



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGİ
(Journal of YEKARUM)

Cilt 10, Sayı 2, 161-181, 2025
E - ISSN:1309-9388



Moda Endüstrisinde Sürdürülebilir Geleceğin Malzemesi: Nişasta Bazlı Biyoplastikler

Hülya Arabacı^{1*}, Kenan Saatçioğlu²

^{1*} Süleyman Demirel Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Sanat ve Tasarım Anasanat Dalı Sanatta Yeterlik Programı, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-2118-3013), arabacihulya@yandex.com

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Tekstil ve Moda Tasarımı Bölümü, Çanakkale, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-1026-1090), kenan.saatcioglu@comu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 05/11/2025 ve Kabul Tarihi 24/11/2025)

(DOI: 10,71208/yekarum.1818406)

ÖZET:

Küresel plastik üretiminin 370–393 milyon tona ulaşması, fosil bazlı plastiklerin yol açtığı karbon emisyonları ve mikroplastik kirliliğini kritik bir çevresel sorun haline getirmiştir. Bu bağlamda, mısır, patates ve manyok gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen nişasta bazlı biyoplastikler, biyolojik olarak parçalanabilir özellikleri ve düşük çevresel etkileriyle moda endüstrisi için önemli bir alternatif sunmaktadır. Uygun katkı maddeleri ve nanodoldurucularla mekanik dayanımı ve su direnci geliştirilebilen bu malzemelerin, yaşam döngüsü analizlerine göre sera gazı emisyonlarını %50–80, enerji kullanımını ise %20–60 oranında azalttığı rapor edilmektedir. Vegan deri, aksesuar ve ambalaj gibi uygulamalarda yaygınlaşan nişasta bazlı biyoplastikler, 2–6 hafta içinde kompostlanabilir olmalarıyla ekolojik avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, nem duyarlılığı ve endüstriyel ölçeklenebilirlik gibi sınırlamalar, daha ileri araştırmaları gerekli kılmaktadır. Bu çalışma, söz konusu biyoplastiklerin sürdürülebilir moda üretiminde döngüsel ekonomi ilkeleri kapsamında güçlü bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nişasta bazlı biyoplastikler; Sürdürülebilir moda; Döngüsel ekonomi

The Material of a Sustainable Future in the Fashion Industry: Starch-Based Bioplastics

ABSTRACT

The global production of plastics has reached 370–393 million tons annually, rendering the carbon emissions and microplastic pollution associated with fossil-based plastics a critical environmental challenge. In this context, starch-based bioplastics derived from renewable resources such as corn, potato, and cassava offer a promising alternative for the fashion industry due to their biodegradability and reduced environmental impact. When formulated with appropriate additives, nanofillers, and plasticizers, these materials exhibit improved mechanical strength, flexibility, and water resistance. Life cycle assessments indicate that starch-based bioplastics can reduce greenhouse gas emissions by 50–80% and energy consumption by 20–60% compared to conventional plastics. Widely applied in vegan leather, accessories, coatings, and packaging, they also provide ecological advantages

* Sorumlu yazar E-mail: arabacihulya@yandex.com

through their ability to compost within 2–6 weeks. However, challenges related to moisture sensitivity and industrial scalability highlight the need for further research and development. This study demonstrates that starch-based bioplastics hold significant potential as a sustainable material solution for fashion production within the framework of circular economy principles.

Keywords: *Starch-based bioplastics; Sustainable fashion; Circular economy*

1. GİRİŞ

Küresel plastik üretimi son on yıllarda hızla artmış ve 2019–2020 itibarıyla yıllık yaklaşık 370–393 milyon ton seviyesine ulaşmıştır. Mevcut tüketim eğilimlerinin sürmesi halinde bu miktarın önümüzdeki yirmi yıl içinde iki katına çıkması öngörülmektedir [1]–[3]. 1950’lerden bu yana yaklaşık 8.300 milyon ton birincil plastik üretilmiş; bunun sonucunda 6.300 milyon ton plastik atık oluşmuş, ancak bu atığın yalnızca %9’u geri dönüştürülmüş, yaklaşık %79’u ise depolama sahalarında birikmiş veya doğal çevreye karışmıştır [1], [3]. Plastik kirliliğine ilişkin artan farkındalığa rağmen, özellikle ambalaj, tekstil ve moda gibi yüksek tüketim hacmine sahip sektörlerde sentetik polimer talebi yükselmeye devam etmektedir. Toplam plastik üretiminin hâlâ %1’inden daha azını oluşturan biyoplastikler ise yıllık %20–30 düzeyindeki büyüme potansiyelleriyle hızla gelişen bir alan olarak öne çıkmaktadır [4], [5].

Fosil kaynaklı plastiklerin çevresel etkisi, hammadde çıkarımından üretime, kullanım sürecinden bertarafa kadar tüm yaşam döngüsünü kapsamaktadır. 2015 yılı itibarıyla geleneksel plastikler, küresel sera gazı (GHG) emisyonlarının yaklaşık %3,8’ini oluşturarak 1,7 gigaton CO₂ eşdeğeri salıma neden olmuştur [6]. Mevcut eğilimler sürdüğü takdirde, plastik sektörünün 2050 yılına kadar küresel karbon bütçesinin %13–15’ini tüketmesi beklenmektedir [7]. Buna ek olarak, her yıl yaklaşık 8 milyon ton plastik atığın okyanuslara karıştığı tahmin edilmektedir [3]. Mikroplastikler yalnızca sucul ekosistemleri ve besin zincirlerini bozmakla kalmamakta; aynı zamanda karbon döngüsünü etkileyerek iklim değişikliğinin şiddetlenmesine katkıda bulunmaktadır [7], [8]. Bu çok boyutlu çevresel kriz, yenilenebilir, düşük karbonlu ve biyolojik olarak parçalanabilir malzemelere geçişin gerekliliğini ve aciliyetini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda, nişasta bazlı biyoplastikler; biyolojik olarak parçalanabilir olmaları, yenilenebilir kaynaklardan üretilibilmeleri ve göreceli olarak basit üretim süreçleri sayesinde umut verici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [9], [10]. Mısır, manyok, pirinç ve mikroalg gibi çeşitli kaynaklardan elde edilen bu biyopolimerler, özellikle kısa ömürlü ürünlerde ve ambalaj uygulamalarında fosil temelli polimerlerin yerini alabilmektedir [11]. Yaşam döngüsü değerlendirmeleri (LCA), nişasta bazlı biyoplastiklerin yenilenemeyen enerji kullanımını

%86’ya kadar azaltabildiğini ve sera gazı emisyonlarını %180 oranında düşürebildiğini ortaya koymaktadır [12], [13]. Bununla birlikte, ölçeklenebilirlik, mekanik dayanım ve maliyet etkinliği gibi alanlarda devam eden bazı teknik ve ekonomik sınırlamalar bulunmaktadır [11], [14]. Döngüsel ekonomi perspektifinden değerlendirildiğinde, nişasta bazlı biyoplastikler, çevresel sorumluluk ile endüstriyel uygulanabilirlik arasında köprü kuran önemli geçiş malzemeleri olarak öne çıkmaktadır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, nişasta bazlı biyoplastiklerin sürdürülebilirlik, malzeme performansı ve sektörel uygulamalar açısından artan önemine işaret etmektedir [15], [16]. Bu biyoplastikler genellikle mısır, patates ve manyok gibi tarımsal kaynakların yanı sıra mikroalg gibi gıda dışı biyokütlelerden elde edilerek yenilenebilir ve biyobozunur bir alternatif sunmaktadır [10], [11]. Bununla birlikte, düşük mekanik dayanım, suya duyarlılık ve sınırlı bariyer özellikleri gibi dezavantajlar, malzemenin uygulama alanlarını kısıtlamaktadır. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla polimer harmanlama (örneğin PLA veya kitosan ile), plastikleştirici ilavesi (örneğin gliserol) ve nano dolgu maddelerinin kullanımı (örneğin selüloz nanofiber veya ZnO nanoparçacıkları) gibi çeşitli modifikasyon yöntemleri geliştirilmiştir [17]–[19]. Bu iyileştirmeler sonucunda nişasta bazlı biyoplastiklerin çekme dayanımı 37 MPa’a, kopma uzaması ise %90’a kadar yükseltilebilmektedir [17], [18].

