



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ANTEP FISTIĞI KABUĞU VE NAR KABUĞUNDAN NANOSELÜLOZ ELDESİ VE
MALZEME KARAKTERİZASYON TESTLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**Bengü KELENDER
BİYOLOJİ**

**ŞANLIURFA
2026**



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ANTEP FISTIĞI KABUĞU VE NAR KABUĞUNDAN NANOSELÜLOZ ELDESİ VE
MALZEME KARAKTERİZASYON TESTLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**Bengü KELENDER
BİYOLOJİ**

**DANIŞMAN: Prof. Dr. Arif PARMAKSIZ
2. DANIŞMAN: Prof. Dr. Yusuf KURT**

**ŞANLIURFA
2026**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ONAY SAYFASI**

Prof. Dr. Arif PARMAKSIZ ve Prof. Dr. Yusuf KURT danışmanlığında, Bengü KELENDER'in hazırladığı “**Antep Fıstığı Kabuğu ve Nar Kabuğundan Nanoselüloz Eldesi ve Malzeme Karakterizasyon Testlerinin Karşılaştırılması**” konulu bu çalışma 30 /06 /2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Harran Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

☐ Oybirliğiyle / ☐ Oy çokluğu ile

İmza

Danışman	: Prof. Dr. Arif PARMAKSIZ	
Danışman	: Prof. Dr. Yusuf KURT	
Üye	: Doç. Dr. Sedat ÇAM	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Cahit ÇEÇEN	

Bu tezin Biyoloji Ana Bilim Dalında yapıldığını ve enstitümüz kurallarına göre düzenlendiğini onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Sabri Akın
(Unvanı, Adı, Soyadı)
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

TEŞEKKÜR

Bir yüksek lisans tezi, yalnızca bireysel bir çalışma değil; arkasında duran koca bir destek mekanizmasının ve inancın ürünüdür. Bu yolculuğun her durağında bana eşlik eden, zihnimi ve ruhumu besleyen herkese minnettarım.

Akademik hayatımın bu en kritik dönüm noktasında, engin vizyonu, derin ilmî birikimi ve ileri görüşlülüğüyle ufkumu aydınlatan; bilginin inceliğini, araştırmanın onurunu ve bilime adanmışlığın gerçek anlamını bana öğreten çok kıymetli hocam **Prof. Dr. Yusuf KURT**'a en içten şükranlarımı sunarım. Çalışmamın ilk gününden itibaren yalnızca bir danışman olmanın ötesine geçerek, düşünce dünyamı şekillendiren, bilimsel bakış açımı derinleştiren ve her daim yolumu aydınlatan eşsiz bir rehber olmuştur. Zarafeti, yüksek akademik disiplini ve sarsılmaz bilimsel duruşu, benim için her zaman en güçlü ilham ve motivasyon kaynağı olmaya devam edecektir.

Çalışmamın başladığı ilk günden bugüne kadar, sadece bir danışman değil, her zaman bir yol gösterici ve sarsılmaz bir dayanak olan kıymetli danışmanım **Prof. Dr. Arif PARMAKSIZ**'a teşekkürü bir borç bilirim. Akademik titizliğiyle çalışmama değer katan, her tıkanımda nezaketiyle yeni yollar açan ve bana bir araştırmacı kimliği kazandıran değerli hocamın hakkı ödenemez.

Bu meşakkatli sürecin tüm yükünü benimle paylaşan, sabrıyla, anlayışıyla ve her düşüğümde uzattığı eliyle bana yeniden yürüme gücü veren, hayatın bana sunduğu en güzel yol arkadaşım **Ümmühan ŞAŞ**'a en kalbi teşekkürlerimi sunarım. Bu başarı, senin inancın ve desteğin olmadan yarım kalırdı.

Son olarak; bugün bulunduğum noktaya gelmemin asıl mimarları olan, fedakarlıklarıyla beni büyüten, dualarıyla ve sevgileriyle hayatımı güzelleştiren sevgili annem **Gülüzar KELENDER** ve babam **İbrahim KELENDER**'e sonsuz minnetimi sunuyorum. Emeklerinizin ve koşulsuz desteğinizin karşılığı olarak bu çalışmayı sizlere atfediyorum.

Bu süreçte varlığıyla güç veren tüm dostlarıma ve meslektaşlarıma yürekten teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	3
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
KISALTMALAR	v
SİMGELER.....	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tarımsal Atıkların Değerlendirilmesi	1
1.2. Selüloz	3
1.3. Lignoselüloz	5
1.4. Hemiselüloz	6
1.5. Nanoselüloz	7
1.6. Nanoselülozun Kullanım Alanları	11
1.7. Şanlıurfa ve Tarımsal Atık Potansiyeli	13
1.7.1. Fıstık Kabuğu	15
1.7.2. Nar Kabuğu	17
1.8. Konunun Önemi	19
1.9. Özgün Değer.....	21
1.10. Araştırma Sorusu.....	22
1.11. Araştırmanın Amaç ve Hedefleri.....	23
1.11.1. Çalışmanın Amacı	23
1.11.2. Çalışmanın Hedefleri.....	23
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	25
2.1. Tarımsal Atıklardan Nanoselüloz İzolasyonu ve Yöntemsel Gelişmeler	25
2.2. Antep Fıstığı Atıkları Üzerine Yapılan Çalışmalar	25
2.3. Nar Kabuğu ve Biyomalzeme Potansiyeli	27
2.4. Karşılaştırmalı Analizler ve Karakterizasyon Çalışmaları	29
3. GEREÇ ve YÖNTEM	30
3.1. Bitki Materyalleri ve Kimyasal Malzemeler	30
3.2. Kullanılan Araç – Gereçler	30
3.3. Antep Fıstığı Kabuklarının Toplanması ve Öğütülmesi	30
3.4. Selülozun Saflaştırılması ve Ağartılması.....	30
3.5. Selülozun Hidrolizi	31
3.6. Nar Kabuklarının Öğütülmesi	32
3.7. Selüloz Saflaştırılması	32
3.8. Selüloz Ağartma İşlemi.....	33
3.9. Alkali İşlemi.....	33
3.10. Nanoselülozların Hazırlanması	33
3.11. Hammaddenin Kimyasal Analizi	34
3.12. Ham Selüloz Tayini	35
3.13. Nanoselüloz Karakterizasyonu.....	35
3.14. Taramalı elektron mikroskopisi (SEM)	35
3.15. X ışınları Kırınımı Spektrometresi (XRD).....	36

3.16. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR).....	36
3.17. Parçacık Boyut Analizi.....	36
4. BULGULAR	37
4.1. Hammaddelerin Ham Selüloz İçerikleri	37
4.2. Fıstık Kabuğu Nanoselüloz Karakterizasyonu	37
4.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	37
4.2.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR).....	38
4.2.3. X ışınları Kırınımı Spektrometresi (XRD).....	40
4.2.4. Parçacık Boyut Analizi.....	41
4.3. Nar Kabuğu Nanoselüloz Karakterizasyon Bulguları	42
4.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	43
4.3.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR).....	44
4.3.3. X ışınları Kırınımı Spektrometresi (XRD).....	46
4.3.4. Parçacık Boyut Analizi.....	47
5. TARTIŞMA.....	49
6. SONUÇLAR	66
7. ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZ GEÇMİŞ	80

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANTEP FISTIĞI KABUĞU VE NAR KABUĞUNDAN NANOSELÜLOZ ELDESİ VE MALZEME KARAKTERİZASYON TESTLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bengü KELENDER

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOLOJİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Arif PARMAKSIZ

2. Danışman: Prof. Dr. Yusuf KURT

Yıl: 2026, Sayfa: 80

Bu çalışmada, stratejik tarımsal atıklar olan Antep fıstığı (*Pistacia vera L.*) ve nar (*Punica granatum*) kabuklarından biyoteknolojik yöntemlerle nanoselüloz izolasyonu gerçekleştirilmiş ve karakteristik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırma sürecinde; hammadde potansiyeli ham selüloz tayini ile belirlenmiş, alkali işlem ve ağartma protokolleri sonrası kontrollü asit hidrolizi ile nano boyuta geçiş sağlanmıştır. Üretilen nanomalzemeler SEM, FTIR ve XRD analizleri ile karakterize edilerek; Antep fıstığı kabuğunun mekanik dayanımı yüksek takviye elemanları için, nar kabuğunun ise yüksek yüzey aktivitesiyle antioksidan özellikli fonksiyonel kompozitler için ideal hammadde kaynakları olduğu saptanmıştır. Uygulanan modifiye ön işlemler ve asit hidrolizi optimizasyonu ile atıl biyokütlenin yüksek saflıkta ve kristal yapısı korunmuş ileri teknoloji ürünlerine dönüşümü başarıyla tamamlanmıştır. Sonuç olarak bu "yeşil" nanokompozitlerin; gıda ambalajından biyomedikal alanlara kadar geniş bir yelpazede fosil yakıt bağımlılığını azaltan, düşük karbon ayak izine sahip ve maliyet-etkin birer alternatif olduğu doğrulanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Nanoselüloz, Biyoteknolojik Yöntemler, Malzeme Karakterizasyonu, Tarımsal atıklar, Sürdürülebilir Nanokompozitler

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

PRODUCTION OF NANOCELLULOSE FROM PISTACHIO SHELL AND POMEGRANATE PEEL AND COMPARATIVE EVALUATION OF MATERIAL CHARACTERIZATION TESTS

Bengü KELENDER

**HARRAN UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL
BIOLOGY**

Thesis Advisor: Prof. Arif PARMAKSIZ

2. Thesis Advisor: Prof. Yusuf KURT

Year: 2026, Page: 80

In this study, nanocellulose isolation was carried out from pistachio (*Pistacia vera L.*) and pomegranate (*Punica granatum*) shells—strategic agricultural wastes—using biotechnological methods, and their characteristic properties were comparatively analyzed. During the research process, raw cellulose content was determined to evaluate feedstock potential, followed by alkaline treatment and bleaching protocols, with the transition to the nanoscale achieved through controlled acid hydrolysis. The synthesized nanomaterials were characterized using SEM, FTIR, and XRD analyses; it was found that pistachio shells are ideal for reinforcement elements with high mechanical strength, while pomegranate peels are critical for developing functional composites with antioxidant properties due to their high surface activity. Through the optimization of modified pre-treatments and acid hydrolysis, the transformation of inert local biomass into high-purity advanced technology products with preserved crystalline structures was successfully accomplished. Consequently, it has been confirmed that these "green" nanocomposites serve as cost-effective and eco-friendly alternatives with a low carbon footprint, reducing fossil fuel dependency across a wide range of applications from food packaging to biomedical scaffolds.

KEYWORDS: Nanocellulose, Biotechnological Methods, Material Characterization, Agricultural Wastes, Sustainable Nanocomposites

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Nanoselüloz malzemelerin kullanıldığı sektörler (Yıldırım, 2018)	13
Çizelge 1.2.	Fıstığın sert kabuğunun temel özellikleri (Okutucu vd., 2011)	16
Çizelge 4.1.	Nar Kabuğu ve Antep Fıstığı Kabuğunun Ham Selüloz Oranları	37
Çizelge 4.2.	Fıstık Kabuğundan elde edilen nanoselüloz FTIR dalga sayısı analizi	40
Çizelge 4.3.	Nar Kabuğundan Elde Edilen Nanoselülozun FTIR Pik Atamaları	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Lignoselülozik biyokütle hücre duvarı yapısı (Brethauer vd., 2020)	6
Şekil 1.2.	Nanoselülozun yapısal türleri (Hubbe vd., 2017)	9
Şekil 1.3.	(a) Bitkilerde veya ağaçlarda bulunan selülozun metreden nanometre ölçeğine kadar hiyerarşik yapısı (b) Nanoselüloz üretiminde selüloz ile kuvvetli asit arasındaki reaksiyonun şematik diyagramı (c) Selüloz sentezleyen bakterilerden kültürlenmiş bakteriyel nanoselüloz (Miyashiro vd., 2020)	10
Şekil 1.4.	Şanlıurfa ve GAP bölgesinin tarım alanı (Al, 2021)	14
Şekil 3.1.	Fıstık kabuğundan nanoselüloz eldesi	32
Şekil 3.2.	Nar Kabuklarından elde edilen nanoselüloz prosesi	34
Şekil 4.1.	Fıstık Kabuğundan Nanoselüloz SEM görüntüleri	38
Şekil 4.2.	Fıstık Kabuğundan elde edilen nanoselülozun FTIR analizi	39
Şekil 4.3.	Fıstık Kabuğundan elde edilen nanoselülozun XRD analizi	41
Şekil 4.4.	Antep fıstığı kabuğu nanoselüloz numunesinin partikül boyut dağılımı (histogram) ve birikimli hacimsel dağılım (undersize) grafiği	42
Şekil 4.5.	Nar Kabuğundan elde edilen nanoselülozun SEM görüntüleri	43
Şekil 4.6.	Nar kabuğundan elde edilen nanoselülozun FTIR analizi	45
Şekil 4.7.	Nar kabuğundan elde edilen nanoselülozun XRD analizi	47

KISALTMALAR

CMC	Karboksimetil Selüloz
BNC	Bakteriyel nanoselüloz
CrI	Kristallenme İndeksi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
MFC	Mikrofibrillenmiş selüloz
MPa	Megapaskal
PCNCs	Nar Kabuğu Kaynaklı Selüloz Nanokristalleri
CNF	Selüloz Nanofibrilleri
GPa	Gigapaskal
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
NCC	Nanokristalin selüloz
PPE	Nar Kabuğu Ekstraktı
XRD	X Işınları Kırınımı Spektrometresi
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu

SİMGELER

°C	Celsius
≈	Yaklaşık eşittir
μm	Mikrometre veya mikron
Θ	Teta

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, tarımsal atıkların yüksek katma değerli biyomalzemelere dönüştürülmesi modern biyoteknolojinin öncelikli alanlarından biri haline gelmiştir. Bu çalışma; bölge ekonomisinde stratejik öneme sahip olan Antep fıstığı (*Pistacia vera* L.) ve Nar (*Punica granatum*) kabuğu atıklarından kontrollü asit hidrolizi yöntemiyle nanoselüloz izolasyonunu gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Elde edilen biyomalzemelerin yapısal ve morfolojik özellikleri; SEM, FTIR, XRD ve Parçacık Boyut analizleri ile karakterize edilerek karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Araştırma, yerel tarımsal atıkların nanoteknolojik uygulamalar için maliyet-etkin ve çevre dostu bir hammadde kaynağı olarak kullanım potansiyelini kanıtlamayı ve atık yönetimine sürdürülebilir bir alternatif sunmayı hedeflemektedir.

