin polimer kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır [14-18]. Endüstriyel atık malzemelerin takviye malzemesi olarak polimer kompozitlerde dayanıklılığını artırmak amacıyla birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır [19-21]. Polimer kompozitlerde farklı yoğunlukta agregaların takviye malzemesi olarak kullanıldığı ve radyasyon zırlama özelliklerinin incelendiği çalışmalar literatürde rapor edilmiştir [22-24]. Önemli yer altı kaynaklarından biri olan siderit ülkemizde yaygın olarak bulunan önemli bir demir mineralidir. Demir karbonat bileşiği olan siderit, FeCO_3 formülü ile gösterilmektedir. Yoğunluğu $3.7\text{-}3.9\text{ g/cm}^3$ düzeyindedir [25].

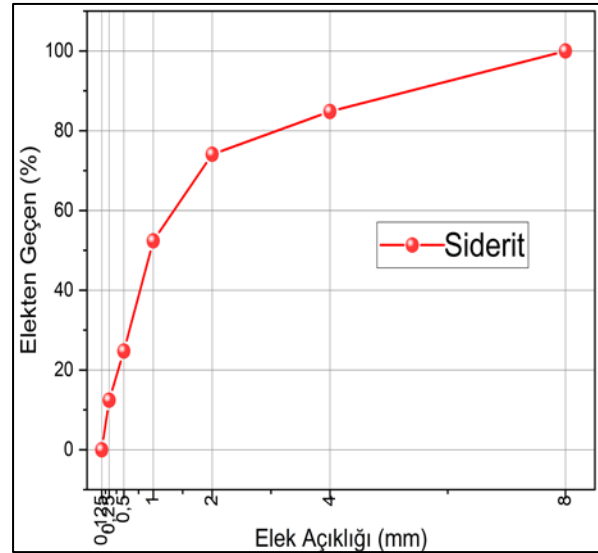
Siderit minerali, çimento ve beton üretiminde özellikle ağır beton uygulamalarında değerli bir katkı maddesi olarak öne çıkmaktadır. Siderit içeren betonların, yüksek yoğunlukları sayesinde gama ışınlarını zayıflatma katsayılarının yüksek olduğu ve bu nedenle radyasyon kalkını olarak etkili oldukları belirlenmiştir [26]. Elyiğit (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, limonit ve siderit minerallerinin farklı oranlarda kullanıldığı beton numunelerinde, %80 oranında siderit içeren karışımların en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı çalışmada, %20 oranında siderit içeren karışımların radyasyon geçirimsizliğini artırdığı tespit edilmiştir [27]. Literatürde siderit mineralinin daha çok çimento ve beton endüstrisindeki kullanımları incelenmiş olup, polimer kompozitlerde etkisi yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışma, siderit mineralinin polimer matrisli kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanılmasının fiziksel, mekanik ve kalıcılık özellikleri ile iç yapı özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirerek, malzeme mühendisliği alanında yeni bir perspektif sunmaktadır.

Ayrıca, bu araştırma kapsamında elde edilen bulgular, polimer kompozitlerin yoğunluk, mekanik dayanım ve diğer kritik performans kriterleri açısından nasıl optimize edilebileceğini anlamaya yönelik bilimsel bir temel oluşturacaktır. Böylece, sürdürülebilir malzeme tasarımı ve alternatif dolgu malzemelerinin değerlendirilmesine katkı sağlayarak literatürdeki mevcut boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, literatürde belirtilen farklı faz malzeme oranlarına uygun olarak, doymamış polyester reçine ağırlığının %0, %25, %50, "%75 ve %100'ü oranında siderit minerali ile ikame edilerek toplam beş farklı polimer kompozit numune grubu üretilmiştir. Elde edilen numunelerin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile iç yapı özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Polimer kompozit numunelerde takviye malzemesi olarak, Malatya ili Hekimhan bölgesinden temin edilen, yoğunluğu 3.55 g/cm^3 ve tane boyutu 0-4 mm arasında olan siderit minerali kullanılmıştır. Siderit mineralinin tane boyut dağılımına ait elek analizi sonuçları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Siderit mineraline ait elek analizi sonuçları

Çalışmada kullanılan siderit mineralinin XRF analizi yapılmıştır. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde gerçekleştirilen analizde, Na_2O , MgO , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 ve MnO elementlerinin oranları sırasıyla %5.60, %6.93, %3.26, %4.43, %75.36 ve %3.90 olarak tespit edilmiştir. Diğer elementlerin miktarlarının ise %1'in altında olduğu belirlenmiştir. Kompozit numunelerin üretiminde bağlayıcı olarak, TP100 kodlu Turkuaz Firmasından temin edilen doymamış polyester reçine kullanılmıştır. Numune üretim sürecinde, reçine ve monomerin sertleşme reaksiyonunu başlatmak amacıyla %1 oranında Metil Etil Ketone Peroksit (MEKP) ve polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmak için %0.2 oranında Kobalt Octoate kullanılmıştır. MEKP ve Kobalt Octoate'in özellikleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1: MEKP Teknik Özellikleri

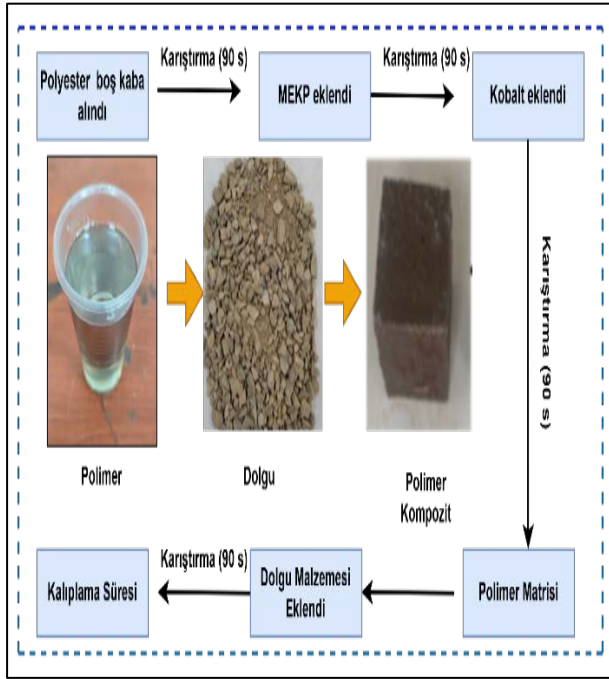
Yoğunluk g/cm^3	1.16
Renk	Renksiz
Aktif Oksijen İçeriği (%)	9.4-9.6
Peroksit İçeriği (%)	40