Yaşam döngüsü analizleri, nişasta bazlı biyoplastiklerin çevresel yükü önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Bu malzemelerin sera gazı emisyonlarını %80’e kadar azaltabildiği ve yenilenemeyen enerji kullanımında %60’a varan düşüş sağlayabildiği rapor edilmektedir [20]. Gıda veya tarımsal atıkların hammadde olarak değerlendirilmesi ise ötrifikasyon potansiyelinin ve arazi kullanım gereksiniminin azalmasına katkıda bulunmaktadır [21]. Bununla birlikte, gıda temelli hammaddelerin kullanımı belirli etik ve sürdürülebilirlik tartışmalarını da gündeme getirmekte; bu nedenle atık veya mikroalg kökenli nişastaya yönelim giderek daha fazla önem kazanmaktadır [10], [11].

Bu çevresel avantajlar, moda ve tekstil gibi yenilikçi sektörlerdeki uygulamalara da yansımaktadır. Yapılan çalışmalar, nişasta bazlı kompozitlerin çekme dayanımını %52’ye (32,7 MPa) kadar artırdığını; esneklik, termal kararlılık ve su dayanımında belirgin iyileşmeler sağladığını göstermektedir [15]. Biyobozunurluk özellikleri ile birleşen bu performans kazanımları, nişasta bazlı biyoplastikleri sürdürülebilir moda malzemeleri, ambalaj çözümleri ve kaplama uygulamaları için güçlü bir aday haline getirmektedir [18], [22].

Tüm bu olumlu gelişmelere rağmen, ölçeklenebilirlik, maliyet etkinliği ve kullanım sonrası atık yönetimi gibi konular hâlen önemli araştırma alanları olarak varlığını

sürdürmektedir [13], [23]. Tekstil ve moda sektörlerindeki uygulamalar için formülasyonların optimize edilmesi, endüstriyel üretim süreçlerinde tutarlılığın sağlanması ve çevresel etki değerlendirmelerinin standardize edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, nişasta bazlı biyoplastikler sürdürülebilir malzeme sistemlerine geçiş ve düşük karbonlu döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda giderek daha kritik bir rol üstlenmektedir.

Bu çalışma, moda ve tekstil endüstrisinde sürdürülebilir malzeme dönüşümünü destekleyen bir seçenek olarak nişasta bazlı biyoplastiklerin potansiyelini incelemektedir. Araştırmada, küresel plastik üretiminin çevresel etkileri, nişasta bazlı biyoplastiklerin üretim süreçleri, mekanik ve fonksiyonel özellikleri ile çevresel performansları güncel literatür temelinde değerlendirilmiştir. Ayrıca bu biyoplastiklerin moda tasarımı, tekstil kaplamaları ve ambalaj uygulamaları gibi alanlardaki kullanım olanakları analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, fosil yakıt temelli plastiklere alternatif oluşturabilecek yenilenebilir, biyobozunur ve düşük karbonlu malzeme yaklaşımlarının moda endüstrisindeki uygulanabilirliğini ortaya koymak ve bu doğrultuda döngüsel ekonomi ilkelerine dayanan bir gelecek perspektifi sunmaktır.

2. NİŞASTA BAZLI BİYOPLASTİKLER

Küresel ölçekte plastik üretiminin yol açtığı çevresel etkiler, alternatif biyopolimerlerin geliştirilmesini acil bir gereklilik hâline getirmiştir. Bu bağlamda, nişasta bazlı biyoplastikler; yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilmeleri, biyolojik olarak parçalanabilir özellikleri ve düşük karbon ayak izine sahip yapıları nedeniyle sürdürülebilir malzeme araştırmalarında öne çıkan bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Kimyasal yapısının kolay işlenebilirliği ve yaygın bulunabilirliği, nişastayı biyoplastik üretiminde en sık tercih edilen doğal polimerlerden biri haline getirmektedir.

Başlıca mısır, patates, buğday, pirinç ve manyok gibi yenilebilir kaynaklardan elde edilen nişasta, gıda ile temas eden ürünler veya kısa ömürlü uygulamalar için uygun bir hammadde sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu tür kaynakların gıda arzı ve arazi kullanımı üzerindeki olası etkileri, sürdürülebilirlik açısından önemli bir tartışma konusudur. Bu nedenle, son yıllarda gıda dışı veya atık temelli nişastaların biyoplastik üretiminde değerlendirilmesine yönelik araştırmaların arttığı gözlemlenmektedir [20], [24].

Bu bölümde, nişasta bazlı biyoplastiklerin hammadde kaynakları, üretim süreçleri, enerji gereksinimleri ve çevresel etkileri ele alınarak sürdürülebilir üretim stratejileri tartışılacaktır. Özellikle nişasta kaynaklarının kökeni ve kimyasal özelliklerinin, elde edilen

biyopolimerlerin çevresel performansını doğrudan etkilediği vurgulanacak ve bu bağlamda kaynak seçiminin sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde kritik bir rol oynadığı gösterilecektir.

2.1. Hammadde Kaynakları ve Sürdürülebilirlik Boyutu

Nişasta bazlı biyoplastikler genellikle mısır, patates, pirinç, buğday ve manyok (cassava) gibi yenilenebilir ve yenilebilir bitkisel kaynaklardan elde edilmektedir. Bu hammaddeler; yüksek nişasta içerikleri (%60–80 kuru ağırlık), düşük üretim maliyetleri, kolay temin edilebilir olmaları ve mevcut tarımsal altyapıyla uyumları sayesinde endüstriyel ölçekte biyoplastik üretimi için cazip alternatifler sunmaktadır [11], [25]. Ayrıca, yenilebilir nişastalar saf kimyasal bileşimleri, yüksek beyazlık dereceleri ve düşük lipid ile protein içerikleri sayesinde yüksek kaliteli biyopolimer sentezi için uygun başlangıç materyalleri sağlamaktadır. Bu özellikler, söz konusu kaynakların özellikle gıda ambalajı, tek kullanımlık ürünler ve tekstil kaplamaları gibi kısa ömürlü uygulamalarda tercih edilmesini mümkün kılmaktadır.

Buna karşın, yenilebilir nişastaların kullanımı, artan küresel gıda talebi ve sınırlı tarım alanları göz önüne alındığında sürdürülebilirlik açısından çeşitli endişeleri beraberinde getirmektedir. Gıda sistemleriyle rekabet, yoğun arazi kullanımı ve yüksek su tüketimi, biyoplastik üretim zincirinde önemli çevresel baskı unsurları oluşturmaktadır [20]. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar, yenilebilir hammaddeler yerine tarımsal yan ürünler (örneğin patates kabukları, mısır koçanları, buğday kepeği) veya gıda endüstrisi atıklarından elde edilen nişastaların kullanımına odaklanmaktadır [24], [25].