1.1. Tarımsal Atıkların Değerlendirilmesi

Atıkların geri dönüşüm ve geri kazanım mekanizmalarına dahil edilmeden bertaraf edilmesi, hem hammadde hem de enerji bağlamında önemli bir kaynak kaybı teşkil etmektedir. Küresel nüfus artışı ve yükselen yaşam standartlarına paralel olarak, tüketim hacminde de kaçınılmaz bir ivmelenme gözlemlenmektedir. Söz konusu durum, doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı yoğunlaştırarak küresel ekosistemin dengesini sarsmakta ve kısıtlı kaynakların artan talebi karşılama noktasında yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, doğal kaynakların verimli bir şekilde yönetilmesinin stratejik önemi gün geçtikçe daha belirgin hale gelmektedir (İncikarakaya vd., 2013). Son dönemde küresel ölçekte, sıfır atık uygulamaları hem bireyler hem de organizasyonlar nezdinde bir standart haline gelmektedir. Bir atık yönetim felsefesi olarak benimsenen 'Sıfır Atık'; israfın engellenmesini, hammadde kullanımında verimliliğin maksimize edilmesini ve atık üretiminin kaynağında bertaraf edilmesini odağına alan ülkesel bir stratejidir. Bu yaklaşım, atık oluşumunun kaçınılmaz olduğu durumlarda ise materyallerin tasnif edilerek geri dönüşüm döngüsüne kazandırılmasını hedeflemektedir (Anonim, 2023). Bu vizyon çerçevesinde, Türkiye'deki tarımsal atıkların geri kazanımı stratejik bir öncelik teşkil etmektedir. Tarım sektörü, 8 milyar sınırına dayanan küresel nüfusun gıda arz güvenliğini sağlayan temel unsurdur. Dünya genelinde milyonlarca insan açlık ve malnütrisyon (beslenme yetersizliği) kriziyle

karşı karşıyayken, eş zamanlı olarak devasa boyutlarda gıda israfının yaşanması paradoksal bir durumdur. Dolayısıyla, sürdürülebilir bir gıda ekosisteminin inşası için tarımsal atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesi bir zorunluluktur (TBB, 2023).

Türkiye, 78,5 milyon hektarlık toplam yüzölçümünün 23,8 milyon hektarlık bölümünü tarımsal faaliyetlere ayırmış durumdadır (TÜİK, 2022). Küresel ölçekte FAO verileriyle 4,8 milyar hektar olarak kaydedilen toplam tarım arazileri içerisinde ülkemiz, %0,79'luk bir pay ile temsil edilmektedir (FAO, 2022). Bu geniş tarımsal kapasite, enerji arz güvenliği açısından kritik olan biyokütle potansiyelini de beraberinde getirmektedir; nitekim EİGM tarafından hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası (BEPA) bu kaynağın haritalandırılmasını sağlamıştır. Literatürde biyokütle enerjisi; tarımsal kökenli materyallerin çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik dönüşüm süreçlerinden geçirilerek standartlaştırılmış yakıtlara (katı, sıvı veya gaz) dönüştürülmesiyle elde edilen bitkisel kaynaklı bir enerji türü olarak tanımlanmaktadır (Taşyürek ve Acaroğlu, 2007). BEPA veri altyapısı, iller bazında tarla, bahçe ve sebze üretimi ile bu süreçlerde açığa çıkan atık miktarlarının dijital ortamda sorgulanmasına olanak tanımaktadır. 2021 yılı BEPA verileri incelendiğinde, Türkiye'deki toplam bitkisel atık arzının yıllık 62.206.754 ton olduğu görülmektedir. Bu hacmin sektörel dağılımında; 46.279.245 ton ile tarla bitkileri en büyük payı alırken, sebze üretiminden 11.889.396 ton ve bahçe bitkilerinden 4.038.114 ton atık oluştuğu saptanmıştır (BEPA, 2021). Bu araştırma dahilinde, ilgili veri tabanından sağlanan nicel veriler yerel, bölgesel ve ulusal düzeyde sistematik olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bu veriler, Türkiye'nin bitkisel atık envanterine dair kritik çıkarımlar sunmaktadır. Mevcut literatür incelendiğinde, tarımsal atıkların değerlendirilmesine yönelik çalışmaların temel olarak enerji bitkilerinin ıslahı, biyoetanol ve biyodizel üretimi (Horuz vd., 2015; Deviren vd., 2017) ile biyobriket ve biyopelet gibi katı yakıt formlarının geliştirilmesi (Küsek vd., 2015; Sümer vd., 2016) üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca bu atıkların malç materyali ve kompost gübre olarak kullanımı (Günay ve Dursun, 2018) ile bitki koruma kapsamında biyopestisit potansiyelleri (Arslan, 2020) sıklıkla çalışılan konular arasındadır. Bunların ötesinde tarımsal atıklar; tekstil lifi (Kalaycı vd., 2016) ve nanoselüloz sentezi (Bilek vd., 2019), kompozit levha üretimi (Arslan vd., 2007; Dünder vd., 2010), kağıt endüstrisi girdileri, inşaat sektöründe agrega kullanımı (Çelik ve Gürdal, 2005), mantar yetiştiriciliği (Akçay vd.,

2023) ve gıda sanayinde biyoaktif bileşen eldesi (Özkan vd., 2022) gibi oldukça geniş ve fonksiyonel bir kullanım alanına sahiptir.

Demografik büyüme ve endüstriyel ivmelenmenin tetiklediği hızlı üretim-tüketim döngüsü, hammadde talebinde süreklilik arz eden bir artışa yol açmaktadır. Buna karşın, küresel hammadde rezervlerinin bu hıza paralel olarak daralması, atık yönetiminden kaynaklanan ekolojik krizleri daha görünür kılmıştır. Bu durum, doğal kaynakların sürdürülebilir bir çerçevede üretilmesini ve rasyonel kullanımını zorunlu hale getirmektedir (Horuz vd., 2015). Endüstriyel hammadde tedariğinin çevresel tahribat yaratmadan sürdürülebilmesi için yenilenebilir kaynaklara öncelik verilmesi elzemdir. Özellikle biyolojik olarak parçalanmayan petrol türevli polimerlerin yarattığı kümülatif kirlilik, araştırmacıları geri dönüşüm ve atık valorizasyonu (değerlendirme) üzerine yenilikçi stratejiler geliştirmeye sevk etmektedir (Küsek vd., 2015). Bu noktada tarımsal atıklar; maliyet avantajı, biyo-uyumluluk ve düşük yoğunluk gibi karakteristik özellikleriyle kritik bir potansiyel sunmaktadır. Artan çevresel farkındalıkla birlikte, sürdürülebilir kaynaklı ve biyobozunur materyallere olan eğilim güçlenirken, doğada en yaygın bulunan biyopolimer olan selüloz bu arayışın merkezinde yer almaktadır (Sümer vd., 2016).

1.2. Selüloz

Son otuz yıl içerisinde polisakkaritler, sahip oldukları biyolojik ve fonksiyonel özellikler sayesinde birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan önemli polimerik yapılar arasında yer almıştır. Polisakkaritler, enerji depolama yeteneğine sahip karbonhidrat esaslı polimerler olup, monosakkaritlerin doğrusal veya dallanmış biçimde birleşmesiyle oluşmaktadır. Monosakkarit olarak adlandırılan bu temel birimler, birbirlerine O-glikosidik bağlar aracılığıyla bağlanarak yüksek molekül ağırlıklı yapılar meydana getirir.

Polisakkaritlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri; içerdiği monosakkarit türü, zincir yapısı, dallanma derecesi ve moleküler ağırlık gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu özellikler, çözünürlük davranışı, jel oluşturma kapasitesi ve yüzey karakteristikleri gibi fonksiyonel özellikler üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Endüstride ve biyomalzeme çalışmalarında en yaygın bilinen polisakkaritler arasında nişasta ve selüloz bulunmaktadır (Küsek vd., 2015; Sümer vd., 2016). Nişasta ve selüloz, aynı temel

yapı taşı olan glikoz monomerlerinden oluşmalarına rağmen, bağ yapılarındaki farklılık nedeniyle birbirinden ayrılan iki önemli polisakkarittir. Nişasta, glikoz birimlerinin kovalent alfa bağlarıyla birleşmesi sonucu oluşurken; selüloz, glikoz monomerlerinin beta bağlarıyla bağlanması sonucu meydana gelen uzun ve doğrusal zincirlerden oluşmaktadır. İnsan vücudu alfa bağlarını parçalayabilen enzimlere sahip olduğundan nişasta sindirilebilirken, beta bağlarını parçalayacak enzimlerin bulunmaması nedeniyle selüloz sindirilememektedir (Bahçegül, 2011).

Selüloz, bitki hücre duvarlarının temel yapısal bileşeni olan doğal bir polisakkarit olup, dünyada en yaygın bulunan biyopolimerlerden biri olarak kabul edilmektedir. Doğada bol miktarda bulunması, selülozu ekonomik ve kolay erişilebilir bir hammadde haline getirmektedir. Yapısal açıdan değerlendirildiğinde selüloz; mekanik dayanım, kimyasal kararlılık ve modifiye edilebilirlik bakımından birçok doğal karbon bazlı malzemeye göre üstün özellikler göstermektedir. Ayrıca çeşitli kimyasal ve fiziksel modifikasyonlara hızlı şekilde uyum sağlayabilmesi, farklı endüstriyel uygulamalarda kullanımını artırmaktadır (Bahçegül, 2011).

Selüloz yapısında hem amorf hem de kristalin bölgeler bulunmaktadır. Saf selülozun kristallik oranı yaklaşık %60 seviyelerinde iken, aynı kaynaktan belirli işlemler uygulanarak elde edilen selüloz nanokristallerinde bu oran yaklaşık %80'e kadar ulaşabilmektedir (Kallel vd., 2016). Bitkisel hammaddelerden selüloz elde edilmesinde çeşitli asit işlemleri kullanılabilir. Ancak asit uygulamaları, selülozun yapısal özelliklerinde değişimlere neden olarak korozyon direncinin azalmasına yol açabilmektedir. Bu olumsuz etkilerin azaltılmasında ultrasonik destekli yöntemlerin etkili olduğu bildirilmektedir. Bunun yanı sıra selüloz, kompozit malzemelerle yüksek uyumluluk gösteren bir biyopolimerdir. Uygun oranlarda takviye maddeleriyle desteklendiğinde mekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlanabilmektedir. Bu nedenle selüloz ve türevleri, birçok uygulamada güçlendirici takviye elemanı olarak tercih edilmektedir (Kallel vd., 2016).

Selüloz ilk kez 1838 yılında Anselm Payen tarafından keşfedilmiş ve bitki hücre duvarlarının ana bileşeni olarak tanımlanmıştır. Günümüzde çevre dostu, biyobozunur ve biyoyumlu ürünlere olan ilginin artmasıyla birlikte selüloz, neredeyse sınırsız bir

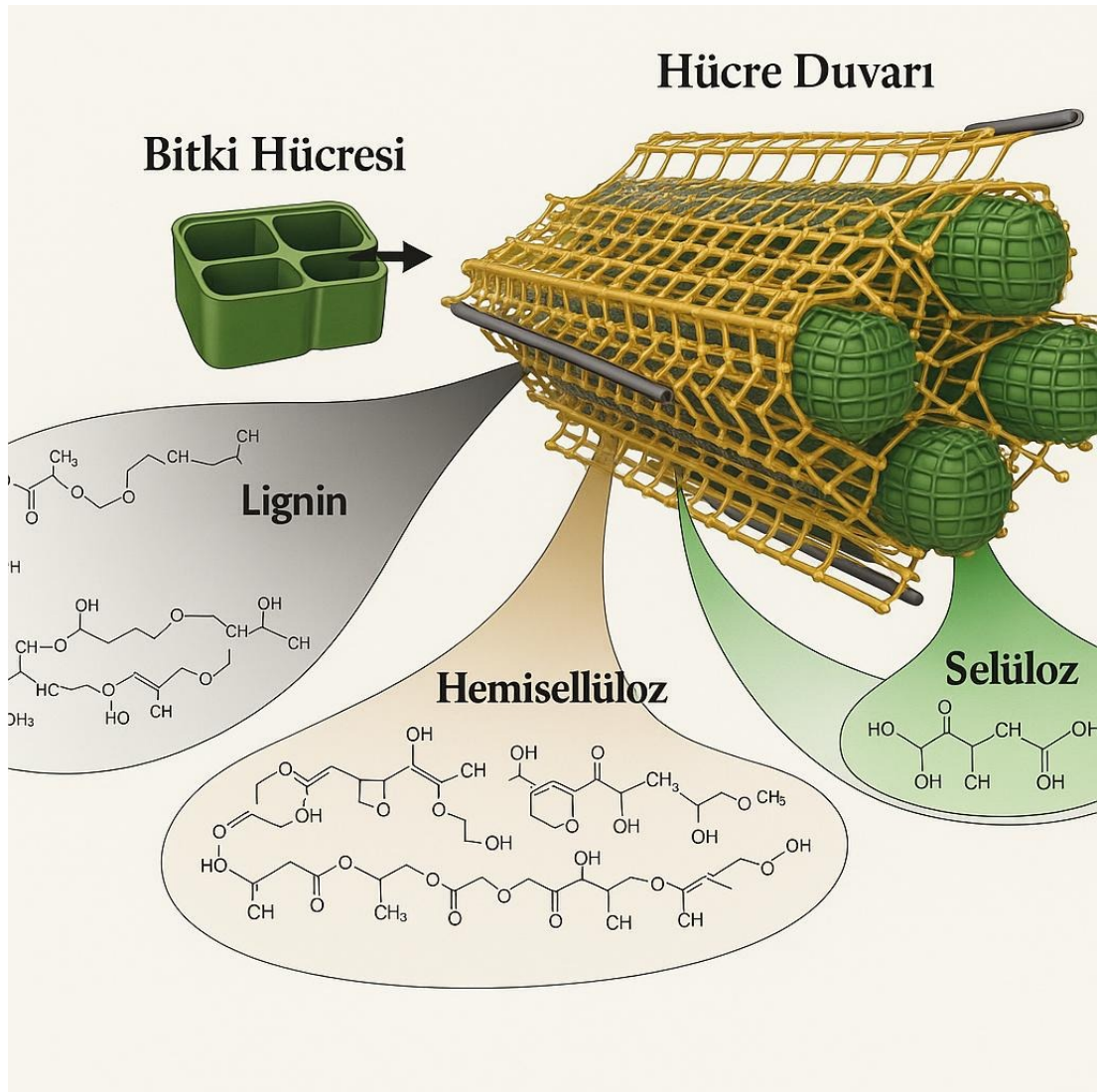
yenilenebilir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Yüksek kristalin yapısı sayesinde suda ve birçok organik çözücüde çözünmeyen kararlı bir polimer özelliği göstermektedir. Bu durum, selülozun doğal stabilitesinin önemli göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Ayrıca yüksek mekanik dayanım ve suya karşı direnç gibi özellikleri sayesinde birçok endüstriyel alanda avantaj sağlamaktadır (Kallel vd., 2016).

Dünyadaki en zengin biyokütle kaynaklarından biri olan selüloz; toksik olmayan, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve düşük maliyetli yapısıyla dikkat çekmektedir. Çok yönlü kullanım potansiyeli sayesinde farklı uygulama alanlarında değerlendirilebilmektedir (Lee vd., 2014). Selülozun yanı sıra lignin ve hemiselüloz ile birlikte bulunan lignoselülozik biyokütleler de sürdürülebilir ve çevre dostu malzeme kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir (Lee vd., 2014).

1.3. Lignoselüloz

Lignoselülozik biyokütle, çevre dostu yapısı sayesinde, fosil yakıtlara dayalı polimerlerin yerine geçebilecek doğal bir lif kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Tarımsal atıklar ve orman kalıntıları gibi biyokütleli atıklar, insan ve hayvan gıda zincirine müdahale etmeden, yüksek katma değerli ürünlerin üretiminde yeniden değerlendirilebilecek önemli bir hammadde potansiyeline sahiptir (Limayem ve Rieke, 2012).