Çizelge 2: Kobalt Oktoat Teknik Özellikleri

Yoğunluk g/cm^3	0.93
Görünüm	Sıvı
Renk	Menekşe mavisi
Metal içeriği (%)	5.9-6.1
Toplam katı içeriği (%)	30±2

Üretim yöntemi ve analizler

Üretilen polimer kompozit numunelerin üretim yöntemi Şekil 2’de sunulmuştur. Şekil 2’de gösterildiği gibi, ilk aşamada polyester reçine bir kaba alınarak karıştırılmış ve daha sonra polyester reçinenin ağırlıkça %1 oranında MEKP eklenerek karıştırma süreci devam ettirilmiştir. Son olarak, %0.2 oranında kobalt eklenmiş ve karıştırılarak polimer matrisi elde edilmiştir. İkinci aşamada, üretilen polimer matrisine ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında siderit minerali katılmış ve homejenisasyon sağlanması için mekanik bir karıştırıcıda karıştırılmıştır. Tüm karıştırma süreçleri 90 s (saniye) boyunca mekanik karıştırıcıda yapılmıştır. Elde edilen matris ve takviye malzemesi karışımı, kalıplarda bekletilmiştir. 24 saat sonra, polimer kompozit numuneler kalıplardan çıkartılarak normal oda sıcaklığında (23 ± 2 °C) kür edilmiştir. Kür edilen numuneler üzerinde gerekli fiziksel mekanik ve kalıcılık testlerine ait deneyler yapılmıştır.



Şekil 2: Polimer Kompozit Numunelerin Üretim Yöntemi

Siderit minerali, doymamış polyester reçineye ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında karışıma dahil edilmiştir. Karışım oranları ve bunlara karşılık gelen kodlar Çizelge 3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3: Kodlama ve Kompozit Numune Grupları

Bileşenler	Karışım Kodları				
	PS0	PS25	PS50	PS75	PS100
Polyester	%100	%100	%100	%100	%100
Siderit	-	%25	%50	%75	%100
Minerali					
MEKP	%1	%1	%1	%1	%1
Kobalt	%0.2	%0.2	%0.2	%0.2	%0.2

Polimer kompozitlerin yoğunluk değerleri, TS EN 12390-7 (2021) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyleri ASTM C 597 (2022) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk ve ultrases geçiş hızı deneylerinde 5x5x5 cm boyutunda 3 adet tekrarlanan deney numunesi kullanılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen verilerin ortalaması alınarak yoğunluk ve ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiştir. Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 (2019) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı değerlerin belirlenmesinde Yüksel Kaya Makine marka UTC-4031 600 kN otomatik basınç dayanım test presi kullanılmıştır. Her bir polimer kompozit numune grubundan 5x5x5 cm boyutunda adet numune üretilmiştir. Elde edilen sonuçların, aritmetik ortalamaların alınmasıyla basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır.

Eğilme dayanımına ait gerilme değerini TS EN 12390-5 (2019) standardına uygun olarak hesaplanmıştır. Eğilme dayanımı testi, U Test 5540 model 200 kN kapasiteli test cihazında, üç nokta eğme yöntemi kullanılarak ve 0.01-0.1 mm/dakika yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyinde 4x4x16 cm boyutunda 3 adet tekrarlanan deney numunesi kullanılmıştır. Bütün numuneler 23 ± 2 °C kür edilmiştir. Yapılan çalışmada kalıcılık özellikleri olarak donma – çözülme ve sülfat etkisi sonrası basınç dayanımı parametreleri incelenmiştir.

Donma çözülme deneyi TSE CEN/TS 12390-9 (2017) standardına göre yapılmıştır. Sülfat etkisini belirlemek için kimyasal formülü Na_2SO_4 olan sodyum sülfat kullanılmıştır. Hazırlanan sodyum sülfat çözeltisi ASTM C 1012 (2024) standardına uygun olarak çözeltide 1ml/cm³ sülfat kullanılmış ve yapılan çalışmada %5’lik sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Ayrıca iç yapı analizlerini belirlemek için SEM ve FTIR analizleri yapılmıştır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Üretilen polimer kompozitlerin fiziksel, mekanik ve kalıcılık özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4’de sunulmuştur.

Çizelge 4: Polimer Kompozit Numunelerin Test Sonuçları

Kod	Yoğunluk (g/cm ³)	Ultrases geçiş hızı (km/s)	Basınç dayanımı (MPa)
PS0	1.23	2.60	116.12
PS25	1.72	3.37	91.59
PS50	2.16	3.56	97.53
PS75	2.35	3.73	109.28
PS100	2.57	3.82	113.32