Bu yaklaşım, yalnızca gıda rekabetini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir üretim modeli sunmaktadır. Özellikle atık temelli veya düşük değerli biyokütleden nişasta elde edilmesi, karbon ayak izini düşürmekte, ötrifikasyon potansiyelini azaltmakta ve arazi kullanımını optimize etmektedir [20], [24]. Örneğin, atık patates kabuklarından üretilen biyoplastiklerin, geleneksel mısır nişastasını temelli filmlere kıyasla sera gazı emisyonlarını %40’a kadar azalttığı bildirilmiştir [24]. Benzer şekilde, tarımsal artıklardan elde edilen nişasta bazlı biyopolimerler, düşük enerji gereksinimleri ve kısa bozunma süreleri sayesinde çevresel açıdan daha avantajlı bir profil sunmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Yenilebilir ve atık nişasta özelliklerinin karşılaştırılması.

Kriter	Yenilebilir Nişasta	Atık / Gıda Dışı Nişasta
Kaynak Türü	Gıda ürünleri (mısır, patates vb.)	Gıda atıkları, tarımsal yan ürünler
Gıda Güvenliği Etkisi	Negatif (rekabet)	Pozitif (atık azaltımı)
Arazi / Su Kullanımı	Yüksek	Düşük
Karbon Ayak İzi	Orta-Yüksek	Düşük
Enerji Verimliliği	Yüksek (standardize üretim)	Orta (ön işlem gerekebilir)
Döngüsel Ekonomi Uyum	Düşük	Yüksek
Mekanik Kalite	Genellikle iyi	Değişken, geliştirilebilir
Genel Sürdürülebilirlik	Orta	Yüksek

Sonuç olarak, yenilebilir kaynaklardan elde edilen nişasta, biyoplastik üretimi açısından teknik olarak uygun bir hammadde olsa da, sürdürülebilirlik bağlamında uzun vadeli bir çözüm yalnızca atık temelli veya gıda dışı biyokütle kullanımına geçişle mümkün görünmektedir. Bu doğrultuda, güncel araştırmalar atık yönetimi, yaşam döngüsü optimizasyonu ve kaynak verimliliği odaklı stratejiler geliştirerek nişasta bazlı biyoplastiklerin çevresel performansını artırmayı hedeflemektedir [11].

2.2. Üretim Aşamaları

Nişasta bazlı biyoplastiklerin üretim süreci, yenilenebilir bitkisel hammaddelerin çevre dostu polimer malzemelere dönüştürülmesini sağlayan bir dizi kimyasal ve fiziksel işlemten oluşmaktadır. Bu süreç genellikle dört temel aşamada gerçekleştirilir: nişasta ekstraksiyonu, jelatinizasyon ve plastifikasyon, formülasyon ve şekillendirme.

Nişasta ekstraksiyonu: Mısır, patates, buğday, pirinç veya manyok gibi nişasta açısından zengin bitkisel kaynaklardan, ıslak veya kuru öğütme yöntemleri ile nişasta elde edilir. Islak öğütme yöntemi daha yüksek saflık sağlarken, kuru öğütme enerji açısından daha verimlidir [25]. Elde edilen nişastadaki amiloz/amilopektin oranı, biyoplastiğin mekanik dayanımı ve biyobozunurluğunu belirleyen temel parametrelerden biridir.

Jelatinizasyon ve plastifikasyon: Ekstrakte edilen nişasta, su ve ısıнын etkisiyle jelatinize edilerek kristal yapısı bozulan amorf bir polimere dönüştürülür. Bu aşamada gliserol, sorbitol veya polietilen glikol (PEG) gibi plastifiyanların eklenmesiyle malzemenin esnekliği artırılır, kırılma direnci azaltılır ve işlenebilirliği geliştirilir [26].

Formülasyon: Jelatinize nişasta, mekanik ve bariyer özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli katkı maddeleriyle zenginleştirilir. Kalsiyum karbonat, kil veya selüloz lifleri

malzemenin mukavemetini artırırken; sitrik asit veya glutaraldehit gibi çapraz bağlayıcılar su direncini ve termal kararlılığı güçlendirir [27]. Ayrıca, poli(laktik asit) (PLA) veya poli(vinil alkol) (PVA) gibi biyopolimerlerle yapılan karışımlar, malzemenin genel performansını optimize eder.

Şekillendirme: Son aşamada hazırlanan karışım, film dökümü, ekstrüzyon veya enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerle nihai ürün formuna dönüştürülür. İşlem sırasında sıcaklık, nem oranı ve soğutma hızı; yüzey özellikleri, mekanik dayanım ve biyobozunurluk üzerinde belirleyici etkiye sahiptir.

Bu çok aşamalı üretim süreci, toksik çözücüler kullanılmadan ve düşük enerji tüketimi ile gerçekleştirilebilmekte; ayrıca atık veya gıda dışı nişasta kaynaklarının entegrasyonu sayesinde karbon ayak izini önemli ölçüde azaltarak sürdürülebilir üretimi desteklemektedir.

2.3. Enerji Gereksinimi ve Karbon Ayak İzi

Son yıllarda gerçekleştirilen yaşam döngüsü analizi (LCA) çalışmaları, nişasta bazlı biyoplastiklerin fosil kökenli plastiklere kıyasla çevresel açıdan önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu avantajların başında, sera gazı (GHG) emisyonlarının azalması ve yenilenemeyen enerji kaynaklarına olan bağımlılığın düşmesi gelmektedir. Bununla birlikte, çevresel kazanımlar kullanılan hammadde türü ve üretim yöntemi gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yenilebilir gıda kaynaklarından elde edilen nişasta, arazi ve su kullanımı ile ötrifikasyon potansiyelini artırarak bazı çevresel olumsuzluklara yol açabilmektedir [11], [28], [29]. Buna karşılık, gıda atıkları veya tarımsal yan ürünlerden türetilen nişasta kullanımı, çevresel etkileri önemli ölçüde azaltmakta ve daha sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır.

Araştırmalar, atık kaynaklı nişasta bazlı biyoplastiklerin petrol kökenli plastiklere kıyasla %70–85 oranında daha düşük sera gazı salımı gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bu malzemelerin emisyon değerleri 0,35–0,62 kg CO₂-eq/kg aralığındayken, polipropilen için bu değer 2,37 kg CO₂-eq/kg düzeyindedir. Ayrıca, enerji tüketiminde %80’e varan tasarruf sağlanabilmektedir [28], [29], [30]. Bu bulgular, nişasta bazlı biyoplastiklerin düşük karbonlu üretim hedeflerine katkı sağlayabilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, mısır, patates veya manyok gibi yenilebilir nişasta kaynaklarının kullanımı, gıda üretimiyle rekabet riskini artırmakta ve yoğun tarımsal faaliyetler nedeniyle su ayak izini büyütmektedir [29], [31]. Aşırı gübre ve pestisit kullanımı da ötrifikasyon ve asidifikasyon potansiyelini yükseltmektedir [21]. Bertaraf aşamasında ise kompostlama ve

anaerobik sindirim çevresel açıdan en uygun yöntemler olarak öne çıkarken, yakma ve depolama süreçleri bu avantajları azaltabilmektedir.

