



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİYO PARTİKÜL TAKVİYESİNİN POLİMER KOMPOZİTLERE
ETKİLERİ**

ERCAN DİLEN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Şanlıurfa
2025**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİYO PARTİKÜL TAKVİYESİNİN POLİMER KOMPOZİTLERE
ETKİLERİ**

ERCAN DİLEN

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Tez Danışmanı: Prof. Dr. MUSTAFA ÖZEN**

**Şanlıurfa
2025**

TEŐEKKÜR

Bu tez çalıőmasının hazırlanmasında bilgi, tecrübe ve akademik rehberliğiyle her aşamada yanımda olan, yönlendirmeleri ve desteğiyle çalıőmama büyük katkılar sunan değerli danıőmanım Prof. Dr. Mustafa Özen'e en içten teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, laboratuvar çalıőmalarım sırasında her türlü teknik destek ve yol göstericiliği sağlayan Doç. Dr. Akar Doğan, Doç. Dr. Gökhan Demircan ve Dr. Abuzer Açıkgöz'e verdikleri katkılardan dolayı teőekkür ederim.

Bu süreçte manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, sabır ve anlayıőla yanımda olan sevgili aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Önemi ve Amacı	1
1.2. Tezin Kapsamı	3
1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler	4
1.4. Kompozitler	6
1.4.1. Metal matrisli kompozitler	7
1.4.2. Seramik matrisli kompozitler	9
1.4.3. Polimer matrisli kompozitler	12
1.4.3.1. Biyopartikül takviyeli polimer kompozitler (BPRPC)	13
1.5. Biyopartikül Çeşitleri	15
1.5.1. Ceviz Kabuğu	16
1.5.2. Badem Kabuğu	17
1.5.3. Fındık Kabuğu	19
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	22
2.1. Kompozitlerde Ceviz Kabuğu (<i>Juglans regia</i>) Uygulamaları	22
2.2. Kompozitlerde Badem Kabuğu (<i>Prunus dulcis</i>) Uygulamaları	27
2.3. Kompozitlerde Fındık Kabuğu (<i>Corylus avellana</i>) Takviyeli Polimer	33
3. GEREÇ VE YÖNTEM	41
3.1. Materyal	41
3.2. Yöntem	41
3.2.1. Biyopartikül takviyelerinin hazırlanması	41
3.2.2. Biyopartikül takviyeli polimer kompozitin üretimi	42
4. BULGULAR	45
4.1. Deneyler	45
4.1.1. Çekme test sonuçları	45
4.1.2. Üç nokta eğilme test sonuçları	49
4.1.3. DSC test sonuçları	53
4.1.4. TGA test sonuçları	58
5. TARTIŞMA	65
6. SONUÇLAR	66
7. ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	68

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BIYO PARTİKÜL TAKVİYESİNİN POLİMER KOMPOZİTLERE ETKİLERİ

ERCAN DİLEN

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışman: Prof. Dr. MUSTAFA ÖZEN

Yıl: 2025, Sayfa : 79

Bu çalışmada çevresel sürdürülebilirlik ve atık yönetimi perspektifinden hareketle, tarımsal yan ürün niteliğindeki ceviz, badem ve fındık kabukları değerlendirilerek yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) matrisli biyokompozit malzemeler geliştirilmiştir. Biyopartiküller, kullanım öncesinde 75 µm altına elenerek ince toz formuna getirilmiş ve HDPE matrise %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında ilave edilmiştir. Bu sayede üç farklı partikül tipine ve üç katkı oranına sahip dokuz kompozit numune hazırlanmıştır. Üretim süreci, tek vidalı ekstrüzyon, mekanik kırma ve enjeksiyon kalıplama adımlarını içeren endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir hat üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mekanik testler kapsamında çekme ve üç nokta eğme deneyleri yapılmış; %1,5 fındık kabuğu katkılı kompozit, 18,99 MPa maksimum çekme dayanımı ve 270,13 MPa elastisite modülü ile en iyi çekme performansını göstermiştir. Eğilme testlerinde de aynı numune, 24,05 MPa eğilme dayanımı ve 458,95 MPa eğilme modülü ile öne çıkmıştır. Termal karakterizasyon için uygulanan Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizleri, biyopartikül takviyelerinin HDPE'nin erime davranışını modifiye ettiğini ve kristallik derecesini kısmen artırdığını ortaya koymuştur. En yüksek erime entalpisi %1 ceviz katkısında (20,49 J/g), en yüksek erime sıcaklığı ise %1,5 ceviz katkısında (137,99 °C) elde edilmiştir. Termogravimetrik Analiz (TGA) sonuçları, %1 ceviz katkılı kompozitin 210,92 °C ile en yüksek başlangıç bozunma sıcaklığına sahip olduğunu, %1,5 badem katkılı kompozitin ise 478,45 °C tepe bozunma sıcaklığı ile en yüksek ısıl kararlılığı sağladığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, tarımsal atık bazlı biyopartiküllerin belirli oranlarda HDPE matrisine eklenmesiyle hem mekanik hem de termal özelliklerde anlamlı iyileşmeler sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Böylece, çalışma yalnızca yüksek performanslı ve fonksiyonel biyokompozitlerin geliştirilmesine katkı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda atık değerlendirme ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine de önemli bir bilimsel ve teknolojik destek sağlamaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: HDPE, biyokompozit, ceviz kabuğu, badem kabuğu, fındık kabuğu

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECTS OF BIO-PARTICLE REINFORCEMENT ON POLYMER COMPOSITES

ERCAN DİLEN

**HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**

Thesis Supervisor: Prof. Dr. MUSTAFA ÖZEN

Year: 2025, Page : 79

This study focuses on the development of high-density polyethylene (HDPE) matrix biocomposites reinforced with agricultural waste-derived walnut, almond, and hazelnut shells, aiming to enhance environmental sustainability and promote waste valorization. The shell-derived bioparticles were ground, sieved below 75 μm , and incorporated into the HDPE matrix at weight fractions of 0.5%, 1.0%, and 1.5%, yielding nine distinct composite formulations. Fabrication was carried out using a processing line consisting of single-screw extrusion, mechanical crushing, and injection molding. Mechanical characterization revealed that the 1.5 wt% hazelnut shell composite exhibited the highest tensile strength (18.99 MPa) and elastic modulus (270.13 MPa), as well as the highest flexural strength (24.05 MPa) and flexural modulus (458.95 MPa). Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysis indicated that biofiller addition altered the melting behavior of HDPE and slightly increased its crystallinity. The maximum melting enthalpy (20.49 J/g) was observed in the 1 wt% walnut shell composite, while the highest melting temperature (137.99 $^{\circ}\text{C}$) was recorded for the 1.5 wt% walnut shell composite. Thermogravimetric Analysis (TGA) showed that the 1 wt% walnut shell composite achieved the highest onset degradation temperature (210.92 $^{\circ}\text{C}$), whereas the 1.5 wt% almond shell composite demonstrated the highest thermal stability with a peak degradation temperature of 478.45 $^{\circ}\text{C}$. These findings confirm that incorporating finely milled agricultural shell waste into HDPE at optimized loadings can significantly improve both mechanical and thermal performance. The results highlight the potential of such biocomposites as eco-friendly and functional materials, contributing to sustainable materials engineering and circular economy practices.

KEYWORDS: HDPE, biocomposite, walnut shell, almond shell, hazelnut shell

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Buğday öğütme makinası	42
Şekil 3.2.	Kompozitlerin üretim şematik gösterimi	43
Şekil 4.1.	Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin çekme tesi grafikleri	47
Şekil 4.2.	Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin çekme tesi grafikleri	48
Şekil 4.3.	Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin çekme tesi grafikleri	49
Şekil 4.4.	Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin eğilme tesi grafikleri	51
Şekil 4.5.	Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin eğilme tesi grafikleri	52
Şekil 4.6.	Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin eğilme tesi grafikleri	53
Şekil 4.7.	Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DSC eğimleri	55
Şekil 4.8.	Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DSC eğimleri	56
Şekil 4.9.	Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DSC eğimleri	57
Şekil 4.10.	Numunelerin erime entalpisi ve erime derecesi karşılaştırması	57
Şekil 4.11.	Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin TGA eğimleri	59
Şekil 4.12.	Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DTG eğimleri	60
Şekil 4.13.	Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin TGA eğimleri	61
Şekil 4.14.	Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DTG eğimleri	62
Şekil 4.15.	Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin TGA eğimleri	63
Şekil 4.16.	Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DTG eğimleri	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Kompozitlerin kodlamaları	44
Çizelge 4.1.	Mekanik deney test standartları	45
Çizelge 4.2.	Çekme Testi Sonuçları	46
Çizelge 4.3.	Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları	49
Çizelge 4.4.	DSC test sonuçları	53
Çizelge 4.5.	TGA test sonuçları	58

SİMGELER

%	Yüzde
C	Derece
E	Elastisite modülü
F	Kuvvet
g	Gram
m	milimetre
T	Sıcaklık (°C)
t	Zaman
W	Ağırlık
μ	Mikro

KISALTMALAR

PEG	polietilen glikol
MAPP	Maleik Anhidrit Aşılı Polimerler
Al₂O₃	Alümina
BPRPC	Biyopartikül takviyeli polimer kompozitler
CMC	Seramik Matrisli Kompozitler
CVI	Kimyasal Buhar Sızması
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
MMC	Metal Matrisli Kompozit
PE	Polietilen
PET	Polietilen Tereftalat
PIP	Polimer İnfiltrasyonu ve Piroliz
PLA	Polilaktik Asit
PMC	Polimer Matrisli Kompozitler
PP	Polipropilen
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
TGA	Termogravimetrik Analiz
TPU	Termoplastik Poliüretan
ZrO₂	Zirkonyum dioksit (Zirkonya)

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Önemi ve Amacı

Artan çevresel bozulma ve yenilenemeyen kaynakların tükenmesi karşısında, sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesi küresel bir zorunluluk olarak ortaya çıkmıştır. Geleneksel kompozit malzemeler, özellikle de petrokimyasal kaynaklardan elde edilen sentetik elyaflar veya dolgu maddeleriyle güçlendirilmiş olanlar, biyolojik olarak parçalanamayan yapıları ve enerji yoğun üretim süreçleri nedeniyle çevre kirliliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, artan kamu bilinci, daha katı çevre düzenlemeleri ve döngüsel ekonomiye doğru küresel geçiş, malzeme bilimi ve mühendisliğinde çevre dostu alternatifler için güçlü bir talep yaratmıştır.

Doğal elyaf ve biyopartikül bazlı kompozitler bu bağlamda umut verici bir çözüm sunmaktadır. Bunlar arasında ceviz, badem ve fındık kabuğu gibi tarımsal atık malzemeler bol, düşük maliyetli ve yenilenebilir bir biyopartikül kaynağını temsil etmektedir(M Barczewski ve ark., 2019; Papageorgiou ve ark., 2025). Bu kabuklar, polimer matrislerde takviye için uygun yapısal ve kimyasal özelliklere sahip olmalarına rağmen genellikle atık olarak atılmaktadır. Bu tür kalıntıların kullanılmasıyla sadece atıklar en aza indirilmekle kalmaz, aynı zamanda tarımsal sanayi sektörünün yan ürünlerine değer katılır ve böylece malzeme geliştirme sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirilir(Salasinska ve Ryszkowska, 2012; Güngör ve ark., 2019).

Tarımsal yan ürünlerden elde edilen biyopartiküller çeşitli avantajlar sergiler: biyolojik olarak parçalanabilirler, düşük yoğunluk sergilerler ve partikül boyutuna, morfolojisine ve arayüzey bağına bağlı olarak polimerlerin sertliğini veya tokluğunu artırabilirler. Bununla birlikte, biyopartikül takviyeli kompozitlerin performansı, partiküllerin türü ve boyutu, matristeki ağırlık oranları ve imalat sırasında kullanılan işleme teknikleri dahil olmak üzere birçok parametreye bağlıdır. Doğal partiküllerin fonksiyonel takviye olarak kullanımını optimize etmek için bu faktörlerin kapsamlı bir değerlendirmesi gereklidir(Barkoula ve ark., 2010; Adeosun ve ark., 2012; Naghdi, 2021).

Bu tezin önemi, iki kritik küresel zorluğa doğrudan yanıt vermesinde yatmaktadır: çevresel etkiyi azaltmak ve sürdürülebilir inovasyon yoluyla polimer bazlı malzemelerin işlevsel verimliliğini artırmak. Literatürde doğal elyaf takviyeli kompozitlere yönelik ilgi giderek artarken, özellikle ceviz, badem ve fındık kabuğundan elde edilenler olmak üzere doğal dolgu maddelerinin ince öğütülmüş

partikül formlarının polimer kompozitler üzerindeki etkilerini araştıran nispeten daha az sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca, aynı matris sistemi içindeki farklı biyopartikül türleri arasında karşılaştırmalı değerlendirmeler nadirdir ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) gibi termoplastik matrislerdeki göreceli performanslarına ilişkin bilgilerde önemli bir boşluk bırakmaktadır.

Bu alışma, çeşitli ağırlık oranlarında ceviz, badem ve fındık kabuğu tozları kullanarak biyopartikül takviyeli polimer kompozitler üreterek ve karakterize ederek bu boşluğu ele almayı amaçlamaktadır. Tez, standartlaştırılmış test prosedürleri kullanarak ve tutarlı işleme koşullarını koruyarak, gelecekteki eko-kompozit uygulamaları için malzeme seçimi ve tasarımına rehberlik edebilecek güvenilir karşılaştırmalı veriler üretmeyi amaçlamaktadır.

Bu nedenle tezin temel amacı, polimer kompozitlerdeki biyopartikül takviyelerinin fiziksel, mekanik ve termal etkilerini sistematik olarak değerlendirmek ve uygun bir performans ve çevresel fayda dengesi sağlayan optimum dolgu maddesi türünü ve içeriğini belirlemektir. Daha spesifik olarak, çalışma şunları amaçlamaktadır:

Ceviz, badem ve fındık kabuğu tozlarının HDPE bazlı kompozitlerde takviye dolgu maddesi olarak kullanılmasının fizibilitesini araştırmak.

Dolgu türü ve yükleme yüzdesinin (ağırlıkça %0,5, ağırlıkça %1 ve ağırlıkça %1,5) kompozit malzemelerin mekanik bütünlüğü üzerindeki etkisini incelemek.

Biyopartikll kompozitlerin termal davranışını standart koşullar altında analiz etmek.

Tez, bilimsel katkısının yanı sıra, tarımsal atıkların malzeme üretimine pratik entegrasyonunu teşvik etmeyi ve böylece hem çevresel sürdürülebilirliği hem de bölgesel ekonomik kalkınmayı desteklemeyi amaçlamaktadır. Yerel olarak mevcut biyo-kaynakların kullanımı sadece hammadde maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilir tarımı ve atıkların değerlendirilmesini de teşvik eder. Bu nedenle, bu araştırma yeşil malzeme tasarımıyla ilgili daha geniş vizyonuna katkıda bulunmakta ve özellikle otomotiv, inşaat ve ambalaj sektörlerinde yer alan endüstriler için sürdürülebilir ürün geliştirmeye geçiş için bir yol sunmaktadır.

Özetle, bu tez, polimer kompozitlerde biyoparacık takviyelerinin

potansiyelini değerlendirerek atık yönetimi ve sürdürülebilir malzeme inovasyonu gibi ikili zorlukları ele almaktadır. Sistemik deney, analiz ve karşılaştırma yoluyla çalışma, çeşitli yapısal ve yarı yapısal uygulamalarda biyo-bazlı kompozit malzemelerin gelecekteki uygulamaları için zemin hazırlamayı amaçlamaktadır.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tezin kapsamı, tarımsal atıklardan, özellikle ceviz, badem ve fındık kabuklarından elde edilen doğal biyopartiküllerle güçlendirilmiş polimer matris kompozitlerin tasarımı, üretimi ve karakterizasyonunu içermektedir. Bu biyopartiküller, farklı ağırlık oranlarında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) matrisine dahil edilecek ve elde edilen kompozitler mekanik ve termal performansları açısından değerlendirilecektir. Araştırma, biyopartiküllerin türü ve konsantrasyonu ile geliştirilen malzemelerin performans sonuçları arasındaki korelasyonları belirlemeye odaklanmaktadır.

Çalışmanın ilk aşaması, biyopartikül maddelerinin hazırlanmasını içermektedir. Ceviz, badem ve fındık kabukları toplanacak, kurutulacak, ince toz haline getirilecek ve homojen partikül boyutu dağılımları elde etmek için elenecektir. Bu adım, farklı kompozit numuneler arasında tutarlılığı sağlamak ve parçacıklar ile HDPE matrisi arasındaki arayüzey etkileşimini optimize etmek için çok önemlidir. Biyoparçacıklar daha sonra, literatür bulguları ve ön işleme fizibilitesi temelinde seçilen üç farklı dolgu içeriğinde (ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5) HDPE matrisine dahil edilecektir.

Kompozit üretim, mekanik karıştırma ve ekstrüzyon dahil olmak üzere eriyik bileşikleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilecektir. Ekstrüde edilen malzemeler pelet haline getirilecek ve ardından enjeksiyon kalıplama işlemi kullanılarak standart test numunelerine kalıplanacaktır. Bu, mekanik testlerin uluslararası kabul görmüş standartlara (örneğin, çekme testleri için ISO 527, eğilme testleri için ISO 178) uygun olmasını sağlar.

Karakterizasyon aşaması, çalışmanın temelini oluşturur. Her kompozit partisi aşağıdakiler açısından değerlendirilecektir:

Çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti, olmak üzere mekanik özellikler incelenmesi amaçlanmıştır. Bunlar, malzemelerin yapısal veya yarı yapısal uygulamalar için uygunluğunu belirlemek için gereklidir.

Kompozitlerin ısı özelliklerinin belirlenmesi amacıyla DSC ve TGA analizleri yapılmıştır.

Ek olarak, araştırma, hangi biyopartikül türünün ve konsantrasyonunun en uygun özellik kombinasyonunu sağladığını belirlemek için karşılaştırmalı analizler içerecektir. Bu karşılaştırmalar, partikül sertliği, arayüzey yapışması ve matris içindeki dağılım gibi faktörleri dikkate alarak farklı partiküllerin takviye mekanizmalarına ışık tutacaktır.

Teknik hedeflerin yanı sıra, tez, üretilen kompozitlerin endüstriyel önemi ve çevresel potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Kompozit üretiminde tarımsal atık malzemelerin yerel ve sürdürülebilir kullanımı, atık minimizasyon stratejilerine ve malzeme döngüselliğine katkıda bulunabilir. Türkiye ve diğer tarım bölgelerinde yaygın olarak bulunan ceviz ve badem kabukları gibi yeterince kullanılmayan kaynakları araştırarak, bu çalışma biyo-bazlı malzeme geliştirmede bölgesel inovasyonu da desteklemektedir.

Özetle, bu tez malzeme seçimi ve işlemeden performans değerlendirmesine ve pratik uygulanabilirliğe kadar uzanmaktadır. Malzeme bilimi, çevre mühendisliği ve sürdürülebilir ürün tasarımının kesiştiği noktada yer alan disiplinler arası bir çalışmadır. Bulguların, biyokompozit malzemelerin gelecekteki gelişmeleri ve ambalaj, tüketim malları, otomotiv bileşenleri ve inşaat panelleri gibi sektörlerdeki potansiyel ticari uygulamaları için değerli bir rehberlik sunması beklenmektedir.

1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler

Bu tezin özgünlüğü, az kullanılan tarımsal kalıntıları (özellikle ceviz, badem ve fındık kabukları) polimer matrisli kompozitler için yüksek performanslı biyopartiküllere dönüştürmeye yönelik entegre yaklaşımında yatmaktadır. Literatürde doğal elyaf takviyeleri üzerine çok sayıda çalışma bulunsa da, aynı polimerik matris (HDPE) içinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilen birden fazla kabuk türünden toz haline getirilmiş biyopartiküllerin kullanılması yeni bir katkıdır. Ayrıca, bu tez sadece tek bir biyopartikül maddesinin takviye etkisini değerlendirmekle kalmayıp, kimyasal ve yapısal olarak farklı üç tarımsal atık malzemesini geniş bir performans parametresi seti üzerindeki etkileri açısından sistematik olarak araştırmaktadır.

Tezin bilimsel katkıları dört temel alanda gruplandırılabilir: malzeme geliştirme, özellik-performans korelasyonu, sürdürülebilirlik entegrasyonu ve mühendislik uygulamalarına uygunluk.

Malzeme Geliştirme ve Deneysel Tasarım

Bu çalışmanın en önemli yeni yönlerinden biri, yerel atık kaynaklarından elde edilen ince öğütülmüş biyopartiküller kullanılarak polimer kompozitlerin hazırlanmasıdır. Biyo-bazlı kompozitler üzerine yapılan araştırmaların çoğu keten, kenevir veya kenaf gibi lifli takviyelere odaklanmaktadır. Buna karşın bu tez, liflere kıyasla farklı geometrik şekillere, kimyasal bileşimlere ve yüzey dokularına sahip olan mikronize tarımsal kabuk parçacıklarının fizibilitesini araştırmaktadır. Aynı işleme koşulları ve dolgu maddesi oranları altında üç partikül türünün kullanılması, önceki çalışmalarda nadiren denenen kontrollü ve titiz bir karşılaştırmaya olanak tanır.

Tez ayrıca, ağırlıkça %0,5, 1 ve 1,5 seviyelerini değerlendirerek optimum dolgu maddesi içeriği hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu bulgular, polimer işlemede tarımsal atık kullanımını artırmayı amaçlayan mühendisler ve araştırmacılar için değerli bir rehberlik sunacaktır.

Özellik-Performans İlişkisi ve Bilimsel İlerleme

Kompozitlerin sistematik karakterizasyonu yoğunluk, su emilimi, termal iletkenlik ve mekanik mukavemet (çekme, eğilme, basınç ve darbe) dahil farklı biyopartiküllerin polimer matris ile nasıl etkileşime girdiğine dair kapsamlı bir anlayış sunar. Tezin, partikül morfolojisi, boyut dağılımı ve kimyasal afinitenin arayüzey yapışmasını nasıl etkilediğini ve nihayetinde malzemelerin makroskopik performansını nasıl kontrol ettiğini ortaya koyması bekleniyor.

Ayrıca çalışma, hangi biyopartikülün en yüksek sertliği sağladığı veya neme maruz kaldığında hangisinin daha iyi performans gösterdiği gibi malzemeye özgü davranış eğilimlerini ortaya çıkarabilir. Bu incelikli bilgiler, partikül dolgulu polimer kompozitlerde biyo-takviye mekanizmaları ve arayüzey uyumluluğu hakkında giderek artan bilgi birikimine katkıda bulunmaktadır.

Sürdürülebilir Malzeme Bilimine Katkı

Bu tez, hem atıkların değerlendirilmesi hem de malzeme inovasyonu için çevreye duyarlı bir strateji sunarak sürdürülebilir kalkınma alanındaki küresel çabaları desteklemektedir. Tarımsal yan ürünlerin işlevsel dolgu maddesi olarak kullanıldığı bu çalışma, kaynak verimliliği, yaşam döngüsü düşüncesi ve yeşil tasarım ilkeleriyle uyumludur.

Ayrıca, yerel kaynaklı, yenilenebilir atık malzemelere odaklanması, araştırmanın sosyo-ekonomik değerini artırmaktadır. Özellikle Türkiye gibi fındık üretiminin yüksek olduğu ülkelerde hem tarım hem de imalat sektörlerine fayda sağlayabilecek merkezi olmayan, bölgeye özgü malzemelerin geliştirilmesi için bir yol önermektedir.

Endüstriyel ve Pratik Alaka

Kullanılan deneysel metodoloji- ekstrüzyon bileşimi ve ardından enjeksiyon kalıplama gerçek dünyadaki termoplastik işleme koşullarını taklit ederek sonuçları doğrudan endüstriyel üretim hatlarına uygulanabilir hale getirmektedir. Standart numunelerden (ASTM prosedürlerine dayalı olarak) elde edilen mekanik performans verileri, laboratuvar bulgularının ambalaj, inşaat, otomotiv panelleri ve çevre dostu tüketici ürünlerindeki potansiyel uygulamalar için tasarım kararlarına dönüştürülmesine yardımcı olacaktır.

Bu nedenle tez, malzeme konsepti ile uygulamaya hazır olma arasındaki boşluğu doldurarak hem bilimsel bir araştırma hem de bir teknoloji gösterimi görevi görmektedir. Biyo takviyeli polimer kompozitlerin sadece çevresel bir gereklilik olarak değil, aynı zamanda teknik olarak uygulanabilir ve ekonomik olarak cazip bir çözüm olarak benimsenmesini desteklemeyi amaçlamaktadır.

1.4. Kompozitler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı bileşenin bir araya getirilmesiyle, tek tek bileşenlerden daha üstün özellikler elde etmek üzere tasarlanır(Dicker ve ark., 2014; Haghshenas, 2016; Naslain ve Pomeroy, 2016). Bu malzemeler tipik olarak sürekli bir matris fazından ve lifler, parçacıklar, pullar veya kumaşlar şeklinde olabilen dağınık bir takviye fazından oluşur. Matris takviyeyi bağlar, dış yükleri dağıtır ve çevresel hasarlardan korurken, takviye kompozitin mekanik, termal ve/veya işlevsel özelliklerini geliştirir(Abu-Jdayil ve ark., 2018).

Kompozit malzeme kavramının kökleri doğaya dayanmaktadır örnek olarak ahşap ve kemik verilebilir ve modern teknolojinin taleplerini karşılamak üzere mühendislik sistemlerine dönüştürülmüştür. Kompozit malzemeler artık havacılık, otomotiv, inşaat, savunma, biyomedikal cihazlar ve enerji sistemleri de dahil olmak üzere çok çeşitli sektörlerde vazgeçilmezdir(Athijayamani ve ark., 2017; Dixit ve ark., 2017).

Kompozitlerin temel avantajlarından biri, uyarlanabilirliklerinde yatmaktadır; takviye ve matrisin türünü, şeklini ve içeriğini dikkatlice seçerek, mühendisler belirli mukavemet-ağırlık oranlarına, termal özelliklere, korozyon direncine veya darbe davranışına sahip malzemeler tasarlayabilirler. Matris malzemesinin türüne bağlı olarak, kompozitler genel olarak üç ana kategoride sınıflandırılır(Srivastava ve ark., 2024):

Metal Matrisli Kompozitler (MMC'ler): alüminyum veya titanyum gibi bir metalin matris görevi gördüğü kompozitlerdir(Hunt, 2000; Haghshenas, 2016; Gürbüz ve ark., 2018; Chak ve ark., 2020; Raj ve ark., 2023).

Seramik Matrisli Kompozitler (CMC'ler): matris olarak silisyum karbür veya alümina gibi bir seramik malzemenin kullanıldığı kompozitlerdir(Naslain ve Pomeroy, 2016).

Polimer Matrisli Kompozitler (PMC'ler): termoplastik veya termoset bir polimerin sürekli faz olarak görev yaptığı kompozitler(Monteiro ve ark., 2018).

Her sınıf, uygulama alanına bağlı olarak belirli avantajlar ve zorluklar sunar. Bunlar arasında polimer matrisli kompozitler, işlenebilirlikleri, hafif yapıları ve maliyet etkinlikleri nedeniyle en yaygın kullanılanlardır.

1.4.1. Metal matrisli kompozitler

Metal Matris Kompozitler (MMC'ler), seramik parçacıkları, whiskerler, kısa lifler veya sürekli lifler gibi ikincil malzemelerle güçlendirilmiş metalik matris fazından oluşan gelişmiş kompozit sistemlerdir(Haghshenas, 2016). Matris genellikle alüminyum, magnezyum veya titanyum gibi hafif metallere oluşur ve bu metallere, süneklik, ısı iletkenlik ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle seçilir(Radhika ve ark., 2023). Öte yandan, takviyeler genellikle kompozitin mekanik ve fonksiyonel özelliklerini geliştirmek için eklenen silikon karbür (SiC), alümina (Al₂O₃), bor

karbür (B₄C), titanyum karbür (TiC) veya karbon bazlı lifler gibi daha sert ve daha rijit malzemelerdir(Mussatto ve ark., 2021).

MMC'ler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, termal stabilite ve aşınma direncinin kritik olduğu mühendislik uygulamalarında büyük ilgi görmüştür(Babbar ve ark., 2020). Monolitik metallere kıyasla, MMC'ler yüksek sıcaklıklarda üstün özgül mukavemet, sertlik, sünme direnci ve boyutsal stabilite sergiler. Bu özellikler, onları havacılık, otomotiv, savunma, denizcilik ve termal yönetim sistemlerinde yapısal olarak zorlu uygulamalar için uygun hale getirir(Hooker ve Doorbar, 2000; Mallick, 2012; Radhika ve ark., 2023). Örneğin, SiC parçacıkları ile güçlendirilmiş alüminyum matris kompozitler, yüksek modülleri ve termal yorulma dirençleri nedeniyle havacılıkta fren rotorlarında, piston kafalarında ve yapısal çerçevelerde yaygın olarak kullanılmaktadır(Koli ve ark., 2014; Radhika ve ark., 2023).