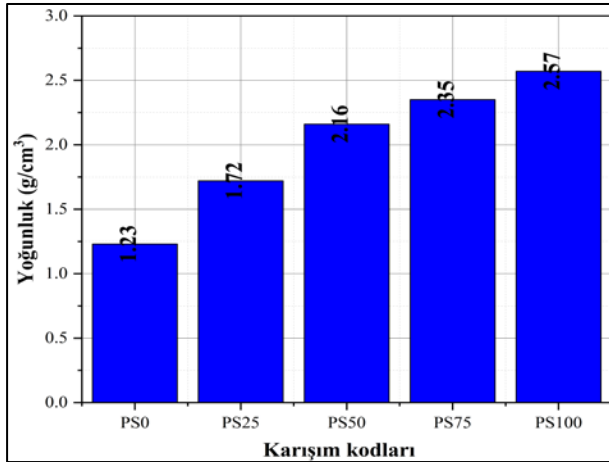
Kod	Eğilme dayanımı (MPa)	DÇ. Sonrası basınç dayanımı (MPa)	SS. sonrası basınç dayanımı (MPa)
PS0	29.72	115.28	115.97

PS25	23.64	88.21	91.33
PS50	25.41	94.76	97.32
PS75	27.14	107.82	109.11
PS100	28.25	112.26	113.15

Yoğunluk ve ultrases geçiş hızı değerleri

Kompozitlerin yoğunluk değerleri Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'de sunulan verilere göre, siderit minerali oranındaki artışla birlikte kompozitlerin yoğunluklarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Kontrol numunesi (PS0) 1.23 g/cm³ yoğunluk değerine sahipken, en yüksek siderit minerali oranına sahip PS100 numunesinin yoğunluğu 2.57 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. Kontrol numunesine kıyasla PS25, PS50, PS75 ve PS100 kodlu numunelerde sırasıyla, %39.84, %75.61, 91.06 ve 108.94 oranında artış meydana gelmiştir.

Yoğunlukta gözlemlenen bu artış, üretim sürecinde düşük yoğunluklu polyester matrisine, yoğunluğu daha yüksek olan siderit mineralinin artan oranlarda eklenmesinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen bulgular, literatürde rapor edilen benzer çalışmalarla uyumlu sonuçlar sunmaktadır [14,18,28].

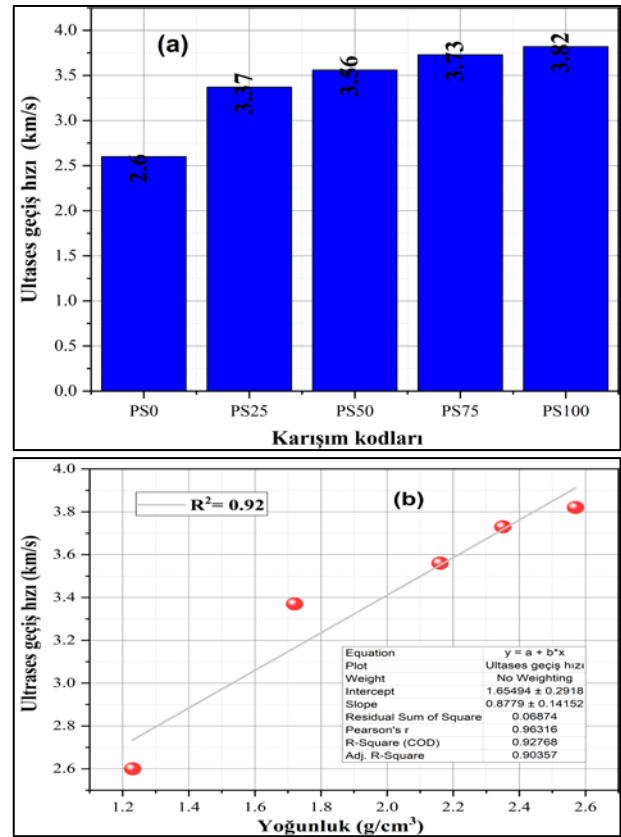


Şekil 3: Polimer Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri
Kompozitlerin ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 4a'da sunulmuştur. Ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde PS0 numunesinde 2.6 km/s olan ultrases geçiş hızı, PS100 numunesinde 3.82 km/s değerine ulaşmıştır. Sideritin matris ile güçlü bir bağ oluşturduğunu ve boşluk oranını azalttığını göstermektedir. Bu durum, mekanik dayanım açısından olumlu bir etki yaratmıştır. Literatürde, ultrases geçiş hızının malzeme yoğunluğu ve mekanik özellikleri ile doğru orantılı olduğu belirtilmiştir [29]. Ayrıca, ultrases geçiş hızındaki artış, malzeme içerisindeki mikro boşlukların azalması ve matris-filler arasındaki bağlanma kalitesinin artması ile açıklanabilir [30]. PS100 numunesinde en yüksek ultrases geçiş hızının gözlenmesi, kullanılan takviye malzemesinin, kompozit yoğunluğunu artırarak boşluk oranını

azalttığını ve böylece daha kompakt bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

Bu durum, beton ve kompozit malzemelerde benzer etkilerin gözlemlendiği çalışmalarla uyumludur. Örneğin, Li et al. (2020) [29], farklı oranlarda katkı maddesi içeren beton karışımlarında, takviye oranı arttıkça ultrases geçiş hızının değerlerinin arttığını bildirmiştir.

Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında doğrudan bir ilişki olmasa da yoğunluk ile ultrases geçiş hızı arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır [30]. Yoğunluk arttıkça ultrases geçiş hızının arttığı gözlemlenmiştir. Bu ilişki, Şekil 4b'de gösterilen korelasyon katsayısı ($R^2=0.92$) ile açıkça ortaya konulmuştur.



Şekil 4: Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (a) Yoğunluk Ultrases Geçiş Hızı İlişkisi (b)

Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri

Basınç ve eğilme dayanımı değerleri Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 5a'da verilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, siderit minerali oranının artışıyla birlikte kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında %21 ile %2 arasında azalma kaydedilmiştir. Bununla birlikte, yalnızca agregaya içeren karışımlar (PS25, PS50, PS75 ve PS100) karşılaştırıldığında, artan siderit oranının basınç dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, matristen daha yüksek ezilme dayanımına sahip olan siderit agregalarının karışım içindeki hacimsel oranının artışıyla ilişkilendirilmiştir.