Genel olarak LCA verileri, hammadde kaynağının çevresel performans üzerinde en belirleyici unsur olduğunu göstermektedir. Atık veya yan ürünlerden elde edilen nişasta, arazi ve su kullanımını minimize ederek çevresel açıdan en avantajlı sonuçları sağlamaktadır [21], [28]. Buna karşın, yenilebilir kaynaklara dayalı biyoplastikler bazı ekolojik baskılar yaratabilse de, fosil bazlı plastiklere kıyasla daha düşük karbon salımıyla çevresel açıdan daha olumlu bir alternatif oluşturmaktadır [12].

Tablo 2. Nişasta bazlı biyoplastiklerin çevresel etkileri.

Parametre	Atık Tabanlı Nişasta Biyoplastiği	Yenilebilir Tabanlı Nişasta Biyoplastiği	Fosil Bazlı Plastik (PP, PET vb.)	Açıklama / Bulgular	Kaynaklar
Sera Gazı Emisyonu (kg CO ₂ -eq/kg)	0.35–0.62	0.62–5.3	0.7–6.7	Atık tabanlı biyoplastikler, PP'ye göre %74–85 daha düşük emisyonu sahip.	[12], [28], [30]
Yenilenemeyen Enerji Kullanımı (MJ/kg veya %)	-86% (bazal değere göre)	-86%	Referans (100%)	Atık tabanlı üretim, enerji gereksinimini %25 ek azaltır.	[12]
Karbon Ayak İzi (kg CO ₂ -eq/kg)	0.35–0.62	0.62–5.3	2.37 (PP örneği)	PA–nişasta kompozitleri %42–43 daha düşük karbon ayak izine sahiptir.	[30]
Arazi Kullanımı (m ² /kg)	↓ %60'a kadar	0.3–1.3	Düşük	Gıda tabanlı üretim arazi baskısını artırabilir; atık kullanımı azaltır.	[21], [29]
Su Kullanımı	Düşük	Yüksek	Düşük–Orta	Sulama gereksinimi gıda tabanlı üretimde önemli bir etkidir.	[21], [29]
Ötrifikasyon Potansiyeli	↓ %40'a kadar	↑ %400'e kadar	Referans (0)	Tarımsal gübre ve pestisit kullanımı ötrifikasyonu artırır.	[21]
Arazi Kullanım Değişimi (LUC)	Düşük risk	Yüksek risk	Yok	Geniş ölçekli üretim dolaylı arazi kullanım değişimine yol açabilir.	[31]

Sonuç olarak, nişasta bazlı biyoplastikler, malzeme üretiminde iklim değişikliği etkilerini azaltma ve yenilenemeyen enerji kullanımını düşürme açısından umut verici bir

strateji sunmaktadır. En yüksek çevresel faydalar, atık veya tarımsal yan ürünlerden elde edilen nişastanın kullanılması ve yaşam döngüsünün sonunda kompostlama veya anaerobik sindirim gibi biyolojik döngülere entegre bertaraf yöntemlerinin tercih edilmesi durumunda sağlanmaktadır [28], [30]. Bununla birlikte, bu biyoplastiklerin çevresel performansı bağlama duyarlıdır. Yenilebilir nişasta kaynaklarına dayalı geniş ölçekli üretimler, arazi işgali, su tüketimi ve ötrifikasyon gibi olumsuz etkiler nedeniyle sağlanan sera gazı azaltımlarını kısmen dengeleyebilmektedir [29], [31]. Gerçek anlamda sürdürülebilir sonuçların elde edilebilmesi için, gelecekteki araştırmaların ve politika çerçevelerinin atık nişasta kullanımını teşvik etmesi, bölgesel tarım uygulamalarını optimize etmesi ve LCA yöntemlerinin sistem sınırları ile tahsis süreçlerini şeffaf biçimde tanımlamasına öncelik vermesi gerekmektedir.

2.4. Çevresel Performans ve Biyobozunurluk

Yenilebilir nişasta kaynakları, özellikle mısır, patates ve manyok, biyoplastik üretiminde en yaygın kullanılan hammaddeler arasında yer almaktadır. Bu kaynaklar, yüksek saflık dereceleri ve homojen yapıları sayesinde biyoplastiklerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirme açısından önemli avantajlar sunmaktadır [24], [26]. Gurunathan ve ark. [26], mısır ve patates nişastalarından üretilen biyoplastiklerin 6–9,8 MPa aralığında çekme dayanımı ve 2,95 GPa’a kadar ulaşan Young modülü değerlerine sahip olduğunu; bu özelliklerin özellikle ambalaj ve esnek film uygulamaları için yeterli olduğunu rapor etmiştir. Benzer şekilde, Chaffa ve ark. [24], atık patates kabuklarından elde edilen nişasta ile ürettikleri biyoplastiklerin yüksek mekanik dayanım ve esneklik gösterdiğini belirtmiştir. Manyok bazlı biyoplastiklerin ise 57,2 N sertlik, %139,8 su emilimi ve yalnızca yedi günde %67 oranında biyobozunurluk sergileyerek üstün fiziksel performans sunduğu Jayalath ve ark. tarafından bildirilmiştir [39].

Nişasta bazlı biyoplastikler, doğada kolayca parçalanabilen çevre dostu polimerler olarak öne çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar, bu biyoplastiklerin formülasyon bileşimi ve çevresel koşullara bağlı olarak 30–120 gün arasında %60–%95 kütle kaybı gösterebildiğini ortaya koymaktadır [20], [26], [32], [33]. Biyobozunma oranı; nişasta içeriği, plastikleştirici türü, lif veya nanodolgu katkısı gibi formülasyon parametrelerinin yanı sıra sıcaklık, nem ve mikrobiyal aktivite gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değişmektedir [19], [20]. Genel olarak, yüksek nişasta oranı ve hidrofilik plastikleştiriciler bozunma hızını artırırken, çapraz bağlayıcı veya nanokatıkların kullanımı süreci yavaşlatmaktadır [32]. Özellikle mikrobiyal aktivitesi yüksek ve nem oranı fazla olan kompost veya toprak ortamlarında, bazı nişasta bazlı biyoplastik formülasyonlarının 3–16 gün içinde tamamen parçalanabildiği bildirilmiştir [20], [26].

Bu yüksek biyobozunma kapasitesi, nişasta bazlı biyoplastiklerin mikroplastik kirliliğini azaltma açısından önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir. Fosil kökenli plastikler çevrede uzun süre kalıcı mikroparçacıklara dönüşürken, nişasta bazlı biyoplastikler toksik olmayan doğal bileşenlere ayrılmaktadır [34], [35]. Bununla birlikte, düşük mikrobiyal aktiviteye sahip ortamlarda (ör. deniz ekosistemleri) bozunma süreci yavaşlayabilir ve geçici mikroparçacık oluşumu gözlemlenebilir [36], [37]. Bu nedenle, biyoplastiklerin çevresel performansını değerlendirirken kullanım sonrası yönetim ve bertaraf koşulları kritik öneme sahiptir.

Synani ve ark. [40] tarafından yapılan yaşam döngüsü analizine göre, nişasta bazlı biyoplastik üretiminde arazi kullanımı 0,3–1,3 m²/kg arasında değişmekte olup, bazı durumlarda ötrofikasyon potansiyelinin fosil bazlı plastiklere kıyasla %400’e kadar artabileceği bildirilmiştir. Bu durum, biyoplastiklerin çevresel avantajlarının koşullara bağlı olarak sınırlanabileceğini ve sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde dikkatle ele alınması gerektiğini göstermektedir. Öte yandan, üretim sürecinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ve nişastanın atık veya yan ürünlerden elde edilmesi durumunda karbon ayak izi ve fosil enerji tüketimi belirgin şekilde azalmaktadır [20], [35].