Lignoselülozik biyokütle, bitki hücre duvarını oluşturan üç temel polimerden oluşur: lignin, hemiselüloz ve selüloz (Şekil 1.1). Bu üç bileşenin oranı, biyokütlenin türüne, tipine ve kaynağına göre değişiklik göstermektedir (Rol vd., 2019). Lignin, selüloz ve hemiselülozun oluşturduğu kompleks yapının etrafında ve arasında yer alarak bağlayıcı bir rol üstlenir. Bu bağlayıcı özellik, bitki hücre duvarına sertlik, basınca dayanıklılık, çürümeye karşı direnç ve su geçirmezlik gibi işlevsel avantajlar kazandırır (Rol vd., 2019).



Şekil 1.1. Lignoselülozik biyokütle hücre duvarı yapısı (Brethauer vd., 2020)

Lignin, sinapil alkol, p-kumaril ve koniferil gibi üç farklı fenilpropan monomerinin rastgele çapraz bağlarla oluşturduğu amorf bir kopolimerdir. Bu yapı bir ya da iki metoksil grubunu içerebilen fenolik bileşiklerden oluşur (Terrett ve Dupree, 2019). Lignoselülozik biyokütlerde yer alan bir diğer önemli bileşen ise, selülozla birlikte bitki hücre duvarının yapısal bütünlüğünü destekleyen hemiselülozdur (Terrett ve Dupree, 2019).

1.4. Hemiselüloz

Selülozdan sonra lignoselülozik materyaller içinde en çok bulunan polimer yapı hemiselülozdur (Işıkgör ve Becer, 2015). Hemiselülozlar lignoselülozik biyokütlenin

yaklaşık %15-35'lik kısmını oluşturmaktadır (Limayem ve Ricke, 2012). Pentoz (D-ksiloz, L- arabinoz) ve heksoz (D-mannoz, D-glikoz ve D-galaktoz) şekerlerden oluşan, ksilozca zengin, dallanmış yapıdaki polimerlerdir. Amorf yapıda, dallanmış ve düşük moleküler ağırlığa sahip olduklarından dolayı hidroliz olmaları kolaydır (Mood vd., 2013). Polisakkaritleri seyreltik asit veya baz ile kolayca yapıdan ayrılmakta ve alkali çözeltilerde yüksek oranda çözünmektedirler (Zhou vd., 2017). Ksilan, mannan ve ksiloglukanlar hemiselülozu oluşturan esas yapılarıdır. Doğada en yüksek miktarda bulunan hemiselülozun ana alt dalı ksilandır. Ksilanların, ksiloz ve arabinoz olmak üzere iki alt birimi bulunmaktadır. Mannanlar; mannoz, glikoz ve galaktoz olmak üzere üç alt dala ayrılmakta, bunlardan yalnızca mannoz bazı bitki türlerinin endosperminde bulunmaktadır (Erkoç, 2020). Ksiloglukanlar; glikoz ve ksiloz birimlerinden oluşmakta ve selüloz ile hidrojen bağı oluşturarak hücre duvarının yapısal bütünlüğüne katkıda bulunmaktadır (Naidu vd., 2018). Hemiselülozlar, selülozlarla hidrojen bağı oluştururken, lignin ile kovalent bağ oluşturmaktadır (Farhat vd., 2017).

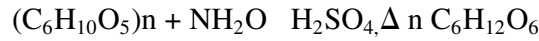
Hemiselüloz, pentoz ve heksoz gibi monomerlerin kısa doğrusal ve dallanmış farklı çeşitteki monomerlerinden oluşan heteropolimer yapıdadır. Hemiselüloz ılımlı koşullarda asit, baz ve enzim ortamlarında hidroliz edilebilir (Terrett ve Dupree, 2019). Lignin, hemiselüloz ve selüloz gibi temel bileşenlerin ayrıştırılmasıyla elde edilen değerli ürünler arasında, özellikle selülozun kontrollü işlemlerle nano boyutlara indirgenmesiyle elde edilen *nanoselüloz*, son yıllarda büyük ilgi görmektedir (Farhat vd., 2017).

1.5. Nanoselüloz

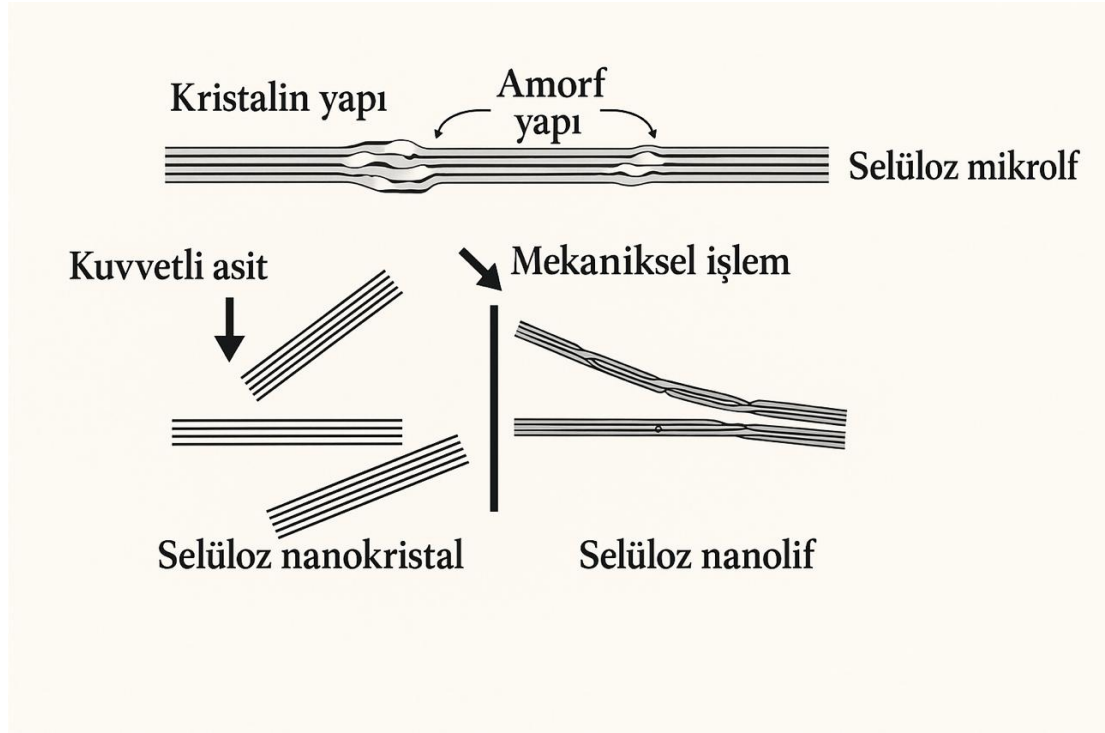
Nanoselüloz, bitki hücre duvarlarından izole edilen ve nano boyutlu yapıya sahip doğal bir biyomalzemedir. Nano ölçekteki yapısı sayesinde yüksek mekanik dayanım, üstün sertlik ve geniş özgül yüzey alanı gibi önemli fiziksel özellikler göstermektedir. Bunun yanı sıra, yapısında yoğun şekilde bulunan hidroksil grupları nanoselülozun kimyasal olarak kolaylıkla modifiye edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde nanoselüloz; kompozit malzemelerden biyomedikal uygulamalara kadar birçok farklı alanda kullanım potansiyeline sahip yenilikçi bir nanomalzeme olarak öne çıkmaktadır (Phanthong vd., 2018). Bu özellikler, nanoselülozu biyomedikal ürünlerden nanokompozit malzemelere,

tekstilden ambalajlamaya kadar birçok alanda kullanılabilir hâle getirmektedir. Nanoselüloz üzerine yapılan çalışmalar yalnızca biyokütleden elde edilmesiyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda farklı alanlardaki yeni uygulamalara da kapı aralamaktadır (Phanthong vd., 2018).

Nanoselüloz lifleri genellikle 100 nm'den daha küçük çapa ve birkaç mikrometre uzunluğa sahiptir. Bu lifler; düşük yoğunluk, yüksek çekme dayanımı, geniş yüzey alanı/hacim oranı ve üstün mekanik özellikler gibi nitelikler göstermektedir. Aynı zamanda hidroksil gruplarının yüksek reaktivitesi, yüzey özelliklerinin istenilen şekilde işlevsel hâle getirilmesini mümkün kılar (Phanthong vd., 2018). Nanoselüloz genel olarak üç temel gruba ayrılmaktadır: mikrofibrillenmiş selüloz (MFC), nanokristalin selüloz (NCC) ve bakteriyel nanoselüloz (BNC). MFC ve NCC, doğal selülozik liflerin parçalanması ve mikrofibrillerin ayrıştırılarak izole edilmesi sonucunda elde edilirken, bakteriyel nanoselüloz ise biyoteknolojik yöntemlerle sentezlenmektedir. BNC üretimi, aerobik özellik gösteren *Gluconacetobacter* türü bakteriler, özellikle de *Acetobacter xylinum* aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu üretim yöntemi, “bottom-up” yaklaşımı olarak tanımlanmakta olup düşük molekül ağırlıklı şekerlerin bakteriler tarafından biyosentez yoluyla polimerize edilmesine dayanmaktadır. Bakteriyel sentez süreci, üretim koşullarına bağlı olarak birkaç gün ile birkaç hafta arasında değişebilmektedir (Phanthong vd., 2018).



Nanokristalin selüloz (CNC), yukarıdaki denklemde bahsedildiği şekilde n polimerizasyon derecesini temsil eder ve asit hidrolizi sırasında glikosidik bağların kopuşunu sembolize etmektedir. Bu yöntemde amorf bölgeler uzaklaştırılırken, kristalin yapılar korunur. Öte yandan mikrofibril selüloz (NFC), uzun ve esnek yapıdaki selüloz liflerinden mekanik işlemlerle elde edilir. NFC'de kristalin ve amorf bölgeler birlikte bulunur ve amorf yapılar tamamen uzaklaştırılmış değildir (Şekil 1.2). CNC'ye kıyasla daha yüksek uzunluk/çap oranına ve daha geniş yüzey alanına sahiptir. Ayrıca reaktif hidroksil grupları sayesinde yüzey modifikasyonları açısından avantajlıdır (Phanthong vd., 2018).



Şekil 1.2. Nanoselülozun yapısal türleri (Hubbe vd., 2017)

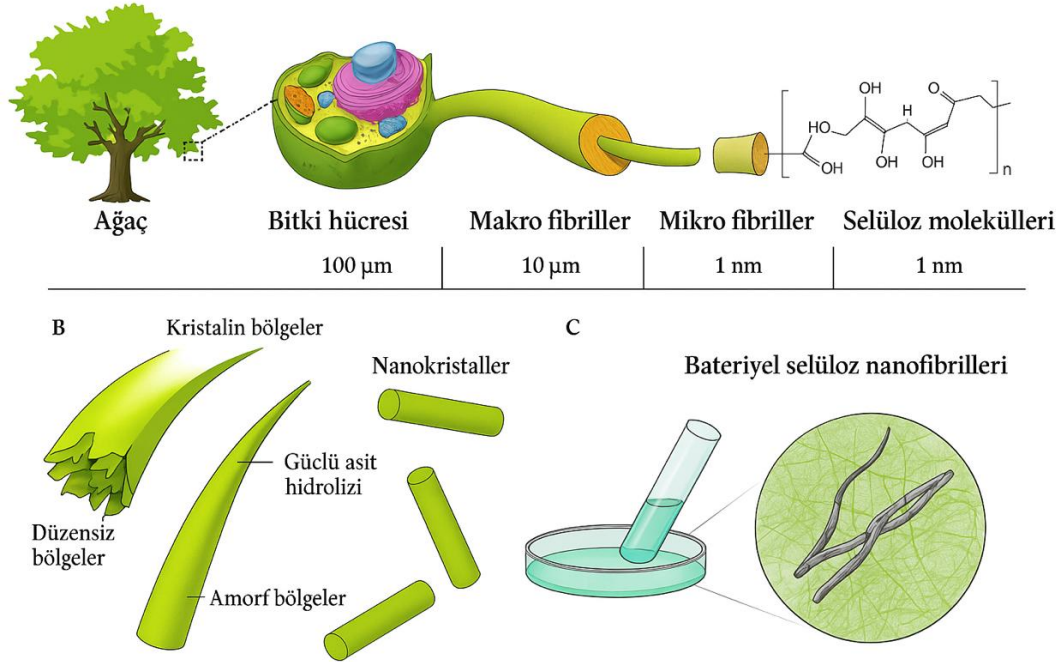
Doğal kökenli bir nanomalzeme olan nanoselüloz (NC), geri dönüştürülebilir olması, biyoyuymululuk göstermesi, düşük toksisite riski taşıması ve yüzey özelliklerinin kolaylıkla düzenlenebilmesi gibi avantajları nedeniyle son yıllarda bilimsel araştırmalarda önemli ölçüde dikkat çekmektedir (Dufresne, 2012; Lin ve Dufresne, 2014; Salimi vd., 2019). Sahip olduğu bu üstün özellikler, nanoselülozun biyomedikal uygulamalardan kompozit malzemelere, ambalaj teknolojilerinden çevresel uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır.

Nanoselüloz yapıları genel olarak üç temel grupta sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.3):

1. **Selüloz Nanokristalleri (CNC):** Nanokristalin selüloz, selüloz nanokılçıkları veya çubuk benzeri mikrokristaller olarak da adlandırılmaktadır. Yüksek kristallik oranına sahip olan bu yapı, özellikle mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir.
2. **Selüloz Nanofibrilleri (CNF):** Nanofibrillenmiş selüloz ya da mikrofibrillenmiş selüloz olarak da bilinmektedir. Selüloz nanofiberleriyle eş anlamlı kullanılan bu yapı, uzun ve esnek fibril ağlarından oluşması nedeniyle yüksek yüzey alanı ve güçlü mekanik

özellikler göstermektedir.

3. **Bakteriyel Selüloz (BC):** Mikrobiyal selüloz olarak da ifade edilen bu nanoselüloz türü, bakteriler tarafından biyosentetik yollarla üretilmektedir. Yüksek saflıkta olması ve üç boyutlu ağ yapısı oluşturabilmesi nedeniyle özellikle biyomedikal ve doku mühendisliği çalışmalarında dikkat çekmektedir (Lin ve Dufresne, 2014).



Şekil 1.3. (a) Bitkilerde veya ağaçlarda bulunan selülozun metreden nanometre ölçeğine kadar hiyerarşik yapısı (b) Nanoselüloz üretiminde selüloz ile kuvvetli asit arasındaki reaksiyonun şematik diyagramı (c) Selüloz sentezleyen bakterilerden kültürlenene bakteriyel nanoselüloz (Miyashiro vd., 2020)

Nanoselüloza olan ilginin son yıllarda hızla artmasının temelinde birçok önemli faktör bulunmaktadır. Öncelikle nanoselüloz, geleneksel kağıt hamuru üretimi ve ağartma teknolojilerine benzer süreçler kullanılarak odun kökenli biyokütlelerden ekonomik biçimde üretilmektedir. Ayrıca karbon nanotüpler ve grafen gibi ileri nanomalzemelere yönelik teknolojik gelişmeler, nanoselülozun doğal ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmasını sağlamıştır. Yenilenebilir biyokütle kaynaklarından elde edilmesi; enerji tüketimi, çevresel etki ve güvenlik açısından avantaj sağlaması nedeniyle nanoselülozu çevre dostu bir nanomalzeme haline getirmektedir. Bunun yanında, özellikle gelişmiş ülkelerde kağıt

ve kağıt hamuru endüstrilerinin ağaç liflerine yönelik yeni kullanım alanları arayışı da nanoselüloza olan ilgiyi artırmaktadır. Nanoselülozun biyotabanlı bir nanomalzeme olarak geniş uygulama potansiyeline sahip olması, bu malzemenin önemini daha da artırmaktadır (Isogai, 2013).