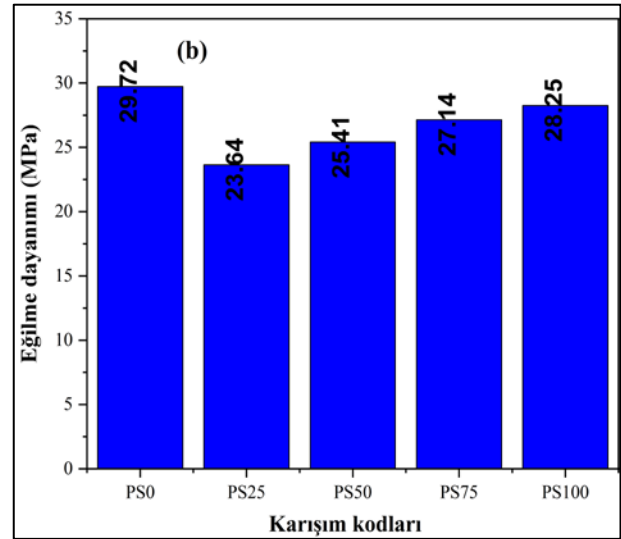
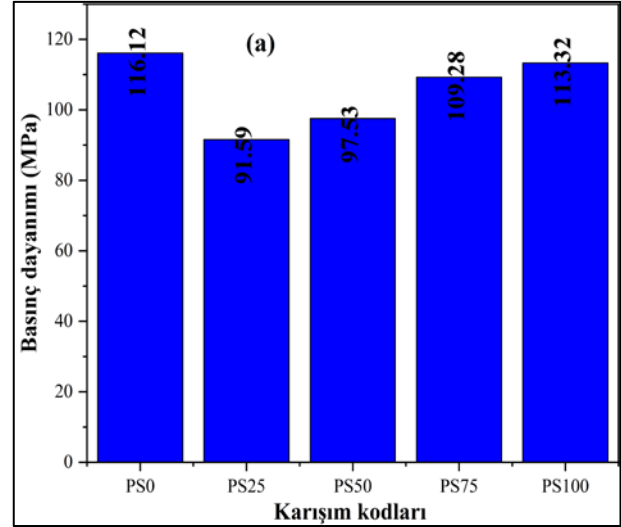
Zhang and Wang (2015) [31], siderit mineralinin yüksek yoğunluk ve mekanik dayanım özellikleri nedeniyle, özellikle yüksek basınçta dayanıklı yapılarda kullanım için uygun olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, Kuo and Huang (2012) [33], tarafından yapılan bir çalışmada, dolgu oranının belirli bir eşik değerine ulaşmasının, kompozit malzemelerin mekanik dayanımını artırdığı, ancak aşırı dolgu kullanımının matrisin bağlayıcılık kapasitesini azaltarak dayanımı olumsuz etkileyebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, Zhang and Li (2015) [34], yüksek yoğunluklu minerallerin matriste çatlak ilerlemesini yavaşlattığını ve bu durumun dayanımı artırdığını bildirmiştir. Bu bağlamda, PS25, PS50, PS75 ve PS100 kodlu numunelerde artan siderit oranına bağlı olarak gözlemlenen dayanım artışı, literatürde belirtilen minerallerin mekanik özelliklere katkısıyla uyumludur. Sonuçlar, takviye malzemesi ve matris arasındaki etkileşimlerin, kompozit malzemelerin performansını optimize etmek için dikkatle ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Eğilme dayanımı değerleri (Şekil 5b) incelendiğinde, kontrol numunesine (PS0) kıyasla siderit minerali oranının artışıyla birlikte bir miktar dalgalanma olduğu görülmektedir.

PS25 kodlu numunede eğilme dayanımı %20 oranında azalmış, ancak siderit oranının daha yüksek olduğu PS50, PS75 ve PS100 numunelerinde dayanımda kademeli bir artış gözlemlenmiştir. PS100 kodlu numunenin eğilme dayanımı, kontrol numunesine oldukça yakın bir değer olan 28.25 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu artış, siderit minerali içeren agregaların matrisle etkileşiminin ve yüksek yoğunluklu agregaların yük aktarımına olan katkısının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir.

Literatürde, takviye malzemesi oranı ve özelliklerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi sıkça vurgulanmıştır. Örneğin, Zhang and Wang (2015) [31], yüksek yoğunluklu minerallerin matrisle güçlü bir bağ oluşturmalarının, eğilme dayanımını artırdığını belirtmiştir. Zhang and Li (2015) [33], takviye malzemelerinin matristeki mikro çatlak ilerlemesini yavaşlatarak eğilme dayanımını artırabileceğini rapor etmiştir.