Ekonomik açıdan, nişasta bazlı biyoplastiklerin mevcut endüstriyel altyapılara uyumlu olması üretim ölçeklenebilirliğini kolaylaştırmakta; ancak tarımsal ürün fiyatlarındaki dalgalanmalar ve tedarik zincirindeki kırılganlıklar ekonomik sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir [15], [20]. Ayrıca, saf nişasta temelli biyoplastiklerin kırılganlık ve düşük bariyer özellikleri göstermesi, bu malzemelerin katkı maddeleriyle modifiye edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, son yıllarda yapılan araştırmalar atık veya yan ürün kaynaklı nişastaların kullanımına yönelmiş ve bu yaklaşımın hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur [20], [24] (Tablo 3).

Tablo 3. Nişasta bazlı biyoplastiklerin çevresel performansı.

Kriter	Gözlemler / Bulgular	Kaynaklar
Biyobozunma oranı	%60–95 kütle kaybı (30–120 gün) arasında değişir. Kompostta daha hızlı bozunur.	[26], [33], [38]
Etkileyen faktörler	Nişasta oranı ve hidrofilik plastikleştiriciler bozunmayı hızlandırır; nano katkılar ve çapraz bağlayıcılar yavaşlatır.	[19], [20], [38]
Mikroplastik emisyonu	Fosil plastiklere kıyasla çok daha düşük; uygun çevre koşullarında tamamen ayrışır.	[34], [35]

Çevresel koşullar	Yüksek nem ve mikrobiyal aktivite bozunmayı hızlandırır. Deniz ortamında süreç yavaşlar.	[36], [37]
Enerji ve hammadde kaynağı	Yenilenebilir enerji ve atık nişasta kullanımı karbon ayak izini azaltır.	[20], [35]
Potansiyel olumsuzluklar	Gıda bazlı nişasta kullanımı arazi, su kullanımı ve ötrifikasyon riskini artırabilir.	[37]
Genel değerlendirme	Yüksek biyobozunurluk, düşük mikroplastik riski; sürdürülebilirlik için uygun hammadde ve enerji kullanımı kritik.	[19], [20], [26], [33], [35], [37], [38]

Sonuç olarak, nişasta bazlı biyoplastikler, yüksek saflık, işlenebilirlik ve biyobozunurluk özellikleri sayesinde çevresel açıdan umut verici malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, gıda üretimiyle rekabet, su ve arazi kullanımı gibi sürdürülebilirlik sorunları bu avantajları kısmen sınırlamaktadır. Gelecekteki araştırmaların, atık nişasta kaynaklarının değerlendirilmesine, katkı sistemlerinin optimize edilmesine ve çevresel etkilerin minimize edilmesine odaklanması, bu malzemelerin hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir alternatif haline gelmesini sağlayacaktır.

2.5. Yenilebilir Nişasta Kaynaklarının Avantajları ve Dezavantajları

Yenilebilir nişasta kaynakları, özellikle mısır, patates ve manyok, biyoplastik üretiminde en yaygın kullanılan temel hammaddeler arasında yer almaktadır. Bu kaynaklar, yüksek saflık dereceleri ve homojen yapıları sayesinde biyoplastiklerin mekanik performansını iyileştirme açısından önemli avantajlar sunmaktadır [24], [26]. Gurunathan ve ark. [26], mısır ve patates nişastalarından üretilen biyoplastiklerin 6–9,8 MPa aralığında çekme dayanımı ve 2,95 GPa’a kadar ulaşan Young modülü değerlerine sahip olduğunu; bu özelliklerin özellikle ambalaj ve esnek film uygulamaları için yeterli olduğunu bildirmiştir. Benzer biçimde, Chaffa ve ark. [24], atık patates kabuklarından elde edilen nişasta kullanarak ürettikleri biyoplastiklerin yüksek mekanik dayanım ve esneklik gösterdiğini ortaya koymuştur. Manyok bazlı biyoplastiklerin ise 57,2 N sertlik, %139,8 su emilimi ve yalnızca yedi günde %67 oranında biyobozunurluk sergileyerek üstün fiziksel performans gösterdiği Jayalath ve ark. tarafından rapor edilmiştir [39].

Biyobozunurluk açısından değerlendirildiğinde, yenilebilir nişasta bazlı biyoplastiklerin büyük bir kısmı 7–30 gün içerisinde %60–84 oranında biyolojik olarak parçalanabilmektedir. Bazı formülasyonlarda ise altı haftadan kısa sürede tam çözünme gerçekleştiği bildirilmiştir

[18], [24]. Bu hızlı bozunma, mikroplastik oluşumunu azaltma potansiyelini artırmakta ve çevresel kalıcılığı önemli ölçüde düşürmektedir. Ayrıca, katkı maddesi olarak kitosan veya nanodolgu ilavesiyle hem mekanik dayanım hem de suya karşı direnç geliştirilebilir ve aynı zamanda antimikrobiyal özellikler kazandırılabilir. Bu durum, yenilebilir nişastaların biyoplastik üretiminde işlevsel açıdan oldukça esnek ve uyarlanabilir bir malzeme grubu oluşturduğunu göstermektedir.

Synani ve ark. [40] tarafından yapılan yaşam döngüsü analizine göre, bu tür üretimlerde arazi kullanımı 0,3–1,3 m²/kg arasında değişmekte olup, bazı durumlarda ötrofikasyon potansiyelinin fosil bazlı plastiklere kıyasla %400’e kadar artabildiği bildirilmiştir. Bu sonuç, biyoplastiklerin çevresel avantajlarının koşullara bağlı olarak sınırlanabileceğini ve sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde dikkatle ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Ekonomik açıdan bakıldığında, yenilebilir nişasta bazlı biyoplastiklerin mevcut endüstriyel altyapılara uyumlu olması üretim ölçeklenebilirliğini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, tarımsal ürün fiyatlarındaki dalgalanmalar ve tedarik zincirindeki kırılganlıklar ekonomik sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir [15], [20]. Ayrıca, saf nişasta temelli biyoplastiklerin kırılganlık ve düşük bariyer özellikleri göstermesi, bu malzemelerin katkı maddeleriyle modifiye edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda araştırmaların atık veya yan ürün kaynaklı nişastaların kullanımına yöneldiği görülmektedir. Bu yaklaşım, hem çevresel etkiyi azaltmakta hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır [20], [24].

Sonuç olarak, yenilebilir nişasta kaynakları, biyoplastik üretiminde yüksek saflık, iyi işlenebilirlik ve hızlı biyobozunurluk gibi özellikleriyle dikkat çekmektedir. Ancak gıda üretimiyle rekabet, su tüketimi ve arazi kullanımı gibi sürdürülebilirlik sorunları bu avantajları kısmen sınırlandırmaktadır. Gelecekteki araştırmaların atık nişasta kaynaklarının değerlendirilmesi, katkı sistemlerinin optimize edilmesi ve çevresel etkilerin azaltılmasına odaklanması, bu malzemelerin çevresel ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir alternatif haline gelmesini sağlayacaktır.