Nanoselüloz (NC), yalnızca bitkisel kaynaklardan değil, farklı organizmalardan elde edilen selülozik biyokütlelerden de üretilen doğal bir nanomalzemedir. Selüloz nanokristalleri (CNC) ve selüloz nanofibrilleri (CNF), üretim yöntemlerine bağlı olarak farklı yapısal özellikler göstermektedir. CNC genellikle asit hidrolizi yöntemiyle üretilirken, CNF çoğunlukla mekanik işlemler kullanılarak elde edilmektedir. CNC yapısı daha yüksek kristallik oranına sahipken, CNF daha amorf karakter göstermektedir. Bu yapısal farklılıklar, her iki nanoselüloz türünün kullanım alanlarını da belirlemektedir (Isogai vd., 2011; Bharimalla vd., 2015).

Literatürdeki çalışmalar, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) aracılığıyla CNC ve CNF'nin mekanik karakterizasyonuna odaklanmıştır. Yapılan analizlerde, özellikle TEMPO oksidasyon yöntemiyle sentezlenen nanoliflerin, yaklaşık 200–300 MPa çekme dayanımı ve 6–7 GPa elastik modül değerleri sergilediği saptanmıştır. Nanofibril selülozun sahip olduğu bu üstün mekanik direnç, ekonomik parametrelerle desteklendiğinde; düşük ağırlıklı, mukavemeti yüksek ve ileri performanslı kompozitlerin üretimi için stratejik bir temel oluşturmaktadır (Isogai vd., 2011; Bharimalla vd., 2015).

Tüm bu özellikleriyle nanoselüloz, sürdürülebilir ve çevre dostu malzeme arayışlarının yoğunlaştığı günümüzde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Selülozun doğada bol miktarda bulunması, yenilenebilir olması ve nanoselülozun üstün fiziksel ile kimyasal özellikler göstermesi, bu malzemelerin hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda büyük önem kazanmasını sağlamaktadır (Bharimalla vd., 2015). Bu çalışma kapsamında ise, selülozun amorf bölgelerinin uzaklaştırılarak yüksek kristallik oranına sahip yapıların elde edilmesi amaçlandığından, nanoselüloz üretiminde asit hidrolizi yöntemi tercih edilmiştir.

1.6. Nanoselülozun Kullanım Alanları

Nanoselüloz polimeri, doğal ve organik yapısının yanı sıra sahip olduğu üstün performans özellikleri nedeniyle birçok geleneksel malzemeye kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Düşük yoğunluğa rağmen yüksek mekanik dayanım göstermesi, bu malzemenin farklı uygulama alanlarında tercih edilmesini sağlamaktadır. Özellikle nanoselülozun çelikten yaklaşık beş kat daha hafif olmasına karşın çeliğe yakın özgül mukavemet değerleri sergilemesi, yüksek performanslı ve hafif biyo-kompozit malzeme geliştirme çalışmalarında araştırmacıların ilgisini bu materyale yönlendirmiştir (Lee vd., 2014).

Mekanik özelliklerinin yanında nanoselülozun bir diğer önemli avantajı da termal kararlılığıdır. Daha önce yapılan çalışmalarda selüloz nanokristalleri (SNK) ve selüloz nanofibrillerin (SNL) ısı bozunma sıcaklıklarının yaklaşık 250 °C ile 350 °C arasında değiştiği rapor edilmiştir (Rebouillat ve Pla, 2013; Yıldırım vd., 2014). Bu durum, nanoselülozun belirli sıcaklık aralıklarında yapısal stabilitesini koruyabildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte nanoselülozun doğasından kaynaklanan bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ağaç ve bitkisel kaynaklardan elde edilmesi nedeniyle hidrofilik (su seven) bir karaktere sahip olması, su ile etkileşimini artırmakta ve bazı uygulamalarda sınırlayıcı bir faktör oluşturmaktadır. Ayrıca yanıcı bir malzeme olması da kullanım alanlarını kısıtlayan diğer bir özelliktir. Ancak yapılan araştırmalar, bu dezavantajların çeşitli yüzey modifikasyonları ve kimyasal işlemlerle giderilebildiğini ve yangına ile suya dayanıklı nanoselüloz bazlı materyallerin geliştirilebildiğini göstermiştir (Korhonen vd., 2011; Wicklein vd., 2014; Yıldırım, 2018).

Yeni nesil nanoselüloz malzemeler, sahip oldukları çok yönlü özellikler sayesinde geniş bir uygulama yelpazesinde değerlendirilmektedir. Orman ürünleri endüstrisinde kağıt üretimi ve güçlendirilmesi (Campano vd., 2018), panel malzeme üretimi (Yıldırım vd., 2014), köpük malzemeler (Svagan vd., 2008) ve yanmaz yalıtım sistemleri (Yıldırım, 2018) gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra biyomedikal alanda yapay organ üretimi (Nimeskern vd., 2013), iyileştirici yapay deri uygulamaları (Mualla vd., 2016) ve virüs filtreleme sistemleri (Mitreveli vd., 2014) gibi ileri teknoloji uygulamalarında da yer almaktadır. Bu örnekler nanoselülozun potansiyel kullanım alanlarının yalnızca bir kısmını temsil etmekte olup, günümüzde bu malzemenin uygulama alanlarının giderek daha da

genişlediği görülmektedir.

Çizelge 1.1. Nanoselüloz malzemelerin kullanıldığı sektörler (Yıldırım, 2018)

Multidisipliner Sektörler	Orman Ürünleri Sektörü
3D Üretim	Polimerler
Tutkallar	Elektrik
Kimyasallar	Enerji
Tarım	Plastikler
Otomobil	Sağlık ve İlaç
Biyoteknoloji	Kompozit Malzemeler
Yapı Malzemeleri	Plastik Mobilya Ürünleri
Kozmetik	Kağıt Teknolojileri
Savunma	Panel Ürünler
Araştırma	Paketleme
Filtreleme	Köpük Üretimleri
Besin Paketleme	Ambalajlama

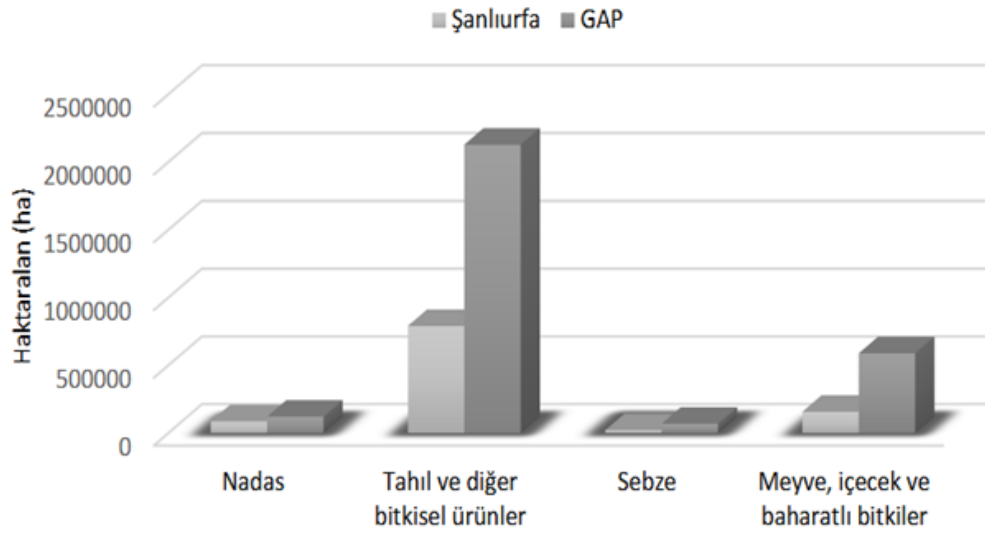
Tüm bu bilgiler ışığında, nanoselülozun doğal, çevre dostu yapısının yanı sıra sahip olduğu yüksek mekanik ve termal performans özellikleri, onu birçok sektörde vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir. Yangına ve suya dayanıklı hale getirilebilmesi, sürdürülebilir üretim yöntemleriyle elde edilebilmesi ve çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olması, nanoselülozu geleceğin malzemesi konumuna taşımaktadır. Bu çerçevede, nanoselüloz üretimi için uygun selülozik kaynaklara erişim büyük önem taşımaktadır. Özellikle tarımsal üretimin yoğun olduğu bölgelerde, tarımsal atıkların değerlendirilmesi bu alanda önemli bir fırsat sunmaktadır.

1.7. Şanlıurfa ve Tarımsal Atık Potansiyeli

Şanlıurfa, 19.451 km²'lik yüzölçümü ile Türkiye'nin önemli tarım merkezlerinden biridir. İl, 1. sınıf kaliteli toprak varlığı açısından Adana ilinden sonra Türkiye'de ikinci sırada yer almaktadır (Karaağaç vd., 2006). Ayrıca Türkiye toplam tarım alanlarının yaklaşık %4,9'una sahip olup, bu oranla Konya ve Ankara'dan sonra üçüncü sırada bulunmaktadır (Çevre Durum Raporu, 2015). Güneydoğu Anadolu Bölgesi içinde ise en geniş tarım

arazisine sahip il konumundadır. Şanlıurfa’da toplam arazi kullanımının %59,3’ü tarım alanı olarak değerlendirilmektedir (Çevre Durum Raporu, 2015).

2018 yılı verilerine göre Şanlıurfa ili ile GAP (Güneydoğu Anadolu Projesi) bölgesinin tarımsal alan dağılımı karşılaştırıldığında, Şanlıurfa’nın bölgedeki toplam tarım arazisinin %36,3’ünü oluşturduğu görülmektedir (Şekil 1.4). İlin tarımsal üretim alanları; tahıl ve diğer bitkisel ürünler, sebze üretim alanları ile meyve, içecek ve baharat bitkileri yetiştirilen alanlar olmak üzere üç temel kategoride değerlendirilmektedir. Bu kapsamda tarım arazilerinin dağılımında tahıl ve diğer bitkisel ürünler %37,2, sebze bahçeleri %29,6 ve meyve, içecek ile baharat bitkileri ise %26,7 oranında yer kaplamaktadır. Genel değerlendirmede ise tahıl ve diğer bitkisel ürünler, ilin toplam tarım arazisinin yaklaşık %75’ini oluşturmaktadır (Al, 2021).



Şekil 1.4. Şanlıurfa ve GAP bölgesinin tarım alanı (Al, 2021)

Şanlıurfa’nın Türkiye genelinde sahip olduğu geniş ve verimli tarım alanları, ilde yıl boyunca büyük miktarlarda bitkisel üretim yapılmasını sağlamaktadır. Bu üretim faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan tarımsal atık miktarı da oldukça yüksektir ve bu atıklar, uygun yöntemlerle değerlendirilmediğinde çevresel sorunlara yol açabilmektedir. Bu atıklar içerisinde, içerdiği lignoselülozik yapı ve yüksek miktarda üretimiyle dikkat çeken Fıstık kabuğu ve Nar kabuğu, bu çalışmada değerlendirilen başlıca biyokütle hammaddeleri olarak

öne çıkmaktadır.

1.7.1. Fıstık Kabuğu

Ekonomik katma değeri yüksek bir kültürel tür olan Antep fıstığı, *Pistacia* cinsine dahil olup literatürde *Pistacia vera* L. olarak tanımlanmaktadır. Türkiye’de, özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi fıstık tarımının stratejik merkezi konumundadır; bölgedeki ağaç varlığı ve toplam üretim kapasitesi düzenli bir yükseliş grafiği sergilemektedir. Ancak fıstığın ticari işleme süreçlerinde meyvenin iç kısmının ayrıştırılması, biyokütle karakteristiğine sahip yüksek hacimli atık kabuk kütlelerinin açığa çıkmasına neden olmaktadır. Dünya Antep fıstığı üretim projeksiyonunda Türkiye; İran, Suriye ve Amerika Birleşik Devletleri ile birlikte lider üreticiler arasında konumlanmaktadır. Ulusal ölçekte ise üretimin yaklaşık %75’lik gibi büyük bir bölümü stratejik olarak Şanlıurfa ve Gaziantep illerinden sağlanmaktadır. Besinsel kompozisyonu bakımından *Pistacia vera* L.; %22,6 protein, %15,6 karbonhidrat içeriği ve 3250 kcal’lik yüksek enerji değeriyle karakterize edilmektedir. Ayrıca %54,5’lik lipid (yağ) oranıyla fıstığın ardından en zengin yağ içeriğine sahip meyveler arasında yer alması, ürünü hem yerel hem de küresel piyasalarda yüksek ticari potansiyele sahip bir meta haline getirmektedir (Altuntaş ve Mutlu, 2007).

Antep fıstığının endüstriyel işleme sürecinde morfolojik olarak iki temel atık bileşeni açığa çıkmaktadır: perikarp olarak adlandırılan kırmızı yumuşak dış kabuk ve endokarp yapısındaki sert iç kabuk. Toplam meyve ağırlığının yaklaşık %18’ine tekabül eden yumuşak dış kabuk, Türkiye ölçeğinde yıllık ortalama 13.000 tonluk bir atık hacmi oluşturmaktadır (Demiral vd., 2008). Meyvenin koruyucu tabakasını teşkil eden sert iç kabuk ise toplam kütleinin yaklaşık %45’lik kısmını kapsamaktadır (Açıkalın vd., 2012).

Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) çerçevesinde sulanabilir arazilerin genişlemesi, Antep fıstığı rekoltesinde belirgin bir artışı beraberinde getirmiş; bu durum kümülatif atık hacminin de yükselmesine yol açmıştır. Söz konusu atık stoklarının katma değerli ürünlere dönüştürülebilmesi için kimyasal kompozisyonlarının ve morfolojik yapılarının detaylıca analiz edilmesi stratejik bir gerekliliktir (Açıkalın vd., 2012).

Fıstık işleme sürecinde oluşan sert kabuğa ait bazı analiz sonuçları Tablo 1.2’de verilmiştir. Yüksek miktarda üretim potansiyeline sahip bu atıklar, günümüzde çoğunlukla

yakma veya depolama gibi düşük verimli ve çevresel açıdan olumsuz yöntemlerle bertaraf edilmektedir. Ancak gelişen termokimyasal ve ileri dönüşüm teknolojileri sayesinde bu kabukların, çevre dostu biyomalzemelerin üretiminde değerli bir hammadde olarak değerlendirilme potansiyeli bulunmaktadır.

Çizelge 1.2. Fıstığın sert kabuğunun temel özellikleri (Okutucu vd., 2011)

Özellik	Değer
Proximate analizi (ağırlıkça %)	
Nem	6,99
Uçucu madde	80,01
Sabit karbon	12,08
Kül	0,09
Ultimate analizi (kuru, ağırlıkça %)	
C	42,41
H	5,64
N	0,07
S	0,01
O	51,87
HHVb (MJ/kg)	17,88
Bileşen analizi (kuru, ağırlıkça %)	
Selüloz	53,98
Hemiselüloz	20,10
Lignin	25,25
Estraktifleri	0,67

Bölge ekonomisi açısından önemli bir yere sahip olan ve yüksek ekonomik değer taşıyan bu tarımsal ürünün yan ürünleri ne yazık ki yeterli düzeyde değerlendirilememektedir. Özellikle sert kabuk olarak adlandırılan atık fraksiyonun sektörde en yaygın değerlendirilme yöntemi yakma işlemi olup, bu durum hem enerji geri kazanımı açısından sınırlı verimlilik sağlamakta hem de çevresel etkiler oluşturmaktadır (Hazal vd., 2023).