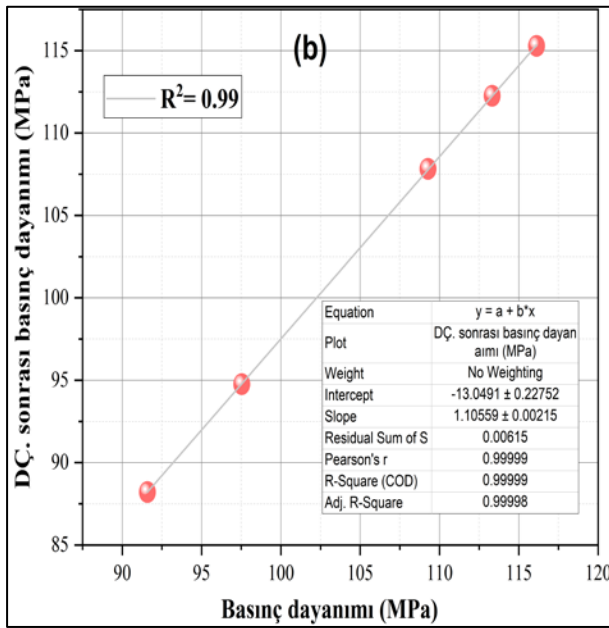
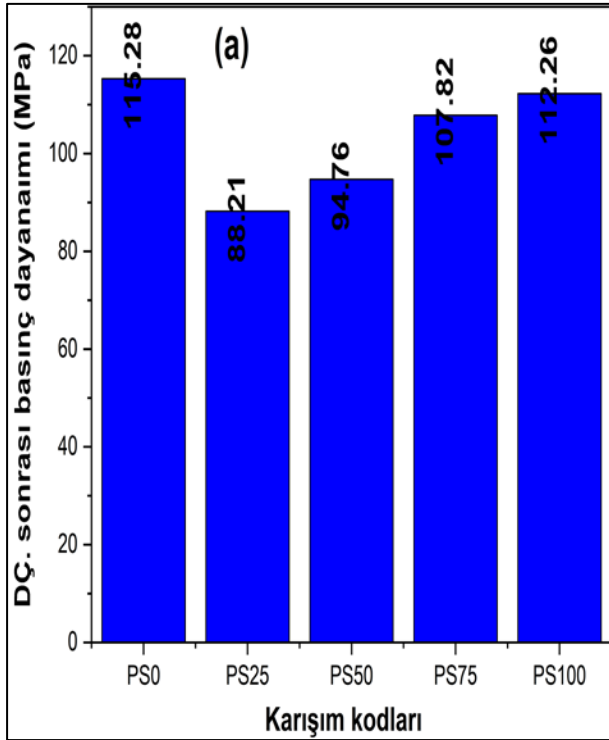
Bu bağlamda, siderit minerali katkısının mekanik dayanım üzerindeki etkisi değerlendirilirken, ekonomik parametreler de göz önünde bulundurulmalıdır. Veriler, katkısız numunenin en yüksek dayanımı sağladığını gösterse de siderit minerali katkısının belirli oranlarda kullanımının dayanımı kabul edilebilir seviyelerde tuttuğu görülmektedir. Bu durum, sideritin düşük maliyetli bir dolgu malzemesi olarak kullanılmasıyla üretim maliyetlerini azaltabileceğini göstermektedir. Özellikle yüksek oranda polimer kullanımı, maliyetleri artırırken, siderit gibi doğal ve bol bulunan bir mineralin belirli oranlarda eklenmesi malzeme tüketimini optimize ederek daha ekonomik ve sürdürülebilir bir üretim sürecine katkı sağlayabilir. Ancak, dayanımda görülen düşüş dikkate alındığında, optimum katkı oranının belirlenmesi hem maliyet etkinliği hem de performans açısından kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 5: Basınç Dayanımı (a) Eğilme Dayanımı (b) Değerleri

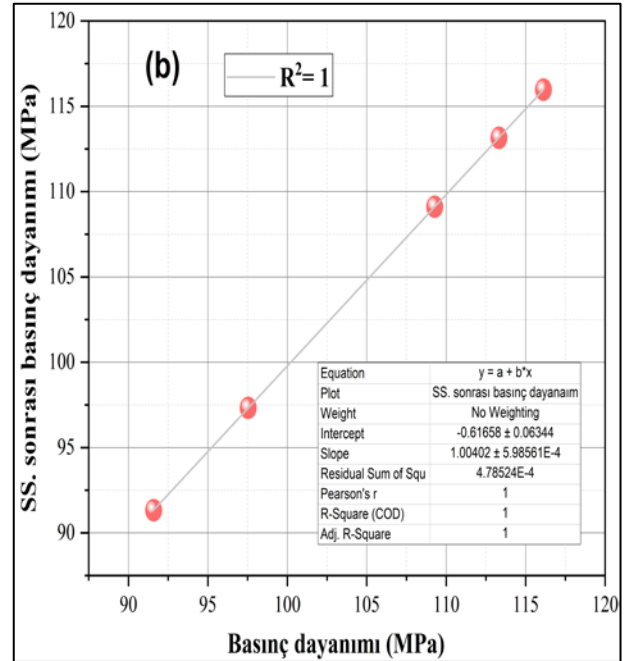
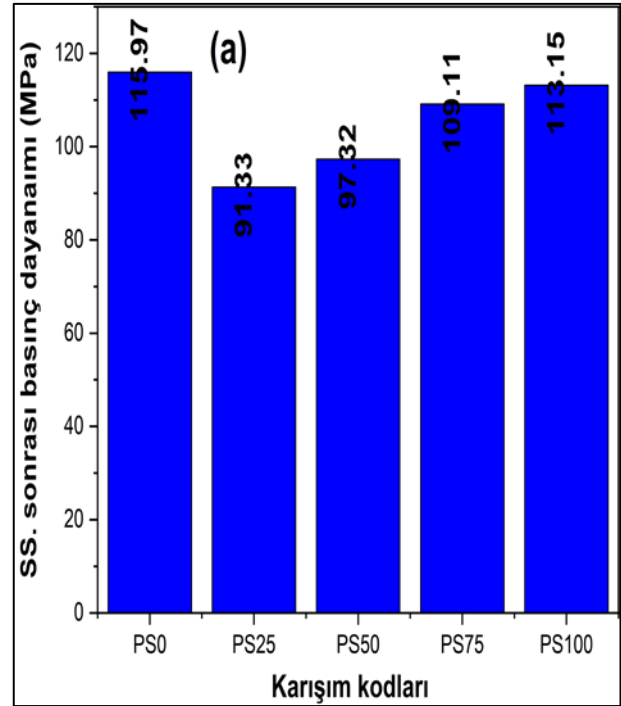
Dayanıklılık özellikleri

Donma- çözülme sonrası basınç dayanımı değerleri Şekil 6a'da gösterilmiştir. Şekil 6a incelendiğinde kontrol numunesinin (PS0) basınç dayanımı değeri 115.28 MPa olarak ölçülmüş olup basınç dayanımı değeri ile karşılaştırıldığında %0.72 oranında azalma meydana gelmiştir. Tüm kompozit numune serilerinde siderit minerali oranının artmasıyla orantılı bir artış elde edilmiştir. Ancak DÇ öncesi basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %3.69, %2.84, %1.34 ve %0.94 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum düşük takviye miktarına sahip numunelerdeki ayrışmadan kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Reçine/takviye oranına bağlı olarak daha önce yapılan çalışmalarla uyumludur [35]. DÇ öncesi ve DÇ sonrası basınç dayanımları arasındaki ilişki (Şekil 6b) incelendiğinde aralarında yüksek bir belirleyicilik katsayısı ($R^2 = 0.99$) elde edilmiştir.