3. MODA ENDÜSTRİSİNDE BİYOPLASTİK KULLANIMI

Nişasta bazlı biyoplastikler, moda endüstrisinde fosil kökenli plastiklere çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmakta ve biyobozunurluk, düşük karbon ayak izi ile yenilenebilir hammadde temeli sayesinde sürdürülebilir tasarım anlayışını desteklemektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, bu malzemelerin mekanik performansı, işlenebilirliği ve çevresel etkileri

bakımından önemli ilerlemeler kaydettiğini; ancak dayanıklılık, üretim ölçeği ve kullanım ömrü sonu altyapısı gibi konularda hâlâ iyileştirmeye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir [11], [16].

Moda alanında nişasta bazlı biyoplastikler, özellikle vegan deri alternatifleri, giyim kaplamaları, aksesuarlar, ayakkabı taban bileşenleri, düğme ve toka gibi küçük parçalar ile ambalaj malzemelerinde kullanılmaktadır. Ambalaj ve yüzey kaplama uygulamaları, biyoplastiklerin bariyer ve antimikrobiyal özelliklerinden yararlanılarak geliştirilmektedir [22]. Bu malzemelerin moda endüstrisinde kullanımına ilişkin performans kriterleri, tekstillerde esneklik ve dökümlülük, ayakkabılarda aşınma direnci ve ambalajlarda nem bariyeri kapasitesi gibi uygulama bazlı farklılıklar göstermektedir.

Üretim teknikleri arasında döküm, ekstrüzyon, sıkıştırma kalıplama ve kaplama yöntemleri öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, endüstriyel ölçeklendirme sürecinde nem duyarlılığı ve yapısal homojenlik gibi problemler hâlâ önemli zorluklar olarak sürmektedir [16].

Yaşam döngüsü analizleri (LCA), nişasta bazlı biyoplastiklerin sera gazı emisyonlarının 0,7–2,5 kg CO₂-eq/kg aralığında olduğunu, bu değerin poliüretan, PVC veya PET gibi fosil temelli malzemelere kıyasla (3–7 kg CO₂-eq/kg) oldukça düşük olduğunu göstermektedir [11], [20], [30]. Yenilenemeyen enerji kullanımı yaklaşık %20–60 oranında azalmış olup, arazi kullanımı 0,3–1,3 m²·yıl/kg ve su tüketimi ise 100–500 L/kg düzeyindedir. Gıda dışı veya atık nişasta kullanımı, bu değerleri yaklaşık %60 oranında iyileştirmektedir [20]. Ancak, gıda bazlı hammaddelerle üretilen biyoplastiklerde ötrofikasyon potansiyeli daha yüksek bulunmuştur. Bu nedenle atık tabanlı üretim, çevresel açıdan en uygun seçenek olarak değerlendirilmektedir [11], [30].

Kullanım ömrü sonunda nişasta bazlı biyoplastiklerin çevreye uyumlu biçimde parçalanabildiği gözlemlenmektedir. Kompost ve toprak ortamında 14–42 gün arasında %50–100 oranında kütle kaybı gerçekleşirken, deniz ve tatlı su koşullarında bu süre 60 güne kadar uzayabilmektedir (Tan et al., 2022; Xie et al., 2023; Anugrahwidya et al., 2021). Biyobozunma hızı, kullanılan katkı maddelerinin türüne bağlı olarak değişebilmektedir; özellikle lif takviyeli formülasyonlarda bozunma süreci yavaşlayabilmektedir (Armynah et al., 2022). Bununla birlikte, uygun formülasyonlar kullanıldığında mikropplastik oluşumu riski oldukça düşüktür (Abe et al., 2021).

Moda endüstrisinde nişasta bazlı biyoplastiklerin çevresel avantajlarına karşın bazı ticari ve yapısal zorluklar mevcuttur. Gıda ile rekabet, arazi ve su kaynaklarının kullanımı ile tarımsal gübre ve pestisitlerin etkileri, sürdürülebilir hammadde tedarik zincirinde önemli tartışma konularıdır [11], [20]. Atık nişasta kaynaklarının kullanımı ve yenilenebilir enerji

entegrasyonu, bu olumsuz etkilerin azaltılmasında kritik rol oynamaktadır. Üretim maliyetleri görece düşük olmasına rağmen, nem duyarlılığı ve katkı gereksinimi işleme maliyetlerini artırmaktadır [16]. Ambalaj sektörü, nişasta bazlı biyoplastikler için en olgun pazarı oluştururken, tekstil ve deri benzeri uygulamalar hâlen gelişme aşamasındadır [11].

Estetik açıdan, nişasta bazlı biyoplastikler doğal pigmentlerle renklendirilebilmekte ve parlak veya dokulu yüzeyler oluşturabilmektedir. Ancak yaşlanma ve kırılabilirlik sorunları, özellikle uzun süreli kullanımlarda formülasyon optimizasyonu gerektirmektedir [18]. Avrupa standartları EN 13432, ASTM D6400 ve ISO 17088 gibi sertifikasyon sistemleri, bu malzemelerin kompostlanabilirlik ve biyobazlı içerik doğrulamasında kullanılmaktadır [11]. Tüketici araştırmaları, sürdürülebilir moda ürünlerinde biyoplastik kullanımına yönelik olumlu bir eğilim olduğunu göstermekte, ancak dayanıklılık ile ilgili endişelerin devam ettiğini ortaya koymaktadır.

Tasarımcılar açısından en iyi uygulamalar; gıda dışı atık hammaddelerin tercih edilmesi, kullanım ömrü sonunda kolay ayrıştırılabilir tasarımların geliştirilmesi, açık etiketleme sistemlerinin kullanılması ve dayanıklılığı artıran üretim yöntemlerinin benimsenmesi yönündedir [11], [20]. Moda alanında biyoplastiklerin yaygın kullanımına yönelik performans hedefleri, en az 15 MPa çekme dayanımı, %20’den yüksek uzama oranı ve 60 gün içinde kompostlanabilirlik olarak önerilmektedir [18].

Tablo 4’te görüldüğü gibi, nişasta bazlı biyoplastikler hem yenilebilir hem de atık kaynaklı hammadde kullanıldığında, fosil bazlı PU deri ve PVC/PET’e kıyasla daha düşük sera gazı salımı, enerji ve su tüketimi sergilemektedir. Özellikle atık nişasta kullanımı, karbon ayak izini ve doğal kaynak kullanımını önemli ölçüde azaltmakta ve sürdürülebilir moda üretiminde çevresel avantaj sağlamaktadır. Biyobozunurluk açısından, nişasta bazlı biyoplastikler 2–6 hafta içinde toprağa veya komposta tamamen parçalanabilirken, fosil plastikler 1 yıldan uzun süre doğada kalmaktadır. Mekanik performans, çekme dayanımı ve elastikiyet gibi kriterler, dolgu malzemeleri ve plastifiyanlarla iyileştirilebilmektedir. Bu veriler, moda endüstrisinde nişasta bazlı biyoplastiklerin hem çevresel hem de fonksiyonel açıdan uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Tablo 4. Nişasta bazlı ve Fosil bazlı plastiklerin sürdürülebilirlik kriterleri