Bu bağlamda, fıstık sert kabuğunun bileşiminde yer alan yaklaşık %53,98 oranındaki

selüloz içeriği, çevre dostu biyomalzeme üretimi açısından dikkat çekici bir potansiyel sunmaktadır. Selüloz; biyobozunur yapısı, yenilenebilir olması, yüksek mekanik dayanım göstermesi ve kimyasal modifikasyona uygunluğu sayesinde sürdürülebilir malzeme geliştirme çalışmalarında en çok tercih edilen doğal polimerlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, yürütülen çalışmada selüloz bazlı hammaddelerin değerlendirilmesi temel araştırma konusu olarak ele alınmıştır.

Benzer şekilde, gıda endüstrisinden kaynaklanan nar kabuğu atıkları da yüksek selüloz içeriği sayesinde değerlendirilebilecek önemli bir lignoselülozik biyokütle kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Bu tür atıkların alternatif hammadde olarak kullanılması, hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakta hem de katma değeri yüksek biyomalzeme üretimi için önemli fırsatlar sunmaktadır.

1.7.2. Nar Kabuğu

Lythraceae familyası (Kınagiller) içerisinde yer alan *Punica* cinsine ait çok yıllık bir bitki olan nar (*Punica granatum*), hem ekonomik hem de kültürel açıdan yüksek öneme sahip bir meyve türüdür (Gölkücü vd., 2011). Narın kültürel geçmişi oldukça eski dönemlere dayanmakta olup, bazı kaynaklarda yetiştiriciliğinin yaklaşık 5000 yıl öncesine uzandığı bildirilmektedir. Anavatanı İran, Batı Asya ve Akdeniz havzası olarak kabul edilen nar; günümüzde Çin, Hindistan, Afganistan, İran ve Arabistan'ın yanı sıra Şili, Arjantin, ABD'nin Kaliforniya ve Arizona eyaletleri ile Kuzey Meksika'da da ticari olarak yetiştirilmektedir (Opara vd., 2009; Kurt ve Şahin 2013; Teixeira da Silva vd., 2013; Gündoğdu vd., 2015; Özgüven vd., 2015). Türkiye'de ise Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nden Doğu Karadeniz'e kadar uzanan geniş bir ekolojik dağılım göstermekte olup, çok düşük sıcaklıkların görüldüğü bölgeler dışında yaygın olarak yetiştirilebilmektedir. Nar özellikle sıcak ve kurak iklim koşullarına adaptasyonu yüksek bir türdür (Özkal ve Dinç, 1993). Türkiye'de nar yetiştiriciliği tarihsel olarak uzun bir geçmişe sahip olmasına rağmen, modern meyvecilik sistemi içerisindeki gelişimi özellikle 2000'li yıllardan itibaren belirgin bir ivme kazanmıştır (Kurt ve Şahin, 2013).

Türkiye'de nar üretim verileri incelendiğinde, son yıllarda üretim miktarında önemli bir artış eğilimi olduğu görülmektedir. Nitekim 2000 yılında 59.000 ton olan üretim miktarı,

2006 yılında 90.737 ton, 2010 yılında 208.502 ton ve 2016 yılında 465.200 tona ulaşmıştır. Bu veriler, yaklaşık on beş yıllık süreçte üretimin yaklaşık beş kat arttığını göstermektedir (TÜİK, 2017). Üretimdeki bu artış, narın endüstriyel işleme kapasitesini de artırmış, özellikle meyve suyu sanayisinde işlenen miktarlarda önemli yükselişler meydana gelmiştir. 2010 yılı verilerine göre üretilen yaklaşık 208 bin ton narın 78,7 bin tonu meyve suyu üretiminde kullanılmış ve bu süreç sonucunda 7,5 bin ton nar suyu konsantresi elde edilmiştir (Akdağ, 2011). Nar kabuğunun meyve toplam ağırlığının yaklaşık %26–40’ını oluşturduğu dikkate alındığında, yalnızca meyve suyu üretim süreçlerinden kaynaklanan kabuk atığının yaklaşık 7,5–11,5 bin ton seviyelerine ulaştığı hesaplanmaktadır (İsmail vd., 2012; Çam vd., 2014).

Nar (*Punica granatum*), taze tüketimin yanı sıra gıda sanayisinde işlenerek farklı ürün formlarında da değerlendirilen bir meyve türüdür. Endüstriyel işleme süreçleri sonucunda meyvenin yaklaşık %50’si kabuk, posa ve çekirdek gibi yan ürün veya atık fraksiyonlar halinde ortaya çıkmaktadır. Özellikle kabuk kısmı, çeşit ve tür farklılıklarına bağlı olarak meyve ağırlığının %33–40’ını oluşturmakta ve yüksek fenolik bileşik içeriği ile dikkat çekmektedir. Bu özellikleri nedeniyle nar kabuğu, yalnızca atık bir yan ürün olmayıp aynı zamanda fonksiyonel bileşenler açısından değerli bir biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Sarıca, 2011; Şengül, 2013).

Küresel ölçekte gıda kaybı ve israfı, sürdürülebilir gıda sistemlerinin sağlanmasında kritik bir sorun alanı olarak değerlendirilmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) 2024 yılı verilerine göre, dünya genelinde üretilen gıdanın yaklaşık %19’u (yaklaşık 1,05 milyar ton) perakende, gıda hizmetleri ve hane halkı düzeyinde israf edilmektedir (UNEP, 2024). Bu durum, gıda güvenliği açısından önemli bir kaynağın verimsiz kullanımına işaret etmektedir. Gıda kaybı ve israfının oluşum aşamaları ülkelerin gelişmişlik düzeyine bağlı olarak farklılık göstermekte olup, gelişmekte olan ülkelerde üretim ve hasat sonrası süreçler öne çıkarken, gelişmiş ülkelerde tüketici kaynaklı israf baskın hale gelmektedir. Ayrıca bu kayıpların çevresel etkisi de oldukça yüksektir; küresel gıda israfının sera gazı emisyonlarının yaklaşık %8–10’unu oluşturduğu bildirilmektedir (IPCC, 2019; UNEP, 2024).

Avrupa özelinde yapılan değerlendirmelerde, toplam gıda atığının %42’sinin hane

halkı, %39'unun gıda üretim ve işleme, %14'ünün hizmet sektörü ve %5'inin ise toptan-perakende sektöründen kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca tüketici düzeyinde satın alınan gıdaların %30–68'inin israf edildiği ve kişi başına yıllık gıda atığının 280–300 kg seviyelerine ulaştığı rapor edilmiştir (Commission, 2010; Gustavson vd., 2011). Türkiye'de ise gıda sanayisinin üretim kapasitesi dikkate alındığında, özellikle meyve-sebze işleme tesislerinde önemli miktarda organik atık oluştuğu görülmektedir. TÜİK 2011 verilerine göre toplam atık miktarı 25,8 milyon ton olup, bunun %49,5'ini gıda sektörünün oluşturduğu belirtilmiştir (Sezer ve Arıkan, 2011). 2016 yılı verilerine göre ise kişi başına günlük ortalama atık miktarı 1,17 kg olarak tespit edilmiştir.

Bu atıkların önemli bir kısmı hayvan yemi olarak değerlendirilebilmekle birlikte, büyük bir bölümü doğrudan atık olarak bertaraf edilmektedir. Bununla birlikte, literatürde söz konusu yan ürünlerin besinsel ve biyokimyasal açıdan yüksek değer taşıdığına ilişkin çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Özellikle meyve işleme endüstrisinden elde edilen kabuk ve çekirdek fraksiyonlarının toplam meyve kütlesinin yaklaşık %50'sini oluşturduğu ve fenolik bileşikler açısından oldukça zengin olduğu bildirilmiştir. Nar kabuğundaki fenolik madde konsantrasyonunun, meyvenin yenilebilir kısmına kıyasla yaklaşık 10 kat daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Bocco vd., 1998; Gorinstein vd., 2002; Someya vd., 2002). Bu bulgular, tarımsal biyokütlenin daha etkin değerlendirilmesini zorunlu kılmakta ve çevresel sürdürülebilirlik kapsamında katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda Avrupa Birliği Altıncı Çevre Eylem Planı'nda da atık yönetimi öncelikli alanlar arasında yer almakta, atığın yalnızca bertaraf edilmesi değil aynı zamanda kaynak olarak yeniden değerlendirilmesi hedeflenmektedir (Korkmaz, 2018).

Bu çerçevede, yapılan literatür incelemeleri ve bölgesel potansiyel analizler doğrultusunda Şanlıurfa yöresinde yaygın olarak yetiştirilen Antep fıstığı ile narın işlenmesi sonucunda ortaya çıkan sert kabuk atıklarının önemli bir lignoselülozik biyokütle kaynağı olduğu belirlenmiştir. Daha önceki bölümlerde kimyasal bileşimleri ayrıntılı olarak ele alınan bu atık türleri, yüksek selüloz içerikleri ve uygun yapısal özellikleri nedeniyle nanoselüloz üretimi açısından uygun hammadde potansiyeli taşımaktadır.

1.8. Konunun Önemi

Hızla artan dünya nüfusu ve sanayileşme, doğal kaynakların tükenmesine ve çevresel kirliliğin kritik seviyelere ulaşmasına neden olmuştur. Bu durum, araştırmacıları petrol türevli polimerlere alternatif olarak yenilenebilir, biyobozunur ve toksik olmayan doğal kaynaklara yöneltmiştir (Klemm vd., 2011; Moon vd., 2011). Doğada en bol bulunan biyopolimer olan selüloz, bitkisel atıklardan elde edilebilme potansiyeliyle sürdürülebilir malzeme biliminin temel taşı haline gelmiştir (Habibi vd., 2010). Özellikle tarımsal atıkların "biyorafineri" konsepti çerçevesinde değerlendirilmesi hem atık yönetim maliyetlerini düşürmekte hem de çevre kirliliğini minimize etmektedir (Abdul Khalil vd., 2012).

Selülozun nano boyuta indirgenmesiyle elde edilen nanoselüloz, makro ölçekteki selüloza göre üstün kristallliği, yüksek elastik modülü ve geniş spesifik yüzey alanı ile ileri teknoloji uygulamalarında vazgeçilmez bir materyaldir (Siro ve Plackett, 2010; Brinchi vd., 2013). Nanoselüloz bazlı malzemeler; biyomedikal iskelelerden esnek elektroniklere, yüksek performanslı filtrelerden güçlendirilmiş nanokompozitlere kadar çok geniş bir yelpazede stratejik öneme sahiptir (Eichhorn vd., 2010; Thomas vd., 2018).

Türkiye'nin tarımsal biyoçeşitliliği, nanoselüloz üretimi için muazzam bir hammadde kaynağı sunmaktadır. Özellikle Antep fıstığı (*Pistacia vera L.*) ve nar (*Punica granatum*) kabukları, lignoselülozik yapıları bakımından nanoselüloz izolasyonu için oldukça elverişlidir. Literatürde farklı tarımsal atıklardan (pamuk, pirinç kabuğu, buğday sapı vb.) nanoselüloz elde edilmesine dair çalışmalar bulunsa da bölge ekonomisinin can damarı olan Antep fıstığı ve nar kabuklarının nanoteknolojik bir hammadde olarak potansiyeli henüz tam anlamıyla mobilize edilmemiştir (Azeredo vd., 2017). Bu atıkların kontrollü asit hidrolizi gibi yöntemlerle nanokristalin forma dönüştürülmesi, atıl durumdaki biyokütlenin katma değeri yüksek teknolojik bir ürüne evrilmesini sağlayacaktır (George ve Sabapathi, 2015).

Bu çalışma; Antep fıstığı ve nar kabuğu atıklarından nanoselüloz izolasyonunu gerçekleştirerek, elde edilen nanomalzemelerin morfolojik ve yapısal karakteristiklerini karşılaştırmalı olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Yerel tarımsal atıkların bu yöntemle değerlendirilmesi, sadece çevresel bir soruna çözüm üretmekle kalmayıp, aynı zamanda yerli hammadde kaynaklarının ileri teknoloji alanında kullanımına dair bilimsel bir temel oluşturacaktır. Elde edilecek bulgular, sürdürülebilir malzeme üretimi stratejilerine katkı

sağlayarak, fosil yakıt bağımlılığını azaltan biyobazlı ekonomilerin gelişimine ışık tutacaktır.

1.9. Özgün Değer

Bu çalışma, bölge ekonomisinde stratejik öneme sahip olan Antep fıstığı (*Pistacia vera* L.) ve nar (*Punica granatum*) kabuğu atıklarını kullanarak, kontrollü asit hidrolizi yöntemiyle selüloz nanokristalleri (CNC) üretmeyi ve bu iki farklı hammadde kaynağının nanoselüloz verimliliği ile karakteristik özelliklerini karşılaştırmalı olarak analiz etmeyi hedeflemektedir. Günümüzde, fosil yakıt tabanlı polimerlerin çevresel etkilerini azaltma ihtiyacı, bilim dünyasını yenilenebilir ve biyobozunur nanomalzemelere yöneltmiştir (Klemm vd., 2011; Moon vd., 2016). Bu bağlamda çalışmamız, atıl durumdaki yerel tarımsal biyokütleyi ileri teknoloji ürünü olan nanoselüloza dönüştürerek literatüre ve döngüsel ekonomiye önemli bir yenilik kazandırmayı amaçlamaktadır.

Literatürde pamuk, odun veya mısır sapı gibi yaygın kaynaklardan nanoselüloz izolasyonu üzerine pek çok çalışma bulunmasına rağmen, Antep fıstığı sert kabuğu ve nar kabuğu atıklarının aynı deneysel koşullar altında nanoselüloz üretim performanslarının karşılaştırıldığı kapsamlı bir araştırma eksikliği göze çarpmaktadır (Azeredo vd., 2017; Thomas vd., 2018). Çalışmamız, bu boşluğu doldurarak her iki hammadde kaynağından elde edilen CNC'lerin kristallik derecesi, termal kararlılık ve morfolojik yapı farklarını somut verilerle ortaya koyacaktır. Özellikle Antep fıstığı kabuğunun %54'e varan yüksek selüloz içeriği, bu atığı geleneksel kaynaklara kıyasla daha verimli bir "nanoselüloz fabrikası" adayı yapmaktadır (Okutucu vd., 2011).

Çalışmanın bir diğer özgün yönü, asit hidrolizi sürecinin optimizasyonu ile amorf bölgelerin tamamen uzaklaştırılarak yüksek saflıkta nanokristaller elde edilmesidir. Geleneksel yöntemlerin aksine, bu iki yerel atığın kimyasal yapılarına özgü modifiye edilmiş ön işlemlerin uygulanması, elde edilecek malzemenin polimer kompozitlerdeki takviye edici özelliğini artıracaktır (Brinchi vd., 2013). Bu durum, özellikle otomotiv ve ambalaj sektörü gibi yüksek mukavemet ve hafiflik gerektiren endüstriyel alanlarda, pahalı sentetik katkı maddeleri yerine yerli ve ucuz biyokütle kaynaklarının kullanımına olanak sağlayacaktır (George ve Sabapathi, 2015).