Şekil 6: DC. Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri (a)
DC. Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri ve DC. Öncesi
Basınç Dayanımı İlişkisi (b)

Sülfat etkisi sonra basınç dayanımı değerleri Şekil 7a'da sunulmuştur. Şekil 7a incelendiğinde siderit oranının artmasıyla basınç dayanımı değerlerinde artış elde edilmiştir. Ancak sülfat etkisi öncesi basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %0.12, %0.28, %0.21, %0.15 ve %0.15 oranında azalma meydana gelmiştir. Meydana gelen azalama miktarı çok düşük düzeyde olup, bu durum Şekil 7b'de verilen ilişkiden ($R^2=1$) anlaşılmaktadır.

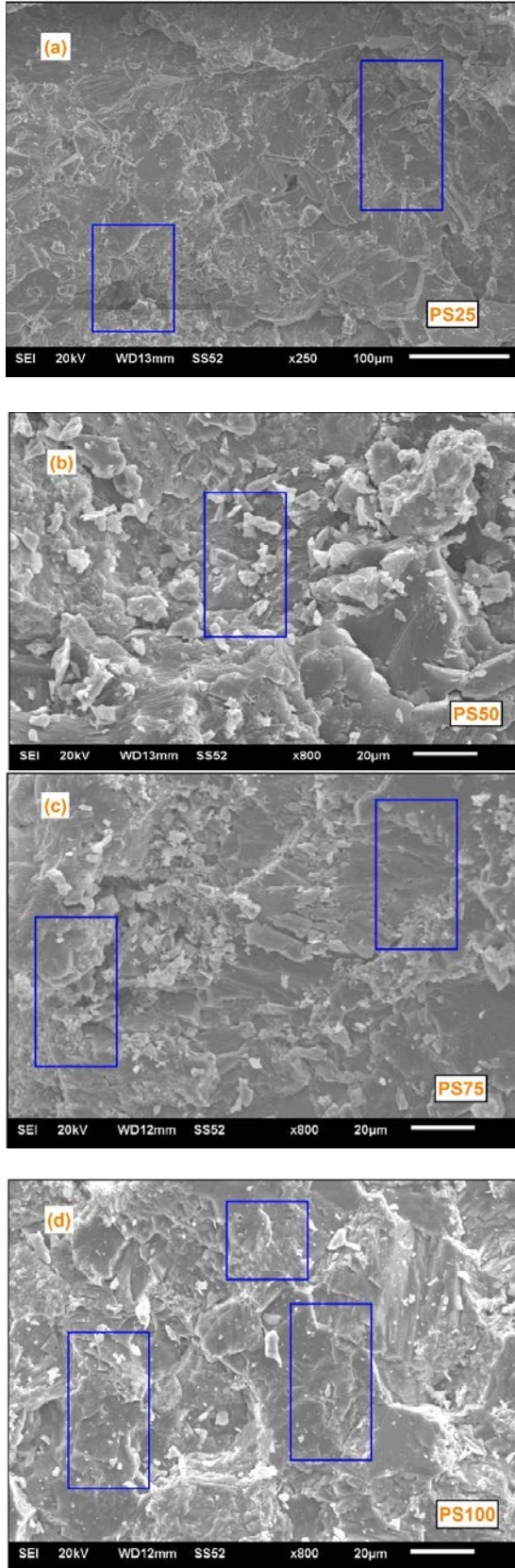


Şekil 7: SS. Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri (a)
Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri ve SS. Öncesi
Basınç Dayanımı İlişkisi (b)

İç yapı analizleri

Üretilen polimer kompozit numunelerin basınç dayanımı testleri sonrasında kırılan yüzeylerinden alınan parçalar, reçine/ takviye arayüz bölgelerinin incelenmesi amacıyla, her bir analizde ortalama 800x büyütme taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Arayüzün yapısını belirlemek amacıyla,

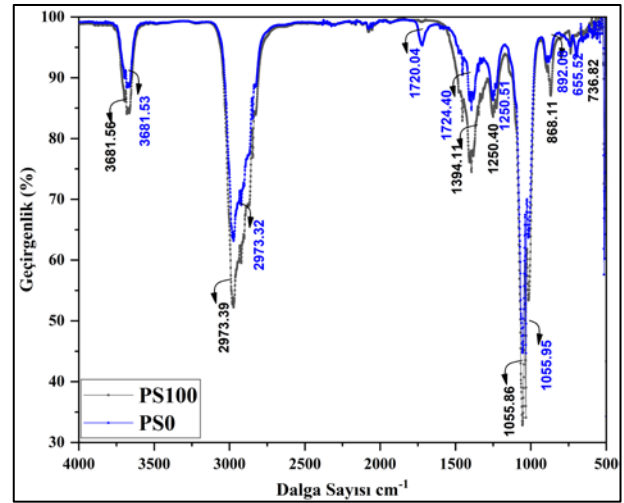
farklı parlaklık ve yüzey pürüzlülüğüne sahip görüntü bölgele analiz edilmiştir.