Kriter	Nişasta (Yenilebilir)	Nişasta (Atık)	PU Deri	PVC/PET	Açıklama / Kaynaklar
Sera gazı (kg CO ₂ -eq/kg)	1,5–2,5	0,7–1,2	5–7	3–6	Yaşam döngüsü emisyonları; atık kaynak daha düşük [11], [20], [30]
Fosil enerji kullanımı (MJ/kg)	40–60	20–40	80–100	70–90	Üretim için gereken enerji; atık kaynak enerji tasarrufu sağlar [11], [20]
Biyobozunur luk (gövde kayıbı, gün)	14–42	10–30	>365	>365	Nişasta biyoplastikler hızlıca parçalanır; fosil plastikler 1 yıldan uzun süre kalır [17], [18]
Arazi kullanımı (m ² ·yıl/kg)	0,3–1,3	0,1–0,5	0,2–0,5	0,2–0,5	Yenilebilir nişasta arazi gerektirir; atık kaynak bu etkiyi azaltır [11], [20]
Su kullanımı (L/kg)	100–500	50–200	50–200	50–200	Tarımsal üretim su tüketimi; atık kaynak ile su kullanımı azalır [11], [20]
Çekme dayanımı (MPa)	1,2–6,9	5–24,5	20–50	30–60	Dolgu ve plastifiyan ile mekanik performans artırılabilir [17], [18]
Son kullanım (geri dönüş / bertaraf)	Kompost	Kompost	Düzenli atık sahası	Düzenli atık sahası	Kompostlama nişasta için en uygun; fosil plastikler düzenli depolamada kalır [17], [18], [20]

Buna karşın, literatürde hâlen çözülmemiş bazı araştırma boşlukları mevcuttur. Uzun süreli aşınma ve kullanım testlerinin eksikliği, biyoplastik “vegan deri” uygulamaları için standartlaştırılmış test protokollerinin yetersizliği ve bölgesel hammaddeye özgü yaşam döngüsü analizlerinin sınırlı olması başlıca sorunlar arasında yer almaktadır [16]. Gelecekteki çalışmalarda, bu malzemelerin moda üretim zincirindeki gerçek saha koşullarında değerlendirilmesi, kullanıcı kabulü araştırmalarıyla desteklenmesi ve yerel atık nişasta kaynaklarının döngüsel kullanımı üzerine yoğunlaşılması önerilmektedir.

4. SONUÇ

Nişasta bazlı biyoplastikler, moda endüstrisinde fosil kökenli plastiklere çevre dostu bir alternatif olarak önemli bir potansiyel taşımaktadır. Hem yenilebilir hem de atık nişasta

kaynaklı üretim, düşük karbon ayak izi, enerji ve su tüketimi avantajı sunarken, biyobozunurluk açısından fosil bazlı malzemelere kıyasla belirgin üstünlük sağlamaktadır. Mekanik performans ve işlenebilirlik, dolgu maddeleri, plastifiyanlar ve nano katkıları aracılığıyla iyileştirilebilmekte ve böylece vegan deri, aksesuar ve ambalaj gibi çeşitli moda uygulamalarına uygun hâle gelmektedir.

Bununla birlikte, sürdürülebilir moda üretiminde nişasta bazlı biyoplastiklerin yaygın kullanımı hâlen bazı yapısal ve ticari sınırlılıklara tabidir. Gıda ile rekabet, arazi ve su kaynaklarının kullanımı, nem duyarlılığı, katkı gereksinimi ve uzun süreli kullanım testlerinin eksikliği, malzemelerin performans ve çevresel güvenilirliğini etkileyen başlıca faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu sorunlar, atık nişasta ve yan ürün kaynaklı üretim, yaşam döngüsü optimizasyonu ve uygun tasarım stratejileri ile önemli ölçüde azaltılabilir.

Gelecekteki araştırmaların, nişasta bazlı biyoplastiklerin moda üretim zincirinde gerçek saha koşullarında değerlendirilmesi, kullanıcı kabulü ve uzun dönem dayanıklılık testlerinin sistematik olarak yürütülmesi, ayrıca yerel atık nişasta kaynaklarının döngüsel kullanımı üzerine odaklanması önerilmektedir. Bu yaklaşımlar, hem çevresel hem de fonksiyonel açıdan nişasta bazlı biyoplastiklerin moda endüstrisinde sürdürülebilir bir şekilde uygulanabilirliğini güçlendirecektir.

Açıklama

Bu çalışma, herhangi bir kurum veya kuruluştan maddi destek alınmaksızın, birinci yazar tarafından ikinci yazarın danışmanlığında Süleyman Demirel Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü bünyesinde yürütülen sanatta yeterlik tezi kapsamında hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

KAYNAKLAR

- [1]. R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Science Advances*, vol. 3, no. 7, e1700782, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.

- [2]. L. Lebreton and A. Andrady, "Future scenarios of global plastic waste generation and disposal," *Palgrave Communications*, vol. 5, p. 6, 2019, doi: 10.1057/s41599-018-0212-7.
- [3]. R. Kumar, A. Verma, A. Shome, R. Sinha, S. Sinha, P. K. Jha, ... and P. V. Vara Prasad, "Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, p. 9963, 2021, doi: 10.3390/su13179963.
- [4]. G. Copopola, M. T. Gaudio, C. G. Lopresto, et.al., "Bioplastic from renewable biomass: A facile solution for a greener environment," *Earth Syst. Environ.*, vol. 5, pp. 231–251, 2021, doi: 10.1007/s41748-021-00208-7.
- [5]. R. Shogren, D. Wood, W. Orts, and G. Glenn, "Plant-based materials and transitioning to a circular economy," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 19, pp. 194–215, 2019, doi: 10.1016/j.spc.2019.04.007.
- [6]. T. Goga, K. Harding, V. Russo, and H. Von Blottnitz, "A lifecycle-based evaluation of greenhouse gas emissions from the plastics industry in South Africa," *South African Journal of Science*, vol. 119, no. 1–2, 2023.
- [7]. S. Sharma, V. Sharma, and S. Chatterjee, "Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 858, p. 159785, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159785.
- [8]. K. Li, L. Du, C. Qin, N. Bolan, H. Wang, and H. Wang, "Microplastic pollution as an environmental risk exacerbating the greenhouse effect and climate change: a review," *Carbon Research*, vol. 3, no. 1, p. 9, 2024, doi: 10.1007/s44155-023-00038-2.
- [9]. M. K. Marichelvam, M. Jawaid, and M. Asim, "Corn and rice starch-based bioplastics as alternative packaging materials," *Fibers*, vol. 7, no. 4, p. 32, 2019, doi: 10.3390/fib7040032.
- [10]. C. Mathiot, P. Ponge, B. Gallard, J. F. Sassi, F. Delrue, and N. Le Moigne, "Microalgae starch-based bioplastics: Screening of ten strains and plasticization of unfractionated microalgae by extrusion," *Carbohydrate Polymers*, vol. 208, pp. 142–151, 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.12.057.
- [11]. M. Sobeih, S. Elhami, and A. Abdelmeguid, "Environmental assessment and scaling challenges of starch-based bioplastics in the fashion industry," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 52, pp. 88–102, 2025, doi: 10.1016/j.spc.2025.04.011.