Çalışmanın özgün değerini artıran bir diğer önemli unsur ise, nanoselüloz üretim

sürecinde çevreci ve sürdürülebilir proses yaklaşımının benimsenmiş olmasıdır. Literatürde selüloz nanokristali üretiminde genellikle daha yüksek konsantrasyonlu asit çözeltileri tercih edilirken, bu çalışmada çevresel etkiyi azaltmak amacıyla asit konsantrasyonu yaklaşık %30 seviyelerinde tutulmuştur. Böylece hem kimyasal tüketiminin hem de proses kaynaklı atık yükünün azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca hidroliz ve yıkama aşamalarında kullanılan saf su, her işlem sonrasında tamamen yenilenmek yerine devir daim sistemiyle yeniden kullanılarak su tüketiminin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım, çalışmayı yalnızca nanoselüloz üretimi açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim teknolojileri ve yeşil kimya prensipleri bakımından da özgün ve yenilikçi bir konuma taşımaktadır.

Sonuç olarak bu araştırma, tarımsal atık yönetimi ile nanoteknoloji disiplinlerini birleştiren yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Antep fıstığı ve nar kabuklarının nanoselüloz üretiminde nasıl bir performans sergilediğine dair sunacağı karşılaştırmalı değerlendirme, araştırmacılar için sürdürülebilir malzeme geliştirme konusunda önemli bir referans kaynağı olacaktır. Çalışma, bölgesel kaynakların katma değeri yüksek teknolojik ürünlere dönüştürülmesine öncülük ederken, biyobazlı ekonomilerin gelişimine ve ithal hammadde bağımlılığının azaltılmasına yönelik stratejik bir katkı sunmaya adaydır.

1.10. Araştırma Sorusu

Bu çalışma kapsamında, Antep fıstığı ve nar kabuğu atıklarından nanoselüloz izolasyonu ve karakterizasyonu sürecinde cevabı aranan temel araştırma soruları şunlardır:

- Antep fıstığı sert kabuğu ve nar kabuğu atıkları, kontrollü asit hidrolizi yöntemiyle nanoselüloz (CNC) üretimi için ne düzeyde bir verimlilik sunmaktadır? Hangi atık türü daha yüksek selüloz geri kazanım potansiyeline sahiptir?
- İzole edilen nanoselülozların kristallik dereceleri (XRD verileri ile) ve moleküler yapıları (FTIR analizleri ile) hammadde kaynağına bağlı olarak ne tür varyasyonlar göstermektedir?
- SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri sonucunda elde edilen nanokristallerin boyut, şekil ve dağılım özellikleri, Antep fıstığı ve nar kabuğu arasında belirgin bir morfolojik farklılık arz etmekte midir?

- Üretilen biyomalzemelerin termal bozunma davranışları, endüstriyel kompozit uygulamalarında (örneğin yüksek sıcaklık gerektiren kalıplama işlemleri) takviye elemanı olarak kullanılmaya ne derece uygundur?
- Yerel tarımsal atıkların (Antep fıstığı ve nar kabuğu) kullanımı, geleneksel nanoselüloz kaynaklarına (pamuk, odun vb.) kıyasla maliyet-etkin ve çevre dostu bir alternatif sunma noktasında ne kadar başarılıdır?
- Uygulanan alkali işlem, ağartma ve kontrollü asit hidrolizi basamakları, her iki hammadde türündeki lignin ve hemiselülozun tamamen uzaklaştırılmasında ve saf kristalin yapının korunmasında yeterli etkinliği sağlamakta mıdır?

1.11. Araştırmanın Amaç ve Hedefleri

1.11.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, bölge ekonomisinde stratejik öneme sahip olan Antep fıstığı (*Pistacia vera L.*) ve nar (*Punica granatum*) kabuğu atıklarından kontrollü asit hidrolizi yöntemiyle nanoselüloz izolasyonunu gerçekleştirmek ve elde edilen biyomalzemelerin karakteristik özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bu bağlamda, tarımsal atıkların yüksek katma değerli birer teknolojik hammaddeye dönüştürülme süreçleri incelenecek; her iki atık türünün nanoselüloz verimliliği, yapısal bütünlüğü ve morfolojik özellikleri ortaya konulacaktır. Çalışma kapsamında, özellikle "Sıfır Atık" ilkeleri doğrultusunda yerel biyokütle kaynaklarının nanoteknolojik uygulamalardaki potansiyeli analiz edilerek, sürdürülebilir malzeme bilimine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Bu çalışmanın bir diğer önemli amacı, farklı lignoselülozik kaynakların (sert iç kabuk ve meyve kabuğu) nanoselüloz üretim süreçlerindeki davranışlarını belirlemektir. Çalışmada, asit hidrolizi parametrelerinin her iki hammadde üzerindeki etkinliği karşılaştırılacak ve endüstriyel kullanım için en verimli izolasyon stratejileri araştırılacaktır. Böylece, ithal ve sentetik polimerlere alternatif olarak yerli, düşük maliyetli ve çevre dostu nanoselüloz üretim yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlanmaya çalışılacaktır.

1.11.2. Çalışmanın Hedefleri

a) Farklı Tarımsal Atıklardan Nanoselüloz İzolasyon Verimliliğinin Karşılaştı-

rılması: Çalışma kapsamında, Antep fıstığı ve nar kabuklarının selüloz içerikleri analiz edilecek; uygulanan kimyasal işlemler sonucunda elde edilen nanoselülozun miktar ve saflık açısından hammadde kaynağına göre nasıl farklılık gösterdiği değerlendirilecektir.

b) Nanoselüloz Üretim Süreçlerinde Kontrollü Asit Hidrolizi Etkinliğinin Belirlenmesi: Çalışmanın bir diğer hedefi, lignin ve hemiselüloz gibi amorf yapıların uzaklaştırılmasında asit hidrolizi yönteminin başarısını ölçmektir. Bu süreçte, uygulanan asit konsantrasyonu ve reaksiyon süresinin, elde edilen nanokristallerin yapısal kararlılığı üzerindeki etkileri analiz edilecektir.

c) Yapısal, Termal ve Morfolojik Karakterizasyonun Gerçekleştirilmesi: İzole edilen nanoselülozlar; FTIR ile fonksiyonel grupları, XRD ile kristallik endeksleri ve SEM ile morfolojik boyutları incelenecektir. İki farklı hammadde kaynağından (fıstık ve nar) elde edilen CNC'lerin (Selüloz Nanokristal) fiziksel ve kimyasal özellikleri karşılaştırmalı olarak ortaya konulacaktır.

d) Tarımsal Atık Yönetiminde Maliyet ve Kaynak Optimizasyonu: Araştırmanın bir hedefi de, halihazırda atık veya düşük verimli yakıt olarak kullanılan bu kabukların, yüksek teknoloji ürünü nanomalzemelere dönüştürülmesinin ekonomik ve çevresel avantajlarını belirlemektir. Geleneksel hammadde kaynaklarına (odun, pamuk vb.) kıyasla, yerel atıkların hammadde temini ve işlem maliyetleri açısından sunduğu potansiyel değerlendirilecektir.

e) Nanoteknoloji ve Sürdürülebilir Biyomalzeme Literatürüne Katkı Sağlamak: Bu çalışma, Antep fıstığı ve nar kabuğu özelinde nanoselüloz izolasyonuna yönelik kapsamlı bir veri seti sunarak literatürdeki eksiklikleri gidermeyi hedeflemektedir. Yerel biyokütle kaynaklarının nanokompozit, ambalaj, tıp ve tekstil gibi sektörlerde takviye elemanı olarak kullanımına dair yeni yaklaşımlar geliştirilerek, biyobazlı ekonomi modelinin uygulanabilirliğine yönelik bilimsel bir referans oluşturulmaya çalışılacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Tarımsal Atıklardan Nanoselüloz İzolasyonu ve Yöntemsel Gelişmeler

Tarımsal atıklar, yüksek selüloz içerikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle nanoselüloz üretimi için birincil kaynak haline gelmiştir. Literatürde, biyokütleden selüloz nanokristalleri (CNC) ve selüloz nanofibrilleri (CNF) elde etmek için çeşitli kimyasal ve mekanik yöntemler geliştirilmiştir (Luduena vd., 2011). Bu süreçte en yaygın kullanılan yöntem, amorf bölgelerin asit yardımıyla hidroliz edilerek kristalin yapıların izole edilmesidir (Bondeson vd., 2006). Son yıllarda yapılan çalışmalar, asit hidrolizinin ardından uygulanan ultrasonik işlemlerin, nanoliflerin dağılımını iyileştirdiğini ve boyut homojenliğini artırdığını göstermiştir (Chen vd., 2011).

Farklı asit türlerinin (sülfürik, hidroklorik, fosforik) izolasyon verimliliği üzerine etkileri araştırılmış ve sülfürik asit kullanımının, nanokristal yüzeyinde sülfat grupları oluşturarak sulu süspansiyonlarda daha kararlı yapılar sağladığı tespit edilmiştir (Araki vd., 1998; Hamad ve Hu, 2010). Ayrıca, iyonik sıvıların ve derin ötektik çözücülerin (DES) selüloz izolasyonunda kullanımı, çevre dostu birer alternatif olarak literatürde yerini almaya başlamıştır (Sirviö vd., 2016).

2.2. Antep Fıstığı Atıkları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Antep fıstığı (*Pistacia vera L.*) kabuğu, sert yapısı ve yüksek lignoselülozik içeriği ile pek çok biyomalzeme çalışmasına konu olmuştur. Yapılan analizler, fıstık sert kabuğunun %50'nin üzerinde selüloz içerdiğini ve bu oranla pek çok odunsu yapıdan daha verimli olduğunu ortaya koymuştur (Okutucu vd., 2011). Literatürde fıstık kabuklarının aktif karbon üretimi, ağır metal adsorpsiyonu ve biyokompozit dolgu malzemesi olarak kullanımı üzerine çalışmalar olduğu görülmektedir (Açıkalın vd., 2012; Gülüç vd., 2021). Ancak, fıstık kabuğundan doğrudan nanoselüloz izolasyonu üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bazı araştırmacılar, fıstık kabuğu liflerini polimer matrislere dahil ederek mekanik özellikleri geliştirmeyi başarmışlardır (Kandemir vd., 2021). Son yıllarda gerçekleştirilen bir çalışmada, fıstık kabuğu selülozunun asit hidrolizi ile nanoboyuta indirgenmesi denenmiş ve elde edilen kristallerin yüksek termal kararlılık gösterdiği rapor edilmiştir (Heidarian

vd., 2022). Bu durum, fıstık kabuğunun endüstriyel CNC üretimi için stratejik bir kaynak olduğunu kanıtlamaktadır.

Nanoselülozun yalnızca yapısal bir biyopolimer olarak değil, aynı zamanda fonksiyonel nanomalzemelerin sentezinde aktif bir bileşen olarak kullanılabildiğini gösteren çalışmalar da dikkat çekmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, Antep fıstığı kabuğundan elde edilen nanoselülozun indirgeme ve stabilize edici ajan olarak kullanılarak gümüş nanoparçacıkların (AgNP) sentezinde şablon görevi gördüğü ortaya konulmuştur. Araştırma sonuçlarına göre, nanoselüloz matrisi içerisinde 2–18 nm boyut aralığında, küresel morfolojide ve homojen dağılım gösteren gümüş nanoparçacıkların başarıyla üretildiği belirlenmiştir. UV-Vis analizinde 406 nm dalga boyunda gözlenen yüzey plazmon rezonansı (SPR), nanoparçacık oluşumunu doğrularken; XRD ve HRTEM analizleri, gümüşün yüzey merkezli kübik (FCC) kristal yapısını ortaya koymuştur. Ayrıca elde edilen nanoselüloz-gümüş (NCAg) hibrit yapının *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* ve *Bacillus subtilis* bakterilerine karşı etkili antibakteriyel aktivite sergilediği rapor edilmiştir (Thomas vd., 2024).

Bu çalışma, Antep fıstığı kabuğundan elde edilen nanoselülozun ileri düzey fonksiyonel uygulamalarda değerlendirilebileceğini göstermesi açısından önemli olmakla birlikte, mevcut tez çalışmasından metodolojik ve amaçsal olarak ayrılmaktadır. Literatürdeki bu yaklaşım, nanoselülozu bir ara materyal olarak kullanarak hibrit ve fonksiyonel sistemlerin geliştirilmesine odaklanırken; bu tez çalışması, farklı tarımsal atık kaynaklarından (Antep fıstığı ve nar kabuğu) elde edilen nanoselülozun yapısal, kimyasal ve morfolojik özelliklerinin karşılaştırmalı analizine odaklanmaktadır. Bu yönüyle mevcut çalışma, nanoselülozun ileri uygulamalarından önceki temel üretim ve karakterizasyon basamağına katkı sağlayarak literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

Literatürde, Antep fıstığı kabuğundan elde edilen lignoselülozik nanofibrillerin farklı malzeme uygulamalarında değerlendirildiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, çevre dostu pişirme ve tamamen klorsuz ağartma yöntemleri kullanılarak fıstık kabuğundan selüloz ve lignoselüloz nanofibrilleri elde edilmiştir. Elde edilen nanofibriller kullanılarak nanopaper üretimi gerçekleştirilmiş ve bu yapılar sıcak presleme yöntemi ile

yoğunlaştırılarak film formuna dönüştürülmüştür. Üretilen nanopaperların mekanik, optik ve yüzey özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, lignin içeren lignoselülozik nanofibrillerden elde edilen nanopaperların viskoelastik özelliklerinin arttığını ve yüzey serbest enerjisinin azalarak hidrofobik karakter kazandığını göstermiştir. Ayrıca lignin varlığının, nanopaperların renk özelliklerinde belirgin değişime neden olduğu ve ultraviyole ışık geçirgenliğini önemli ölçüde azalttığı rapor edilmiştir (Robles vd., 2021).

2.3. Nar Kabuğu ve Biyomalzeme Potansiyeli

Nar (*Punica granatum*) kabuğu, meyve suyu endüstrisinin en büyük yan ürünüdür ve genellikle fenolik bileşenlerin ekstraksiyonu için incelenmiştir (Lansky ve Newman, 2007). Bununla birlikte, nar kabuğunun lifli yapısı ve selüloz içeriği, onu nanoteknolojik uygulamalar için değerli kılmaktadır. Nar kabuğu atıklarından pektin ve selüloz izolasyonu üzerine yapılan çalışmalar, bu atığın biyobozunur film yapımında kullanım potansiyelini vurgulamaktadır (Yılmaz vd., 2019).

Nar kabuğundan nanoselüloz izolasyonu üzerine yapılan güncel araştırmalar, alkali işlem ve ağartma süreçlerinin nar kabuğundaki yoğun fenolik yapıyı temizlemede kritik olduğunu göstermiştir (Baccile vd., 2014). Bir çalışmada, nar kabuğundan elde edilen selüloz nanoliflerin gıda paketlenme sektöründe antimikrobiyal özellik gösteren akıllı ambalajların üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir (Volić vd., 2018). Özellikle nar kabuğunun antioksidan kapasitesi ile nanoselülozun mekanik direncinin birleşimi, literatürde "fonksiyonel nanomalzeme" başlığı altında yeni bir araştırma alanı açılabilir (Ursu vd., 2021).