Güçlendirme türü ve morfolojisi, elde edilen kompozit özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Kesikli takviyeler (partiküller ve kısa lifler) izotropik özelliklerin geliştirilmesine olanak tanır ve genellikle işlenmesi daha kolaydır, oysa sürekli lifler (karbon veya bor lifleri gibi) en yüksek mekanik performansı sunar, ancak genellikle anizotropik davranışa neden olur ve daha kontrollü üretim koşulları gerektirir. Partikül takviyeli MMC'ler, performans, işlenebilirlik ve maliyet arasındaki dengeleri nedeniyle maliyet duyarlı endüstriyel uygulamalarda genellikle tercih edilir(Zhang ve ark., 2015; Mussatto ve ark., 2021).

MMC'lerin üretimi genellikle polimer kompozitlerin üretiminden daha karmaşıktır ve homojen takviye dağılımı ve güçlü arayüzey bağlanması sağlamak için özel teknikler gerektirir.(Parikh ve ark., 2023) Yaygın üretim yöntemleri şunlardır:

Toz Metalurjisi: Metalik ve takviye tozlarının karıştırıldığı, sıkıştırıldığı ve sinterlendiği bir katı hal işlemi. Bu yöntem, takviye dağılımı üzerinde iyi kontrol sağlar ve yüksek hacimli üretim için uygundur(Manohar ve ark., 2018).

Karıştırmalı Döküm: Seramik parçacıkların dökümden önce erimiş metale mekanik olarak karıştırıldığı bir sıvı hal yöntemi. Bu, partikül MMC'leri üretmek için en ekonomik yöntemlerden biridir, ancak aglomerasyon veya düzgün olmayan dağılım sorunları yaşayabilir(Sankhla ve Patel, 2022).

Sıkıştırmalı Döküm ve Sızma: Bunlar, erimiş metali basınç altında bir takviye

ön formuna zorlayarak, yüksek hacimli fraksiyon takviyeleri ve güçlü matris-takviye arayüzleri sağlar(Chak ve ark., 2020).

Sprey Biriktirme ve Yerinde Teknikler: Özel mikro yapılar ve gelişmiş termal-mekanik davranışa sahip kompozitler üretmek için kullanılan gelişmiş yöntemlerdir(Xue ve ark., 2020).

Umut verici özelliklerine rağmen, MMC'ler bazı sınırlamalar ve zorluklarla karşı karşıyadır. Bunlar arasında yüksek işleme maliyetleri, takviyelerin düzgün dağılımının sağlanmasındaki zorluk, yüksek sıcaklıklarda matris ve takviye arasında potansiyel kimyasal reaktivite ve kırılğan seramik fazların varlığı nedeniyle sınırlı süneklik sayılabilir. Ayrıca, MMC'lerin işlenebilirliği genellikle zayıftır, özellikle sert seramik parçacıklarla takviye edildiğinde, bu da takım aşınmasını ve üretim maliyetlerini artırır(Manohar ve ark., 2018).

MMC'lerin mekanik performansı büyük ölçüde matris ve takviye arasındaki bağın doğasına bağlı olduğundan, devam eden araştırmaların bir başka alanı da arayüzey mühendisliğidir(Guo ve ark., 2020). Zayıf arayüzey yapışması, gerilme yoğunlaşmalarına ve erken arızalara yol açabilirken, aşırı güçlü arayüzeyler plastik deformasyonu kısıtlayabilir ve tokluğu azaltabilir(Zhong ve ark., 2024). Kompozit bütünlüğünü optimize etmek için takviyelerin yüzey kaplaması, matrisin alaşımlanması veya arayüzey değiştiricilerin kullanılması gibi teknikler araştırılmaktadır(Guo ve ark., 2020).

Sonuç olarak, metal matris kompozitler, hafif metaller ile yüksek mukavemetli seramikler arasındaki boşluğu dolduran önemli bir ileri malzeme sınıfını temsil etmektedir. Çok işlevli özellikleri, geleneksel metallerin yetersiz kaldığı yüksek performanslı uygulamalar için uygun olmalarını sağlar. Araştırma, işleme sınırlamaları ve maliyet engellerini ele almaya devam ettikçe, MMC'lerin yeni nesil yapısal ve işlevsel bileşenlerin geliştirilmesinde daha yaygın olarak benimsenmesi beklenmektedir.

1.4.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik Matris Kompozitler (CMC'ler), monolitik seramiklerin içsel sınırlamalarını, özellikle kırılğanlıklarını ve düşük kırılma tokluğunu aşmak için tasarlanmış yüksek performanslı malzemeler sınıfıdır. CMC'ler, silikon karbür (SiC), alümina (Al₂O₃) veya zirkonyum oksit (ZrO₂) gibi seramik matrislerden oluşur ve

seramik lifler, whiskerlar veya partiküllerle güçlendirilir(Cawley, 2001; Lamon, 2014; Stojanovic ve Glisovic, 2021). Bu takviyeler, malzemenin çatlak yayılmasına ve termal şoka karşı direncini önemli ölçüde artırarak, aşırı ortamlarda yapısal olarak zorlu uygulamalarda kullanılmasını sağlar(Rajak ve ark., 2024).

Geleneksel seramikler, sertlikleri, termal kararlılıkları, korozyon dirençleri ve elektrik yalıtımları ile değerlidir. Ancak, zayıf enerji emme kapasiteleri nedeniyle mekanik stres altında düşük gerilme mukavemeti ve felakete sonuçlanan arızalarla karşı karşıya kalırlar. CMC'lerin geliştirilmesi, çatlak sapması, lif çekilmesi ve köprüleme gibi enerji dağılım mekanizmalarını destekleyen takviyeler ekleyerek bu sorunları giderir ve böylece genel kırılma direncini artırır(François Christin, 2008; Laha, 2009; Fan ve Njuguna, 2016).

CMC'ler, metallerin yumuşadığı veya oksitlendiği yüksek sıcaklık uygulamalarında özellikle caziptir. Mükemmel termomekanik özellikleri, gaz türbinleri, havacılık bileşenleri (örneğin burun konileri, ısı kalkanları), nükleer reaktör iç parçaları, kesici aletler ve fren sistemlerinde kullanım için uygun hale getirir(Ibadi ve ark., 2025). Örneğin, SiC/SiC kompozitler, oksitleyici atmosferlerde 1200°C'nin üzerinde güvenilir bir şekilde çalışabilme özellikleri nedeniyle yeni nesil uçak motoru bileşenlerinde kullanılmaktadır(Che ve ark., 2025).

CMC sistemlerinde kullanılan çeşitli seramik matris ve takviye türleri vardır ve her biri kendine özgü özelliklere sahiptir:

Oksit/Oksit CMC'ler: Hem matris hem de takviye, Al_2O_3 veya mullit gibi oksit seramiklerden yapılmıştır. Bunlar oksitleyici ortamlarda nispeten stabildir, ancak oksit olmayan sistemlere kıyasla sıcaklık direnci sınırlıdır(Cui ve ark., 2020).

Oksit Olmayan CMC'ler: SiC veya Si_3N_4 gibi matrisler, aynı veya benzer malzemelerle takviye edilir. Bunlar üstün mekanik ve termal özellikler sergiler, ancak oksidasyonu önlemek için koruyucu kaplamalar veya özel işlemler gerektirir(Andreev ve ark., 2023; Qin ve ark., 2024).

Takviye geometrisinin seçimi de CMC'lerin performansını etkiler:

Lifli Takviyeler (ör. sürekli seramik lifler, dokuma kumaşlar): Anizotropik takviye sağlar, yönlü yükleme meydana gelen yapısal bileşenler için idealdir(Naslain ve Pomeroy, 2016).

Whiskers ve Parçacıklar: İzotropik sertleştirme sağlar, genellikle kesici aletler gibi aşınmaya dayanıklı uygulamalar için kullanılır(Zhang, 2014).

CMC'lerin üretim teknikleri, metal veya polimer kompozitlere göre daha karmaşık ve maliyetlidir, bunun başlıca nedeni yüksek sinterleme sıcaklıkları ve kontrollü atmosfer gereksinimidir. Yaygın işleme yöntemleri şunlardır:

Kimyasal Buhar Sızması (CVI): Gaz halindeki seramik öncülünün gözenekli bir ön forma sızdırıldığı ve yavaş yavaş matrisi oluşturduğu bir işlemdir. Mikro yapı üzerinde iyi kontrol sağlar, ancak zaman alıcıdır(Kopeliovich, 2014).

Polimer İnfiltasyonu ve Piroliz (PIP): Seramik öncü polimerin bir fiber ön forma sızdırılması ve ardından seramik matrise dönüştürmek için ısıl işlem uygulanmasıdır. Bu işlem tekrarlanabilir ve maliyet etkindir(Ibadi ve ark., 2025).

Çamur İnfiltasyonu ve Sıcak Presleme: Partikül CMC'ler için kullanılır; çamur, yoğun mikro yapılar elde etmek için yüksek basınç ve sıcaklık altında preslenir ve sinterlenir(Zou ve ark., 2024).

Avantajlarına rağmen, CMC'lerin yaygın olarak benimsenmesi, yüksek işleme maliyeti, karmaşık üretim yolları ve büyük bileşenler için sınırlı ölçeklenebilirlik nedeniyle sınırlıdır. Ayrıca, matris ve takviye arasındaki termal genleşme katsayılarındaki uyumsuzluk, işleme sırasında iç gerilmelere neden olabilir ve bu da mikro çatlakları önlemek için dikkatle yönetilmelidir(Tian ve ark., 2020).

CMC'lerdeki mevcut araştırmalar, arayüzey bağlanmasını, oksidasyon direncini ve üretim verimliliğini iyileştirmeye odaklanmaktadır. Yüzey mühendisliği, nano takviyeler ve hibrit takviye mimarilerindeki gelişmeler, hem yapısal hem de işlevsel kullanımlar için ayarlanabilir özelliklere sahip yeni nesil CMC'lerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Seramik Matris Kompozitler, seramiklerin sertliği ve termal direnci ile takviyelerin sağladığı dayanıklılık arasında benzersiz bir denge sunar. Hafif, yüksek mukavemetli ve termal olarak dayanıklı malzemelerin gerekli olduğu kritik uygulamalarda, özellikle metallerin ve polimerlerin kapasitesini aşan agresif hizmet koşullarında vazgeçilmezdirler.

1.4.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimer kompozit malzemeler, polimer matrisine fiber veya partikül gibi takviye malzemeleri ekleyerek oluşturulur ve bu sayede sertlik, mukavemet, termal stabilite ve çevresel direnç açısından iyileştirmeler sağlanır. Bu malzemeler, otomotiv gövde panelleri, havacılık bileşenleri, spor malzemeleri ve tıbbi implantlar gibi yüksek mekanik verimliliğe sahip hafif yapılar gerektiren uygulamalar için özellikle caziptir(Asim ve ark., 2018; Sreenivasulu ve ark., 2018; Greene, 2021; Angra, 2023).

Matris olarak kullanılan polimerler genellikle iki kategoriye ayrılır:

Termoplastikler (ör. polietilen, polipropilen, poliamid): Bunlar eritilip birçok kez yeniden şekillendirilebilir, bu da geri dönüştürülebilirlik ve işleme kolaylığı sağlar(Mallick, 2010).

Termosetler (ör. epoksi, polyester, fenolik reçineler): Bunlar küreme sırasında geri dönüşümsüz çapraz bağlı ağlar oluşturur ve üstün boyutsal ve termal stabilite sağlar(Asim ve ark., 2018).

Takviye fazı, biçim ve işlev açısından büyük farklılıklar gösterebilir, örneğin: Sentetik elyaflar (ör. cam, karbon, aramid), Doğal elyaflar (ör. keten, kenevir, jüt), Mineral veya seramik parçacıklar (ör. talk, silika, alümina), Biyolojik bazlı parçacıklar ve dolgu maddeleri (örneğin, ceviz kabuğu tozu, pirinç kabuğu, odununu)(Adeosun ve ark., 2012; Dicker ve ark., 2014; Li ve ark., 2015; Asim ve ark., 2018; Rohan ve ark., 2018)

Polimer kompozit araştırmalarındaki son trendler, ekolojik kaygılar ve sentetik dolgu maddelerine sürdürülebilir alternatiflere duyulan ihtiyaç nedeniyle, biyolojik bazlı takviyelere güçlü bir şekilde yönelmiştir. Fındık kabuğu ve bitki lifleri gibi tarımsal atıklardan elde edilen doğal parçacıklar, yenilenebilirlikleri, biyolojik olarak parçalanabilirlikleri ve uygun şekilde işlenip dağıtıldıklarında kabul edilebilir mekanik özellikleri nedeniyle popülerlik kazanmaktadır(Ashori ve Nourbakhsh, 2010; Adeosun ve ark., 2012; Begum ve ark., 2020).

Polimer kompozitlerin mekanik performansı, sadece takviye ve matrisin içsel özelliklerine değil, aynı zamanda arayüzey yapışmasına, parçacık dağılımına, dolgu morfolojisine ve işleme parametrelerine de bağlıdır. Bu faktörlerin optimize edilmiş

dengesi, üstün performansa sahip kompozitler ile sonuçlanır(Mateusz Barczewski ve ark., 2019).

Bu tezde, polimer kompozit malzemeler sürdürülebilirlik ve inovasyon açısından incelenmektedir. Termoplastik bir polimer olan yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), kimyasal direnç, tokluğun ve işlenebilirlik gibi olumlu özellikleri nedeniyle matris olarak seçilmiştir(Najafi ve ark., 2006; Awan ve ark., 2021; Abbas-Abadi ve ark., 2022; İdris Karagöz ve ark., 2024). Takviyeler, bol miktarda bulunmaları, biyolojik olarak parçalanabilir olmaları ve özellikleri geliştirme potansiyeli nedeniyle seçilen ceviz, badem ve fındık kabuklarının öğütülmüş parçacıklarını içermektedir. Çalışma, biyopartikül türü ve içeriğinin malzemenin yapısal ve işlevsel davranışındaki rolünü sistematik olarak değerlendirerek biyopartiküllü polimer kompozitlerin gelişmesine katkıda bulunmaktadır.

1.4.3.1. Biyopartikül takviyeli polimer kompozitler (BPRPC)

Biyopartikül takviyeli polimer kompozitler (BPRPC'ler), polimer matrislere ince öğütülmüş doğal partiküllerin (tipik olarak tarımsal veya ormancılık atıklarından elde edilen) dahil edilmesiyle geliştirilen ve hızla gelişen bir sürdürülebilir malzeme sınıfıdır. Fındık kabuğu, odun unu, pirinç kabuğu, hindistan cevizi kabuğu veya meyve kabuklarını içerebilen bu biyopartiküller, baz polimerin seçilen mekanik, termal veya bariyer özelliklerini geliştiren takviye maddeleri olarak hizmet eder. BPRPC'lerin geliştirilmesi, petrol bazlı katkı maddelerine bağımlılığı azaltmak ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda yenilenebilir biyokütleyi değerlendirmek gibi ikiz hedeflere hitap etmektedir.

Geleneksel elyaf takviyeli polimer kompozitlerin aksine, biyopartikül takviyeli sistemler genellikle işlenmesi daha kolay olan, matris içinde daha homojen bir şekilde dağılan ve izotropik özellik artışı sağlayan partikül dolgu maddelerinden yararlanır. Partikül morfolojisi, boyut dağılımı, kimyasal bileşimi ve polimer ile arayüzey uyumluluğu, kompozitin nihai özelliklerinin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır (Omar Faruk ve ark., 2012; M Barczewski ve ark., 2019).

BPRPC'lerde kullanılan polimer matrisler, eritilerek işlenebilirlikleri ve geri dönüştürülebilirlikleri nedeniyle genellikle polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polilaktik asit (PLA) gibi termoplastiklerdir. Bu matrislerde, ceviz kabuğu tozu, badem kabuğu tozu, pirinç kabuğu külü veya odun tozu gibi biyopartiküller, tipik olarak %5 ila %30 arasında değişen ağırlık fraksiyonlarında eklenir. Düşük dolgu

maddesi içerikleri genellikle işlenebilirlik üzerinde minimum etkiyle orta düzeyde takviye sağlarken, daha yüksek yüklemeler viskoziteyi, eriyik akışını ve mekanik bütünlüğü önemli ölçüde etkileyebilir (Ganesan ve Kaliyamoorthy, 2022).

Biyopartiküller tipik olarak selüloz, hemiselüloz, lignin ve mumlar, proteinler ve fenolikler gibi küçük bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler partiküllere yapısal sertlik kazandırır, ancak aynı zamanda HDPE veya PP gibi hidrofobik polimer matrislerle zayıf uyumluluğa neden olabilecek hidrofilikliği de beraberinde getirir. Bu nedenle, alkali işlemi, silan bağlama veya uyumlaştırıcı ilavesi (ör. maleik anhidrit aşılı polimerler) gibi yüzey işlemleri, dolgu maddesi-matris arayüzey yapışmasını iyileştirmek için yaygın olarak uygulanır (Omar Faruk ve ark., 2012; Greene, 2021).

Mekanik performans açısından, biyopartikül dolgu maddeleri genellikle modül, sertlik ve aşınma direncinde artışa yol açarken, daha yüksek konsantrasyonlarda kopma uzamasını ve darbe mukavemetini potansiyel olarak azaltır. Hindistan cevizi kabuğu tozu, ceviz kabuğu tozu veya fındık kabuğu içeren çalışmalar, optimum dolgu maddesi yüklemesinde eğilme ve basınç dayanımında %15-20'ye varan iyileşmeler bildirmiştir (H Essabir ve ark., 2013; Velmurugan ve ark., 2021). Termal stabilite de, bu partiküllerin termal bozunmayı geciktiren yüksek lignin içeriği nedeniyle tipik olarak geliştirilmiştir.

Teknik performansın ötesinde, BPRPC'lerin en önemli avantajı sürdürülebilirlikleridir. Atık akışlarını kullanırlar, plastiklerin çevresel etkisini azaltırlar ve özellikle PLA veya PBS gibi biyo-bazlı matrislerle eşleştirildiklerinde genellikle biyolojik bozunabilirliği iyileştirirler. Bu da onları otomotiv iç mekanları, tüketici ambalajları, inşaat panelleri ve mobilya bileşenleri için cazip kılmaktadır.

Bununla birlikte, çeşitli zorluklar devam etmektedir. Bunlar arasında biyopartiküllerin homojen dağılımının sağlanması, nem hassasiyetinin kontrol edilmesi, aglomerasyonun önlenmesi ve işleme sırasında ve sonrasında boyutsal stabilitenin korunması yer almaktadır. Kompozit performansını iyileştirmek ve endüstriyel uygulamalarını genişletmek için hibrit sistemler, nanopartikül entegrasyonu ve gelişmiş yüzey mühendisliği üzerine daha fazla araştırma yapılması şarttır (Mohamed ve ark., 2022).

Sonuç olarak, biyopartikül takviyeli polimer kompozitler, yüksek performanslı, çevreye duyarlı malzemelere giden zorlayıcı bir yolu temsil etmektedir.

Bunların geliştirilmesi, sürdürülebilir üretime geçişi desteklemekte ve doğal dolgu maddelerinin gelişmiş polimerik sistemlere entegre edilmesi için yeni fırsatlar sunmaktadır.

1.5. Biyopartikül Çeşitleri

Tarımsal atıklardan elde edilen biyo-bazlı dolgu maddeleri, polimer kompozitler için sürdürülebilir ve uygun maliyetli takviyeler olarak son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Genellikle gıda ve tarım endüstrilerinin yan ürünleri olan bu malzemeler bol miktarda bulunur, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir. Tipik olarak lignoselülozik yapılar bakımından zengindirler ve esas olarak selüloz, hemiselüloz ve lignin ile birlikte mumlar, proteinler ve polifenoller gibi küçük bileşenlerden oluşurlar. Yapısal sertlik ve hafiflik kombinasyonu, onları özellikle polietilen ve polipropilen gibi termoplastik matrislerde takviye edici maddeler olarak çekici kılmaktadır(O Faruk ve ark., 2012).

Biyo-bazlı partiküllerin sentetik takviyelere göre önemli bir avantajı, çevresel uyumlulukları, işleme için düşük enerji talebi ve nihai kompozit malzemenin karbon ayak izi performansını artırma yeteneklerinde yatmaktadır. Dahası, bunların kullanımını atık biyokütlenin değerlendirilmesini destekleyerek döngüsel ekonomi ilkeleri ve sürdürülebilir malzeme inovasyonu hedefleriyle uyumludur(Gunasekaran ve ark., 2012; Mohamed ve ark., 2022).

Çeşitli tarımsal kalıntılar arasında, sertlik, gözeneklilik ve kimyasal stabilitenin benzersiz kombinasyonu nedeniyle fındık kabukları öne çıkmaktadır. Ceviz, badem ve fındıktan elde edilenler gibi fındık kabukları, kompakt bir mikro yapı ve iyi termal direnç ve oksidatif stabilite sağlayan yüksek lignin içeriği (tipik olarak %25-35) sergiler. Saman veya küspe gibi yumuşak lignoselülozik malzemelere kıyasla, fındık kabukları mekanik olarak daha sert ve termal olarak daha esnektir, bu da onları özellikle yapısal ve yarı yapısal uygulamalar için umut verici hale getirir (M Barczewski ve ark., 2019)

Bu partiküllerin dolgu maddesi olarak etkinliği yalnızca kimyasal bileşimlerine değil, aynı zamanda partikül boyutuna, yüzey pürüzlülüğüne ve matris ile arayüzey uyumluluğuna da bağlıdır. Uygun şekilde öğütüldüğünde, elendiğinde ve yüzey işlemine tabi tutulduğunda, fındık kabuğu parçacıkları kompozitin boyutsal stabilitesini, sertliğini ve aşınma direncini artırabilirken nispeten düşük yoğunluğu da koruyabilir(Ganesan ve Kaliyamoorthy, 2022).

Bu çalışmada, ceviz, badem ve fındık kabuğu tozları yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) matrisinde takviye maddesi olarak incelenmiştir. Bu malzemeler Türkiye'de ve diğer birçok bölgede yaygın olarak bulunmasına rağmen endüstriyel olarak yeterince kullanılmamaktadır. Bu araştırma, bu malzemeleri polimer kompozitlere dahil ederek, sürdürülebilir dolgu maddeleri olarak işlevsel potansiyellerini göstermeyi ve farklı fındık kabuğu türlerinin yeşil kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini nasıl etkilediğine dair karşılaştırmalı bir anlayış sağlamayı amaçlamaktadır.

1.5.1. Ceviz Kabuğu

Ceviz kabukları, polimer kompozitlerde biyopartikül maddesi olarak kullanım için en umut verici tarımsal yan ürünler arasındadır. Gıda ve işleme endüstrileri tarafından önemli miktarlarda üretilen ceviz kabukları, avantajlı yapısal ve kimyasal özelliklerine rağmen tipik olarak atık olarak atılmaktadır. Doğal sertlikleri, gözeneklilikleri ve sertlikleri, nispeten düşük yoğunlukları ile birleştiğinde, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polipropilen (PP) veya polilaktik asit (PLA) gibi termoplastik matrisleri takviye etmek için mükemmel adaylar haline gelirler (Omar Faruk ve ark., 2012; H. Essabir ve ark., 2013).

Kimyasal açıdan bakıldığında, ceviz kabukları yaklaşık %38-45 selüloz, %20-30 lignin ve %15-25 hemiselüloz ile az miktarda polifenoller, yağ asitleri ve mumlar gibi ekstraktiflerden oluşur (Barczewski ve ark., 2019). Yüksek lignin içeriği termal stabiliteye ve mikrobiyal bozulmaya karşı dirence katkıda bulunurken, selüloz çerçeve mekanik bütünlük sağlar. Bu özellikler toplu olarak ceviz kabuğu tozunu (WSP) kompozit geliştirme için değerli, yenilenebilir bir kaynak haline getirmektedir.

Yapısal olarak, ceviz kabukları kalın duvarlı sklerenkima hücreleri tarafından oluşturulan üç boyutlu gözenekli bir mikro yapı sergiler. Bu mimari, özellikle partiküller uygun boyut ve en-boy oranına sahip olduğunda, polimer matrislerle mekanik kenetlenmeyi artırır. Çalışmalar, 250 µm'nin altındaki partikül boyutlarına sahip WSP'nin daha homojen bir şekilde dağılma eğiliminde olduğunu ve kompozitlerin yüzey sertliğini, sertliğini ve basınç dayanımını artırdığını göstermektedir (Velmurugan ve ark., 2021). Bununla birlikte, daha yüksek dolgu maddesi yüklemelerinde, mekanik özellikleri olumsuz etkileyen partikül aglomerasyonu, matris süreksizliği ve işleme zorlukları (örneğin, zayıf eriyik akışı)

riski ortaya çıkabilir.

Ceviz kabuğu takviyeli kompozitlerle ilgili yaygın bir zorluk, lignoselülozik dolgu maddelerinin hidrofilik doğasıdır; bu da HDPE gibi hidrofobik polimer matrislerle zayıf yapışmaya neden olur. Bunun üstesinden gelmek için, alkali işlem (NaOH), silanizasyon ve uyumlaştırıcı ilavesi (örneğin, maleik anhidrit aşıllı polietilen, MAPE) gibi çeşitli yüzey modifikasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu işlemler yüzey safsızlıklarını gidererek, reaktif hidroksil gruplarını açığa çıkararak veya dolgu maddesi ile matris arasındaki kovalent bağı teşvik ederek arayüzey bağı geliştirir (

WSP takviyeli kompozitlerin mekanik karakterizasyon çalışmaları, özellikle orta dereceli dolgu maddesi içeriklerinde (ağırlıkça ~%10-15) eğilme modülü, basınç dayanımı ve aşınma direncinde sürekli olarak artışlar göstermektedir. Örneğin, Barczewski ve arkadaşları (2019) epoksi-ceviz kabuğu kompozitlerinde saf epoksi reçineye kıyasla çekme mukavemetinde %12 ve eğilme modülünde %28 artış gözlemlenmiştir. Termoplastik sistemlerde, malzeme maliyetlerinin azalması ve biyolojik içeriğin artması gibi ek faydalarla birlikte benzer gelişmeler kaydedilmiştir

Termal olarak, ceviz kabuğu partiküllerinin dahil edilmesi, lignin bakımından zengin bileşimleri nedeniyle bozunmanın başlamasını geciktirir. Termogravimetrik analiz (TGA) çalışmaları, ceviz kabuğunun 250 °C'nin üzerinde bozunmaya başladığını ve bu sayede çoğu termoplastik işleme koşuluyla uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır (H. Essabir ve ark., 2013)

Çevresel olarak, polimer kompozitlerde ceviz kabuğu kullanmak sadece sentetik dolgu maddelerine olan bağımlılığı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda yeterince kullanılmayan bir tarımsal atık akışına değer katar. Sürdürülebilir üretimi destekler ve ambalaj, otomotiv iç mekanları, tüketim malları ve inşaat panelleri için uygun çevre dostu malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunur.

Sonuç olarak, ceviz kabuğu tozu mekanik takviye potansiyeli, termal stabilite ve sürdürülebilirliğin cazip bir kombinasyonunu sunarak onu termoplastik kompozit sistemlere entegrasyon için ideal bir biyopartikül haline getirmektedir. Gelecek deneysel bölümler, aynı matris koşulları altında diğer biyopartiküllere göre performansını değerlendirecektir.

1.5.2. Badem Kabuğu

Badem kabukları, ceviz kabukları gibi, küresel badem endüstrisi tarafından büyük hacimlerde üretilen lignoselülozik bir tarımsal kalıntıdır. Genellikle yakıt veya malç gibi düşük değerli uygulamalar için atılan veya kullanılan badem kabukları, sürdürülebilir polimer kompozitlerin geliştirilmesinde biyopartikül maddesi olarak kullanılmayan bir fırsat sunmaktadır. Yüksek mekanik mukavemetleri, yoğun mikro yapıları ve termal kararlılıkları, onları polietilen (PE), polipropilen (PP), epoksi veya PLA gibi termoplastik ve termoset matrislere dahil edilmeye uygun hale getirmektedir (H. Essabir ve ark., 2013)

Kimyasal olarak, badem kabukları yaklaşık %35-42 selüloz, %25-30 hemiselüloz ve %30-35 gibi oldukça yüksek bir lignin içeriğinden oluşur ve bu da onları diğer yumuşak tarımsal kalıntılardan ayırır (Ganesan ve Kaliyamoorthy, 2022). Lignin bakımından zengin yapı, stres, nem veya termal döngüye maruz kalan polimer uygulamaları için kritik olan mükemmel termal direnç, boyutsal stabilite ve mikrobiyal bozulma direnci sağlar.

Morfolojik olarak badem kabukları, daha lifli biyomalzemelere kıyasla az sayıda yüzey gözenğine sahip yoğun, katmanlı bir mimari sergiler. Malzemenin sert dış kabuğu ve kırılğan yapısı, öğütüldüğünde köşeli, sert parçacıkların oluşmasına neden olur. Öğütüldüğünde ve ince parçacık boyutlarına (tipik olarak <300 µm) elendiğinde, badem kabuğu tozu (ASP), özellikle maleik anhidrit aşılı polimerler (MAPE, MAPP) veya yüzey alkali işlemleri gibi uyumlaştırma stratejileri ile desteklendiğinde, polimer matrislerinde homojen bir şekilde dağılabilir.