Şekil 8: PS25 (a) PS50 (b) PS75 (c) PS100 (d) Kodlu Numunelere Ait Sem Görüntüleri

PS25 ve PS50 örneklerinde, polimer matris ile takviye malzemesi arasında daha fazla boşluk olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 8a ve b). Bu durum, üretim sürecinde polimer matris ve takviye malzemesi arasındaki uyumsuzluk nedeniyle oluşan faz ayrışması ve düzensiz dağılımdan kaynaklanmış olabilir. Buna karşılık, PS75 ve PS100 örneklerinde daha kompakt (yoğun, boşluksuz ve sıkı bir içyapıya sahip) bir yapı olduğu görülmüştür. Bu durum, polyester ile dolgu malzemesi arasındaki ayrışmanın azaldığını ve polyesterin boşlukları tamamen doldurduğunu göstermektedir.

Polimer kompozit numunelerin mikroyapı analizi, Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. FTIR spektrumları, 4000-500 cm^{-1} aralığında geçirgenlik modunda elde edilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9: Polimer Kompozitlere Ait FTIR Analiz Sonuçları

Şekil 9'da sunulan FTIR analiz sonuçlarına göre, PS0 ve PS100 kodlu kompozit numunelerde benzer pik oluşumları gözlemlenmiştir. Ortalama olarak, tüm kompozit serilerinde 3681, 2973, 1721, 1394, 1250, 1055, 868, 736 ve 698 cm^{-1} dalga sayıları arasında titreşim pikleri tespit edilmiştir. Analizler, 3681 cm^{-1} dalga boyunda belirgin bir değişim göstermeyen adsorbe edilmiş nem piki olduğunu ortaya koymuştur. Pik boyutlarının incelenmesi sonucunda, PS100 kodlu numunede daha belirgin bir nem piki gözlenmiş ve bu durum, siderit mineralinin daha fazla nem tutma özelliğine bağlıdır.

Üretilen polimer kompozitlerde diğer karakteristik pikler arasında, CH_2 ve CH_3 gruplarına karşılık gelen 2973.53 cm^{-1} piki [36] yer almaktadır. Ayrıca, karbonil grubuna karşılık gelen 1727 cm^{-1} 'de karakteristik bir pik bulunmuş olup, bu pik dolgu malzemesi miktarı arttıkça kaybolma eğilimi göstermiştir [37]. Bunun yanında, kompozit numunelerde 1055 cm^{-1} 'de simetrik aromatik C-O esnemesine karşılık gelen karakteristik bir tepe noktası tespit edilmiştir [38]. Bu pik, PS100 kodlu numunede daha belirgin bir şekilde tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, polimer reçine (PS0) ve siderit katkılı (PS100) numunelerin FTIR analizlerinde belirli pik boyutlarının farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu farklılıkların, numunelerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada, farklı oranlarda siderit minerali kullanılarak üretilen polimer kompozitlerin fiziksel, mekanik ve mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, siderit oranındaki artışın kompozit yoğunluğunu belirgin bir şekilde artırdığını göstermiştir. PS0 numunesinde 1.23 g/cm³ olarak ölçülen yoğunluk, PS100 numunesinde 2.57 g/cm³'e ulaşmıştır (%108.94 artış). Benzer şekilde, ultrases geçiş hızı PS0 numunesinde 2.6 km/s iken PS100 numunesinde 3.82 km/s olarak tespit edilmiştir.

Siderit oranının artışı, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında %21 ile %2 arasında bir azalmaya neden olmuştur. Ancak sadece siderit içeren numuneler arasında, mineral oranının artışı dayanımı artırmıştır. Bu durum, düşük siderit oranlarında matris-filler etkileşiminin zayıflamasıyla dayanımın düştüğünü, ancak yüksek oranlarda agregalar arası bağlanmanın güçlenerek dayanımı artırdığını göstermektedir. Eğilme dayanımı ise belirli bir doğrusal eğilim göstermemekle birlikte, PS100 numunesinde kontrol numunesine yakın bir değer elde edilmiştir. Bu sonuçlar, sideritin belirli bir oran üzerinde kullanıldığında yapısal katkı sağladığını, ancak düşük oranlarda mekanik dayanımı olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanımında düşük düzeyde azalmalar gözlenmiş, ancak bu azalmalar sülfat etkisi öncesi ve sonrası dayanım arasındaki yüksek ilişkiyi ($R^2=0.99$) değiştirmemiştir. Mikro yapı analizleri, özellikle PS75 ve PS100 numunelerinde daha kompakt bir yapı oluştuğunu ve matris-dolgu malzemesi arasındaki bağların güçlendiğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, siderit mineralinin polimer kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanımının yoğunluk ve fiziksel özellikler üzerinde olumlu etkileri olduğunu, ancak mekanik dayanımların tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