Nar (*Punica granatum*) kabuğunun biyobazlı malzeme geliştirme alanında önemli bir potansiyel taşıdığı ve özellikle yüksek fenolik içeriği nedeniyle uzun süredir araştırma konusu olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, son yıllarda nar kabuğunun yalnızca ekstraktif bileşen kaynağı değil, aynı zamanda fonksiyonel biyopolimer sistemlerin geliştirilmesinde değerlendirilebilecek bir lignoselülozik hammadde olduğu ortaya konulmuştur. Özellikle selüloz içeriği ve lifli yapısı, bu atığın nanoteknolojik uygulamalarda kullanımını mümkün kılmaktadır.

Güncel çalışmalarda, bakteriyel nanoselüloz (BNC) ve oksitlenmiş türevlerinin (o-BNC), nar kabuğu ekstraktlarının (PPE) taşıyıcı sistemi olarak kullanılabileceği rapor

edilmiştir. TEMPO aracılı oksidasyon işlemi ile nanoselüloz yüzeyine karboksilat grupları kazandırılarak, fenolik bileşiklerin (özellikle ellagic acid ve punicalagin) daha etkin şekilde bağlanması ve kontrollü salımının sağlanabildiği gösterilmiştir. FTIR ve HPLC analizleri, nar kabuğu ekstrakt bileşenlerinin başarıyla yapıya entegre edildiğini doğrularken, FESEM analizleri materyalin yüzey morfolojisindeki değişimi ortaya koymuştur (Filipovic vd., 2025).

Ayrıca in vitro salım çalışmaları, o-BNC yapısının pH'a bağlı kontrollü salım davranışı sergilediğini ve aktif bileşenlerin daha sürdürülebilir şekilde salındığını göstermiştir. Antioksidan aktivite analizlerinde (DPPH ve FRAP), o-BNC-PPE sisteminin BNC-PPE'ye göre daha yüksek antioksidan kapasite gösterdiği, bunun da yapıya daha fazla fenolik bileşiğin bağlanmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunun yanında α -glukozidaz inhibisyon testleri, o-BNC-PPE sisteminin hem BNC-PPE'ye hem de standart ilaç (akarboz) ile karşılaştırıldığında daha yüksek inhibitör aktivite sergilediğini ortaya koymuştur.

Bu bulgular, nar kabuğu türevli biyokütlelerin yalnızca yapısal bir selüloz kaynağı olarak değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda ve biyomedikal uygulamalarda aktif taşıyıcı sistem olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Özellikle bakteriyel nanoselüloz ile nar kabuğu fenolik bileşiklerinin birleştirilmesi, literatürde "fonksiyonel biyomalzeme" yaklaşımı kapsamında sürdürülebilir ve yüksek katma değerli yeni bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Nar kabuğu ve fenolik bileşiklerin biyopolimer kompozit sistemlerde kullanımına yönelik literatür incelendiğinde, nar kabuğu ekstraktlarının özellikle antibakteriyel ve antioksidan fonksiyonlar kazandırmak amacıyla selülozik matrislerle birlikte değerlendirildiği çalışmaların arttığı görülmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, şeker pancarı posasından elde edilen selüloz nanofiberler (CNF) ile pektin ve nar kabuğu ekstraktı (PGE) kullanılarak nanokompozit filmler ve kaplama materyalleri geliştirilmiştir. Ultrasonik işlem ile hazırlanan nanoemülsiyon sisteminde farklı PGE oranları denenmiş ve en yüksek antibakteriyel aktiviteyi gösteren formül seçilerek selüloz nanofiberler ile birleştirilmiştir.

Elde edilen CNF/pektin/PGE tabanlı filmlerin mekanik dayanım, gres geçirmezlik, antioksidan aktivite ve antibakteriyel özellikler açısından detaylı olarak incelendiği

belirtilmiştir. Ayrıca bu kompozit yapının kağıt yüzeyine kaplama materyali olarak uygulanmasıyla, su buharı geçirgenliği, hava porozitesi ve farklı ortam koşullarındaki migrasyon davranışlarının değerlendirildiği rapor edilmiştir. Sonuçlar, nar kabuğu ekstraktı içeren sistemlerin hem fonksiyonel hem de koruyucu özellikler kazandırarak gıda ambalaj uygulamaları için uygun bir yapı oluşturduğunu göstermiştir (Hassan vd., 2022).

Bu çalışma, nar kabuğu türevli bileşenlerin selülozik matrislerle birleştirilerek çok fonksiyonlu biyopolimer sistemler oluşturulabileceğini ortaya koymakta olup, nar kabuğunun yalnızca ekstraksiyon kaynağı değil, aynı zamanda aktif fonksiyonel katkı sağlayan bir biyomalzeme olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

2.4. Karşılaştırmalı Analizler ve Karakterizasyon Çalışmaları

Literatürde farklı tarımsal atıkların (örneğin muz kabuğu, pirinç sapı ve hindistan cevizi lifi) nanoselüloz performanslarının karşılaştırıldığı pek çok çalışma bulunmaktadır (Cherian vd., 2010; Tibolla vd., 2014). Bu çalışmalarda, hammadde kaynağının kristallenme indeksi (CrI) ve lif morfolojisi üzerindeki belirleyici rolü net bir şekilde ortaya konulmuştur. XRD (X-Işını Kırınımı) analizleri, farklı bitkisel kaynaklardan elde edilen CNC'lerin kristallik oranlarının %60 ile %90 arasında değiştiğini göstermektedir (French, 2014).

FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) analizleri, izolasyon sürecinde lignin ve hemiselülozun yapıdan uzaklaştırıldığını kanıtlayan karakteristik pik değişimlerini izlemek için standart bir yöntem olarak kabul edilmiştir (Kasyapi vd., 2013). Ancak, Antep fıstığı ve nar kabuğu gibi iki farklı morfolojik yapıya (biri sert ve odunsu, diğeri daha yumuşak ve pektinli) sahip atığın aynı deneysel koşullarda karşılaştırmalı olarak nanoselüloz izolasyon performansının incelendiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışma, bu iki yerel atığın nanoteknolojik çıktıları doğrudan karşılaştırarak literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

3. GEREÇ ve YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında Fıstık kabuğu ile Nar kabuğu atıklarından nanoselüloz eldeleri için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın her bir aşaması aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

3.1. Bitki Materyalleri ve Kimyasal Malzemeler

Çalışmada kullanılan Antep Fıstığı kabuğu ve Nar kabuğu, Harran Üniversitesi Osmanbey kampüsünde bulunan Fıstık ağaçları ve Nar ağaçlarından temin edildi. Oda sıcaklığında kurutulan kabuklar doğrayıcı yardımıyla öğütüldü. Analizlerde kimyasal olarak; Etanol, toluen, sodyum hidroksit (NaOH), hidrojen peroksit (H_2O_2), asetik asit, sülfürik asit (H_2SO_4), etil alkol, Sodyum Klor oksit ($NaClO_2$), Glasiyel asetik asit ($C_2H_4O_2$), Nitrik asit (HNO_3) ve Benzen (C_6H_6) kullanıldı.

3.2. Kullanılan Araç – Gereçler

Çalışma esnasında kullanılan diğer malzemeler, nanoselüloz ve ham selüloz tayini elde etmek için 1 Litre – 100 mL'lik cam beherler, falcon tüpleri, petri kapları, pH metre, hot Plate, hassas terazi, cam tüpler, filtre kağıdı, santrifüj (Hettich Zentrifugen Rotina 420R), fırın (NUVE FN 120) kullanıldı. Analizler için ise Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), X-ışını Kırınımı Spektrometresi (XRD), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Parçacık Boyut Analizi (Master Sizer Hydro 3000) ve Ultrasonik homojenizatör (Bandelin Sonopuls Hd 2070) kullanıldı.

3.3. Antep Fıstığı Kabuklarının Toplanması ve Öğütülmesi

Antep fıstığı kabukları yıkandı, kurutuldu ve bir Spex öğütücü kullanılarak öğütüldü. 28000 mikser değirmeninde paslanmaz çelik bilyeler ve 30 dakika boyunca 8'lik bir şarj oranı (öğütme ortamı kütlesinin kabuk kütlesine oranı) kullanıldı. Sonuç olarak XRD ile karakterize edilen ve sonraki adımlarda kullanılan ince bir toz elde edildi.

3.4. Selülozun Saflaştırılması ve Ağartılması

Antep fıstığı kabuğundan 10 g toz tartıldı ve hacimce 1000 mL 1/3 etanol ve 2/3 toluen kullanılarak saflaştırıldı. Antep Fıstığı kabuğu tozu, hazırlanan çözelti içerisinde

110 °C’de kaynatılarak lipitler gibi monomerlerin uzaklaştırılması için 24 saat bekletildi. Ardından filtre kağıdı ile süzülerek, kabuk tozları gece boyunca kurumaya bırakıldı (Marett vd., 2017).

Antep Fıstığı kabuğu tozundaki hemiselüloz yapısının uzaklaştırılabilmesi için, 40 g sodyum hidroksit 1000 mL su ile karıştırılarak 1 M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi oluşturuldu ve 30 dakika boyunca 70 °C’de ısıtıldı. Ardından Antep fıstığı kabuğu tozları 2 saat boyunca çözeltiye eklendi. Bu sayede ekstrakte edilen selülozlar, 1000 mL tatlı su ile 6 defa yıkandı. Bu işleme su berraklaşana kadar devam edildi (Santos vd., 2013; Mueller vd., 2014).

Antep Fıstığı kabuğu tozundaki lignin yapısı, tekrarlanan hidrojen peroksit (H_2O_2) çözeltisi yıkamalarıyla uzaklaştırıldı. Yaklaşık 440 mL %3 hidrojen peroksit (H_2O_2) çözeltisi ile 560 mL’ de 1 mL asetik asit çözeltisi ayrı ayrı hazırlandı. Ardından bu çözeltiler karıştırıldı (1,3 v/v hidrojen peroksit ve 0,1 v/v asetik asit). Bu karışım 60 °C’de 30 dakika ısıtılıp, kabuk tozlarıyla beraber 2 saat boyunca bekletildi. Tekrar 1000 mL su ile 6 defa yıkandı (Marett vd., 2017). Bu banyolar tamamlandıktan sonra, fazla kimyasalları veya partikülleri gidermek için yukarıdaki ile aynı parametreler olmak üzere bir defa daha tekrarlandı. Böylece, selüloz artık saftır ve herhangi bir karakterizasyon yapılmadan kullanılabilir haldedir (Marett vd., 2017).

3.5. Selülozun Hidrolizi

Saflaştırılmış selüloz 500 mL su içinde, gece boyunca 5 °C’ye ayarlanmış buzdolabına yerleştirildi. Ertesi gün su banyosuna yerleştirilerek %30’luk sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi 20 °C’nin altında damla damla eklendi. Asidin tamamı eklendikten sonra sıcaklık 50 °C’ye yükseltilerek, 90 dakika boyunca bekletildi. Ardından var olan asidin uzaklaşması için 10000 rpm’de pH nötr olana kadar (4 defa) santrifüj yapıldı. Bunu takiben selüloz 3 gün boyunca her gün suda bekletilerek, gün sonunda 4000 rpm’ de santrifüjlendi. 3. gün sonunda 30 dakika ultrasonik homojenizatör cihazı ile liyofilize edildi. Ardından elde edilen yapı kurutularak, toz halinde tartılıp analize gönderilebilir hale getirildi (Marett vd., 2017). Yapılan işlemler 3 tekrarlı olup, Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.

ANTEP FISTIĞI KABUĞU



Şekil 3.1. Fıstık kabuğundan nanoselüloz eldesi

3.6. Nar Kabuklarının Öğütülmesi

Nar kabukları yıkandı, kurutuldu ve bir Spex öğütücü kullanılarak öğütüldü. 20000 mikser değirmeninde paslanmaz çelik bilyeler ve 30 dakika boyunca 8'lik bir şarj oranı (öğütme ortamı kütlesinin kabuk kütlesine oranı) kullanıldı. Sonuç olarak XRD ile karakterize edilen ve sonraki adımlarda kullanılan ince bir toz elde edildi.

3.7. Selüloz Saflaştırılması

Nar kabuğu tozu 100 gözlü elekten geçirilerek elde edildi. Nar kabuğu tozu, %60

(v/v)'lık etil alkol ile karıştırılıp oda sıcaklığında 24 saat boyunca bekletildi. Ardından nar kabukları filtre kağıdı yardımıyla süzülerek, katı kalıntı pH nötr olana kadar yıkandı. Elde edilen pelet, 70 °C 'de kurutuldu. Daha sonra kalıntı, damıtılmış su ile karıştırıldı. Karıştırılan çözelti pH 2,0'a ayarlanarak pektini uzaklaştırmak için 80 °C'de 4 saat boyunca karıştırıldı. Kalıntı süzöldükten sonra toplanıp, pH nötr hale gelene kadar distile su ile yıkandı ve 24 saat boyunca 70 °C'de kurutuldu (Zeng vd., 2022).

3.8. Selüloz Ağartma İşlemi

Ağartma işleminde, asitle muamele edilmiş Nar kabuğu tozları, asetik asit ile ayarlanmış pH 3,5 düzeyinde 5 saat boyunca 70 °C'de bekletildi. Sodyum klor oksit (NaClO_2) (%1,4 w/v) ile iki kez delignifiye edildi ve süzöldü. Kalıntı, pH nötr hale gelene kadar damıtılmış su ile yıkandı (Zeng vd., 2022).

3.9. Alkali İşlemi

Alkali işleminde, delignifiye kalıntı 80 °C'de 6 saat boyunca sodyum hidroksit (NaOH) (%5, w/v) çözeltisine ilave edilip süzöldü. Kalıntı pH nötre ulaşana kadar yıkanıp dondurularak kurutuldu (Zeng vd., 2022).

3.10. Nanoselülozların Hazırlanması

Nar kabuğu tozlarından elde edilen selülozun hidroliz reaksiyonu, 45 °C'de 45 dakika boyunca sülfürik asit (H_2SO_4) (%32 w/w) kullanılarak gerçekleştirildi ve ardından on kat soğuk distile su eklenerek durduruldu. Süspansiyon, fazla asidi uzaklaştırmak için santrifüjleme yoluyla 4000 rpm' de 15 dk. olmak üzere üç kez yıkandı. Son olarak, Nar kabuğu tozlarından elde edilen nanoselüloz süspansiyonu konsantre edilerek, dondurulup kurutuldu (Zeng vd., 2022). Yapılan işlemler 3 tekrarlı olup, Şekil 3.2' de gösterilmiştir.

NAR KABUĞU



Şekil 3.2. Nar Kabuklarından elde edilen nanoselüloz prosesi

3.11. Hammaddenin Kimyasal Analizi

Nar kabuğu ve Antep fıstığı kabuğunun kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla

ham selüloz tayini gerçekleştirildi. Analizler, lignoselülozik yapının selüloz içeriğinin belirlenmesi ve nanoselüloz üretim potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır.

3.12. Ham Selüloz Tayini

Nar kabuğu ve Antep fıstığı kabuğunda bulunan ham selüloz miktarı Kurschner–Hoffer yöntemine göre belirlendi (Kurschner ve Hoffer, 1969). Analiz öncesinde numuneler kurutuldu, öğütüldü ve homojen hale getirildi.

Yaklaşık 1 g numune hassas terazi ile tartılarak santrifüj tüplerine alındı. Üzerine 12,5 mL glasiyel asetik asit ve 2,5 mL nitrik asit ilave edilerek hot Plate üzerinde 20–30 dakika kaynatıldı. İşlem sonunda numuneler filtre kağıdından süzüldü ve sıcak saf su ile yıkandı. Daha sonra sırasıyla sıcak alkol ve sıcak benzen ile yıkama işlemi gerçekleştirildi (Kumar ve Turner, 2015).