Badem kabuğu dolgu maddeleri çeşitli kompozit özelliklerini geliştirir. Mekanik çalışmalar, ağırlıkça %10-20 ASP içeren kompozitlerin, özellikle PP ve HDPE gibi termoplastiklerde eğilme modülü, sertlik ve basınç dayanımında iyileşmeler gösterdiğini ortaya koymuştur. Bir çalışmada, ağırlıkça %15 ASP'nin dahil edilmesi, bir polietilen matrisin eğilme mukavemetini %20'nin üzerinde artırırken, aynı zamanda sertliği iyileştirmiş ve malzeme maliyetini düşürmüştür (Velmurugan ve ark., 2021).

Termal performans da ASP'den olumlu etkilenmektedir. Yüksek lignin içeriği, bozunmanın başlangıç sıcaklığını artırır ve böylece dolgu maddesinin önemli termal bozunması olmadan 200-220 °C'ye kadar işleme sıcaklıklarına olanak sağlar. TGA sonuçları genellikle badem kabuğunun çoğu termoplastik işleme operasyonu ile uyumlu olan 250 °C'nin üzerinde bozulmaya başladığını göstermektedir (H. Essabir ve ark., 2013). Ek olarak, ASP'nin termal olarak yalıtıcı davranışı, termal iletkenliğin

azalmasına katkıda bulunarak ambalajlama ve yapısal yalıtım uygulamaları için faydalı olmasını sağlar.

Diğer doğal dolgu maddeleri gibi, badem kabuğu partikülleri de hidrofilik davranış sergiler, bu da su emilimine, boyutsal kararsızlığa ve işlenmediği takdirde mekanik performansın düşmesine neden olabilir. Bunu ele almak için, yüzey safsızlıklarını gidermek ve reaktif -OH gruplarının kullanılabilirliğini artırmak, ASP ile hidrofobik polimer matrisi arasındaki yapışmayı iyileştirmek için alkali işlemi (NaOH) yaygın olarak uygulanmaktadır. Silan bağlayıcı maddeler veya termoplastik uyumlaştırıcılar arayüzey bağını daha da güçlendirerek daha güçlü ve dayanıklı kompozitler elde edilmesini sağlayabilir.

Sürdürülebilir bir şekilde, badem kabuğunun takviye olarak kullanılması atıkların değerlendirilmesine katkıda bulunur ve Akdeniz havzası, Kaliforniya ve Türkiye gibi badem tarımı açısından zengin bölgeler için ekonomik olarak uygulanabilir bir çözüm sağlar. ASP'nin polimer kompozitlere dahil edilmesi, üreticilerin malzeme maliyetlerini, karbon ayak izini ve mineral veya petrokimyasal dolgu maddelerine bağımlılığı azaltmasına olanak tanıyarak eko-tasarım ilkeleriyle uyumludur.

Özetle, badem kabuğu tozu mekanik sertlik, termal direnç ve eko-verimliliğin benzersiz bir kombinasyonunu sunarak yüksek performanslı, sürdürülebilir polimer kompozitler geliştirmek için değerli bir biyopartikül dolgu maddesi haline geliyor. Bu çalışmada, HDPE bazlı biyokompozitler için en uygun dolgu türü ve konsantrasyonunu belirlemek amacıyla ceviz ve fındık kabuğu takviyeleriyle birlikte performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

1.5.3. Fındık Kabuğu

Fındık kabukları, polimer kompozit sistemlerde işlevsel bir takviye olarak değerlendirilebilecek bir diğer önemli tarımsal-endüstriyel lignoselülozik atık kategorisini temsil etmektedir. Özellikle Türkiye, İtalya ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerde yoğunlaşan küresel fındık endüstrisinin birincil yan ürünü olan fındık kabukları büyük hacimlerde üretilmekte ve tipik olarak yakma veya düzenli depolama yoluyla bertaraf edilmektedir. Bununla birlikte, yoğun mikro yapıları, yüksek lignin içerikleri ve elverişli mekanik özellikleri, onları polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polilaktik asit (PLA) gibi polimer matrislerde biyopartikül maddesi olarak son derece uygun hale getirmektedir(Balart ve ark., 2018; Ceraulo ve

Kimyasal olarak, fındık kabukları yaklaşık %30-35 selüloz, %20-25 hemiselüloz ve %35-40 gibi nispeten yüksek bir lignin fraksiyonundan oluşur. Bu yüksek lignin içeriği termal stabilite, UV direnci ve kimyasal dayanıklılık açısından avantajlıdır. Ayrıca fındık kabukları, polimer matrisine bağlı olarak arayüzey yapışmasını etkileyebilecek az miktarda ekstraktif ve tanen içerir(Cherkashina ve ark., 2023).

Yapısal olarak fındık kabukları, kalın duvarlı sklerenkima hücreleri ve minimum gözeneklilik ile sert, katmanlı bir mimari sergiler. Kontrollü boyutta (tipik olarak 300 µm'nin altında) parçacıklar halinde öğütüldüğünde, fındık kabuğu tozu (HSP) iyi mekanik kenetlenme kabiliyeti gösterir ve polimer kompozitlerde sertliğe ve sertliğe önemli ölçüde katkıda bulunur. Kompakt yapıları nedeniyle, fındık kabuğu partikülleri diğer biyopartikül maddelerine göre yüksek yoğunluk sergiler ve bu da hedeflenen uygulamalarda ağırlığa özgü performansı artırabilir(Mateusz Barczewski ve ark., 2019a; Yildirim, 2020).

Mekanik çalışmalar, dağılım ve arayüzey uyumluluğunun yeterince kontrol edilmesi koşuluyla, ağırlıkça %10-15 HSP'nin termoplastik matrislere dahil edilmesinin eğilme modülünü, darbe direncini ve aşınma dayanıklılığını artırabileceğini göstermektedir. HDPE bazlı kompozitlerde, HSP'nin boyutsal kararlılığı ve yüzey sertliğini artırdığı gösterilmiştir; bu da özellikle otomotiv trim parçaları, palet tahtaları ve paketleme elemanları gibi uygulamalarda faydalıdır(Ceraulo ve ark., 2022b).

Termal analiz, fındık kabuğu partiküllerinin 250 °C'nin üzerinde termal olarak bozunmaya başladığını göstermektedir ki bu da çoğu termoplastiğin işleme sıcaklıklarının oldukça üzerindedir. HSP'nin termogravimetrik kararlılığı, kademeli olarak bozunmaya uğrayan ve bazı uygulamalarda alev geciktiricilik için istenen bir özellik olan kömürleşmeye katkıda bulunan lignin bakımından zengin yapısına bağlanmaktadır(Papageorgiou ve ark., 2025).

Bununla birlikte, diğer lignoselülozik dolgu maddeleri gibi, fındık kabukları da özünde hidrofildir ve hidrofobik polimerlere dahil edildiğinde potansiyel nem hassasiyetine yol açar. Bunu hafifletmek için, alkali ön işlem, asetilasyon veya silanlarla birleştirme gibi kimyasal yüzey işlemleri, dolgu maddesi-matris yapışmasını arttırmak ve su emilimini azaltmak için kullanılır. Maleik anhidrit aşılı

uyumlaştırıcıların (ör. MAPE, MAPP) eklenmesi, arayüzdeki gerilim transferini daha da iyileştirir ve kompozitin mekanik bütünlüğünü artırır(Mylsamy ve ark., 2024a, 2024b).

Sürdürülebilirlik açısından bakıldığında, fındık kabuğu kullanımı, düşük değerli bir atık akışını yüksek değerli bir kompozit malzemeye dönüştürerek döngüsel ekonomi hedefleriyle uyumludur. Bu strateji, sentetik ve mineral dolgu maddelerine olan bağımlılığı azaltırken aynı zamanda atık yönetimi ve çevresel etki endişelerini de ele alıyor. Türkiye'nin dünyanın önde gelen fındık üreticisi olduğu düşünüldüğünde, HSP takviyeli kompozitlerin endüstriyel potansiyeli ulusal düzeyde özellikle önemlidir(Ganesan ve Kaliyamoorthy, 2020; Akkouri ve ark., 2022; Santulli ve ark., 2023).

Sonuç olarak, fındık kabuğu tozu biyokompozit üretimi için mükemmel bir termal, mekanik ve çevresel fayda dengesi sunmaktadır. Bu tezde, HDPE bazlı yeşil kompozitler için en etkili biyopartikülyü belirlemek amacıyla aynı işleme ve test koşulları altında performansı ceviz ve badem kabuğu takviyeleriyle sistematik olarak karşılaştırılacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda, artan çevre bilinci, kaynak sürdürülebilirliği ihtiyacı ve ekonomik kaygılar nedeniyle polimer matrisli kompozitlerde biyo-bazlı dolgu maddelerinin kullanımına yönelik artan bir eğilim söz konusudur. Lignoselülozik içerik bakımından zengin olan ceviz kabuğu, badem kabuğu ve fındık kabuğu gibi tarımsal atık malzemeler, geleneksel sentetik dolgu maddeleri ve takviyelere umut verici alternatifler olarak ortaya çıkmaktadır. Bu biyopartikül maddeleri sadece bol ve düşük maliyetli olmakla kalmayıp, aynı zamanda malzemelerin karbon ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunarak döngüsel ekonomi ve yeşil malzeme tasarımı ilkelerine de uyum sağlamaktadır(Mateusz Barczewski ve ark., 2019a; Mylsamy ve ark., 2024b, 2024a).

Biyobazlı dolgu maddelerinin etkinliği kimyasal bileşim, partikül morfolojisi, polimer matrisi ile uyumluluk ve yüzey modifikasyon teknikleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Çok sayıda çalışma, bu malzemelerin mekanik mukavemet, termal stabilite, su emilimi ve elde edilen kompozitlerin biyolojik olarak parçalanabilirliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ayrıca, bu tür tarımsal atık dolgu maddelerinin termoplastik veya termoset matrislere dahil edilmesi, ambalaj, inşaat, mobilya ve otomotiv bileşenlerinde kullanılmak üzere hafif ve işlevsel kompozitlerin geliştirilmesini sağlamıştır(Fan ve Njuguna, 2016a; Mann ve ark., 2020; Yıldırım ve Acay, 2021; Dejene ve Geletaw, 2024).

Artan araştırma hacmine rağmen, farklı kabuk bazlı biyopartikül maddeleri arasında doğrudan karşılaştırmalı çalışmalar hala sınırlıdır. Çoğu çalışma tek bir dolgu türünü farklı koşullar altında değerlendirmekte ve bu da sistematik bir anlayış oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, bu bölüm ceviz, badem ve fındık kabuğu bazlı kompozitler üzerine yapılan en ilgili çalışmaları birleştirilmiş bir format kullanarak derlemeyi ve eleştirel bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Her çalışma, hedeflerini, işleme yöntemlerini, dolgu özelliklerini, temel bulgularını (mekanik, termal veya biyolojik) ve genel bilimsel katkısını özetleyen yapılandırılmış bir paragrafta sunulmaktadır. Bu sistematik analiz, araştırma boşluklarının belirlenmesi ve mevcut tezin yeniliğinin vurgulanması için zemin hazırlamaktadır(Cabrera, 2021; Venkataravanappa ve ark., 2023; Kılınç ve Korkmaz, 2024).

2.1. Kompozitlerde Ceviz Kabuğu (*Juglans regia*) Uygulamaları

Lignoselülozik yapıdaki tarımsal atıklar, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri

ve döngüsel ekonomi uygulamaları kapsamında, geleneksel mineral dolgulara alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu atıklar arasında, yüksek lignin ve selüloz içeriği, düşük yoğunluğu, geniş bulunabilirliği ve düşük maliyeti ile ceviz kabuğu (*Juglans regia*) dikkat çekmektedir. Web of Science veri tabanında yapılan son on yıllık taramalarda “walnut shell composite” anahtar kelimesiyle yüzün üzerinde yayın tespit edilmesi, bu malzemenin akademik ve endüstriyel ilgi gördüğünü ortaya koymaktadır. Uygun öğütme ve yüzey modifikasyonu sonrasında ceviz kabuğu, hem termoplastik hem de termoset matrislere entegre edilebilmekte; böylece daha hafif, çevre dostu ve fonksiyonel polimer kompozitlerin geliştirilmesine imkân sağlamaktadır. Bu bölümde, farklı polimer matrislerde ceviz kabuğu kullanımına yönelik literatürde yer alan çalışmalar sistematik olarak özetlenmiştir.

Güzel ve çalışma arkadaşları (2021), hafif uygulamalarda mekanik performansı ve sürdürülebilirliği artırmak için kimyasal olarak işlenmiş ceviz kabuğu (WS) tozları ile güçlendirilmiş polipropilen (PP) kompozitlerin geliştirilmesini araştırmıştır. Geleneksel mineral dolgu maddeleri, mukavemet artışında etkili olmakla birlikte, yoğunluğun artmasına katkıda bulunur ve biyolojik olarak parçalanabilirlikten yoksundur; bu da çevreye duyarlı uygulamalar için sınırlamalar oluşturur. Bu çalışmada, WS partikülleri matris uyumluluğunu artırmak için alkali işleme (NaOH) tabii tutulmuş ve çeşitli yükleme seviyelerinde (ağırlıkça %5-30) eriyik birleştirme yoluyla PP'ye dahil edilmiştir. Ağırlıkça %20 WS içeren kompozit, mekanik özellikler ve işlenebilirlik açısından en iyi dengeyi sergilemiştir. Çekme mukavemeti 28,5 MPa'dan (saf PP) 35,2 MPa'ya yükselirken, eğilme mukavemeti %31 oranında iyileşmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), kimyasal işlemde sonra artan yüzey pürüzlülüğü nedeniyle gelişmiş arayüzey bağına doğruladı. Termogravimetrik analiz (TGA), bozunma başlangıç sıcaklığında 12°C'lik bir kayma olduğunu ortaya koyarak termal stabilitenin arttığını göstermiştir. Ayrıca, dolgu maddesinin hidrofilik yapısı nedeniyle su emilimi biraz artmış, ancak iç mekân kullanımı için kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Bu çalışma, termoplastik kompozitlerde geleneksel dolgu maddelerinin modifiye ceviz kabuğu ile değiştirilmesinin uygulanabilirliğini göstermekte ve tüketici ve otomotiv ürünlerinde yarı yapısal parçalar geliştirmek için daha sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır (Güzel ve ark., 2021).

Jawaid ve ark. (2017), yapısal malzemelerde yenilenebilir tarımsal atık dolgu maddelerinin kullanımını artırmak için ceviz kabuğu (WS) parçacıklarıyla güçlendirilmiş epoksi bazlı kompozitlerin üretimini ve karakterizasyonunu araştırmıştır. Geleneksel dolgu maddeleri genellikle yeterli sürdürülebilirliği

sağlayamazken, WS gibi biyopartikül maddeleri çevre dostu alternatifler sunmaktadır. Çalışmada, ceviz kabuğu partikülleri 100 µm'nin altına öğütülmüş ve mekanik karıştırma, ardından döküm ve kütleme kullanılarak çeşitli içeriklerde (ağırlıkça %5-25) epoksi reçineye dahil edilmiştir. Optimum performans ağırlıkça %15 yüklemde gözlenmiştir. Çekme mukavemeti 25.3 MPa'dan (saf epoksi) 32.8 MPa'ya yükselirken, darbe direnci %46 oranında iyileşmiştir. FTIR ve SEM analizleri, matris-dolgu yapışmasının iyileştiğini ve WS partiküllerinin homojen dağılımını ortaya koymuştur. Ayrıca, Dinamik Mekanik Analiz (DMA) depolama modülünün arttığını ve sönümlenme faktörünün ($\tan \delta$) azaldığını göstererek daha iyi sertlik ve arayüzey bağlanmasına işaret etmiştir. Nem alımındaki hafif artışa rağmen, kompozit iyi boyutsal kararlılığını korumuştur. Yazarlar, biyolojik olarak parçalanabilen, düşük yoğunluklu bir dolgu maddesi olan ceviz kabuğunun, yapısal ve yarı yapısal kullanımlar için çevre dostu kompozitler üretmek üzere epoksi sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır (Jesuarockiam ve ark., 2019).

Sivakumar ve ark. (2024), tarımsal atık kaynaklı dolgu maddelerin biyoplastik kompozitler üzerindeki etkilerini inceleyerek, polilaktik asit (PLA) matrisine yumurta kabuğu (ES) ve ceviz kabuğu (WS) tozlarının farklı oranlarda ilavesiyle plastikleştirilmiş PLA kompozitler üretmiştir. Plastikleşme için %5 epoksitlenmiş soya yağı kullanılmış ve elde edilen biyoplastik parçacıklar köpek-kemik şeklinde numuneler haline getirilerek mekanik (çekme, Charpy darbe ve eğilme) ve termal testlere tabi tutulmuştur. Sonuçlar, saf PLA'ya kıyasla plastikleştirilmiş PLA'nın mekanik özelliklerinin düştüğünü, ancak ES takviyeli kompozitlerin, WS takviyeli kompozitlere kıyasla daha iyi çekme, darbe ve eğilme performansı sergilediğini göstermiştir. Bu durum, dolgu tipinin matris içindeki dağılımı ve matris-dolgu etkileşim seviyesinin kompozit performansında belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır (Sivakumar ve ark., 2024).

Gürü ve ark. (2008), ceviz kabuğu takviyeli üre-formaldehit (UF) esaslı polimer matrisli kompozit yonga levha üretmiş ve levhanın yanmazlık, mantar ve böcek saldırısına karşı dayanıklılık ile suya karşı direnç özelliklerini geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, uçucu kül ve fenol-formaldehit ilavesinin bu özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Laboratuvar koşullarında yürütülen deneylerde, UF oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve ceviz kabuğu dolgu/UF reçine oranı gibi parametrelerin sertlik ve bükülme direnci üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre, 1.0 UF oranı, 70 °C reaksiyon sıcaklığı, 25 dk reaksiyon süresi, 3:1 ceviz kabuğu dolgu/UF reçine oranı ve 0,12 mm ortalama

partikül boyutunda maksimum eğilme dayanımı 3,8 N/mm² olarak elde edilmiştir. Yanma testlerinde, uçucu kül içermeyen kompozitlerde maksimum alev sıcaklığı 535 °C iken, %15 (a/a) uçucu kül ilavesiyle bu değer 299 °C'ye düşmüştür. Ayrıca, fenol-formaldehit/üre-formaldehit oranının artırılması, su emme ve kalınlık artışını üstel olarak azaltmıştır. Elde edilen sonuçlar, ceviz kabuğu bazlı kompozit yonga levhaların, uygun katkılarla iyileştirilmiş fiziksel ve yangın geciktirici özelliklere sahip olabileceğini göstermektedir(Gürü ve ark., 2008).

Alshgari ve ark. (2022), doğal lif parçacık takviyeli polimer kompozitlerin kriyojenik ortam altındaki mekanik özelliklerini incelemiştir. El yatırması yöntemiyle üretilen kompozitlerde farklı seviyelerde (i) hindistan cevizi kabuğu tozu, (ii) ceviz kabuğu tozu ve (iii) kriyojenik işlem süreleri parametre olarak değerlendirilmiştir. 77 K'de kriyojenik odaya yerleştirilen lamine kompozitler, çekme, eğilme ve ara tabaka kayma dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, 100 µm hindistan cevizi kabuğu tozu bazlı kompozitlere kıyasla 80 µm ceviz kabuğu tozu takviyeli kompozitlerin en yüksek mekanik dayanımı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, %10 hindistan cevizi kabuğu ve ceviz kabuğu tozu ile %80 polyester matris kombinasyonu da mekanik performans üzerinde olumlu bir etki oluşturmuştur. Parçacık malzemenin morfolojik davranışı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Bu çalışma, kriyojenik koşullar altında doğal takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde partikül boyutu, dolgu oranı ve kriyojenik işlem süresinin önemli parametreler olduğunu ortaya koymaktadır(Alshgari ve ark., 2022).

Włodarczyk-Fligier ve Polok-Rubiniec (2021), polipropilen (PP) matrisli ve doğal dolgu takviyeli polimer kompozitlerin mantar kaynaklı bozunmaya karşı direncini incelemiştir. Çalışmada, fındık ve ceviz kabuğu unlarının tane morfolojisi değerlendirilmiş ve her iki dolgu tipinin geometrisinin birbirine benzer şekilde düzensiz küresel formda olduğu belirlenmiştir. Bu tanelerin heterojen yapısı ve gelişmiş yüzey alanı, polimer matris içindeki boşlukların etkili bir şekilde doldurulmasına imkân tanımaktadır. SEM görüntüleri, dolgu tanelerinin matris içerisinde genel olarak dağıldığını ancak yer yer küçük aglomeralar ve matris–dolgu arayüzünde boşluklar oluştuğunu göstermiştir. Farklı oran ve tane boyutlarında üretilen PP/fındık ve ceviz kabuğu unu kompozitlerinde yapılan mantar aktivitesi (misel büyümesi) değerlendirmesinde, 315–443 µm fraksiyonuna sahip fındık kabuğu dolgulu numunelerin en iyi mantar gelişimini engelleyici (fungistatik) etkiyi gösterdiği saptanmıştır. Buna karşın, aynı fraksiyondaki ceviz kabuğu dolgulu numuneler (F2 ve F4), test alanının %50'sinden fazlasında mikroorganizma gelişimi

gözlendiği için en düşük fungistatik etkiye sahip olmuştur. Temas açısı ölçümlerinde de 315–443 µm fraksiyonlu fındık kabuğu dolgulu numuneler (C2 ve C4) en yüksek değerleri göstermiştir; bu bulgu, bu numunelerin en iyi fungistatik performansa sahip olduğunu desteklemektedir(Włodarczyk-Fligier ve Polok-Rubiniec, 2021).

Pradhan ve ark. (2020), farklı oranlarda ceviz kabuğu tozu (WSP) ile takviye edilmiş polyester matrisli biyokompozitlerin üretimini ve termal özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, kompozitlerin etkin ısı iletkenlik katsayısı, cam geçiş sıcaklığı ve ısı genleşme katsayısı gibi temel termal özellikleri değerlendirilmiştir. Isıl iletkenlik deneysel olarak Unitherm Model 2022 cihazı ile ölçülmüş ve elde edilen bulgular, uygun varsayımlar altında yapılan matematiksel ve sayısal analizlerle desteklenmiştir. Kompozitlerin etkin ısı iletkenliğini (K_{eff}) tahmin etmek için bir matematiksel korelasyon önerilmiş; sayısal analizlerde ise ANSYS 19.2R(2) sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, küresel dolguların farklı konsantrasyonlarda periyodik ve rastgele düzenlenmiş yerleşimleri üzerinden tek boyutlu ısı iletimi analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar ile önerilen korelasyondan ve sayısal çalışmalardan elde edilen K_{eff} değerlerinin birbirleriyle yakın uyum gösterdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, WSP ilavesinin saf polyeesterin ısı yalıtım kapasitesini anlamlı ölçüde artırdığı ortaya konmuştur(Pradhan ve ark., 2020).

Açıkbaş (2018), ceviz kabuğu selülozik liflerini takviye fazı olarak kullanarak düşük maliyetli ve geliştirilmiş fiziksel-mekanik özelliklere sahip polyester kompozitler üretmeyi amaçlamıştır. Türkiye'nin yıllık 200.000 tonun üzerinde ceviz üretimiyle dünya sıralamasında dördüncü sırada yer aldığı ve kabukların toplam ağırlığın %40–60'ını oluşturduğu belirtilmiş; bu durum yılda 100.000 tondan fazla kabuğun çoğunlukla atık olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çalışmada, lifler öğütülmüş ve taramalı elektron mikroskopu (SEM), X-ışını difraksiyonu (XRD), FTIR, lazer difraksiyonu ve He gaz piknometresi gibi yöntemlerle ayrıntılı karakterizasyon yapılmıştır. Dolgu/matris oranının ve ceviz liflerinin kimyasal işlem görmesinin kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Kompozitler, gözeneklilik, yoğunluk, üç nokta eğme dayanımı, darbe direnci ve sertlik testleri ile karakterize edilmiş; elde edilen yapı-özellik ilişkileri tartışılmıştır. En iyi fiziksel-mekanik performans, tozun hidrofobik bir çözelti ile muamele edilmesi sonucu elde edilmiş; bu işlem, daha iyi işlenebilirlik ve geliştirilmiş arayüzey yapışması sağlamıştır (Açıkbaş, 2018).

Bisht ve ark. (2022), tarımsal atık olan ceviz kabuğu partiküllerinin, cam elyaf

takviyeli hibrit kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. El yatırması yöntemiyle üretilen kompozitlerde, sabit cam elyaf miktarı korunarak ceviz kabuğu partikülleri farklı oranlarda ve farklı tane boyutlarında ilave edilmiştir. Üretilen numunelerin fiziksel, mekanik ve aşınma özellikleri değerlendirilmiştir; sonuçlar, %15 (a/a) partikül içeren numunelerde belirli tane boyutlarına göre en yüksek çekme dayanımı (70–90 µm), en yüksek eğilme dayanımı (160–180 µm), en yüksek darbe dayanımı (160–180 µm), en yüksek sertlik (280–300 µm) ve en düşük özgül aşınma oranının (280–300 µm) elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, belirli bir tane boyut aralığında, en yüksek partikül oranına sahip numunelerin yoğunluğunun daha düşük olduğu bulunmuştur. Çalışmada, farklı özelliklerin optimizasyonu için TOPSIS yöntemi de uygulanmıştır (Singh Bisht ve ark., 2022).

Özetle, lignoselülozik bir tarımsal atık olan ceviz kabuğu (WS), sürdürülebilir polimer kompozitlerin geliştirilmesi için oldukça umut verici bir biyopartikül maddesi olarak ortaya çıkmıştır. İncelenen çalışmalar, WS'nin özellikle %10-30 ağırlıkça optimize edilmiş dolgu yüklemelerinde çekme mukavemeti, eğilme modülü ve sertlik gibi mekanik özellikleri geliştirdiğini tutarlı bir şekilde göstermektedir. Ayrıca, alkali veya silan işlemleri gibi yüzey modifikasyonları, dolgu maddesi-matris uyumluluğunu önemli ölçüde iyileştirerek daha iyi dağılım, arayüzey yapışması ve termal performansa katkıda bulunur. Özellikle, WS bazlı kompozitler, döngüsel ekonomi hedefleriyle uyumlu olarak, daha az çevresel etki, biyolojik bozunabilirlik ve daha düşük üretim maliyetleri sergiler. Bu özellikler, ceviz kabuğunu otomotiv bileşenleri ve ambalajlamadan inşaat malzemelerine kadar çeşitli uygulamalarda geleneksel dolgu maddelerine cazip bir alternatif haline getirir. Genel olarak, ceviz kabuğunun çeşitli termoplastik ve termoset matrislere dahil edilmesi, yeşil kompozit teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

2.2. Kompozitlerde Badem Kabuğu (*Prunus dulcis*) Uygulamaları

Badem kabuğu (*Prunus dulcis*), yüksek lignoselülozik içeriği, düşük yoğunluğu, bol miktarda temin edilebilirliği ve yenilenebilir yapısı sayesinde, son yıllarda polimer matrisli biyokompozit geliştirme çalışmalarında yaygın olarak araştırılan tarımsal atık malzemeler arasında yer almaktadır. Web of Science veri tabanında yapılan taramalarda, “almond shell composite” ve benzeri anahtar kelimelerle çok sayıda akademik yayının listelenmesi, bu malzemenin hem araştırma hem de endüstriyel uygulamalar açısından yükselen önemini ortaya koymaktadır.

Uygun öğütme, yüzey işlemleri ve kontrollü yükleme oranları ile badem kabuğu tozu (ASP) veya unu (ASF), farklı termoplastik ve termoset matrislere entegre edilerek mekanik dayanım, sertlik, termal kararlılık ve biyolojik bozunabilirlik gibi özelliklerde iyileşmeler sağlamaktadır. Bu bölümde, literatürde raporlanan badem kabuğu bazlı kompozit çalışmaları sistematik olarak özetlenmiş ve farklı matris sistemlerinde elde edilen performans eğilimleri karşılaştırılmıştır.

Palaniyappan ve ark. (2022), badem kabuğu biyolojik atık dolgu maddelerinin vinil ester polimer kompozit üretiminde etkin kullanımını araştırmıştır. Badem kabuğu partikülleri, arayüzey yapışmasını geliştirmek amacıyla alkali işlem ile kimyasal olarak modifiye edilmiş ve %5–30 ağırlık aralığında vinil ester matrisine eklenmiştir. Deneysel sonuçlar, %25 alkali işlem görmüş badem kabuğu partikülü ilavesinin, saf vinil ester ve işlenmemiş dolgu içeren kompozitlere kıyasla mekanik özellikleri belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. En yüksek çekme dayanımı 54 MPa, eğilme dayanımı 142 MPa, darbe dayanımı 31 kJ/m² ve Shore D sertliği 79 olarak ölçülmüştür. Bu gelişme, alkali işlemin hemiselüloz ve lignin gibi kolay bozulan bileşenleri uzaklaştırarak vinil ester matrisi ile dolgu partikülleri arasındaki aderansı artırmasına bağlanmıştır. Ayrıca, %25 alkali işlem görmüş dolgu katkılı kompozitlerde ısı ile şekil değiştirme sıcaklığı 72 °C olarak belirlenmiş ve FTIR ile EDX analizleri, yüzeyde mineral fazların daha fazla açığa çıktığını doğrulamıştır. Çalışma, alkali işlem görmüş badem kabuğu partiküllerinin vinil ester matris özelliklerini iyileştirerek yüksek performanslı biyokompozitlerin geliştirilmesine olanak sağladığını ortaya koymuştur (Palaniyappan ve ark., 2022).