- [12]. N. Singh, O. A. Ogunseitan, M. H. Wong, and Y. Tang, "Sustainable materials alternative to petrochemical plastics pollution: A review analysis," *Sustainable Horizons*, vol. 2, p. 100016, 2022, doi: 10.1016/j.horiz.2022.100016.
- [13]. J.-G. Rosenboom, R. Langer, and G. Traverso, "Bioplastics for a circular economy," *Nature Reviews Materials*, vol. 7, pp. 117–137, 2022, doi: 10.1038/s41578-021-00407-8.
- [14]. L. do Val Siqueira, C. I. L. F. Arias, B. C. Maniglia, and C. C. Tadini, “Starch-based biodegradable plastics: Methods of production, challenges and future perspectives,” *Current Opinion in Food Science*, vol. 38, pp. 122–130, 2021. doi: 10.1016/j.cofs.2020.10.020.
- [15]. A. K. Rashwan, H. A. Younis, A. M. Abdelshafy, A. I. Osman, M. R. Eletmany, M. A. Hafouda, and W. Chen, “Plant starch extraction, modification, and green applications: A review,” *Environmental Chemistry Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 2483-2530, 2024, doi: 10.1007/s10311-024-01753-z
- [16]. A. M. Jayarathna, S. Fernando, and A. Jayawardena, "Advances and challenges in starch-based bioplastics: A comprehensive review on mechanical and environmental performance," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 214, pp. 237–252, 2022, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.06.045.
- [17]. W. Tan, Q. Chen, and D. Liu, "Enhancement of mechanical and biodegradation properties of starch-based films via nano-filler reinforcement," *Carbohydrate Polymers*, vol. 295, p. 119841, 2022, doi: 10.1016/j.carbpol.2022.119841.
- [18]. R. Xie, Y. Zhao, and C. Hu, "Design and degradation of nano-cellulose reinforced starch bioplastics for sustainable applications," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 11, no. 3, p. 109762, 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.109762.
- [19]. T. Shuprajhaa, S. K. Paramasivam, S. Pushpavalli, S. Anandakumar, and R. Naik, “Influence of additives on the development, mechanical, functional characteristics and biodegradability of banana starch-based bio plastic films,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 295, p. 139544, 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.139544.
- [20]. K. Abe, S. Takahashi, and T. Nakamura, "Life cycle assessment of starch-based biodegradable plastics using waste and non-food feedstocks," *Journal of Cleaner Production*, vol. 319, p. 128627, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128627.

- [21]. S. S. Ali, E. A. Abdelkarim, T. Elsamahy, R. Al-Tohamy, F. Li, M. Kornaros, ... and J. Sun, "Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review," *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 15, p. 100254, 2023, doi: 10.1016/j.esec.2023.100254.
- [22]. B. Arminah, N. Fitriani, and I. Nurul, "Antimicrobial and barrier properties of starch-based bioplastics reinforced with natural fillers for sustainable packaging applications," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 210, pp. 495–504, 2022, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.04.053.
- [23]. C. M. O. González, E. A. Castillo, S. Flores, L. N. Gerschenson, and C. Bengoechea, "Effect of plasticizer composition on the properties of injection molded cassava starch-based bioplastics," *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 40, p. 101218, 2023, doi: 10.1016/j.fpsl.2023.101218.
- [24]. T. Y. Chaffa, B. T. Meshesha, S. A. Mohammed, S. Anuradha Jabasingh, "Production, characterization, and optimization of starch-based biodegradable bioplastic from waste potato (*Solanum tuberosum*) peel with the reinforcement of false banana (*Ensete ventricosum*) fiber," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 12, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1007/s13399-022-03426-9
- [25]. E. M. Gonçalves, M. Silva, L. Andrade, ve J. Pinheiro, "From fields to films: exploring starch from agriculture raw materials for biopolymers in sustainable food packaging," *Agriculture*, vol. 14, no. 3, p. 453, 2024, doi: 10.3390/agriculture14030453.
- [26]. M. K. Gurunathan, R. J. H. Navasingh, J. D. R. Selvam, ve R. Çep, "Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 15264, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-00221-0.
- [27]. A. Shafqat, A. Tahir, W. U. Khan, and A. Mahmood, and G. H. Abbasi, "Production and characterization of rice starch and corn starch based biodegradable bioplastic using various plasticizers and natural reinforcing fillers," *Cellulose Chemistry and Technology*, vol. 55, pp. 867–881, 2021.
- [28]. M. Samer, O. Hijazi, B. A. Mohamed, E. M. Abdelsalam, M. A. Amer, I. H. Yacoub, and H. Bernhardt, "Environmental impact assessment of bioplastics production from agricultural crop residues," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 24, no. 3, pp. 815–827, 2022, doi: 10.1007/s10098-021-02145

- [29]. J. Brizga, K. Hubacek, and K. Feng, "The unintended side effects of bioplastics: carbon, land, and water footprints," *One Earth*, vol. 3, no. 1, pp. 45–53, 2020, doi: 10.1016/j.oneear.2020.06.016.
- [30]. L. Äkräs, F. Silvenius, H. Baniasadi, M. Vahvaselkä, H. Ilvesniemi, and J. Seppälä, "A cradle-to-gate life cycle assessment of polyamide-starch biocomposites: carbon footprint as an indicator of sustainability," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 26, no. 10, pp. 3297–3312, 2024, doi: 10.1007/s10098-024-02884-1.
- [31]. N. Escobar and W. Britz, "Metrics on the sustainability of region-specific bioplastics production, considering global land use change effects," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 167, p. 105345, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105345.
- [32]. M. Ghasemlou, F. Daver, B. J. Murdoch, A. S. Ball, E. P. Ivanova, and B. Adhikari, "Biodegradation of novel bioplastics made of starch, polyhydroxyurethanes and cellulose nanocrystals in soil environment," *Science of the Total Environment*, vol. 815, p. 152684, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152684.
- [33]. A. Folino, A. Karageorgiou, P. S. Calabrò, and D. Komilis, "Biodegradation of wasted bioplastics in natural and industrial environments: A review," *Sustainability*, vol. 12, no. 15, p. 6030, 2020, doi: 10.3390/su12156030.
- [34]. F. Degli-Innocenti, M. Barbale, S. Chinaglia, E. Esposito, M. Pecchiari, F. Razza, and M. Tosin, "Analysis of the microplastic emission potential of a starch-based biodegradable plastic material," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 199, p. 109934, 2022, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.109934.
- [35]. L. Bartolucci, S. Cordiner, E. De Maina, G. Kumar, P. Mele, V. Mulone, ... and G. Piechota, "Sustainable valorization of bioplastic waste: a review on effective recycling routes for the most widely used biopolymers," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 9, p. 7696, 2023, doi: 10.3390/ijms24097696.
- [36]. U. Piyathilake, C. Lin, N. Bolan, J. Bundschuh, J. Rinklebe, and I. Herath, "Exploring the hidden environmental pollution of microplastics derived from bioplastics: A review," *Chemosphere*, vol. 355, p. 141773, 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141773.
- [37]. S. V. Afshar, A. Boldrin, T. F. Astrup, A. E. Daugaard, and N. B. Hartmann, "Degradation of biodegradable plastics in waste management systems and the open environment: A critical review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, p. 140000, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140000.

- [38]. M. Ghasemlou, F. Daver, B. J. Murdoch, A. S. Ball, E. P. Ivanova, and B. Adhikari, "Biodegradation of novel bioplastics made of starch, polyhydroxyurethanes and cellulose nanocrystals in soil environment," *Science of the Total Environment*, vol. 815, p. 152684, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152684.
- [39]. U. T. Jayalath, H. Samaraweera, and A. Samarasinghe, "Development and characterization of gelatin-starch bioplastics: A comparative study of cassava, corn, and rice-based alternatives," *Sustainable Chemistry for the Environment*, vol. 9, p. 100190, 2025, doi: 10.1016/j.scenv.2024.100190.
- [40]. K. Synani, K. Abeliotis, K. Velonia, A. Maragkaki, T. Manios, and K. Lasaridi, "Environmental impact and sustainability of bioplastic production from food waste," *Sustainability*, vol. 16, no. 13, p. 5529, 2024, doi: 10.3390/su16135529.