1919B012301584 numaralı projemizi destekleyen TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığına (BİDEB) katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Jose J. P., Joseph K. Advances in Polymer Composites: Macro- and Microcomposites – State of the Art, New Challenges, and Opportunities. In Polymer Composites (pp. 1–16). Wiley, 2012.
- [2] Nassar M. M., Arunachalam R., Alzebeid K. I. Machinability of natural fiber reinforced composites: A review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88(9-12):2985-3004, 2017.
- [3] Thakur R. K., Singh K. K., Ramkumar J. Experimental investigation of abrasive waterjet hole cutting on hybrid carbon/glass composite. Materials Today: Proceedings., 21: 1551-1558, 2020.
- [4] Reis J.M.L.D. Effect of textile waste on the mechanical properties of polymer concrete. Materials Research, 12(1):63-67, 2009.
- [5] Tavares C.M.L., Ribeiro M.C.S., Ferreira A.J.M., Guedes R.M. Creep behaviour of FRP-reinforced polymer concrete. Composite Structures., 57(1-4):47-51, 2002.
- [6] Dharmarajan, N. Flexural creep behavior of polymer concrete systems., Rice University, 1987.
- [7] ACI Committee 548. Guide for the use of polymers in concrete (ACI 548, IR-86)., American Concrete Institute, 1986.
- [8] Wang L., Qiu H., Liang C., Song P., Han Y., Han Y., Guo Z. Electromagnetic interference shielding MWCNT-Fe₃O₄@Ag/epoxy nanocomposites with satisfactory thermal conductivity and high thermal stability. Carbon., 141, 506-51, 2019.
- [9] Yang X., Guo Y., Luo X., Zheng N., Ma T., Tan J., Gu J. Self-healing, recoverable epoxy elastomers and their composites with desirable thermal conductivities by incorporating BN fillers via in-situ polymerization. Composites Science and Technology., 164:59-6, 2018.
- [10] Guo Y., Ruan K., Shi X., Yang X., Gu J. Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: A review. Composites Science and Technology., 193- 108134, 2020.
- [11] Spaeth V., Tegguer A. D. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. International Journal of Sustainable Built Environment, 2(2):143-152, 2013.
- [12] Hameed A.M., Hamza M.T. Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials. Energy Procedia., 157,43-50, 2019.
- [13] Velardo P., del Bosque I.S., Matías A., de Rojas M.S., Medina C. Properties of concretes bearing mixed recycled aggregate with polymer-modified surfaces. Journal of Building Engineering, 38:10221, 2021.
- [14] Soykan O., Özel C. Mermer tozu tane boyutunun polimer beton özelliklerine etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 4(3):102-111, 2012.
- [15] Özel C., İren, B. Polimer betonlarda gaz beton atıklarının kullanılabilirliğinin araştırılması. Teknik Bilimler Dergisi, 6(2):28, 2016.
- [16] Barbuta M., Harja M., Baran I. Comparison of mechanical properties for polymer concrete with different types of filler. Journal of Materials in Civil Engineering., 22(7): 696-701, 2010.

- [17] Barbuta M., Rujanu M., Nicuta A. Characterization of polymer concrete with different wastes additions. *Procedia Technology.*, 22:407-412, 2016.
- [18] Polat H., Üstün İ., Şafak A., Çakılcıoğlu AN. Atık tuğla tozunun polimer betonda katkı malzemesi olarak kullanımı: Mekanik özelliklerin incelenmesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi.*, 4(2):76-86, 2023.
- [19] Uygunoğlu T., Brostow W., Gencel O., Topcu I.B. Bond strength of polymer lightweight aggregate concrete. *Polymer Composites*, 34(12):2125-2132, 2013.
- [20] Rebeiz K.S., Serhal S.P., Craft A.P. Properties of polymer concrete using fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1):15-19, 2004.
- [21] Varughese K.T., Chaturvedi B.K. Fly ash as fine aggregate in polyester based polymer concrete. *Cement and Concrete Composites*, 18(2):105-108, 1996.
- [22] Akman F., Ozkan I., Kaçal M. R., Polat H., Issa S. A., Tekin H. O., Agar O. Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites. *Applied Radiation and Isotopes.*, 167-109470, 2021.
- [23] Turhan M.F., Akman F., Polat H., Kaçal M. R., Demirkol İ. Gamma-ray attenuation behaviors of hematite doped polymer composites. *Progress in Nuclear Energy.*, 129:103504, 2020.
- [24] Sharma A., Sayyed M. I., Agar O., Kaçal M. R., Polat H., Akman F. Photon-shielding performance of bismuth oxychloride-filled polyester concretes. *Materials Chemistry and Physics.*, 241, 122330, 2020.
- [25] Topçu, İ. B., Hocaoglu, İ., & Adıl, F. M. A. Ağır Betonlardaki Güncel Gelişmelere Genel Bir Bakış. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 14(2), 385-399, 2023.
- [26] Elyiğit, A., Başyigit, C., & Alkayış, M. H. Farklı mineral kökenli ağır betonların mekanik özelliklerinin araştırılması. *Engineering Sciences*, 19(1), 2024.
- [27] Aşan B. B. Siderit Cevherindeki Demirin Farklı Sıcaklıklarda Bazı Metallerle Olan İlişkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [28] Topsakal A., Özel C. Faz malzeme oranının polimer beton özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(1):16-28, 2013.
- [29] Neville, A. M. *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education, 2011.
- [30] Li Z., Wang Y., Zhang X. Effect of admixtures on ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 234, 117210, 2020.
- [31] Sevinc A.H., Durgun M.Y., Eken M. A Taguchi approach for investigating the engineering properties of concretes incorporating barite, colemanite, basaltic pumice and ground blast furnace slag. *Construction and Building Materials.*, 135:343-351, 2017.
- [32] Zhang Q., Wang Y. The influence of siderite mineral addition on the mechanical properties of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 78, 166-172, 2015.
- [33] Kuo W.T., Huang J.S. Effect of aggregate gradation on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 720-728, 2012.
- [34] Zhang H., Li C. High-density mineral fillers in composite materials: Effects on crack propagation and mechanical strength. *Journal of Composite Materials*, 49(15), 1897-1910, 2015.
- [35] Özden Ç.A. Polimer betonların donma-çözülme etkisine dayanıklılığı, Namık kemal üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye, 2010.
- [36] Rosu D., Cascaval C.N., Rosu L.. Synthesis and characterization of some composites with bioactive properties on the basis of vinyl ester resins. *e-Polymers*, 8(1):105, 2008.
- [37] Özel F., Akman F., Kaçal M. R., Ozen A., Arslan H., Polat H., Agar O. Production of microstructure BaZrO₃ and Ba₂P2O₇-based polymer shields for protection against ionizing photons. *Journal of Physics and Chemistry of Solids.*, 158-110238, 2021.
- [38] Adibelli Ü., Mutlu D., Çakır Y. N., Karagöz İ. Ceviz kabuğu dolgulu epoksi hibrit kompozit malzemelerin hazırlanması ve karakterizasyonu. 10. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu., 13-14, 2022.