Kirubakaran ve ark. (2022), doğal keten lifi tabakalı polimer laminatlarda görülen yapısal gözeneklilik zayıflığını, yığılma tabakaları arasındaki gözenekli bölgeleri tercihen dolduran doğal badem kabuğu dolgusunun mekânsal yerleşimiyle azaltarak malzeme özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, yüzey modifikasyonu ve badem kabuğu dolgu oranının keten lifi ile iç içe geçmiş vinil ester kompozitlerin mekanik, termal ve serbest titreşim davranışına etkileri incelenmiştir. Doğal keten lifi ve badem kabuğu dolgularına uygulanan alkali işlem, FTIR analizleri ile doğrulandığı üzere hemiselüloz, lignin ve mum gibi hidrofilik bileşenleri azaltmış, selüloz yapıyı ise değiştirmemiştir. %10 badem kabuğu dolgulu ve alkali işlem görmüş kompozit, işlenmemiş dolgulu kompozitlere kıyasla %35 daha yüksek çekme mukavemeti göstermiştir. Ancak dolgu oranı %10'un üzerine çıktığında, matris içinde dolgu dağılımının zayıflaması nedeniyle çekme mukavemeti azalmıştır. %10 dolgulu numunelerde, güçlü matris–dolgu etkileşimi sayesinde badem kabuğu dolgularının keten lifi tabakaları arasında termal yalıtım tabakası gibi

davranması termal kararlılığı artırmıştır. Ayrıca, %10 alkali işlem görmüş badem kabuğu dolgulu keten lifi kompoziti, dinamik kuvvetlerin içsel sönümlenmesi sayesinde 185 Hz doğal frekans ve 0,042 sönümlenme değeri ile en yüksek titreşim performansını sergilemiştir. Çalışma, optimum oranda ve yüzey modifikasyonu uygulanmış badem kabuğu dolgularının, keten lifi takviyeli vinil ester kompozitlerin mekanik, termal ve titreşim özelliklerini önemli ölçüde geliştirebileceğini ortaya koymuştur (Kirubakaran ve ark., 2022).

Jeyaraman ve ark. (2022), Hint badem lifi ve kenaf lifi ile takviye edilmiş hibrit kompozitlerin dinamik mekanik özelliklerini incelemiş ve tabaka diziliminin etkilerini değerlendirmiştir. El yatırması yöntemi ile dört tip kompozit üretilmiştir: yalnızca kenaf lifi, Kenaf/Hint badem/Kenaf, Hint badem/Kenaf/Hint badem ve yalnızca Hint badem lifi. Deneysel sonuçlar, kenaf lifi kompozitinin yüksek rijitliği ve matris–lif bağının güçlü olması nedeniyle tüm kompozitler arasında en yüksek depolama modülü ve kayıp modülü değerlerini gösterdiğini ortaya koymuştur. Hibrit kompozitler arasında, iki katman yüksek rijitlikte kenaf lifi içermesi sebebiyle Kenaf/Hint badem/Kenaf dizilimine sahip kompozit, Hint badem/Kenaf/Hint badem dizilimli kompozite kıyasla daha yüksek depolama ve kayıp modülü sergilemiştir. Termal stabilite sıralaması ise Kenaf > Kenaf/Hint badem/Kenaf > Hint badem/Kenaf/Hint badem > Hint badem olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Hint badem lifi kompoziti ve Hint badem/Kenaf/Hint badem hibrit kompoziti, polimer zincirlerinin daha yüksek hareketliliğine bağlı olarak diğer kompozitlere göre daha iyi sönümlenme özellikleri göstermiştir. Cole–Cole analizleri, tüm kompozitlerin heterojen bir yapıya sahip olduğunu ve kenaf lifi kompozitinin bu heterojenlik düzeyinin en yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, depolama modülü ve sönümlenme faktörüne yönelik yapılan modelleme ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Çalışma, tabaka diziliminin hibrit kompozitlerin dinamik mekanik davranışında belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir (Jeyaraman ve ark., 2022).

Ramraji ve ark. (2019), yapı ve otomotiv sektörlerinde yapısal bileşenlerde kullanılmak üzere, yüksek sönümlenme özelliklerine sahip doğal lif ve partikül takviyeli polimer kompozitlerin geliştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada, 0° ve 90° yönlendirilmiş dokuma keten lifleri ile badem kabuğu partikülleri kullanılmış; bu takviyeler alkali ve asetilen çözeltileri ile ayrı ayrı kimyasal işleminden geçirilmiştir. Vinil ester reçine matrisi kullanılarak, keten lifleri ile badem kabuğu partiküllerinin el yatırması yöntemiyle alternatif tabakalar halinde yerleştirilmesi ve ardından hidrolik presleme ile kompozit laminatlar üretilmiştir. Badem kabuğu partikül ağırlık

oranı %0, %5, %10 ve %15 olarak değiştirilmiştir. Mekanik testler, alkali işlem görmüş interleave düzenine sahip badem kabuğu ve keten lifi kompozitlerinin, işlenmemiş kompozitlere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek sönümlenme özellikleri gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu iyileşme, matris ile takviyeler arasındaki yapışmanın artmasına bağlanmıştır. Ayrıca, badem kabuğu partikül ilavesi, kompozitlerin mukavemet ve rijitliğini olumlu yönde etkilemiştir. Çalışma, yüzey modifikasyonu uygulanmış badem kabuğu partikülleri ile keten lifi takviyesinin, vinil ester matrisli kompozitlerin mekanik ve dinamik termomekanik performansını geliştirebileceğini göstermektedir (Ramraji ve ark., 2019).

Doğan ve Güneş (2025), maliyet etkinliği, sürdürülebilirlik ve hammadde bulunabilirliği gibi avantajları nedeniyle polimer kompozitlerde sentetik malzemelerin yerine doğal malzemelerin kullanımına yönelik eğilim kapsamında, badem kabuğu tozu (ASP) ve sezyum oksit (CeO_2) takviyesinin akrilonitril bütadien stiren (ABS) termoplastik kompozitlerin özelliklerine etkilerini incelemiştir. Farklı oranlarda ASP ve CeO_2 içeren dokuz farklı kompozit, saf ABS ile karşılaştırmalı olarak çekme, üç nokta eğme, dinamik mekanik analiz (DMA) ve termogravimetrik analiz (TGA) testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, takviye edilmiş kompozitlerde saf ABS'ye kıyasla çekme mukavemeti, elastisite modülü ve üç nokta eğme mukavemetinin sırasıyla %6, %7 ve %7,5 arttığını göstermiştir. Ayrıca, kompozitler saf ABS'ye göre daha yüksek cam geçiş sıcaklığı ve depolama modülü sergilemiştir. SEM ve EDS analizleri, ASP ve CeO_2 partiküllerinin ABS matrisindeki dağılımını ortaya koyarak mekanik ve termal özellikler üzerindeki etkilerini doğrulamıştır. Çalışma, düşük oranda CeO_2 katkısının ASP ile birlikte ABS kompozitlerin mekanik performansını optimize edebileceğini göstermektedir (Doğan ve Güneş, 2025).

Kumar ve ark. (2025), polimer atıklarının çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmek amacıyla, ikincil geri dönüştürülmüş polilaktik asit (2° PLA) ile badem kabuğu endüstriyel atıklarından elde edilen badem kabuğu derisi tozunu takviye ederek Fused Filament Fabrication (FFF) için kompozit filaman üretimini incelemiştir. Çalışmada, %94 2° PLA ve %6 badem kabuğu derisi içeren kompozit filamanlar, çift vidalı ekstrüderde tork (0,1 Nm, 0,2 Nm, 0,3 Nm), yük (7,5 kg, 10 kg, 12,5 kg) ve sıcaklık (175 °C, 185 °C, 195 °C) parametreleri kontrol edilerek üretilmiştir. Taguchi'nin ortogonal dizi yöntemi kullanılarak hazırlanan dokuz farklı kompozit filaman arasında, 0,1 Nm tork, 12,5 kg yük ve 195 °C ekstrüzyon sıcaklığında üretilen numune, 43,85 MPa ile en yüksek tepe çekme dayanımını göstermiştir. Morfolojik ve termal özellikler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ile incelenmiş;

gözeneklilik analizleri ise filamanlardaki düşük gözeneklilik oranlarının mekanik özellikleri iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Çalışma, badem kabuğu derisi takviyeli geri dönüştürülmüş PLA filamanların, katkı oranı ve üretim parametreleri optimize edildiğinde FFF tabanlı katmanlı imalat için uygun ve çevre dostu bir malzeme alternatifi sunduğunu göstermektedir (Kumar ve ark., 2025).

Essabir ve ark. (2013), badem kabuğu (AS) partiküllerini polipropilen (PP) termoplastik matrisinde takviye elemanı olarak kullanarak biyokompozitlerin mekanik, termal ve reolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında badem kabuğu partikülleri, maleik anhidrit ile aşılansız polipropilen (SEBS-g-MA) uyumlaştırıcı ile ve uyumlaştırıcı olmadan kompozitlere eklenmiştir. Çift vidalı ekstrüderde üretilen numuneler, X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), termogravimetrik analiz (TGA), çekme testi ve dinamik mekanik analiz (DMA) yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, uyumlaştırıcı kullanılsın veya kullanılsın, badem kabuğu partikül takviyesinin PP matrisin mekanik ve reolojik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirdiğini, %30 dolgu oranında Young modülünde sırasıyla %56,2 ve %35 artış sağlandığını göstermiştir. Termal analiz, partikül takviyesinin kompozitlerin başlangıç termal bozunma sıcaklığını artırdığını ortaya koymuştur. Çalışma, badem kabuğu partiküllerinin PP matrisli biyokompozitlerin performansını artırmada etkili bir doğal takviye olduğunu göstermektedir (Essabir ve ark., 2013).

Çetin (2025), yüksek selüloz içeriğine sahip jüt lifi kompozitlerinin mekanik performansını ve sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla selüloz bazlı badem kabuğu dolgusu (ASF) ile hibrit takviye uygulamıştır. Doğal atık badem kabukları mikropartikül boyutuna öğütülmüş ve %0, %1,5, %3, %4,5 ve %6 oranlarında jüt lifi kompozitlerine eklenmiştir. Çekme, eğilme, Charpy darbe (düz ve kenar yükleme) ve kayma testlerini kapsayan kapsamlı deneyler sonucunda, ASF ilavesi jüt lifi kompozitlerinin mekanik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirmiş; en yüksek değerler %3 ASF içeren numunelerde elde edilmiştir. Bu oranda, çekme, eğilme, darbe ve kayma dayanımları sırasıyla %48,2, %63,5, %24,4 ve %52,2 oranında artmıştır. SEM görüntüleri, ASF'nin ara tabaka yapışmasını güçlendirdiğini, boşlukları azalttığını, lif-matris bağımlı iyileştirdiğini ve lif ayrılması ile delaminasyonu engellediğini göstermiştir. Çalışma, doğal dolgu takviyesiyle güçlendirilmiş, çevre dostu ve yüksek performanslı hibrit doğal kompozitlerin geliştirilmesine önemli bir katkı sağlamaktadır (Çetin, 2025).

García ve ark. (2020), nişasta bazlı polimer (Mater-Bi DI01A) matrisine %30

oranında farklı badem kabuğu (AS) çeşitleri (Desmayo Rojo, Largueta, Marcona, Mollar ve ticari karışım) ekleyerek biyobozunur ve çevre dostu biyokompozitler geliştirmiş, badem kabuğu çeşidinin enjeksiyonla üretilmiş biyobozunur parçaların özelliklerine etkisini incelemiştir. Çeşitli badem kabuğu türleri FT-IR, TGA, SEM ve XRD analizleri ile karakterize edilmiş; kompozitler çift vidalı ekstrüderde hazırlanarak çekme, eğilme, Charpy darbe ve sertlik testleri ile mekanik, ayrıca DSC ve TGA ile termal özellikleri değerlendirilmiştir. Çeşitler arasında kimyasal bileşimde farklılıklar görülmesine rağmen, mekanik test sonuçları çeşitler arasında anlamlı performans farkı olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, temini daha kolay ve maliyet açısından daha uygun olması nedeniyle ticari karışımın kullanılmasının en uygun seçenek olduğu sonucuna varılmıştır (García ve ark., 2020).

Boujelben ve ark. (2021), yenilenebilir kaynaklı polimerlerin ve doğal liflerin kullanımıyla sentetik polimer ve liflerin ikame edilmesini hedefleyerek, doğrusal alçak yoğunluklu polietilen (LLDPE) matrisli ve badem kabuğu tozu (ASP) takviyeli biyokompozitler üretmiştir. Kimyasal işlem görmemiş ve uyumlaştırıcı eklenmemiş ASP partikülleri, katı halde benzer yoğunluğa sahip polimer tozu ile karıştırılmış ve termokompresyon yöntemiyle konsolide edilmiştir. LLDPE/ASP kompozitlerinde ASP oranı %10–40 arasında değiştirilmiştir. Mekanik ve yapısal özellikler çekme testi, Shore D sertlik testi ve mikroskobik gözlemlerle incelenmiştir. %20'nin altında ASP içeriğinde partiküllerin matris içinde homojen dağıldığı gözlenirken, %20'nin üzerindeki oranlarda dolgu partiküllerinin aglomerasyona uğradığı belirlenmiştir. Sonuçlar, biyokompozitlerin elastisite modülünün ASP oranıyla birlikte arttığını; ancak çekme mukavemeti ve sünekliğin ASP oranı yükseldikçe azaldığını göstermiştir. Çalışma, ASP takviyesinin LLDPE biyokompozitlerin sertlik ve rijitliğini artırırken yüksek dolgu oranlarında mekanik performansta düşüşe yol açabileceğini ortaya koymaktadır (Boujelben ve ark., 2021).

Edward ve ark. (2022), küresel ısınma ve çevresel kirliliğin yarattığı baskılar nedeniyle ambalaj malzemesi olarak biyopolimerlerin önem kazandığını vurgulayarak, polilaktik asit (PLA) filmlerin mekanik ve bariyer özelliklerini iyileştirmek için badem kabuğu atıklarından elde edilen nanopartiküllerin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Ortalama 197 nm boyutunda badem kabuğu nanopartikülleri bilyalı öğütme ve ultrasonikasyon yöntemleriyle sentezlenmiş, ardından farklı plastikleştiriciler (gliserol, sorbitol, polietilen glikol, karanfil yağı, polikaprolakton) ile PLA filmlere eklenmiştir. Bulgular, %10 karanfil yağı katkılı PLA filmlerinde uzamanın %377,19 oranında artarak 19,75 MPa çekme dayanımına ulaştığını göstermiştir. Ayrıca, %0,25–1,0 oranlarında nanopartikül katkılı PLA

filmleri hazırlanmış, optimum %0,75 yüklemde çekme dayanımı 25,09 MPa'a yükselmiş, %1 katkıda ise su buharı geçirgenliği $0,25 \times 10^{-10} \text{ g Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ seviyesine düşmüştür. Nanopartikül takviyesi, filmlerin şeffaflığını azaltırken, su çözünürlüğünü ve biyobozunurluğunu artırmıştır. Çalışma, badem kabuğu atıklarından elde edilen nanopartiküllerle güçlendirilmiş PLA filmlerin, sentetik plastiklere kıyasla çevre dostu ve ambalaj endüstrisi için umut verici bir alternatif sunduğunu göstermektedir (Edward ve ark., 2022).

Sonuç olarak, badem kabuğu tozu (ASP) ve badem kabuğu unu (ASF) polimer matrislerine dahil edilmesi, çevre dostu biyokompozitler geliştirmek için sürdürülebilir ve verimli bir yaklaşım olduğu kanıtlanmıştır. Bu doğal dolgu maddeleri, modül, eğilme mukavemeti ve termal stabilite gibi mekanik performansı artırmanın yanı sıra biyolojik olarak parçalanabilirlik ve maliyet etkinliği de sağlar. Optimum takviye genellikle %10-20 ağırlıkça dolgu maddesi yüklemesinde elde edilir; bunun ötesinde, dispersiyon sorunları ve arayüzey eksiklikleri performansı olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, alkali veya silan işlemi gibi yüzey modifikasyonları, dolgu maddesi-matris etkileşimini daha da iyileştirerek yapısal bütünlük ve dayanıklılığı artırır. Yeşil malzemelere olan ilginin artmasıyla birlikte, badem kabuğu bazlı kompozitler ambalaj, otomotiv iç mekanları, tüketim malları ve tarım alanlarında uygulamalar için büyük umut vaat etmektedir.

2.3. Kompozitlerde Fındık Kabuğu (*Corylus avellana*) Takviyeli Polimer

Son yıllarda sürdürülebilirlik, düşük maliyet, biyobozunurluk ve çevresel etkilerin azaltılması gibi faktörler nedeniyle, doğal dolgu malzemelerinin polimer matrisli kompozitlerde kullanımı giderek daha fazla önem kazanmıştır. Bu doğrultuda tarımsal yan ürünler, özellikle de fındık kabuğu (*Corylus avellana*), içerdiği yüksek lignoselülozik yapı sayesinde polimer kompozitlerde dikkat çeken alternatiflerden biri olmuştur. Web of Science (WoS) veri tabanında "hazelnut" ve "polymer" anahtar kelimeleri ile yapılan tarama sonucunda 79 kayıt elde edilmiş olup, bu çalışmalar fındık kabuğunun toz, un, yağ veya kabuk formunda farklı polimer matrislerle birleştirilerek mekanik, termal, morfolojik ve çevresel performanslarının iyileştirilmesini hedeflediğini ortaya koymuştur. Literatürde fındık kabuğu; polilaktik asit (PLA), polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polistiren (PS), polibenzoksazin ve üre-formaldehit esaslı sistemlerde kullanılarak çekme, eğilme, darbe ve termal dayanım gibi temel özellikleri geliştirmek amacıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, kompozitlerin su emme, biyobozunma, UV dayanımı ve yangın direnci gibi çevresel parametreler açısından

da incelendiği görülmektedir.

Baiamonte ve ark. (2024), polilaktit (PLA) matrisine %10 ve %20 oranlarında odun unu (WF) ve fındık kabuğu (HS) ekleyerek biyokompozitler üretmiş ve bunların paketleme uygulamalarındaki potansiyelini mekanik, reolojik ve bozunma özellikleri açısından incelemiştir. Kompozitlerin viskozitesinin saf PLA'ya kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiş ve bu durum, dolgu ile matris arasındaki sınırlı yapışmaya bağlanmıştır. Her iki dolgu da elastik modülü artırırken, çekme dayanımı ve kopma uzamasını düşürmüştür. UV dayanımı açısından ise, lignoselülozik yapılarından dolayı hem odun unu hem de fındık kabuğu katkısı, PLA'nın UV ışınlarına karşı direncini artırmıştır. Kompost gömme testleri (30 gün) sonucunda saf PLA yaklaşık %26 kütle kaybı gösterirken, %20 oranında WF ve HS içeren biyokompozitlerde bu değer sırasıyla %10 ve %14 olarak bulunmuştur. Ayrıca, foto-oksidasyon ön işlemine tabi tutulan biyokompozitlerin bozunma hızının arttığı ve %20 WF içeren kompozitlerde %15, %20 HS içerenlerde ise %21 kütle kaybına ulaşıldığı rapor edilmiştir. Çalışma, PLA matrisli biyokompozitlerin “doğumdan ölüme” (cradle-to-grave) çevresel performansını ortaya koyarak, özellikle UV dayanımı ve kontrollü biyobozunurluk açısından fındık kabuğu gibi tarımsal atık dolguların çevre dostu paketleme uygulamalarında kullanılabilirliğini vurgulamaktadır (Baiamonte ve ark., 2024).

Tufan ve ark. (2015), fındık kabuğu unu (HHF), polipropilen (PP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) karışımlarından dört farklı doğal lif-polimer kompozit formülasyonu üretmiş ve bu kompozitlerin mekanik, termal, morfolojik ve biyolojik dayanım özelliklerini incelemiştir. Kompozitler, 175 °C'de 3 dakika süreyle sıcak presle şekillendirilmiş ve ASTM D-790 ile ASTM D-638 standartlarına göre mekanik testlere tabi tutulmuştur. Ayrıca, taramalı elektron mikroskobu (SEM), termogravimetri (TG) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizleri yapılarak kompozitlerin yapısal ve termal davranışları değerlendirilmiştir. Bulgular, fındık kabuğu katkılı kompozitlerin yüksek mekanik performans sergilediğini göstermiştir. Termal analizler, HHF ilavesinin polimer matrislerin ısıl kararlılığını olumsuz etkilemediğini ortaya koymuştur. Çürüme testleri ise, özellikle HDPE + %50 odun + %3 MAPE (HHF2) formülasyonunun en yüksek doğal dayanıklılığı sağladığını; *Trametes versicolor* ve *Postia placenta* mantarlarına karşı sırasıyla yalnızca %3,47 ve %4,60 kütle kaybı gösterdiğini ortaya koymuştur. Aynı koşullarda test edilen sarıçam (*Pinus sylvestris*) örnekleri ise yaklaşık %32 kütle kaybına uğramıştır. Çalışma, fındık kabuğu ununun polimer matrislerle birleştirilerek hem yüksek mekanik özelliklere sahip hem de biyolojik bozunmaya dirençli kompozitler

üretilebileceğini göstermektedir (Tufan ve ark., 2015).

Cherkashina ve ark. (2023), fındık kabuğu tozunun polistiren (PS) matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılabilirliğini araştırmış ve dolgu partiküllerini polistiren kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyonuna tabi tutmuştur. Bu işlem sonucunda dolgu maddesinin su ile temas açısı $60,16^\circ$ 'den $87,02^\circ$ 'ye yükselmiş, böylece matris-dolgu etkileşimi iyileştirilmiştir. %10–50 oranlarında modifiye edilmiş fındık kabuğu tozu içeren kompozitler hazırlanmış ve mekanik ile termal özellikleri incelenmiştir. Bulgular, %20–40 fındık kabuğu içeren ve %60–80 PS oranına sahip kompozitlerin optimum fiziksel, mekanik ve kullanım özellikleri gösterdiğini ortaya koymuştur. %90'dan fazla PS içeren numunelerde ise eğilme dayanımı ve Vickers sertliği düşük bulunmuş, bu da malzemenin dayanıklılığını sınırlandırmıştır. Ayrıca, düşük dolgu oranına sahip numuneler daha soluk renkte ve doygunluğu düşük bir görünüme sahip olmuştur. Termal analizler, kompozitlerin çalışma sıcaklık aralığının dolgu oranına bağlı olarak $265\text{--}376^\circ\text{C}$ arasında değiştiğini göstermiştir. Çalışma, modifiye edilmiş fındık kabuğu tozunun polistiren bazlı kompozitlerde kullanılmasının, hem mekanik hem de termal performansı geliştiren sürdürülebilir bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir (Cherkashina ve ark., 2023).

Gorar ve ark. (2022), fındık kabuğu (HS) partiküllerini bisfenol-A anilin bazlı benzoksazin (BA-a) reçinesi ile takviye ederek biyokompozitler geliştirmiştir. %5–25 arasında değişen oranlarda mikro boyutlu HS partikülleri BA-a matrisi ile başarılı bir şekilde harmanlanmıştır. DSC, çekme, darbe ve TGA testleri ile kürlenme davranışı, mekanik özellikler ve termal bozunma incelenmiştir. Sonuçlar, HS katkısının cam geçiş sıcaklığını yaklaşık %4 düşürdüğünü, ancak kömürleşme verimini artırarak termal kararlılığı geliştirdiğini göstermiştir. Özellikle %25 HS katkılı kompozitlerde Young modülünde %82,6 ve çekme gerilmesinde %74,1 artış kaydedilmiştir. Darbe dayanımı ise maksimum %207 oranında iyileşme göstermiştir. Ayrıca, CATIA V5 ortamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri, HS katkılı kompozitlerin gerilme dağılımında saf BA-a'ya kıyasla daha iyi performans sergilediğini doğrulamıştır. Çalışma, fındık kabuğu partiküllerinin polibenzoksazin matrisli kompozitlerde mekanik ve termal özellikleri önemli ölçüde geliştiren sürdürülebilir bir dolgu maddesi olduğunu ortaya koymaktadır (Gorar ve ark., 2022).

Aslan ve ark. (2023), polilaktik asit (PLA) matrisine atık fındık kabuğu unu (HSF) ve inorganik katkıları ekleyerek biyobazlı kompozitlerin mekanik ve termal performansını incelemiştir. Çalışmada %40 HSF içeren kompozitler, ekstrüzyon ve

presleme yöntemiyle hazırlanmış ve %2,5, %7,5 ve %10 oranlarında mika, cam bilya ve talk katkıları uygulanmıştır. Bulgular, inorganik katkıların darbe enerjisini saf PLA'ya kıyasla belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Ancak, mika ve cam bilya takviyeleri çekme ve eğilme özelliklerinde düşüşe neden olurken, talk katkısı (%7,5 ve %10) ile mekanik performansta iyileşmeler gözlenmiştir. Özellikle %7,5 talk katkılı PLA/HSF kompozitlerinde en yüksek eğilme dayanımı 51 MPa, %7,5 ve %10 talk katkılarında ise en yüksek çekme dayanımı 22 MPa olarak elde edilmiştir. SEM analizleri, organik ve inorganik dolguların homojen dağıldığını ve kırılma yüzeylerinde mikro yapısal deformasyonların meydana geldiğini ortaya koymuştur. Çalışma, HSF ve talk katkısının PLA matrisli biyokompozitlerde özellikle ambalaj ve taşıma uygulamaları için umut verici bir dolgu kombinasyonu olduğunu göstermektedir (Aslan ve ark., 2023).

Kuram (2020), akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) matrisli kompozitlerde findık kabuğu unu (HSF) ve ceviz kabuğu unu (WSF) hibrit takviyesinin reolojik, mekanik ve morfolojik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bulgulara göre, tekli dolgu kullanımında ceviz kabuğu unu, findık kabuğuna kıyasla çekme, eğilme ve darbe dayanımı ile çekme ve eğilme modülünü artırmada daha etkili bulunmuştur. Hibrit kompozitlerde en yüksek mekanik özellikler, %5 HSF ve %15 WSF içeren numunelerde elde edilmiş, buna karşılık %20 oranında HSF veya WSF ilavesi çekme, eğilme ve darbe dayanımlarında azalmaya yol açmıştır. Ayrıca, yalnızca HSF katkısı eriyik akış indeksinde (MFI) düşüşe sebep olurken, yalnızca WSF katkısı MFI değerini saf ABS'ye göre artırmıştır. Çalışma, findık ve ceviz kabuğu unu dolgularının düşük maliyetli, ancak sınırlı mekanik performansın kabul edilebildiği uygulamalarda ABS matrisli kompozitler için uygun bir seçenek sunduğunu ortaya koymuştur (Kuram, 2020).

Balart ve ark. (2018), gıda endüstrisinden elde edilen findık kabuğu unu (HSF) kullanarak poli(laktik asit) (PLA) matrisli yeşil kompozitler üretmiştir. %10–40 aralığında değişen HSF takviyesiyle üretilen kompozitlerin tam biyobozunur özellik gösterdiği ve dikkate değer performans sunduğu rapor edilmiştir. HSF oranının artmasıyla birlikte lignoselülozik parçacıkların çekirdeklenme etkisi sayesinde kristallenme derecesinde artış gözlenmiş, ayrıca ısıl boyutsal stabilite iyileşerek termal genleşme katsayısında belirgin bir azalma elde edilmiştir. Mekanik açıdan, HSF parçacıkları polimer zincir hareketliliğini kısıtlayan kilit noktaları gibi davranarak kompozitleri daha rijit hale getirmiştir. Sonuç olarak, HSF ile takviye edilen PLA kompozitler dengeli mekanik ve termal özellikler sergileyen, tamamen biyobozunur malzemeler olarak öne çıkmış; aynı zamanda

findık endüstrisi atıklarının değerlendirilmesine ve PLA bazlı malzemelerin maliyetinin düşürülmesine katkı sağlamıştır (Balart ve ark., 2018).

Solak ve ark. (2018), rafine findık yağının 80–180 °C sıcaklık aralığında ısıl oksidasyon kinetiğini incelemiştir. Oksidasyon süresince peroksit değeri, p-anisidin değeri, polimer trigliserit içeriği, tokoferol miktarı ve renk parametrelerindeki değişimler değerlendirilmiş ve bu değişimlerin sıfırıncı dereceden kinetik modele en iyi şekilde uyduğu belirlenmiştir. Bulgulara göre, 80–160 °C arasında p-anisidin değeri, polimer trigliserit içeriği ve tokoferol bozunma hız sabitleri artarken, peroksit değerinin hız sabiti 80–140 °C aralığında azalmıştır. Aktivasyon enerjileri sırasıyla; peroksit oluşumu için 47,49 kJ/mol, sekonder oksidasyon ürünleri (alkenaller) için 29,95 kJ/mol, polimer trigliseritler için 52,65 kJ/mol ve tokoferol bozunması için 14,22 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, findık yağının indüksiyon periyodunun oksidasyon süresi arttıkça kısaldığı gözlenmiştir. Oksidasyon süresi ve sıcaklıkla birlikte b^* renk değerinin yükselmesi, ısıl işlemin yağın sarı rengini yoğunlaştırmasına bağlanmıştır. Çalışma, rafine findık yağının ısıl oksidatif kararlılığı ve raf ömrü üzerine önemli kinetik veriler sunmaktadır (Solak ve ark., 2018).

Büyükkaya ve Temel (2019), polipropilen (PP) matrisine farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15 ve %20) findık kabuğu (HS) eklenerek üretilen kompozitlerin uzun süreli su adsorpsiyon davranışını incelemiştir. 75–150 µm boyutundaki HS partikülleriyle üretilen kompozitler 23 °C’de 13.000 saat boyunca test edilmiştir. Hidrofobik karakteri nedeniyle saf PP’nin suya karşı yüksek direnç gösterdiği, ancak HS’nin hidrofilik yapısından ötürü PP/HS kompozitlerinde su adsorpsiyonunun dolgu oranı arttıkça düzenli biçimde yükseldiği belirlenmiştir. PP ve PP/HS kompozitlerinin yaklaşık olarak Fick tipi adsorpsiyon davranışı sergilediği, HS miktarı arttıkça normal difüzyonun daha baskın hale geldiği saptanmıştır. Ayrıca üretim sırasında kullanılan katkı maddelerinin etkisi incelenmiş; mum katkısının su adsorpsiyonunu azalttığı, antioksidan katkısının ise kısmen artırdığı görülmüştür. Difüzyon katsayısı (D), difüzyon parametreleri (k, n) ile adsorpsiyon (S) ve geçirgenlik (P) katsayıları mum katkısıyla azalırken, antioksidan katkısıyla artış göstermiştir. Sonuçlar, üretim sürecinde kullanılan katkı maddelerinin PP/HS kompozitlerin su alma davranışı üzerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Büyükkaya ve Temel, 2019).

Tufan ve Ayrılmış (2016), findık kabuğu ununun geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (R-HDPE) matrisli kompozitlerde dolgu malzemesi olarak

potansiyel kullanımını araştırmıştır. Tek vidalı ekstrüzyonla hazırlanan karışımlar, sıcak presleme yöntemiyle panellere dönüştürülmüş ve morfolojik, fiziksel, mekanik, termal özellikler ile biyolojik dayanıklılıkları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, fındık kabuğu dolgu oranı arttıkça kompozitlerin çekme ve eğilme modülünün iyileştiğini, ancak fiziksel özelliklerin, biyolojik dayanıklılığın ve çekme-eğilme dayanımlarının azaldığını göstermiştir. Maleik anhidrit aşılı polietilen (MAPE) kullanıldığında, dolgu malzemesinin polimer matris içinde daha homojen dağıldığı ve kristallenme derecesinin saf R-HDPE'ye kıyasla düştüğü belirlenmiştir. Çalışma, fındık kabuğu ununun R-HDPE kompozitlerinde sürdürülebilir ve maliyet etkin bir dolgu alternatifi olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır (Tufan ve Ayrılmış, 2016).

Salişinska ve Ryszkowska (2012), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) atık folyonun ince öğütülmüş fındık kabuğu unu ile fiziksel olarak modifiye edilerek hem iç hem de dış mekânlarda kullanılabilecek özelliklere sahip kompozitler üretmiştir. Çalışmada %11, %26 ve %42 hacim oranında dolgu içeren üç farklı karışım, polimer işleme ekipmanlarıyla ve herhangi bir ek katkı maddesi kullanılmadan hazırlanmıştır. Üretilen kompozitler; işlenebilirlik (kütle akış oranı), fiziksel (yoğunluk, nem içeriği), mekanik (çekme dayanımı, kopma uzaması, dinamik termal analiz) ve çevresel faktörlere direnç (şişme, su emme, termogravimetrik analiz, yanma ısı) açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca dolgu parçacık boyutu dağılımı ve morfolojik özellikler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Sonuçlar, düşük yoğunluklu, düşük su emme kapasitesine sahip, kabul edilebilir mekanik özellikler gösteren ve kullanım ömrü sonunda enerji geri kazanımında da yakıt olarak değerlendirilebilecek kompozitlerin üretilebileceğini ortaya koymuştur (Salişinska ve Ryszkowska, 2012).

Volpe ve Pantani (2025), otomotiv endüstrisi için geri dönüştürülmüş polipropilen (PP) matrisine düşük yoğunluklu lignoselülozik doğal dolgular ekleyerek çevreci hafif kompozitlerin geliştirilmesini incelemiştir. Çalışmada dolgu malzemesi olarak mantar, fındık kabukları ve fındık kabuğu iç zarları (cuticle) kullanılmıştır. Kompozitlerin yoğunluk, ısıl direnç, mekanik özellikler, kalıplanabilirlik ve ısıl iletkenlik performansları değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre tüm doğal dolgular PP'nin ısıl stabilitesini artırmış, yüksek sıcaklıklarda mekanik direnç sağlamış ve yoğunluk ile ısıl iletkenlik üzerinde olumsuz bir etki

yaratmamıştır. Özellikle fındık iç zarı katkısı, PP'nin termal ve mekanik direncini en yüksek seviyede iyileştirmiş ve kalıplanabilirliğini artırmıştır. Bu bulgular, otomotiv sektöründe hafif, çevre dostu ve geri dönüştürülmüş kompozitlerin geliştirilmesine yönelik önemli bir katkı sunmaktadır (Volpe ve Pantani, 2025).

Gürü ve ark. (2009), fındık kabuğundan üre-formaldehit esaslı yonga levha üretimi gerçekleştirmiş ve bu malzemenin dezavantajları olan yanıcılık, su emme ve kalınlık şişme davranışlarını iyileştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada fındık kabukları farklı oranlarda üre-formaldehit reçinesi ile karıştırılmış, ayrıca uçucu kül ve fenol-formaldehit katkılarının eğilme dayanımı, limit oksijen indeksi, su emme kapasitesi ve kalınlık şişmesine etkileri incelenmiştir. Optimizasyon sonucunda, 70 °C'de 25 dakikalık reaksiyon süresinde 2.4 oranında fındık kabuğu/üre-formaldehit reçinesi karışımıyla en yüksek eğilme dayanımı 4,1 N/mm² elde edilmiştir. Uçucu kül katkısı, malzemenin limit oksijen indeksini ve yangına dayanıklılığını belirgin şekilde artırırken, fenol-formaldehit katkısı su emme ve kalınlık artışını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu sonuçlar, fındık kabuğu esaslı yonga levhaların yangına ve neme karşı daha dirençli hale getirilebileceğini göstermektedir (Gürü ve ark., 2009).

Elde edilen bulgular, fındık kabuğu takviyesinin polimerlerin mekanik ve termal özelliklerini iyileştirdiğini, uygun yüzey modifikasyonları veya ilave katkılarla (örneğin MAPE, fenol-formaldehit, inorganik takviyeler) matris-dolgu etkileşiminin güçlendirilebileceğini ve böylece daha dayanıklı, fonksiyonel ve sürdürülebilir malzemelerin üretilebileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, fındık kabuğu esaslı kompozitlerin yalnızca malzeme performansı açısından değil, aynı zamanda atıkların değerlendirilmesi, çevresel yükün azaltılması ve döngüsel ekonomi hedefleri bakımından da önemli katkılar sunduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla fındık kabuğu, polimer matrisli biyokompozitlerin geliştirilmesinde stratejik bir tarımsal yan ürün olarak öne çıkmakta ve gelecekte özellikle otomotiv, ambalaj ve yapı malzemeleri gibi sektörlerde daha geniş uygulama alanı bulma potansiyeli taşımaktadır.

Polimer kompozitlerde biyopartikül maddesi olarak ceviz kabuğu, badem kabuğu ve fındık kabuğunun karşılaştırmalı analizi, çeşitli uygulamalarda hem ortak özellikleri hem de ayırt edici malzeme avantajlarını ortaya koymaktadır. Bu üç biyopartikül maddesi de bol miktarda bulunan, biyolojik olarak parçalanabilir ve özellikle PP, PE, PLA ve epoksi sistemleri gibi termoplastiklere dahil edildiğinde mekanik takviye potansiyeli gösteren lignoselülozik tarımsal atıklardır. İncelenen literatürde öne çıkan bir tema, bu partikül dolgu maddelerinin sert yapısı ve iyi

dağılılabirliği sayesinde düşük ila orta düzeyde dolgu yüklemelerinde (tipik olarak %5-15 ağırlıkça) sertlik, sertlik ve termal stabilitenin artırılmasıdır.

Ancak, dolgu maddesi-matris uyumluluğu, termal direnç ve optimum kullanım eşikleri değerlendirildiğinde farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Lignin ve karbon içeriği daha yüksek olan ceviz kabuğu parçacıkları, genellikle termal stabilite ve su direnci açısından daha iyi performans gösterir, bu da onları özellikle dış mekan veya ambalaj uygulamaları için uygun hale getirir. Badem kabuğu dolgu maddeleri ise, lif boyutu ve morfolojisinin ayarlanması yoluyla mekanik özellikler üzerinde daha hassas kontrol sağlar ve PLA ve nişasta gibi biyolojik olarak parçalanabilir veya biyo-bazlı matris sistemlerinde yaygın olarak araştırılmaktadır. Fındık kabuğu unu, mekanik takviye ve biyolojik bozunabilirlik arasında bir denge sergiler, ancak agregasyon ve artan nem alımı nedeniyle yüksek yükleme rejimlerinde sınırlamalar gösterir. İlginç bir şekilde, hem fındık hem de badem kabukları, matris yapışmasını iyileştirmek için genellikle kimyasal yüzey işlemlerinden (örneğin alkali, silan) yararlanırken, ceviz kabuğu kompozitleri kapsamlı işlevselleştirme olmadan da iyi performans gösterir.

İşleme açısından, bu üç dolgu maddesi de geleneksel ekstrüzyon, sıkıştırma kalıplama veya yerinde polimerizasyon teknikleriyle uyumludur ve parçacık boyutu kontrol edildiğinde (genellikle 100 µm'nin altında) iyi işlenebilirlik gösterir. Çevresel açıdan, bu doğal dolgu maddeleri tarımsal atıkları değerlendirerek ve petrol bazlı dolgu maddelerine olan bağımlılığı azaltarak döngüsel ekonomiye katkıda bulunur. Ayrıca, bu çalışmalar, dolgu maddesi içeriğinin, yüzey işleminin ve matris seçiminin dikkatli bir şekilde optimize edilmesiyle, mekanik, termal ve bazen biyolojik özellikleri özelleştirilmiş polimer kompozitler üretilebileceğini ve bunların otomotiv, inşaat, ambalaj ve biyomedikal alanlarda sürdürülebilir malzeme uygulamaları için uygun hale geldiğini göstermektedir.

Özetle, üç biyopartikül maddesi de önemli faydalar sağlarken, ceviz kabuğu dolgu maddeleri termal ve nem direnci açısından üstün olma eğilimindedir, badem kabukları biyopolimer uyumluluğu için çok yönlü bir platform sunar ve fındık kabukları iyi mekanik potansiyele sahip, uygun maliyetli, biyolojik olarak parçalanabilir bir takviye sağlar. Gelecekteki çalışmalar, bu dolgu maddelerinin melezleştirilmesine, yüzey modifikasyonlarının optimize edilmesine ve çok işlevli kompozitlerdeki sinerjik rollerinin araştırılmasına odaklanmalıdır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada matris malzeme olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kullanılmıştır. HDPE, SABIC firmasının P6006 ticari kodlu ürünüdür ve termoplastik karakteri, düşük maliyeti, işlenebilirliği ve mekanik dayanımı nedeniyle tercih edilmiştir. HDPE granülleri yaklaşık 3 mm çapında olup 97.500 g/mol ortalama moleküler ağırlığa sahiptir.

Takviye elemanı olarak ise tarımsal atık niteliğindeki ceviz kabuğu, badem kabuğu ve fındık kabuğu (200-400 mikron) kullanılmıştır. Her üç doğal malzeme, 1'er kilogram olacak şekilde hammaddesepeti.com üzerinden temin edilmiştir. İlk olarak bu kabuklar 160 mikron elek kullanılarak un değirmeniyle öğütülmüş, ardından Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında 75 mikron elek ile elenerek homojen ve istenilen partikül boyutuna getirilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Biyopartikül takviyelerinin hazırlanması

Bu çalışmada takviye elemanı olarak kullanılan ceviz kabuğu, badem kabuğu ve fındık kabuğu atıkları, öncelikle belirli bir partikül boyutuna indirgenerek biyopartikül haline getirilmiştir. Her bir kabuk türü ayrı ayrı 1 kilogram olacak şekilde temin edilmiştir. Takviye malzemelerinin işlenebilirliğini ve kompozit yapı içindeki dağılımını iyileştirmek amacıyla iki aşamalı bir öğütme ve eleme işlemi uygulanmıştır.

İlk aşamada, kabuklar buğday öğütme makinası yardımıyla Şekil 3.1'deki gibi 160 mikron elek kullanılarak ön elenmiş ve kaba partiküller uzaklaştırılmıştır. Elde edilen toz halindeki malzeme daha sonra Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarlarında 75 mikron elek ile elenerek daha ince fraksiyona ayrılmış ve homojen bir tane boyutu dağılımı sağlanmıştır. Böylece her üç kabuk türü için yaklaşık 75 mikron altı boyutta ince biyopartikül elde edilmiştir.

Hazırlanan biyopartikül tozları, deneysel çalışmalarda HDPE matrisi ile karıştırılarak kompozit yapıların üretiminde kullanılmıştır



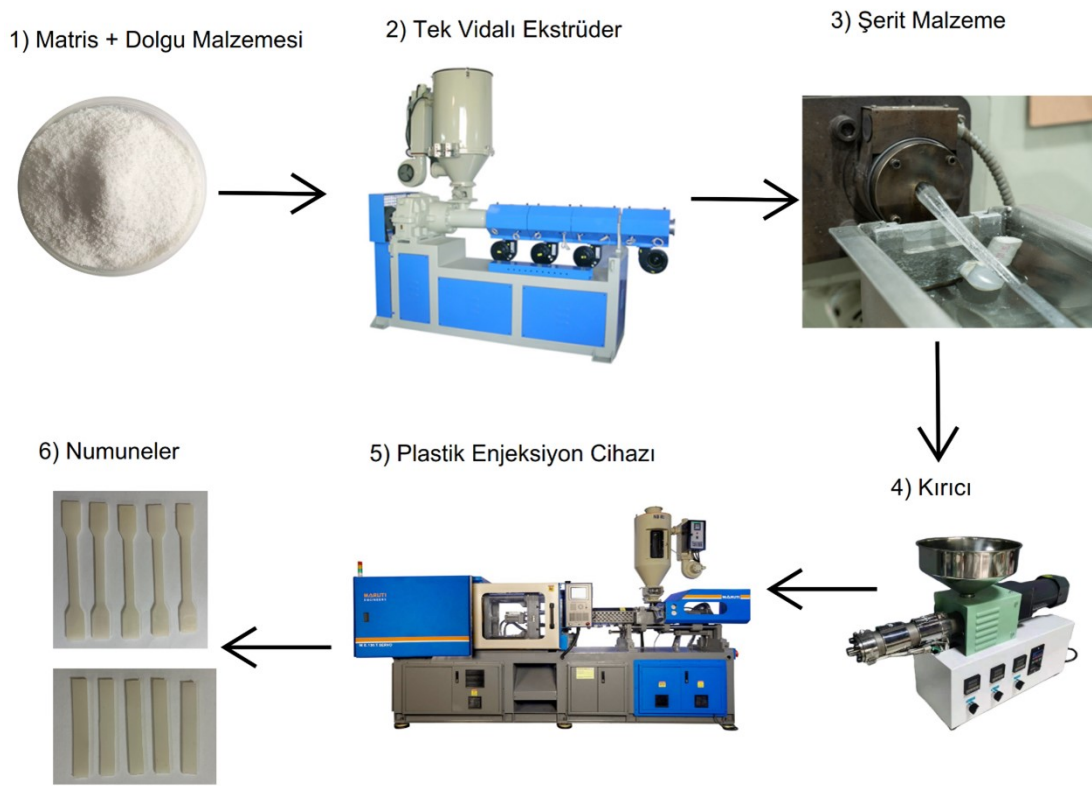
Şekil 3.1. Buğday öğütme makinası

3.2.2. Biyopartikül takviyeli polimer kompozitin üretimi

Biyopartikül takviyeli HDPE matrisli kompozitlerin üretiminde, elde edilen ceviz, badem ve fındık kabuğu tozları belirli oranlarda HDPE ile karıştırılarak toplam dokuz farklı kompozit formülasyonu hazırlanmıştır. Her bir doğal takviye türü için %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında katkılar belirlenmiş ve bu oranlara göre numuneler kodlanmıştır (örneğin; 0.5B = %0,5 badem kabuğu katkılı numune).

Kompozit üretim sürecinde, öncelikle HDPE granülleri ve önceden hazırlanmış biyopartikül tozları uygun oranlarda hassas şekilde tartılmıştır. Tartılan bileşenler kuru halde karıştırılmış ve homojen bir karışım elde edilmesi sağlanmıştır. Çizelge 3.1’de oranları belirtilen matris ve takviye malzemeleri, mekanik olarak karıştırıldıktan sonra karışımın homojenliğini artırmak amacıyla, 160–180 °C aralığında ısıtma bölgelerine sahip Munzur Üniversitesi laboratuvarlarında bulunan

“S-265 00 ASTORP” model tek vidalı ekstrüdere beslenmiştir. Ekstrüderin ucunda yer alan silindirik kalıp kafasından çıkan malzeme, şerit halinde çekilerek soğutma havuzundan geçirilmiş ve soğutulduktan sonra kırıcıya yönlendirilmiştir. Kırıcı işleminden geçen bu şeritler granül forma dönüştürülmüştür. Elde edilen granüller, standart deney numunelerinin hazırlanması amacıyla yine Munzur Üniversitesi laboratuvarında bulunan plastik enjeksiyon makinesinde kalıplara basılmıştır. Bu süreçte çekme ve üç nokta eğilme testlerine uygun numuneler üretilmiştir. Üç bölgeli ısıtma sistemine sahip enjeksiyon makinesinin bölge sıcaklıkları 180 °C, enjeksiyon memesi sıcaklığı ise 170 °C olarak ayarlanmıştır (Metin ve ark. 2015, Nawang ve ark. 2001). Üretim aşamaları Şekil 3.2.’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kompozitlerin üretim şematik gösterimi

Elde edilen kompozit levhalar soğutulularak stabilize edilmiş, ardından standartlara uygun ölçülerde kesilerek mekanik ve termal testlere tabi tutulmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Bu süreçte kullanılan üretim parametreleri, hem biyopartiküllerin HDPE matrisi içinde homojen dağılımını sağlamak hem de nihai kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini optimize etmek amacıyla seçilmiştir. Numune elde edilmesinden sonra mekanik ve termal testler gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin kodlamaları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kompozitlerin kodlamaları

Kodlama	Takviye Malzemesi	Matris Malzemesi
Saf	-	HDPE
%0,5B	%0,5 Badem Kabuğu Katkılı	HDPE
%1B	%1 Badem Kabuğu Katkılı	HDPE
%1,5B	%1,5 Badem Kabuğu Katkılı	HDPE
%0,5C	%0,5 Ceviz Kabuğu Katkılı	HDPE
%1C	%1 Ceviz Kabuğu Katkılı	HDPE
%1,5C	%1,5 Ceviz Kabuğu Katkılı	HDPE
%0,5F	%0,5 Fındık Kabuğu Katkılı	HDPE
%1F	%1 Fındık Kabuğu Katkılı	HDPE
%1,5F	%1,5 Fındık Kabuğu Katkılı	HDPE

4. BULGULAR

4.1. Deneyler

Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çekme ve üç nokta eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi ISO 527 standardına uygun olarak köpek kemiği şeklinde ve 4 mm kalınlığında hazırlanan numunelerle yapılmıştır. Deney hızı 10 mm/dk olarak belirlenmiştir. Üç nokta eğme deneyi ise ISO 178 standardına uygun olarak 80 mm × 10 mm × 4 mm boyutlarında üretilen numunelerle gerçekleştirilmiş; açıklık mesafesi 64 mm, deney hızı ise 5 mm/dk olarak uygulanmıştır. Kullanılan test standartlarına ve parametrelerine ilişkin bilgiler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Kompozitlerin ısıl özelliklerinin belirlenmesi amacıyla DSC ve TGA analizleri yapılmıştır. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri) testleri nitrojen atmosferi altında, 60 ml/dk akış hızında gerçekleştirilmiştir. Numune miktarı ortalama 8 mg olup, ısıtma hızı 10 °C/dk olarak ayarlanmıştır. Bu test ile erime sıcaklığı (T_m) ve erime entalpisi (ΔH_m) değerleri elde edilmiştir. TGA testleri de yine nitrojen atmosferinde, 100 ml/dk gaz akışıyla yürütülmüş; ortalama 8 mg numune kullanılmış ve ısıtma hızı 10 °C/dk olarak belirlenmiştir. Bu test ile kompozitlerin termal bozunma başlangıç sıcaklığı, tepe bozunma sıcaklığı ve kalan kütle yüzdesi belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Mekanik deney test standartları

Deney Adı	Deney Standartları	Numune Boyutları	Açıklık Mesafesi (mm)	Deney Hızı (mm/dk)
Çekme Deneyi	ISO 527	Köpek Kemiği 4 mm kalınlık	-----	10
Üç Nokta Eğme Deneyi	ISO 178	80 x 10 x 4	64	5

4.1.1. Çekme test sonuçları

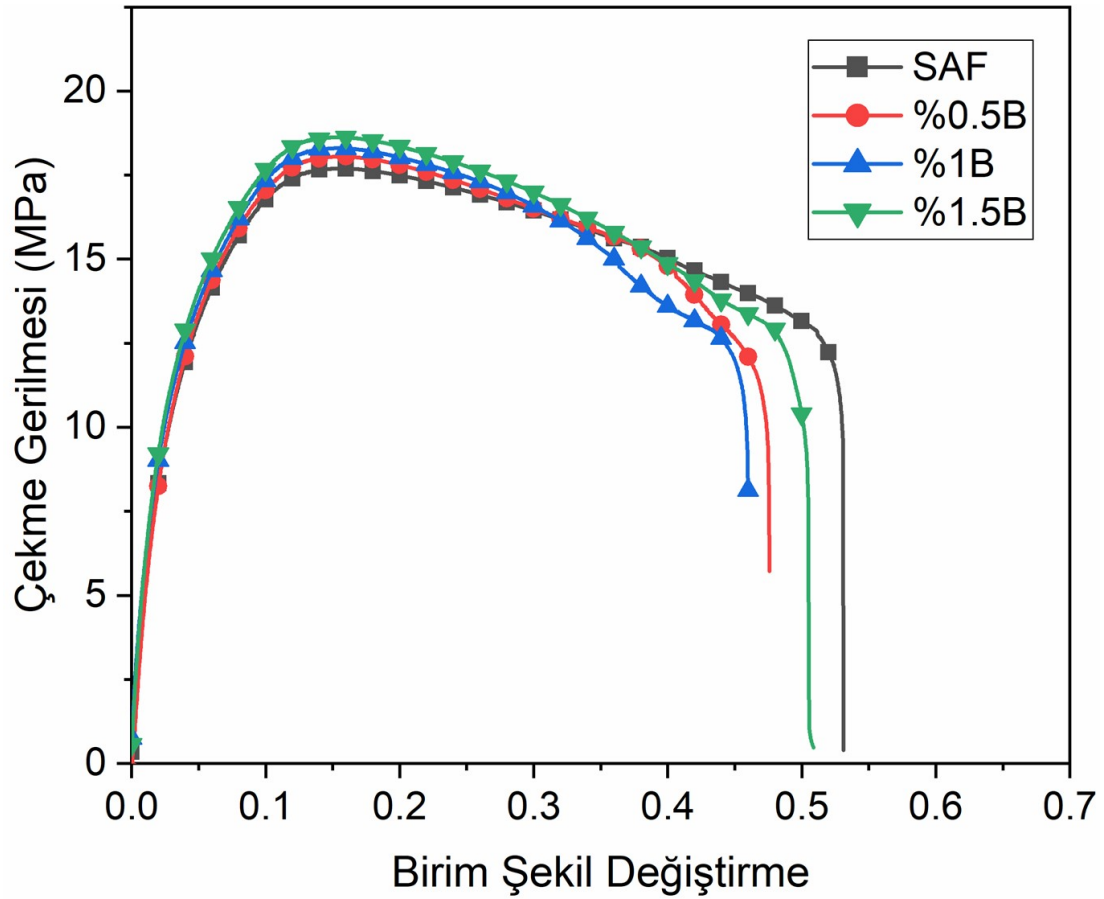
Bu çalışmada, badem, ceviz ve fındık kabukları kullanılarak HDPE matrisli biyokompozitler üretilmiş ve mekanik özellikleri çekme testi ile değerlendirilmiştir. Test sonuçlarına ilişkin veriler Çizelge 4.2’de sunulmakta olup; maksimum çekme gerilmesi, maksimum birim şekil değiştirme ve elastisite modülü değerleri üç farklı katkı oranı (%0,5, %1 ve %1,5) için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Badem kabuğu,

ceviz kabuğu ve fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin çekme testi gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri sırası ile Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'de verilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre, tüm katkılı numunelerde saf HDPE'ye kıyasla mekanik özelliklerde belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Saf HDPE numunesi 17.36 MPa çekme dayanımı, 0.1566 birim şekil değiştirme ve 220.00 MPa elastisite modülü değerleri göstermiştir. Bu iyileşmeler, doğal toz partiküllerinin polimer matris içinde etkin dağılımı ve partikül-matris ara yüzeyinde oluşan güçlü adhezyon bağlarından kaynaklanmaktadır (Šupová ve ark., 2011)

Çizelge 4.2. Çekme Testi Sonuçları

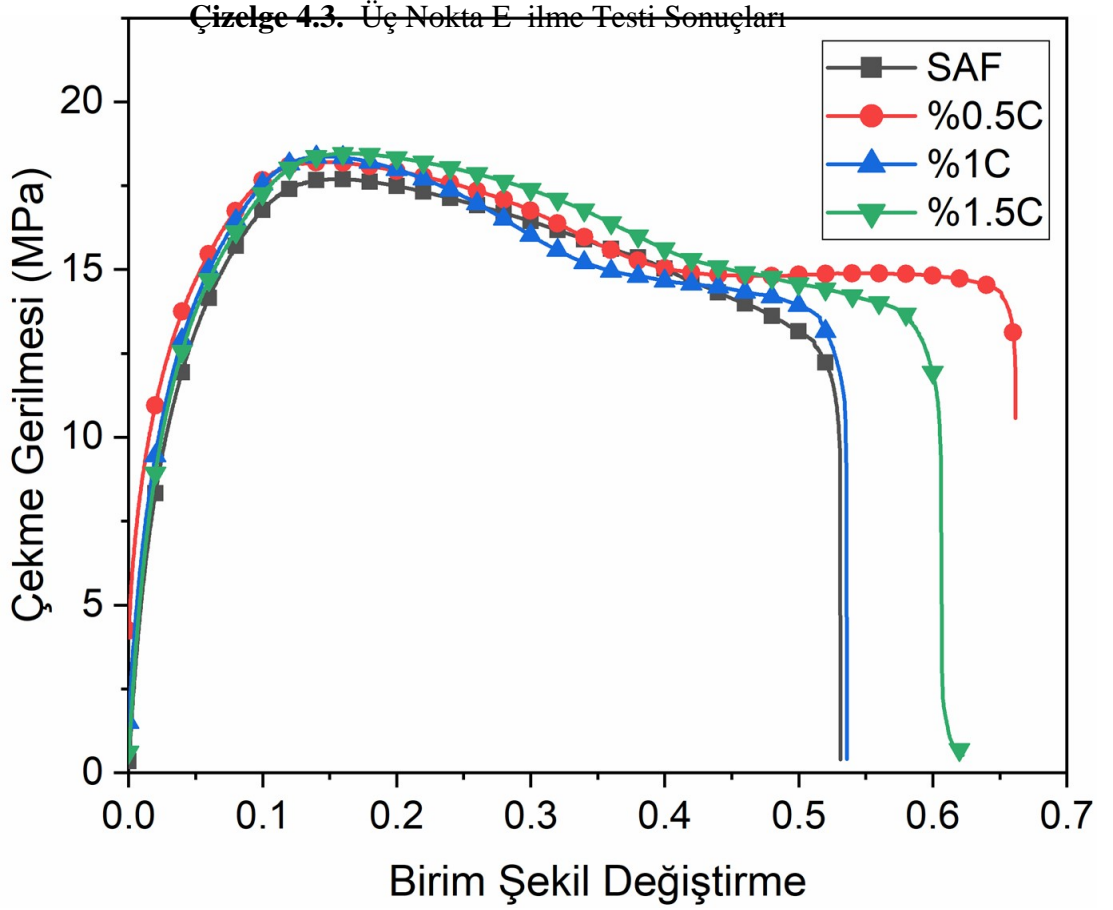
Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	Elastisite Modülü (MPa)
Saf	17,36	0,1566	220,00
%0.5B	18,05	0,1513	247,34
%1B	18,31	0,1499	258,61
%1.5B	18,75	0,1551	261,68
%0.5C	18,20	0,1497	257,96
%1C	18,34	0,1540	258,27
%1.5C	18,52	0,1603	259,36
%0.5F	18,55	0,1573	231,37
%1F	18,72	0,1621	253,41
%1.5F	18,98	0,1580	270,12

Badem kabuğu tozu katkılı numunelerde, katkı oranı arttıkça çekme dayanımının istikrarlı şekilde arttığı görülmektedir. %0.5 oranında 18.05 MPa olan çekme dayanımı, %1'de 18.31 MPa'ya ve %1.5'te 18.75 MPa'ya yükselmiştir. Bu artış, badem kabuğunun yüksek selüloz içeriği (%45-55) sayesinde matrisle oluşturduğu hidrojen bağlarıyla açıklanabilir (Kabir ve ark., 2012). Elastisite modülü değerleri de benzer şekilde artış göstermiş olup, 247.34 MPa'dan 261.68 MPa'ya ulaşmıştır. Ancak maksimum birim şekil değiştirme değerlerinde %1 oranına kadar hafif bir azalma (0.1513 ve 0.14992) görülmüş, %1.5 oranında ise tekrar 0.15517 seviyesine çıkmıştır.



Şekil 4.1. Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin çekme tesi grafikleri

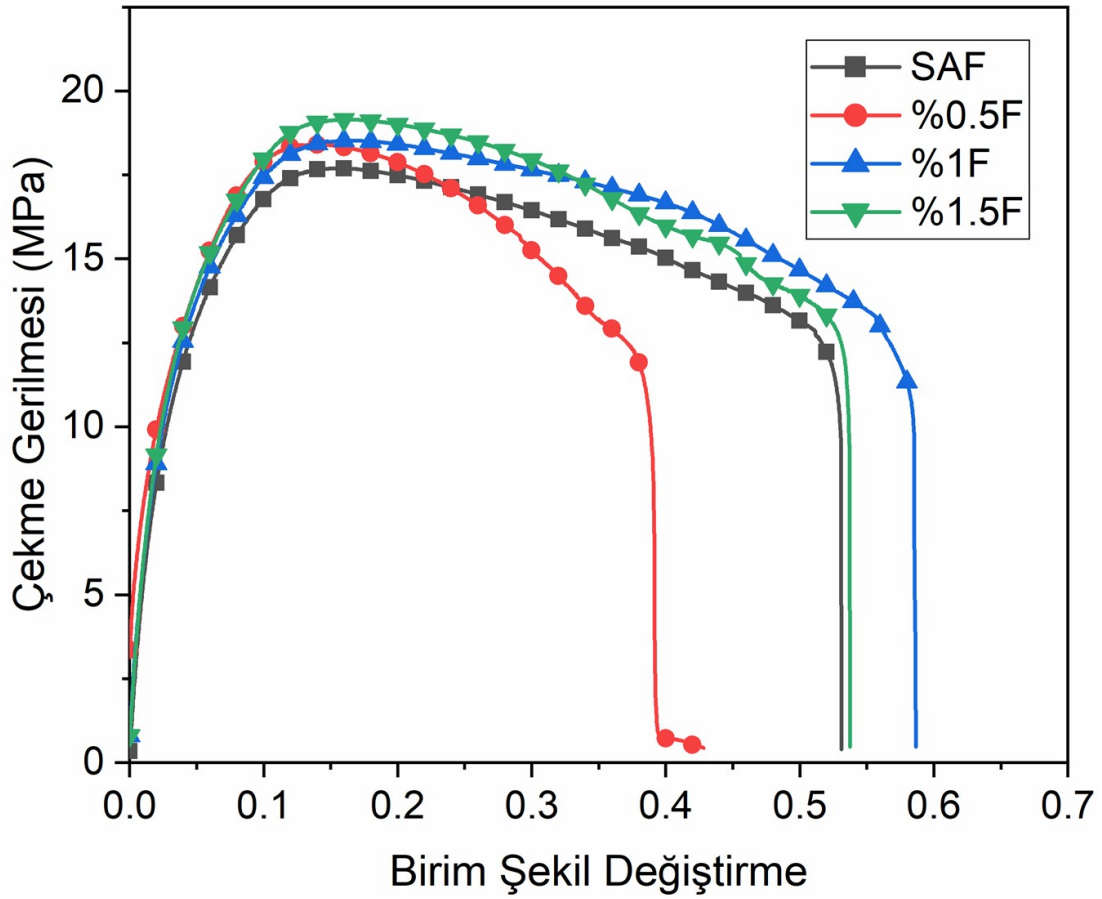
Ceviz kabuğu tozu katkılı numunelerde de benzer bir eğilim izlenmiştir. Çekme dayanımı %0.5'te 18.20 MPa'dan %1.5'te 18.52 MPa'a doğru kademeli olarak artış göstermiştir. Ceviz kabuğunun yüksek lignin içeriği (%30-35), termal stabiliteyi artırarak mekanik dayanımı iyileştirmiş olabilir (Laurichesse ve Avérous, 2014). Elastisite modülü değerleri 257.96 MPa ile 259.36 MPa aralığında nispeten sabit kalmıştır. Birim şekil değiştirme değerleri ise %0.5 ve %1 oranlarında düşüş (0.1497 ve 0.1540) gösterdikten sonra %1.5 oranında 0.1603 gibi en yüksek değere ulaşmıştır.



Şekil 4.2. Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin çekme testi grafikleri

Fındık kabuğu tozu katkılı numuneler, en yüksek mekanik performansı sergilemiştir. Çekme dayanımı %0.5'te 18.55 MPa'dan başlayarak %1.5'te 18.98 MPa'ya kadar çıkmıştır. Fındık kabuğunun mikro-yapısal morfolojisi ve yüksek lignoselülozik içeriği, bu performansın temel nedeni olabilir (Karagöz ve ark., 2024). Elastisite modülü değerleri ise 231.37 MPa'dan 270.12 MPa'ya kadar önemli bir artış göstermiştir. Birim şekil değiştirme değerleri ise %1 oranında 0.1621 gibi en yüksek seviyeye ulaşmış, diğer oranlarda 0.1573-0.1580 aralığında kalmıştır.

Sonuç olarak, tüm katkı türlerinde çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri artarken, birim şekil değiştirme değerlerinde genellikle hafif düşüşler yaşanmıştır. Özellikle fındık kabuğu tozu katkılı numuneler, diğerlerine kıyasla daha yüksek mekanik performans sergilemiştir.



Şekil 4.3. Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin çekme tesi grafikleri

4.1.2. Üç nokta eğilme test sonuçları

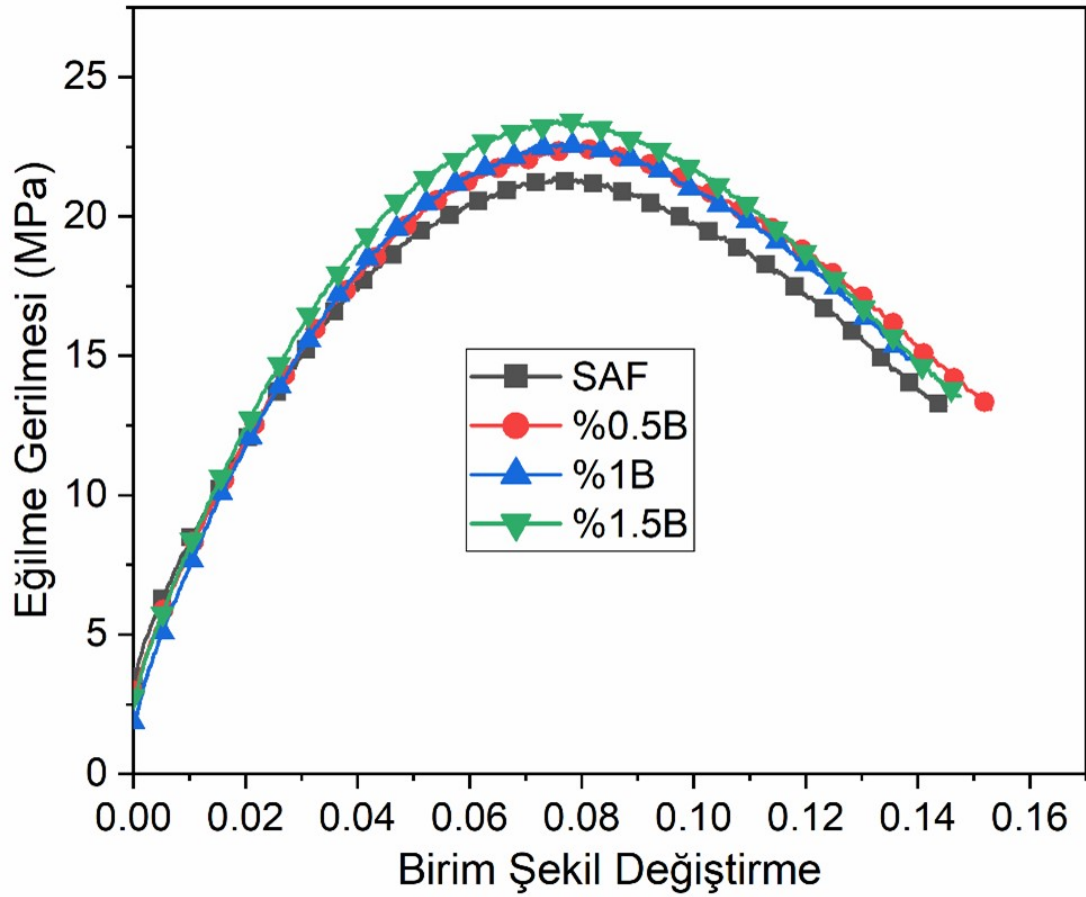
Üç nokta eğilme test sonuçlarına ilişkin veriler Çizelge 4.3'te sunulmakta olup; maksimum eğilme gerilmesi, maksimum birim şekil değişirme ve elastisite modülü değerleri üç farklı katkı oranı (%0,5, %1 ve %1,5) için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Badem kabuğu, ceviz kabuğu ve fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin eğilme testi gerilme-birim şekil değişirme grafikleri sırası ile Şekil 4.4., Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4.3. Üç Nokta E ilme Testi Sonuçları

Numune	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Birim Şekil Değişirme	Elastisite Modülü (MPa)
Saf	21,49	0,0813	363,48
%0.5B	22,40	0,0810	372,29
%1B	22,88	0,0782	407,42
%1.5B	23,37	0,0771	435,70
%0.5C	22,08	0,0779	390,86
%1C	22,47	0,0770	415,78
%1.5C	22,74	0,0760	428,10
%0.5F	22,92	0,0719	438,12
%1F	23,58	0,0759	449,86
%1.5F	24,05	0,0810	458,95

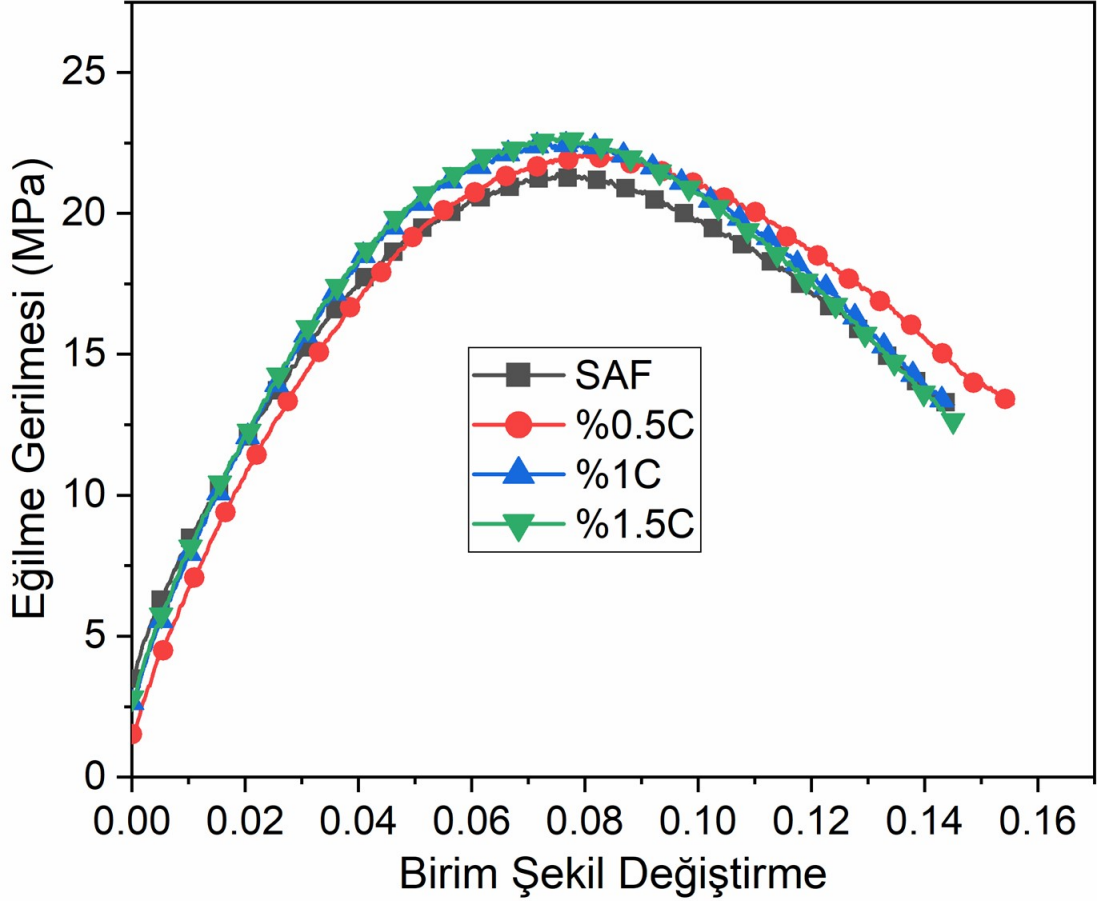
Eğilme testi sonuçları incelendiğinde, tüm katkılı numunelerin saf HDPE'ye kıyasla mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler gösterdiği görülmektedir. Saf HDPE numunesinde 21.49 MPa eğilme dayanımı, 0.0813 birim şekil değişirme ve 363.48 MPa elastisite modülü değerleri kaydedilmiştir. Bu artışlar, doğal toz partiküllerinin matris içinde oluşturduğu ağ yapısının yük transferini kolaylaştırmasıyla açıklanabilir (Fu ve ark., 2008).

Badem kabuğu tozu katkılı numunelerde eğilme dayanımı %0.5'te 22.40 MPa'dan %1.5'te 23.37 MPa'ya yükselmiştir. Elastisite modülü ise 372.29 MPa'dan 435.70 MPa'a kadar önemli bir artış göstermiştir. Bu gelişme, badem kabuğu partiküllerinin yüksek sertlik ve rijitlik özellikleriyle doğrudan ilişkilendirilebilir (Quiles-Carrillo ve ark., 2018). Birim şekil değişirme değerlerinde ise 0.0810'dan 0.0771'a hafif bir düşüş gözlenmiştir.



Şekil 4.4. Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin eğilme testi grafikleri

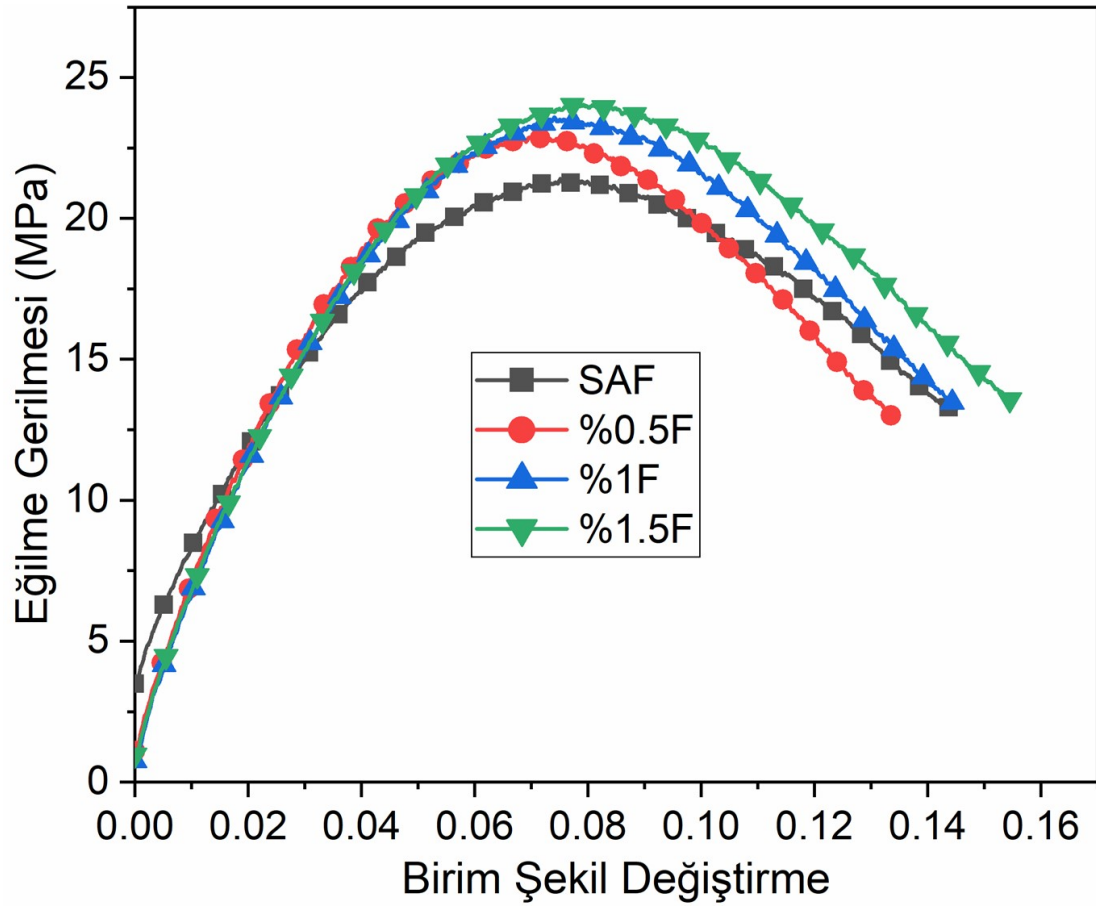
Ceviz kabuğu tozu katkılı numunelerde eğilme dayanımı %1.5 oranında 22.74 MPa'ya ulaşmıştır. Elastisite modülü 390.86 MPa ile 428.10 MPa arasında değişim göstermiştir. Ceviz kabuğunun yüksek lignin içeriğinin (%30-35) matrisle uyumlu termal genişleme katsayısı, bu sonuçların temel nedeni olabilir (Ayrilmis ve ark., 2013). Birim şekil değiştirme değerleri ise 0.0779 ile 0.0760 aralığında kalmıştır.



Şekil 4.5. Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin eğilme testi grafikleri

Fındık kabuğu tozu katkılı numuneler en yüksek eğilme performansını sergilemiştir. %1.5 oranında 24.05 MPa eğilme dayanımı ve 458.95 MPa elastisite modülüne ulaşılmıştır. Bu performans, fındık kabuğunun yüksek yoğunluklu lignoselülozik yapısı ve matrisle mükemmel ara yüzey bağlanmasıyla açıklanabilir (Demirer ve ark., 2018). Birim şekil değişirme değerleri ise 0.0719 ile 0.0810 arasında değişim göstermiştir.

Sonuç olarak, eğilme testleri de çekme testleriyle uyumlu şekilde, doğal toz katkılarının polimer matrisin mekanik performansını önemli ölçüde artırdığını doğrulamaktadır. Özellikle fındık kabuğu tozu katkılı numuneler hem çekme hem de eğilme testlerinde en iyi performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, tarımsal atık tozlarının polimer kompozitlerde etkin bir şekilde kullanılabileceğini ve malzeme performansını multidireksiyonel olarak iyileştirebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin eğilme tesi grafikleri

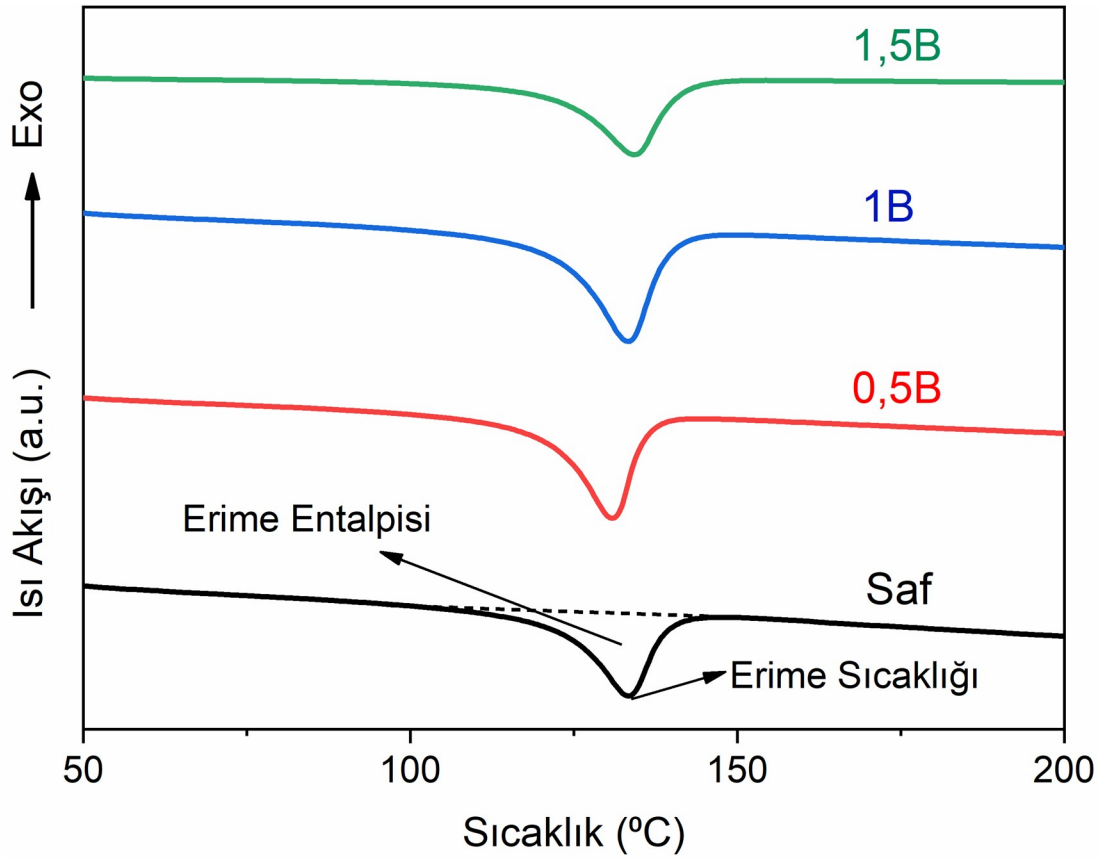
4.1.3. DSC test sonuçları

DSC testleri sonucunda elde edilen Erime Entalpisi ve Erime Derecesi sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. DSC analiz sonuçları, katkılı numunelerin termal davranışında önemli değişiklikler olduğunu ortaya koymaktadır. Saf HDPE numunesi 133.37 °C erime sıcaklığı ve 14.64 J/g erime entalpisi göstermiştir. Katkı maddelerinin eklenmesiyle bu değerlerde karakteristik değişimler gözlenmiştir.

Çizelge 4.4. DSC test sonuçları

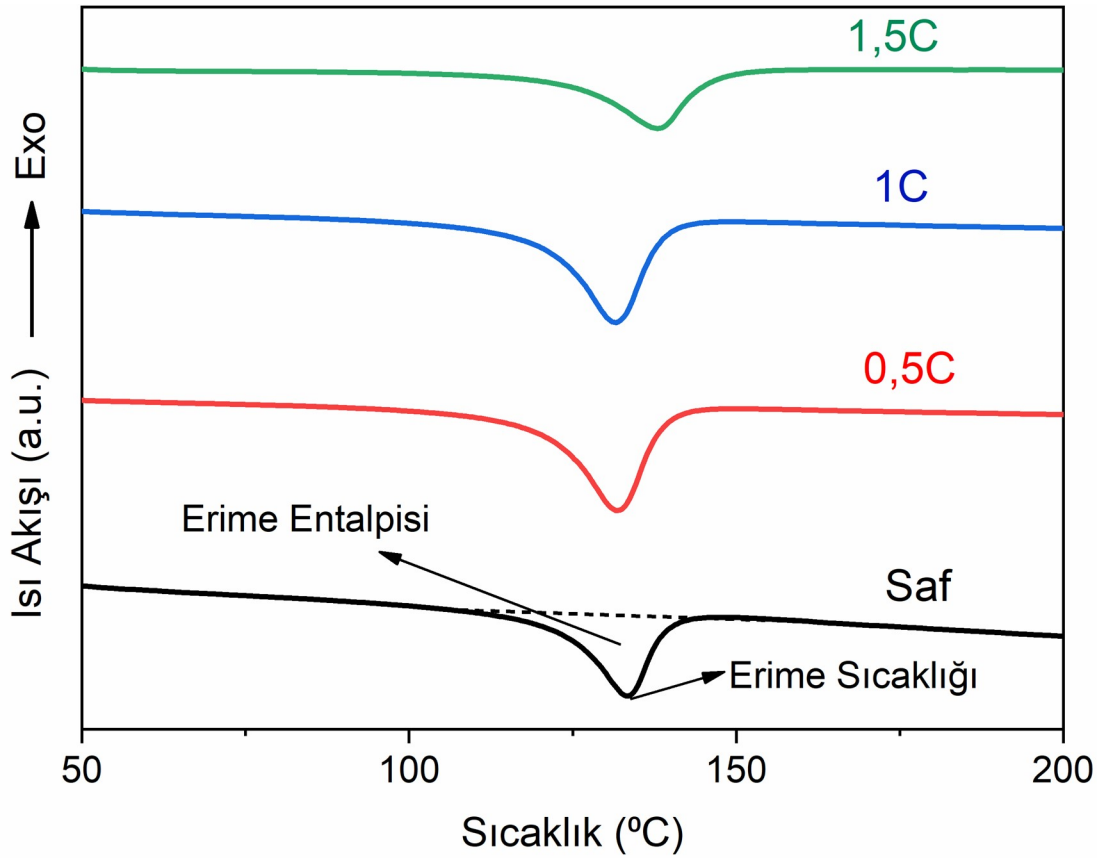
	Erime Entalpisi	Erime Derecesi
Numune	ΔH_m (J/g)	T _m (°C)
Saf	14,64	133,37
0.5B	17,45	130,89
1B	20,49	133,26
1.5B	15,11	134,35
0.5C	20,32	131,23
1C	20,08	131,88
1.5C	13,06	137,99
0.5F	14,61	136,02
1F	18,11	133,71
1.5F	17,84	132,73

Badem kabuğu tozu katkılı numunelerde, %0.5 oranında erime sıcaklığı 130.89 °C'ye düşerken, erime entalpisi 17.45 J/g'ye yükselmiştir. %1 oranında erime sıcaklığı 133.26 °C'ye yükselirken, erime entalpisi 20.49 J/g ile maksimum değerine ulaşmıştır. %1.5B numunesinde, erime sıcaklığı 134.35 °C'ye yükselmiş ve erime entalpisi 15.11 J/g olarak ölçülmüştür. Bu davranış, yüksek katkı oranlarında partikül-partikül etkileşimlerinin artması ve kristal yapıda bozulmalar meydana gelmesiyle açıklanabilir. %1.5B'de gözlenen bu değişim, katkı oranı arttıkça termal özelliklerde bir optimizasyon noktası olduğunu göstermektedir. Badem kabuğu tozu katkılı numunelerin DSC eğimleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DSC eğimleri

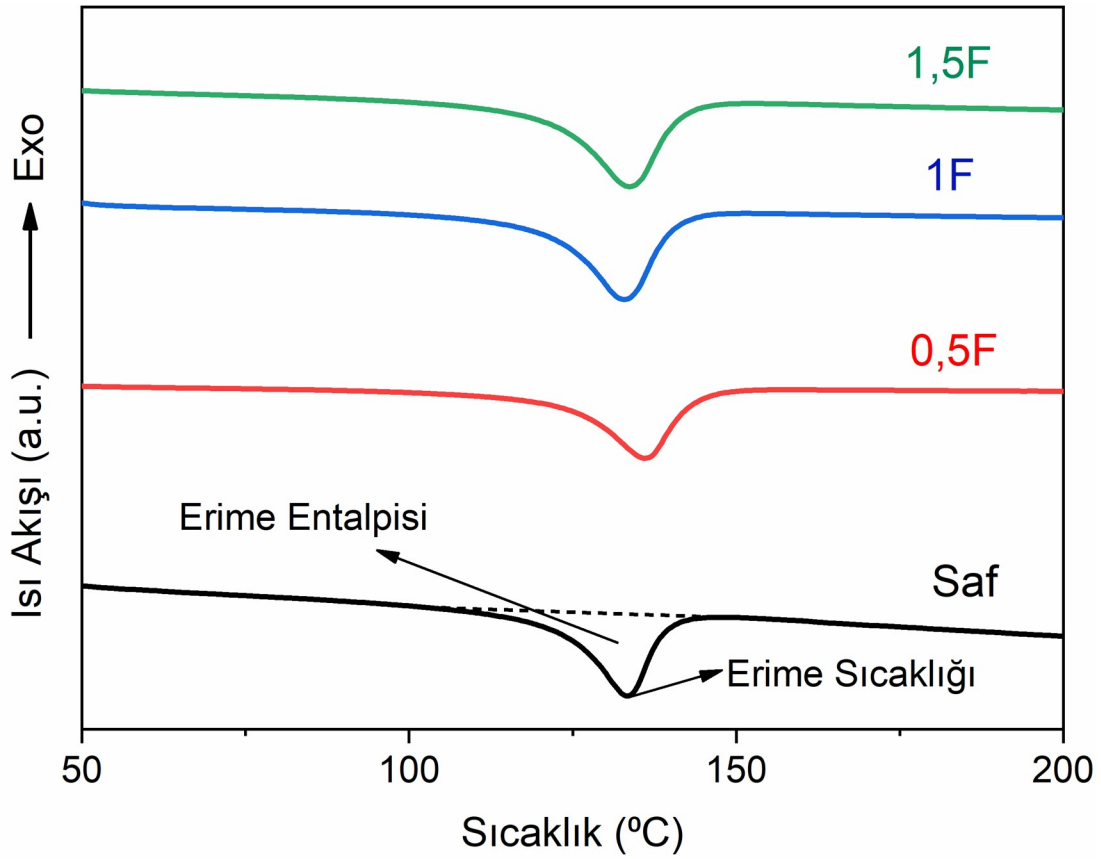
Ceviz kabuğu tozu katkılı numunelerde ise erime sıcaklıkları 131.23 °C ile 137.99 °C aralığında değişim göstermiştir. %1.5 oranında gözlenen 137.99 °C'lik erime sıcaklığı, ceviz kabuğunun yüksek termal iletkenliğinin bir sonucu olarak yorumlanabilir (Pradhan ve Satapathy, 2022). Erime entalpisi değerleri ise 13.06 J/g ile 20.32 J/g arasında değişmiştir. Ceviz kabuğu tozu katkılı numunelerin DSC eğimleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



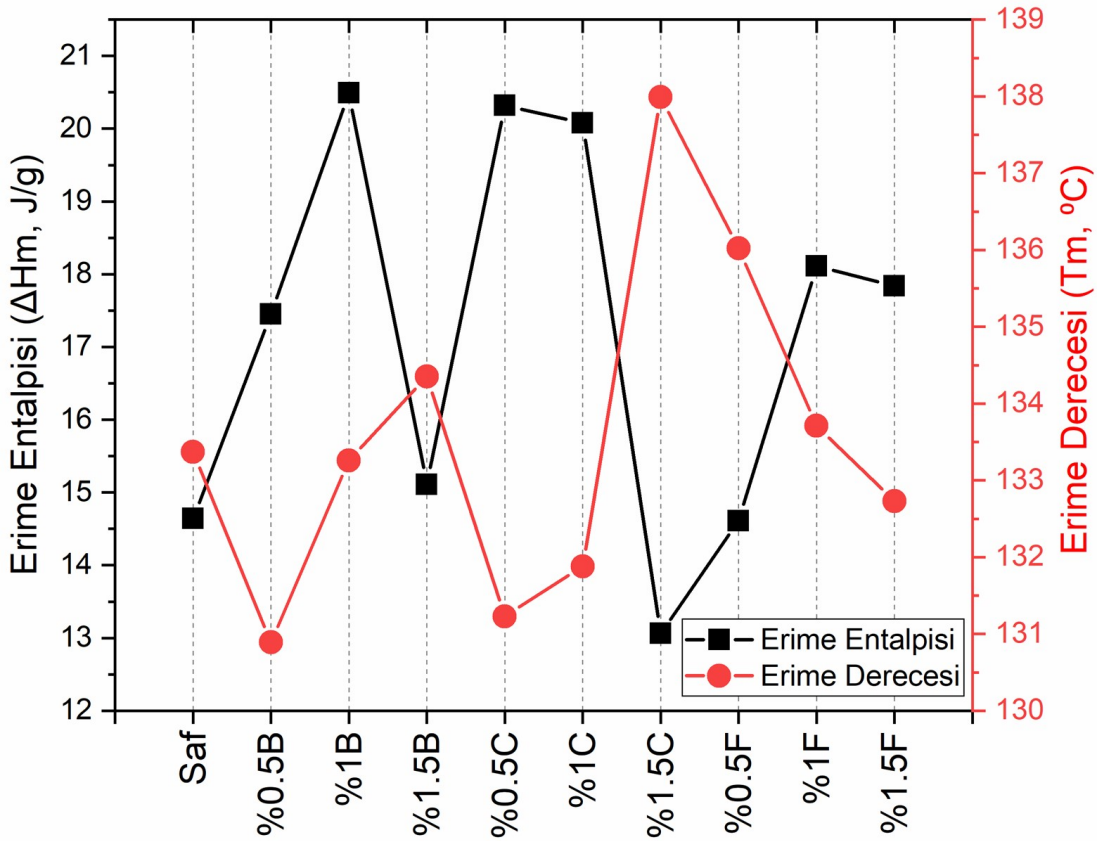
Şekil 4.8. Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DSC eğimleri

Fındık kabuğu tozu katkılı numunelerde erime sıcaklıkları 132.73 °C-136.02 °C aralığında gözlenirken, erime entalpisi değerleri 14.61 J/g ile 18.11 J/g arasında kalmıştır. Bu sonuçlar, fındık kabuğu partiküllerinin polimer kristal yapısı üzerinde diğer katkılara göre daha az etkili olduğunu göstermektedir. Fındık kabuğu tozu katkılı numunelerin DSC eğimleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

DSC eğrilerinin analizi, tüm katkılı numunelerde erime piklerinin genişlemesi, polimerin kristal yapısında yer yer heterojenlik oluştuğuna işaret etmektedir (Murayama ve ark., 2021). Özellikle %1.5 ceviz kabuğu tozu katkılı numunede gözlenen 137.99 °C’lik yüksek erime sıcaklığı, bu malzemenin termal uygulamalar için potansiyel avantaj sağlayabileceğini düşündürmektedir. Erime entalpisi ve Erime Derecesi karşılaştırmasında Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Fındık kabuğu katkıli HDPE kompozitlerin DSC eğimleri



Şekil 4.10. Numunelerin erime entalpisi ve erime derecesi karşılaştırması

4.1.4. TGA test sonuçları

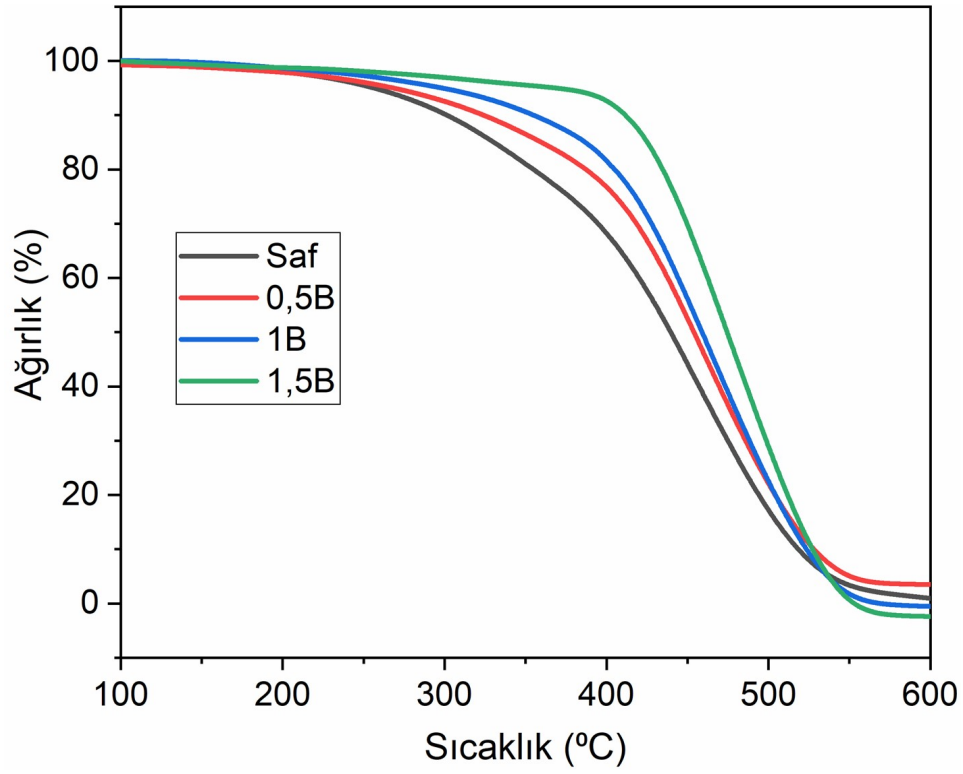
Termal gravimetrik analiz (TGA) sonuçları, kompozit malzemelerimizin termal kararlılığı ve bozunma davranışı hakkında kritik bilgiler sunmaktadır. TGA testleri sonucunda elde edilen Başlangıç Bozulma Derecesi ($^{\circ}\text{C}$), Tepe Bozulma Derecesi ($^{\circ}\text{C}$) ve Kalan Kütle ($\%$, 535°C 'de) sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. TGA test sonuçları

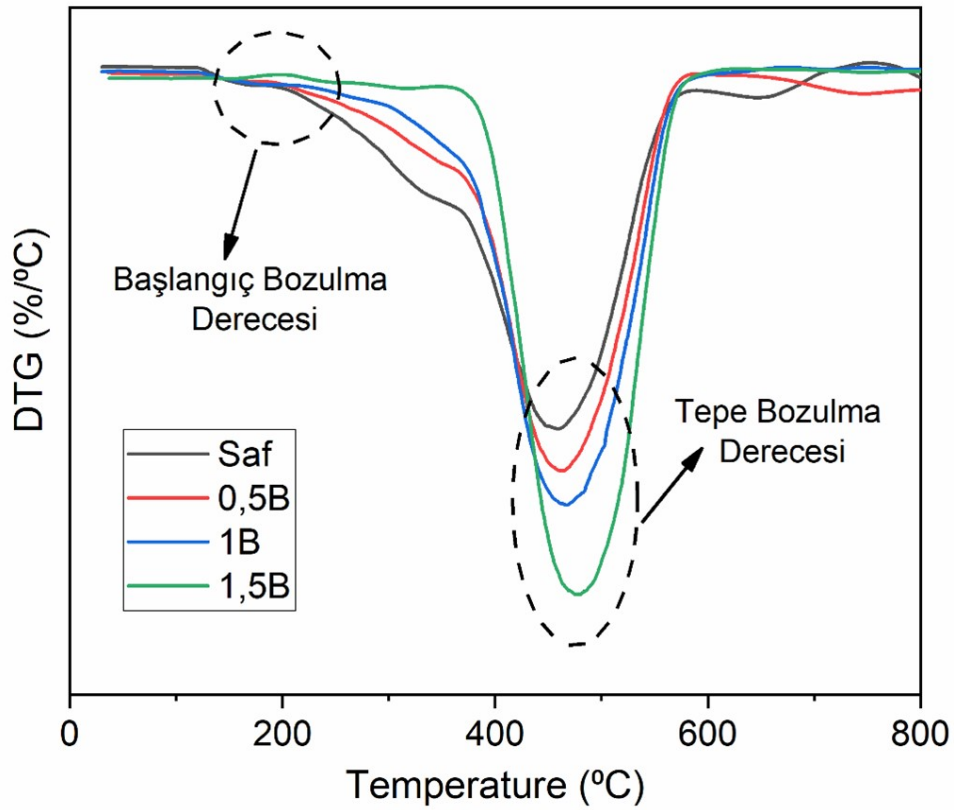
	Başlangıç Bozulma Derecesi ($^{\circ}\text{C}$)	Tepe Bozulma Derecesi ($^{\circ}\text{C}$)	Kalan Kütle ($\%$, 535°C 'de)
Saf	119,82	457,12	5,57
0,5B	121,73	461,67	7,95
1B	124,94	466,47	5,41
1,5B	207,63	478,45	5,81
0,5C	124,55	475,44	6,34
1C	210,92	472,12	2,47
1,5C	166,21	474,92	6,84
0,5F	245,04	459,07	0,87
1F	193,77	474,06	NA
1,5F	183,34	474,81	NA

Saf HDPE numunesinin bozunma davranışı incelendiğinde, başlangıç bozunma sıcaklığının 119.82°C ve tepe bozunma sıcaklığının 457.12°C olduğu, 535°C 'de ise $\%5.57$ kalan kütle gözlemlenmiştir. Bu değerler, saf HDPE'nin karakteristik termal davranışıyla uyumludur.

Badem kabuğu tozu katkılı numunelerde dikkat çekici bir termal stabilite artışı gözlenmiştir. $\%0.5\text{B}$ numunesinde başlangıç bozunma sıcaklığı 121.73°C 'ye yükselirken, bu artış $\%1.5\text{B}$ numunesinde 207.63°C 'ye kadar ulaşmıştır. Tepe bozunma sıcaklıkları ise 461.67°C 'den 478.45°C 'ye doğru belirgin bir artış göstermiştir. Bu sonuçlar, badem kabuğu tozunun yüksek selüloz içeriği ($\%45-55$) ve polimer matrisle oluşturduğu etkileşimler sayesinde termal stabiliteyi önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Kalan kütle yüzdelerindeki artış ($\%7.95$ 'e kadar) ise badem kabuğunun yüksek sıcaklıklarda karbonizasyon yeteneğiyle açıklanabilir (Debevc ve ark., 2022). Badem kabuğu tozu katkılı numunelerin TGA eğimleri Şekil 4.11'da DTG eğimleri ise Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

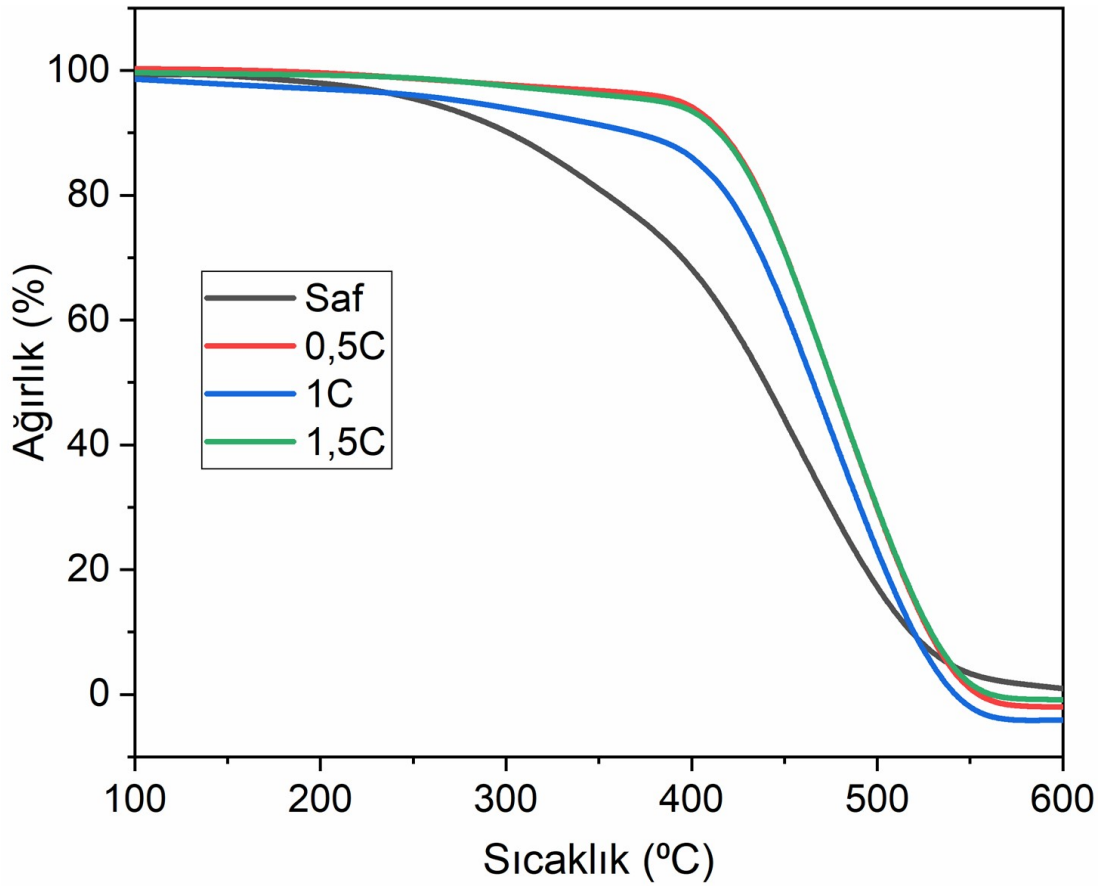


Şekil 4.11. Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin TGA eğimleri

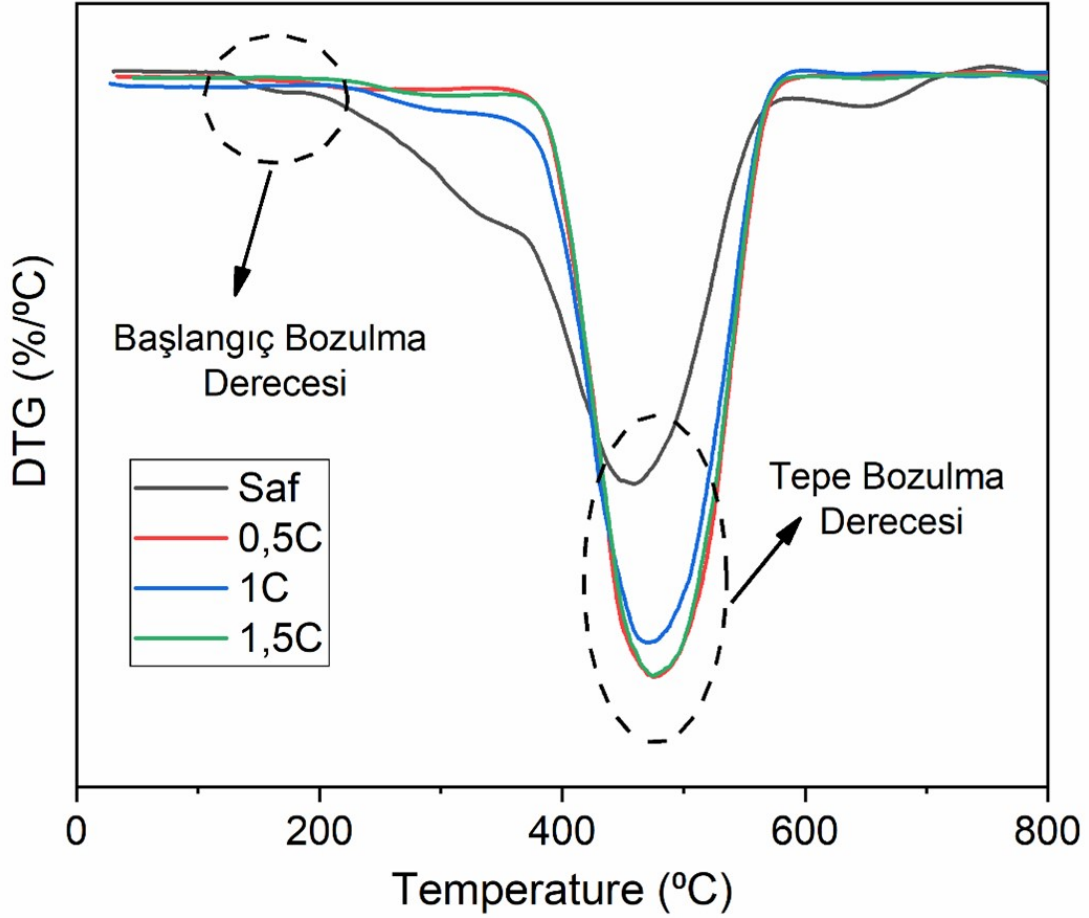


Şekil 4.12. Badem kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DTG eğimleri

Ceviz kabuğu tozu katkılı numunelerde ise özellikle %1 katkı oranlarında belirgin bir stabilite artışı dikkat çekmektedir. %1C numunesinde başlangıç bozunma sıcaklığı 210.92 °C'ye kadar yükselmiştir ki bu, saf HDPE'ye kıyasla yaklaşık 91 °C'lik bir iyileşmeyi temsil etmektedir. Tepe bozunma sıcaklıkları 472.12 °C-475.44 °C aralığında seyretmiş olup, bu değerler ceviz kabuğunun yüksek lignin içeriğinin (%30-35) termal dayanım üzerindeki olumlu etkisini yansıtmaktadır (Karagöz ve ark., 2024). Kalan kütle değerlerinin %2.47 ile %6.84 arasında değişmesi ise katkı oranına bağlı olarak bozunma mekanizmalarında farklılıklar olduğunu düşündürmektedir. Ceviz kabuğu tozu katkılı numunelerin TGA eğimleri Şekil 4.13'de DTG eğimleri ise Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



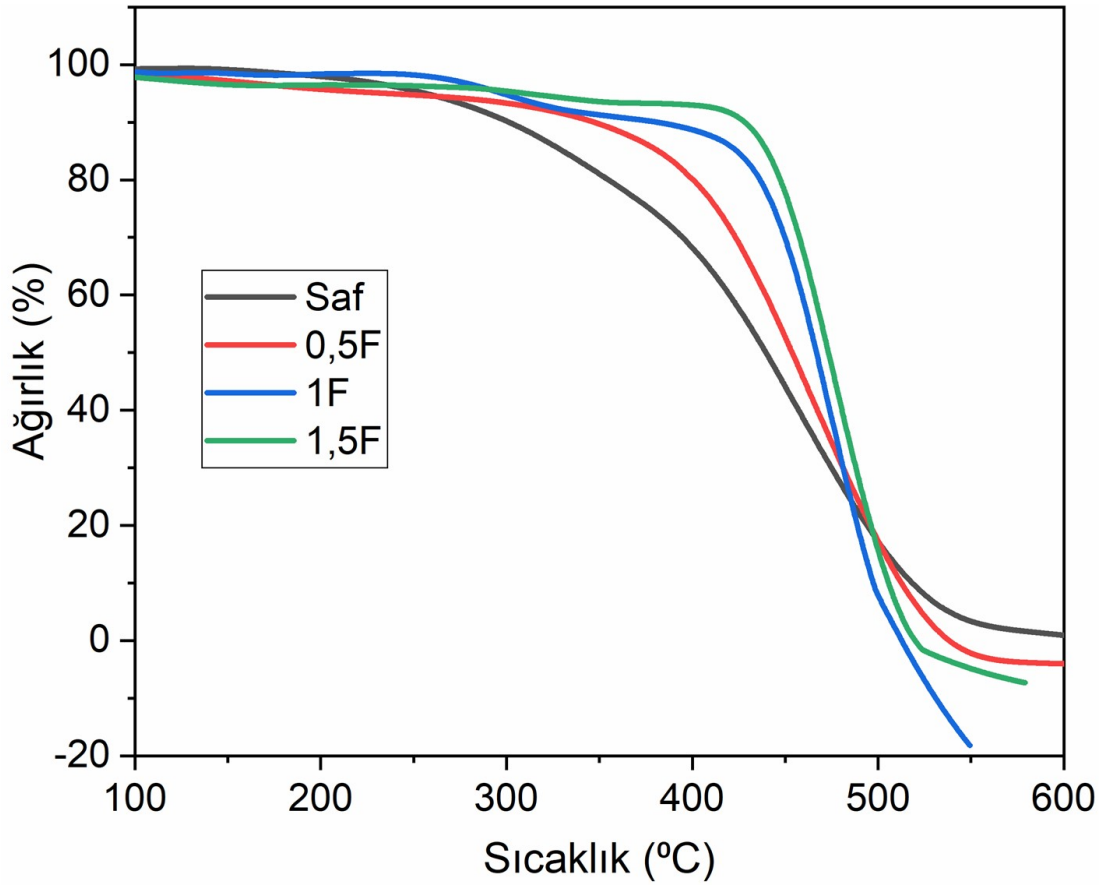
Şekil 4.13. Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin TGA eğimleri



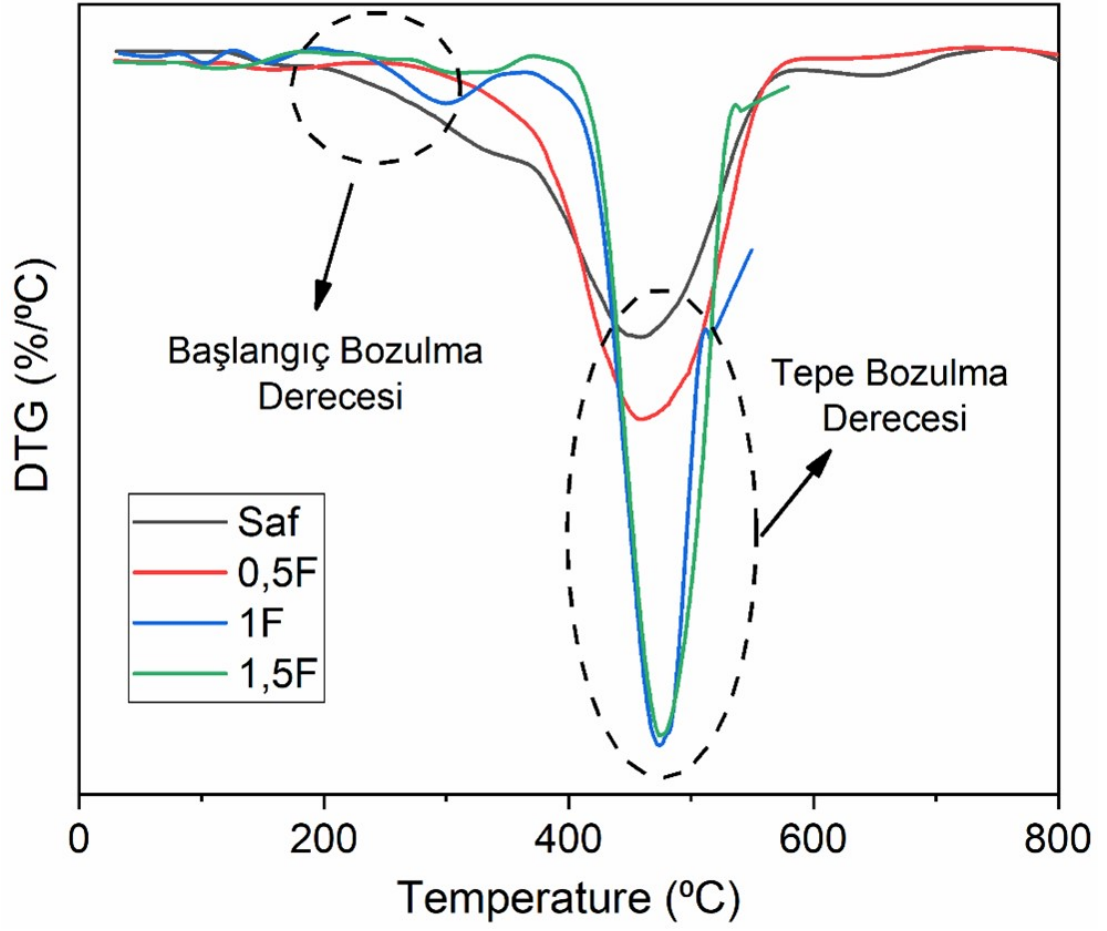
Şekil 4.14. Ceviz kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DTG eğimleri

Fındık kabuğu tozu katkılı numuneler, TGA sonuçlarında en ilginç davranışı sergilemiştir. %0.5F numunesinde başlangıç bozunma sıcaklığının 245.04°C gibi olağanüstü bir değere ulaşması, fındık kabuğunun eşsiz kimyasal kompozisyonu ve polimer matrisle kurduğu güçlü ara yüzey etkileşimleriyle açıklanabilir. Ancak ilginç bir şekilde, kalan kütle yüzdelерinin oldukça düşük olması (%0.87), bu malzemenin yüksek sıcaklıklarda neredeyse tamamen bozunduğunu göstermektedir. Bu durum, fındık kabuğunun organik bileşenlerinin yüksek sıcaklıklarda minimal karbon kalıntısı bırakacak şekilde bozunmasından kaynaklanmaktadır (Kaya ve ark., 2018). Fındık kabuğu tozu katkılı numunelerin TGA eğimleri Şekil 4.15'te DTG eğimleri ise Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

TGA eğrilerinin detaylı analizi, tüm katkılı numunelerde bozunma basamaklarında kaymalar ve yeni bozunma mekanizmalarının ortaya çıktığını göstermektedir. Özellikle %1.5B, %1C ve %0.5 F numunelerinde gözlenen 200°C üzerindeki başlangıç bozunma sıcaklıkları, bu kompozitlerin yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyel adaylar olduğunu düşündürmektedir. Bununla birlikte, kalan kütle değerlerindeki önemli farklılıklar, farklı tarımsal atık tozlarının bozunma mekanizmalarının da farklı olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.15. Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin TGA eğimleri



Şekil 4.16. Fındık kabuğu katkılı HDPE kompozitlerin DTG eğimleri

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, tarımsal atık tozları (badem, ceviz ve fındık kabuğu) ile takviye edilmiş HDPE kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu doğal dolgu maddelerinin polimer matrisin performansını çok yönlü olarak iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

Mekanik test sonuçları, tüm katkı türlerinin çekme ve eğilme özelliklerinde kayda değer iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Özellikle %1.5 oranındaki fındık kabuğu tozu katkısı, çekme dayanımını %9.4 (18.99 MPa) ve eğilme dayanımını %11.9 (24.05 MPa) artırmıştır. Bu gelişme, fındık kabuğunun yüksek lignoselülozik içeriği ve matrisle kurduğu güçlü ara yüzey bağlarıyla açıklanabilir. Elastisite modülündeki artışlar ise katkı partiküllerinin polimer zincirlerinin hareketliliğini kısıtlayarak rijitliği artırmasından kaynaklanmaktadır.

Termal analizler, kompozitlerin ısıl kararlılığında da önemli iyileşmeler olduğunu ortaya koymuştur. DSC sonuçları, katkı maddelerinin polimerin kristal yapısını modifiye ettiğini göstermektedir. Özellikle %1.5C numunesinde 137,99°C'lik erime sıcaklığı ve %0.5F numunesinde 245,04 °C'lik başlangıç bozunma sıcaklığı, bu malzemelerin yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyelini ortaya koymaktadır. TGA sonuçlarına göre, doğal toz katkıları başlangıç bozunma sıcaklıklarını saf HDPE'ye kıyasla 125°C'ye kadar artırabilmektedir.

Termal özelliklerdeki iyileşmeler iki temel mekanizmayla ilişkilendirilebilir: (1) Doğal tozların yüksek selüloz ve lignin içeriğinin termal kararlılığı artırması, (2) Partikül-matris ara yüzeyinde oluşan etkileşimlerin bozunma enerjisini yükseltmesi.

Sonuç olarak, bu çalışma tarımsal atık tozlarının polimer kompozitlerde başarıyla kullanılabileceğini ve hem mekanik hem de termal özellikleri eşzamanlı olarak iyileştirebileceğini göstermiştir. Özellikle fındık kabuğu tozu katkılı kompozitler, yüksek performanslı, sürdürülebilir ve düşük maliyetli malzeme alternatifleri olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, endüstriyel uygulamalarda doğa dostu kompozit malzemelerin kullanımını teşvik edecek niteliktedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, badem, ceviz ve fındık kabuğu tozlarıyla takviye edilmiş HDPE kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel bulgular, bu tarımsal atık kökenli doğal tozların polimer matrisin performansını çok yönlü olarak iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Mekanik test sonuçları, özellikle %1.5 oranında fındık kabuğu tozu katkısının çekme dayanımını %9.4, eğilme dayanımını ise %11.9 oranında artırdığını göstermiştir. Bu performans artışı, fındık kabuğunun lignoselülozik yapısı ve matrisle kurduğu güçlü ara yüzey etkileşimleriyle açıklanabilir. Elastisite modülündeki iyileşmeler ise katkı partiküllerinin polimer zincir hareketliliğini kısıtlayarak rijitliği artırmasından kaynaklanmaktadır.

Termal analizler, kompozitlerin ısı kararlılığında da önemli gelişmeler olduğunu ortaya koymuştur. TGA sonuçları, doğal toz katkılarının başlangıç bozunma sıcaklıklarını saf HDPE'ye kıyasla 125°C'ye kadar artırabildiğini göstermiştir. DSC analizleri ise katkı maddelerinin polimerin kristal yapısını modifiye ettiğini ve erime davranışını değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın sonuçları, tarımsal atık tozlarının:

1. Polimer kompozitlerin mekanik dayanımını önemli ölçüde artırabileceğini,
2. Termal kararlılığı iyileştirebileceğini,
3. Sürdürülebilir ve çevre dostu malzeme alternatifleri sunabileceğini,
4. Düşük maliyetli yüksek performanslı kompozit üretimine olanak tanıyabileceğini göstermektedir.

7. ÖNERİLER

Bu çalışmanın sonuçları ışığında, tarımsal atık tozlarıyla takviye edilen polimer kompozitlerin geliştirilmesine yönelik aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. Yüzey Modifikasyon Tekniklerinin Uygulanması: Katkı tozlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla alkali muamele, silan kaplama veya maleik anhidrit modifikasyonu gibi yöntemlerin etkileri araştırılmalıdır.
2. Yüksek Katkı Oranlarının İncelenmesi: Bu çalışmada %1.5'e kadar olan katkı oranlarının etkileri incelenmiş olup, özellikle %3-5 gibi daha yüksek oranlarda malzeme davranışının nasıl değiştiğinin araştırılması önem taşımaktadır.
3. Hibrit Katkı Sistemlerinin Geliştirilmesi: Farklı tarımsal atık tozlarının (örneğin badem+findık kabuğu) birlikte kullanımının sinerjik etkileri araştırılmalıdır. Hibrit sistemlerin, tekli katkı sistemlerine göre mekanik ve termal özelliklerde daha iyi performans sergileyebileceği düşünülmektedir.
4. Uzun Dönemli Performans Değerlendirmesi: Kompozitlerin çevresel koşullar altında (nem, UV ışınımı, sıcaklık dalgalanmaları vb.) uzun süreli performanslarının incelenmesi için hızlandırılmış yaşlandırma testleri yapılmalıdır. Bu testler, malzemelerin gerçek uygulama koşullarındaki dayanıklılığını değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.
5. Mikroyapısal Karakterizasyon Çalışmaları: Geliştirilen kompozitlerin mikro ve nano ölçekte karakterizasyonu için ileri görüntüleme teknikleri (SEM, TEM, AFM) kullanılarak partikül-matris ara yüzey etkileşimleri detaylı olarak incelenmelidir.
6. Ekonomik Analiz Çalışmaları: Bu kompozitlerin endüstriyel üretiminin ekonomik fizibilitesinin detaylı olarak incelenmesi ve geleneksel kompozitlerle maliyet karşılaştırmasının yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbas-Abadi, M. S., Zayoud, A., Kusenber, M., Roosen, M., Vermeire, F., Yazdani, P., Van Waeyenberg, J., Eschenbacher, A., Hernandez, F. J. A., Kuzmanović, M., Dao Thi, H., Kresovic, U., Sels, B., Van Puyvelde, P., De Meester, S., Saeys, M. ve Van Geem, K. M. (2022) “Thermochemical recycling of end-of-life and virgin HDPE: A pilot-scale study”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 166.
- Šupová, M., Martynková, G. S. ve Barabaszová, K. (2011) “Effect of Nanofillers Dispersion in Polymer Matrices: A Review”, *Science of Advanced Materials*, 3(1), 1–25.
- Abu-Jdayil, B., Mourad, A. H. ve Hassan, M. (2018) “Development of polymeric heat insulators based on emirati red shale filler: Thermal and physical properties”, *Polymer Composites*, 39, E1463–E1473.
- Açıkbas, G. (2018) “Interfacial and physico-mechanical properties of walnut shell fiber reinforced polyester matrix composites”, *Materialpruefung/Materials Testing*, 60(5), 510–518.
- Adeosun, S. O., Lawal, G. I., Balogun, S. A. ve Akpan, E. I. (2012) “Review of Green Polymer Nanocomposites”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11(04), 385–416.
- Akkouri, N., Bourzik, O., Baba, K. ve Tayeh, B. A. (2022) “Thermophysical characteristics of eco-friendly mortars containing recycled PET as partial sand replacement in dry and wet conditions”, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4).
- Alshgari, R. A., Anandaram, H., Kistan, A., Nisha, N., Vel, V. M., Anitha, G., Wabaidur, S. M., Islam, M. A. ve Alemayehu, A. (2022) “Experimental Investigations on the Mechanical Characteristics of Natural Fiber Particle-Reinforced Polymer Composites under Cryogenic Environment”, *Journal of Nanomaterials*, 2022.
- Andreev, P., Drozhilkin, P., Alekseeva, L., Smetanina, K., Rostokina, E., Balabanov, S., Boldin, M., Murashov, A. ve Shcherbak, G. (2023) “Spark Plasma Sintering of Si₃N₄ Ceramics with Y₂O₃–Al₂O₃ (3%–10% wt.) as Sintering Additive”, *Coatings*, 13(2), 240.
- Angra, D. K. (2023) “A Comprehensive Review of Formulations, Polymers, Fibers, and Fillers for Enhanced Mechanical and Thermal Performance”, *International Journal For Multidisciplinary Research*, 5(6).
- Ashori, A. ve Nourbakhsh, A. (2010) “Bio-based composites from waste agricultural residues”, *Waste Management*, 30(4), 680–684.
- Asim, M., Saba, N., Jawaid, M. ve Nasir, M. (2018) “Potential of natural fiber/biomass filler-reinforced polymer composites in aerospace applications”, *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, 253–268.
- Athijayamani, A., Jose, A. S., Ramanathan, K. ve Sidhardhan, S. (2017) “Effects of

- Addition of Prosopis Juliflora Fiber on the Physical and Mechanical Properties of Wood Dust and Coir Pith Particle Reinforced Phenol Formaldehyde Hybrid Composite”, *JOURNAL OF ADVANCES IN CHEMISTRY*, 13(10), 6558–6562.
- Awan, M. O., Shakoor, A., Rehan, M. S. ve Gill, Y. Q. (2021) “Development of HDPE composites with improved mechanical properties using calcium carbonate and NanoClay”, *Physica B: Condensed Matter*, 606, 412568.
- Babbar, A., Jain, V., Gupta, D., Prakash, C. ve Sharma, A. (2020) “Fabrication and Machining Methods of Composites for Aerospace Applications”, *Characterization, Testing, Measurement, and Metrology*. First edition. | Boca Raton : CRC Press, 2020. |, 109–124.
- Balart, J. F., García-Sanoguera, D., Balart, R., Boronat, T. ve Sánchez-Nacher, L. (2018) “Manufacturing and properties of biobased thermoplastic composites from poly(lactid acid) and hazelnut shell wastes”, *Polymer Composites*, 39(3), 848–857.
- Barczewski, M, Sałasińska, K. ve Szulc, J. (2019) “Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites”, *Polymer Testing*, 75, 1–11.
- Barczewski, Mateusz, Sałasińska, K. ve Szulc, J. (2019) “Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behavior related to structural and rheological properties”, *Polymer Testing*, 75, 1–11.
- Barkoula, N. M., Garkhail, S. K. ve Peijs, T. (2010) “Biodegradable composites based on flax/polyhydroxybutyrate and its copolymer with hydroxyvalerate”, *Industrial Crops and Products*, 31(1), 34–42.
- Begum, S., Fawzia, S. ve Hashmi, M. S. J. (2020) “Polymer matrix composite with natural and synthetic fibres”, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6(3), 547–564.
- Cabrera, F. C. (2021) “Eco-friendly polymer composites: A review of suitable methods for waste management”, *Polymer Composites*, 42(6), 2653–2677.
- Cawley, J. D. (2001) “Binary Oxide Ceramics: Al₂O₃, ZrO₂, Structure and Properties of”, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 524–533.
- Ceraulo, M., La Mantia, F. P., Mistretta, M. C. ve Titone, V. (2022) “The Use of Waste Hazelnut Shells as a Reinforcement in the Development of Green Biocomposites”, *POLYMERS*, 14(11), 2151.
- Chak, V., Chattopadhyay, H. ve Dora, T. L. (2020) “A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites”, *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1059–1074.
- Che, T., Meng, X.-Y., Yu, T., Guo, R.-F. ve Shen, P. (2025) “Fabrication and characterization of SiC-reinforced magnesium-matrix composites with honeycomb structures and anisotropic properties”, *Ceramics International*.

- Jilin Univ, Sch Mat Sci & Engn, Key Lab Automobile Mat, Minist Educ, 5988 Renmin St, Changchun 130025, Peoples R China, 51(1), 949–960.
- Cherkashina, N. I., Pavlenko, Z. V., Pushkarskaya, D. V., Denisova, L. V., Domarev, S. N. ve Ryzhikh, D. A. (2023) “Synthesis and Properties of Polystyrene Composite Material with Hazelnut Shells”, *Polymers*, 15(15), 3212.
- Cui, K., Zhang, Y., Fu, T., Wang, J. ve Zhang, X. (2020) “Toughening mechanism of mullite matrix composites: A review”, *Coatings*, 10(7).
- Debevc, S., Weldekidan, H., Snowdon, M. R., Vivekanandhan, S., Wood, D. F., Misra, M. ve Mohanty, A. K. (2022) “Valorization of almond shell biomass to biocarbon materials: Influence of pyrolysis temperature on their physicochemical properties and electrical conductivity”, *Carbon Trends*, 9, 100214.
- Dejene, B. K. ve Geletaw, T. M. (2024) “Development of fully green composites utilizing thermoplastic starch and cellulosic fibers from agro-waste: a critical review”, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(5), 540–569.
- Demirer, H., Kartal, İ., Yıldırım, A. ve Büyükkaya, K. (2018) “The utilisability of ground hazelnut shell as filler in polypropylene composites”, *Acta Physica Polonica A*, 134(1), 254–256.
- Dicker, M. P. M., Duckworth, P. F., Baker, A. B., Francois, G., Hazzard, M. K. ve Weaver, P. M. (2014) “Green composites: A review of material attributes and complementary applications”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 56, 280–289.
- Dixit, S., Goel, R., Dubey, A., Shivhare, P. R. ve Bhalavi, T. (2017) “Natural fibre reinforced polymer composite materials - A review”, *Polymers from Renewable Resources*, 8(2), 71–78.
- Essabir, H., Nekhlaoui, S., Malha, M., Bensalah, M. O., Arrakhiz, F. Z., Qaiss, A. ve Bouhfid, R. (2013) “Bio-composites based on polypropylene reinforced with almond shells particles: mechanical and thermal properties”, *Mat Des*, 51, 225–230.
- Essabir, H., Hilali, E. ve Elgharad, A. (2013) “Mechanical and thermal properties of bio-composites based on polypropylene reinforced with nut-shells of Argan particles”, *Materials and Design*, 49, 442–448.
- Fan, J. ve Njuguna, J. (2016) “An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures”, *Lightweight Composite Structures in Transport*, 3–34.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P. ve Sain, M. (2012) “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010”, *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596.
- Faruk, Omar, Bledzki, A. K., Fink, H.-P. ve Sain, M. (2012) “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010”, *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596.

- François Christin (2008) “CMC Materials for Space and Aeronautical Applications”, *Ceramic Matrix Composites: Fiber Reinforced Ceramics and their Applications*. Editör Walter Krenkel, 327–349.
- Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B. ve Mai, Y. W. (2008) “Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites”, *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 933–961.
- Ganesan, V. ve Kaliyamoorthy, B. (2022) “Utilization of Taguchi technique to enhance the Interlaminar shear strength of wood dust filled woven jute fiber reinforced polyester composites”, *Journal of Natural Fibers*, 19(6), 1990–2001.
- Ganesan, V. ve Kaliyamoorthy, B. (2020) “Utilization of Taguchi Technique to Enhance the Interlaminar Shear Strength of Wood Dust Filled Woven Jute Fiber Reinforced Polyester Composites in Cryogenic Environment”, *Journal of Natural Fibers*, 1–12.
- Greene, J. P. (2021) “Polymer Composites”, *Automotive Plastics and Composites*, 191–222.
- Gunasekaran, K., Annadurai, R. ve Kumar, P. S. (2012) “Long term study on compressive and bond strength of coconut Shell aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, 28(1), 208–215.
- Guo, Q., Han, Y. ve Zhang, D. (2020) “Interface-dominated mechanical behavior in advanced metal matrix composites”, *Nano Materials Science*, 2(1), 66–71.
- Güngör, A., Akbay, I. K. ve Özdemir, T. (2019) “Waste walnut shell as an alternative bio-based filler for the EPDM: mechanical, thermal, and kinetic studies”, *J Mater Cycles Waste Manage*, 21(1), 145–155.
- Gürbüz, M., Can Şenel, M. ve Koç, E. (2018) “The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites”, *Journal of Composite Materials*, 52(4), 553–563.
- Gürü, M., AKYÜZ Emin AKIN, Y., Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği, G., Üniversitesi, G., Bilimleri Enstitüsü, F. ve Teknolojiler Anabilim Dalı, leri (2005) “Mermer Tozu/Polyester Kompozitlerde Dolgu Oranının Mekanik Özelliklere Etkileri”, *Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt*, 8(8), 271–274.
- Gürü, M., Atar, M. ve Yildirim, R. (2008) “Production of polymer matrix composite particleboard from walnut shell and improvement of its requirements”, *Materials and Design*, 29(1), 284–287.
- Güzel, K., Jawaid, M., Hadi A., A. and H., Boonsuk, P., Khan, M. Z., Ramesh, M., Yahaya, R., Das A., M. and S., Uddin, F. ve Rana, S. (2021) “Mechanical Properties of Chemically Treated Walnut Shell Reinforced Polypropylene Composites”, *Journal of Natural Fibers*, 18(5), 734–743.
- Haghshenas, M. (2016) “Metal–Matrix Composites”, *Reference Module in Materials*

Science and Materials Engineering.

- Hooker, J. A. ve Doorbar, P. J. (2000) “Metal matrix composites for aeroengines”, *Materials Science and Technology*, 16(7–8), 725–731.
- Hunt, W. H. (2000) “Metal Matrix Composites”, *Comprehensive Composite Materials*, 57–66.
- Ibadi, M., Supriadi, S., Purnomo, H., Setianto, M. H., Wibowo, H. B. ve Whulanza, Y. (2025) “Challenges and innovative solutions in fabrication of ceramic matrix composite for ultra high-temperature application”, *Science of Sintering*, (00), 14–14.
- Jesuarockiam, N., Jawaid, M., Zainudin, E. S., Hameed Sultan, M. T. ve Yahaya, R. (2019) “Enhanced thermal and dynamic mechanical properties of synthetic/natural hybrid composites with graphene nanoplatelets”, *Polymers*, 11(7).
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T. ve Cardona, F. (2012) “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview”, *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883–2892.
- Karagöz, İ, Büyükkaya, K., Demirer, H., Mudu, M. ve Kartal, I. (2024) “Mechanical and thermal characterization of elastomer modified polypropylene hybrid composites reinforced with hazelnut shell and wollastonite fillers”, *Journal of Applied Polymer Science*, 141(30), e55710.
- Karagöz, İdris, Tamer, İ. M., Çavuşoğlu, A. ve Sepetcioglu, H. (2024) “Investigation of mechanical, thermal, and morphological properties of walnut shell and nano clay reinforced HDPE composites”, *Materials Today Communications*, 41, 110905.
- Kaya, N., Yıldız, Z. ve Ceylan, S. (2018) “Preparation and characterisation of biochar from hazelnut shell and its adsorption properties for methylene blue dye”, *Politeknik Dergisi*, 21(4), 765–776.
- Kılınç, İ. ve Korkmaz, M. (2024) “Agricultural Waste-Based Composite Materials: Recycling Processes, Technical Properties, and Industrial Applications”, *European Journal of Technique (EJT)*, 14(2), 136–145.
- Koli, D. K., Agnihotri, G. ve Purohit, R. (2014) “A Review on Properties, Behaviour and Processing Methods for Al- Nano Al₂O₃ Composites”, *Procedia Materials Science*, 6(Icmpe), 567–589.
- Kopeliovich, D. (2014) “Advances in the manufacture of ceramic matrix composites using infiltration techniques”, *Advances in Ceramic Matrix Composites*, 79–108.
- Laha, T. (2009) “A Review of: ‘Ceramic Matrix Composites, Walter Krenel (Ed.)’”, *Materials and Manufacturing Processes*, 24(2), 240–241.
- Lamon, J. (2014) “Influence of Interfaces and Interphases on the Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Ceramic Matrix Composites”, *Wiley Blackwell*

6, 9781118231166, 40–64.

- Laurichesse, S. ve Avérous, L. (2014) “Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers”, *Progress in Polymer Science*, 39(7), 1266–1290.
- Li, C., Chen, H., Shi, H., Tade, M. O. ve Shao, Z. (2015) “Green fabrication of composite cathode with attractive performance for solid oxide fuel cells through facile inkjet printing”, *Journal of Power Sources*, 273, 465–471.
- Mallick, P. K. (2012) “Advanced materials for automotive applications: An overview”, *Advanced Materials in Automotive Engineering*, 5–27.
- Mallick, P. K. (2010) “Thermoplastics and thermoplastic–matrix composites for lightweight automotive structures”, *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, 174–207.
- Mann, G. S., Singh, L. P., Kumar, P. ve Singh, S. (2020) “Green composites: A review of processing technologies and recent applications”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33(8), 1145–1171.
- Manohar, G., Dey, A., Pandey, K. M. ve Maity, S. R. (2018) “Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review”, *AIP Conference Proceedings*, 1952(1).
- Mohamed, M. G., El-Mahdy, A. F. M., Kotp, M. G. ve Kuo, S. W. (2022) “Advances in porous organic polymers: syntheses, structures, and diverse applications”, *Materials Advances*, 3(2), 707–733.
- Monteiro, S. N., de Assis, F. S., Ferreira, C. L., Simonassi, N. T., Weber, R. P., Oliveira, M. S., Colorado, H. A. ve Pereira, A. C. (2018) “Fique fabric: A promising reinforcement for polymer composites”, *Polymers*, 10(3).
- Murayama, T., Abe, E. ve Saito, H. (2021) “Strengthening of mille-feuille structured high-density polyethylene by heat elongation”, *Polymer*, 236, 124343.
- Mussatto, A., Ahad, I. U. I., Mousavian, R. T., Delaure, Y. ve Brabazon, D. (2021) “Advanced production routes for metal matrix composites”, *Engineering Reports*, 3(5), e12330.
- Mylsamy, B., Shanmugam, S. K. M., Aruchamy, K., Palanisamy, S., Nagarajan, R. ve Ayrilmis, N. (2024) “A review on natural fiber composites: Polymer matrices, fiber surface treatments, fabrication methods, properties, and applications”, 64(6), 2345–2373.
- Naghdi, R. (2021) “Advanced natural fibre-based fully biodegradable and renewable composites and nanocomposites: a comprehensive review”, *International Wood Products Journal*, 12(3), 178–193.
- Najafi, S. K., Hamidinia, E. ve Tajvidi, M. (2006) “Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics”, *Journal of Applied Polymer Science*, 100(5), 3641–3645.
- Naslain, R. R. ve Pomeroy, M. (2016) “Ceramic Matrix Composites: Matrices and Processing”, *Reference Module in Materials Science and Materials*

Engineering.

- Nawang, R., Danjaji, I. D., Ishiaku, U. S., Ismail, H. ve Mohd Ishak, Z. A. (2001) "Mechanical properties of sago starch-filled linear low density polyethylene (LLDPE) composites", *Polymer Testing*, 20(2), 167–172.
- Papageorgiou, Z., Brlekovi'cbrlekovi'c, F., Mužina, K., Haramina, T. ve Kurajica, S. (2025) "Waste Nutshell Particulate Biocomposites with Geopolymer Matrix", *Biomass 2025, Vol. 5, Page 31*, 5(2), 31.
- Parikh, V. K., Patel, V., Pandya, D. P. ve Andersson, J. (2023) "Current status on manufacturing routes to produce metal matrix composites: State-of-the-art", *Heliyon*, 9(2).
- Pradhan, P., Nanda, B. P. ve Satapathy, A. (2020) "Polyester composites filled with walnut shell powder: Preparation and thermal characterization", *Polymer Composites*, 41(8), 3294–3308.
- Pradhan, P. ve Satapathy, A. (2022) "Physico-mechanical characterization and thermal property evaluation of polyester composites filled with walnut shell powder", *Polymers and Polymer Composites*, 30, 77808.
- Qin, Q., Han, L., Xiong, G., Guo, Z., Huang, J., Zhang, Y., Shen, Z. ve Ge, C. (2024) "Impact of Sintering Aid Type and Content on the Mechanical Properties of Digital Light Processing 3D-Printed Si₃N₄ Ceramics", *Materials*. Univ Sci & Technol Beijing, Inst Powder Met & Adv Ceram, Sch Mat Sci & Engn, Beijing 100083, Peoples R China, 17(23), 5830.
- Quiles-Carrillo, L., Montanes, N., Garcia-Garcia, D., Carbonell-Verdu, A., Balart, R. ve Torres-Giner, S. (2018) "Effect of different compatibilizers on injection-molded green composite pieces based on polylactide filled with almond shell flour", *Composites Part B: Engineering*, 147, 76–85.
- Radhika, N., Sam, M., Sathishkumar, M., Kavimani, V. ve Pramanik, A. (2023) "Periodic advancement of aluminium metal matrix composites: tribo-mechanical performance, corrosion properties, challenges and future", *Advances in Materials and Processing Technologies*, 10(3), 1–24.
- Raj, P., Biju, P. L., Deepanraj, B. ve Menachery, N. (2023) "A systematic review on characterization of hybrid aluminium nanocomposites", *Materials Today: Proceedings*, 72, 2139–2150.
- Rajak, D. ; K. ;, Joshi, T ;, Singh, D. K. ;, Mondal, D. P., Fantozzi, G., Halloran, J. W., Shrivastava, S., Kumar Rajak, D., Joshi, Tilak ve Singh, D. K. (2024) "Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications", *Ceramics 2024, Vol. 7, Pages 652-679*, 7(2), 652–679.
- Rohan, T., Tushar, B. ve Mahesha, G. T. (2018) "Review of natural fiber composites", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 314(1).
- Salasinska, K. ve Ryszkowska, J. (2012) "Natural fibre composites from polyethylene waste and hazelnut shell: dimensional stability, physical,

- mechanical and thermal properties”, *COMPOSITE INTERFACES*, 19(5), 321–332.
- Sankhla, A. ve Patel, K. M. (2022) “Metal Matrix Composites Fabricated by Stir Casting Process—A Review”, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(2), 1270–1291.
- Santulli, C., Palanisamy, S. ve Dharmalingam, S. (2023) “Natural Fibres-Based Bio-Epoxy Composites: Mechanical and Thermal Properties”, *Epoxy-Based Biocomposites*, 163–176.
- Singh Bisht, A., Dhanola, A., Arya, P. K. ve Gupta, A. (2022) “Effect of walnut shell particulate content and size on Physico-Mechanical properties of hybrid glass fiber composite”, *Materials Today: Proceedings*, 62(P14), 7407–7414.
- Sivakumar, A., Srividhya, S., Prakash, R. ve Subbarayan, M. R. (2024) “Exploring the effects of eco-friendly and biodegradable biocomposite with PLA incorporating eggshell and walnut powder as fillers”, *Global Nest Journal*, 26(3), 1–6.
- Sreenivasulu, B., Ramji, B. R. ve Nagaral, M. (2018) “A Review on Graphene Reinforced Polymer Matrix Composites”, *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2419–2428.
- Srivastava, M., Srivastava, A., Jangid, N. K., Yadav, A. ve Sunidhi (2024) “Classification and Application of Advanced Composite Materials”, 1–36.
- Stojanovic, B. ve Glisovic, J. (2021) “Application of Ceramic Matrix Composite in Automotive Industry”, *Encyclopedia of Materials: Composites*, 2, 275–292.
- Tian, Z., Wang, Y., Zhang, Z., Duan, X., Jia, D. ve Wu, S. (2020) “Preparation of highly oriented h-BN based textured ceramics via grain rearrangement under DLP printing and low-pressure sintering”, *Materials Letters*. Guangdong Univ Technol, Sch Electromech Engr, Guangzhou 510006, Guangdong, Peoples R China, 268, 127584.
- Velmurugan, G., Vigneshwaran, S. ve Babu, K. (2021) “Optimization of mechanical properties in saw-dust/woven-jute fibre/ polyester structural composites under cryogenic conditions”, *Polymers*, 13(15), 2471.
- Venkataravanappa, R. Y., Lakshmikanthan, A., Kapilan, N., Chandrashekarappa, M. P. G., Der, O. ve Ercetin, A. (2023) “Physico-Mechanical Property Evaluation and Morphology Study of Moisture-Treated Hemp–Banana Natural-Fiber-Reinforced Green Composites”, *Journal of Composites Science*, 7(7).
- Włodarczyk-Fligier, A. ve Polok-Rubiniec, M. (2021) “Studies of resistance of PP/natural filler polymer composites to decomposition caused by fungi”, *Materials*, 14(6).
- Xue, T., Attarilar, S., Liu, S., Liu, J., Song, X., Li, L., Zhao, B., Tang, Y., Tongtong, X., Shokouh, A., Shi-feng, L., Jia, L., Xi, S., Lanjie, L., Beibei, Z. ve Yujin, T. (2020) “Surface Modification Techniques of Titanium and its Alloys to Functionally Optimize Their Biomedical Properties: Thematic Review”,

Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8.

- Yildirim, A. ve Acay, H. (2021) “Applications of Biodegradable Green Composites”, *Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*, 373–392.
- Yildirim, K. (2020) “Evaluation of Hazelnut Shells in Polypropylene Based Polymer Composite Production”, *International Journal of Science and Society*, 2, 2020.
- Zhang, C. (2014) “Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites”, *Advances in Ceramic Matrix Composites*, 312–339.
- Zhang, H., Wu, J., Zhang, Y., Li, J. ve Wang, X. (2015) “Effect of Metal Matrix Alloying on Mechanical Strength of Diamond Particle-Reinforced Aluminum Composites”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(6), 2556–2562.
- Zhong, Z., Jiang, X., Sun, H., Wu, Z., Yang, L. ve Matamoros-Veloza, A. (2024) “Recent Research on the Optimization of Interfacial Structure and Interfacial Interaction Mechanisms of Metal Matrix Composites: A Review”, *Advanced Engineering Materials*, 26(23), 2401392.
- Zou, C., Ou, Y., Zhou, W., Li, Z., Zheng, P. ve Guo, X. (2024) “Microstructure and Properties of Hot Pressing Sintered SiC/Y3Al5O12 Composite Ceramics for Dry Gas Seals”, *Materials*, 17(5), 1182.