Süzme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler 105 °C’de 3–4 saat kurutuldu ve soğutularak tartıldı (a).

Ham selüloz yüzdesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı:

$$\text{Ham Selüloz (\%)} = a / \text{İlk numune miktarı} \times 100$$

Bu analiz ile iki farklı tarımsal atığın selüloz içeriği karşılaştırıldı ve nanoselüloz üretim potansiyeli değerlendirildi (Jayaprakash vd., 2022).

3.13. Nanoselüloz Karakterizasyonu

Elde edilen nanoselülozların Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), X- ışını Kırınımı Spektrometresi (XRD) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleri Harran Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (HÜBTAM) yapılmıştır. Parçacık Boyut Analizi ise İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarları’ nda (İKÇÜ-MERLAB) yapılmıştır.

3.14. Taramalı elektron mikroskopisi (SEM)

Nanoselülozların morfolojik özelliklerinin belirlenmesi ve film yapısında oluşturacağı bağların gözlemlenmesi için SEM Zeiss Evo 50 cihaz ile görüntü alınmıştır. Filmler ve nanoselülozlar iletken özellikte olmadığından dolayı altın paladyum alaşımı ile kaplanmıştır.

Numunelerin 10,00 kV voltajda, 1,00-500x büyütme ile analizi gerçekleştirilmiştir.

3.15. X ışınları Kırınımı Spektrometresi (XRD)

Nanoselülozun kristallografik özelliklerini ve içerdikleri fazları göstermek amacıyla XRD Rigoku Ultima-3 cihazı ile analiz yapılmıştır. Ölçümler 90-10° aralığında ölçülmüştür.

3.16. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Nanoselüloz yapısındaki kimyasal bileşenlerin moleküler yapılarını ve kimyasal bağlarının analizi IRTracer-100 FTIR Spektrofotometresi cihazı ile yapılmıştır. Numune, 4000-500 cm⁻¹ değerleri aralığında ölçülmüştür.

3.17. Parçacık Boyut Analizi

Nanoselülozun içerisindeki parçacık boyutları, Master Sizer Hydro 3000 cihazı ile nanometre mertebesinde milimetre mertebesine kadar belirlenmiştir. Numuneler, 0,01-10000 µm değerleri aralığında ölçülmüştür.

4. BULGULAR

4.1. Hammaddelerin Ham Selüloz İçerikleri

Yapılan analizler sonucunda, nar kabuğu ve Antep fıstığı kabuğu numunelerinin ham selüloz içerikleri Kurschner–Hoffer yöntemiyle belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar **Tablo 4.1**'de sunulmuştur.

Analiz verilerine göre, 1 gramlık başlangıç numuneleri üzerinden yapılan hesaplamalarda; **nar kabuğunun** ham selüloz miktarı **0,5710 g (%57,10)**, **Antep fıstığı kabuğunun** ham selüloz miktarı ise **0,7020 g (%70,20)** olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Nar Kabuğu ve Antep Fıstığı Kabuğunun Ham Selüloz Oranları

Hammadde	Başlangıç Ağırlığı (g)	Elde Edilen Selüloz (g)	Ham Selüloz (%)
Nar Kabuğu	1	0,5710	57,10
Antep Fıstığı Kabuğu	1	0,7020	70,20

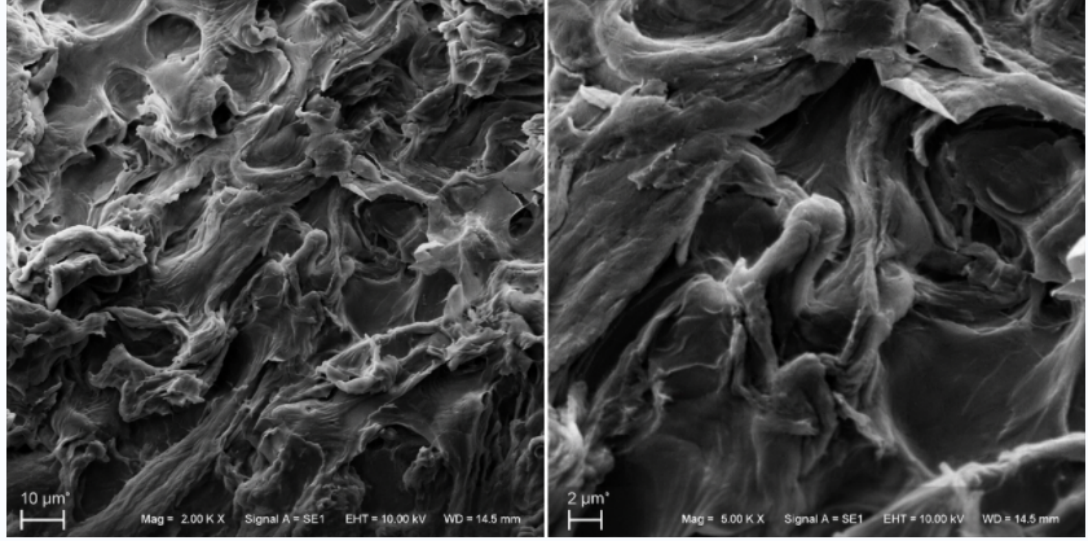
Elde edilen bulgular, her iki tarımsal atığın da yüksek oranda selüloz içerdiğini göstermektedir. Özellikle Antep Fıstığı kabuğunun, Nar kabuğuna oranla yaklaşık **%13,10** daha fazla selüloz ihtiva ettiği görülmüştür. Bu yüksek selüloz oranları, her iki hammaddenin de nanoselüloz üretimi için verimli birer kaynak (prekürsör) olduğunu doğrulamaktadır. Lignoselülozik yapıdaki bu yüksek selüloz içeriği, asit hidrolizi veya mekanik işlemlerle yüksek verimli nanolif veya nanokristal üretimine olanak sağlayacak niteliktedir.

4.2. Fıstık Kabuğu Nanoselüloz Karakterizasyonu

Nanoselüloz karakterizasyonu sonucu elde edilen bulgular, aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmaya çalışılmıştır.

4.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM analizlerine göre Fıstık kabuğundan elde edilen nanoselülozların bağ yapısı **Şekil 4.1**'de görülmektedir.

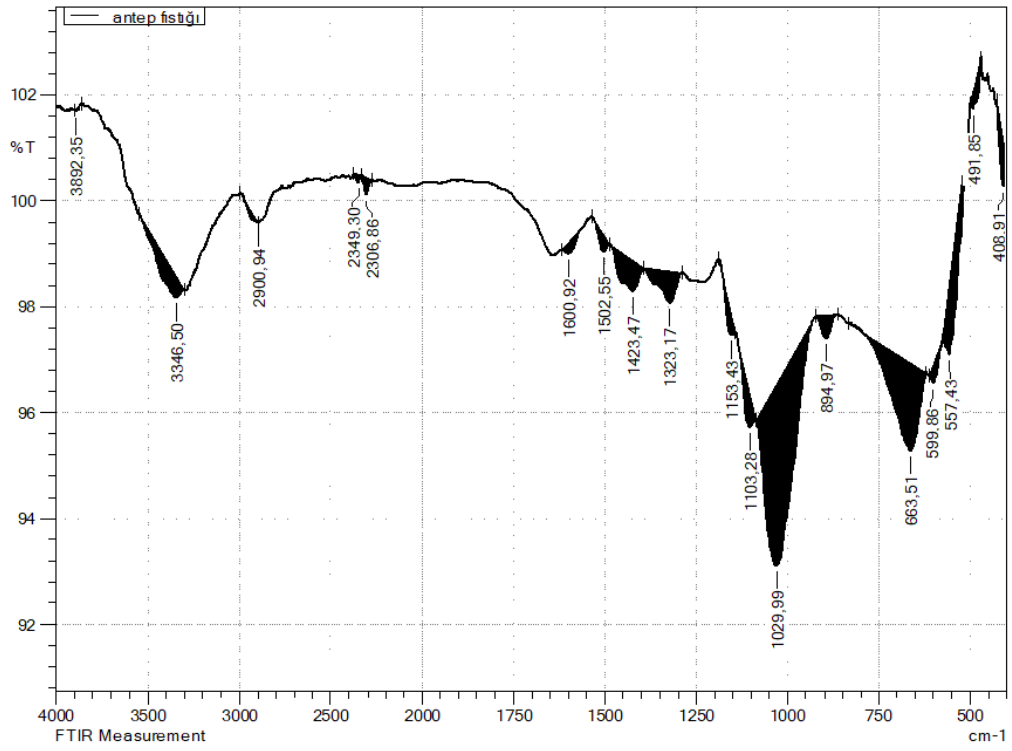


Şekil 4.1. Fıstık Kabuğundan Nanoselüloz SEM görüntüleri

Sol görüntüde, lifli, gözenekli ve kaba bir yapı dikkat çekiyor. Bu, lignoselülozik materyallerde yaygın olarak görülen kompleks yapıdır. Lif benzeri oluşumlar, kabuğun yüksek selüloz ve lignin içeriğine işaret ederken, sağ görüntü daha yüksek büyütmede olup, liflerin daha sıkı büküldüğü, yapının ise katmanlı ve kıvrımlı bir form gösterdiği görülmektedir.

4.2.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Nanoselülozun FTIR analizi 4000-500 cm^{-1} aralığında grafiğe aktarılmıştır. **1029,99 cm^{-1}** ve **1153,43 cm^{-1}** piklerinin güçlü ve belirgin olması, selülozun yapısının korunduğunu ve nanoselüloz formunun oluştuğunu göstermektedir. **894,97 cm^{-1}** piki, özellikle β -1,4-glikozidik bağın korunmuş olduğunu ve amorf yerine kristal yapının hâlâ var olduğunu ortaya koymaktadır. **3346,50 cm^{-1}** 'deki geniş OH bandı, yüzeydeki hidroksil gruplarının aktif olduğunu ve bu da su tutma kapasitesi ve fonksiyonelleştirme potansiyeli açısından önemlidir. **1600–1500 cm^{-1}** civarındaki lignin kaynaklı piklerin (özellikle **1600,92** ve **1502,55**) hâlâ var olması, tam anlamıyla ligninden arındırılmadığını gösterir. Ancak bu pikler zayıf veya az belirginse, lignin ve hemiselülozun büyük oranda uzaklaştırıldığı söylenebilir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Fıstık Kabuğundan elde edilen nanoselülozun FTIR analizi

FTIR analiz sonucunda verilen grafikte tüm pikler detaylı bir şekilde Tablo 4.2' de aktarılmıştır.

Çizelge 4.2. Fıstık Kabuğundan elde edilen nanoselüloz FTIR dalga sayısı analizi

Dalga Sayısı (cm ⁻¹)	Atama	Yorumu
3346,50	–OH gerilme titreşimi	Selülozun ve hemiselülozun hidroksil gruplarına ait. Genellikle hidrojen bağlarını da temsil eder.
2900,94	–CH ve –CH ₂ gerilme	Selüloz ve lignin yapılarında bulunan alifatik hidrokarbon zincirlerine işaret eder.
1600,92	C=C aromatik halkalar	Lignin'in aromatik yapısından kaynaklanır.
1502,55	Aromatik C=C (lignin)	Lignin'in karakteristik piklerinden biridir.
1232,17	C–O–C gerilmesi	Selülozun glikozidik bağ yapısına işaret eder.
1153,43	C–O–C asimetrik gerilme	Selüloz omurgasında yer alan eter bağları (β-1,4-glikozidik bağ) için tipiktir.
1029,99	C–O gerilmesi	Selülozun yapısal iskeletine aittir. Bu pik, nanoselülozda da gözlenmelidir.
894,97	β-glikozidik bağ	Selülozun kristal yapısını destekleyen önemli bir işarettir.
663,51 – 408,91	Parmak izi bölgesi	Polimer yapılar için tanımlayıcı düşük enerjili titreşimler. Kompleks karbon yapılarına işaret eder.

4.2.3. X ışınları Kırınımı Spektrometresi (XRD)

Kristallik derecesi genellikle **CrI (Crystallinity Index)** ile ölçülür ve şu şekilde hesaplanabilir (Park vd., 2010):

$$CrI = \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \times 100$$

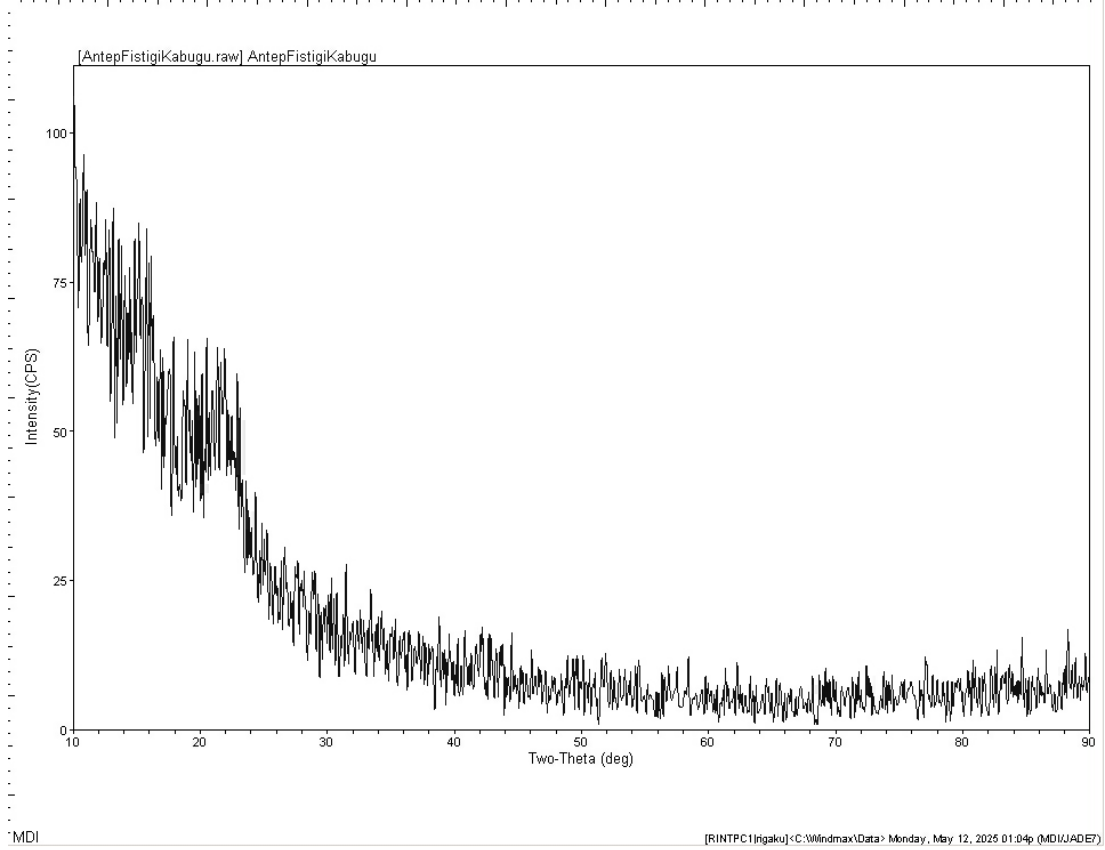
- I_{200} : 22° civarındaki en yüksek yoğunluk (pik)
- I_{am} : 18° civarındaki amorf bölge yoğunluğu

Bu grafik üzerinden kesin değerler alınamasa da:

- Piklerin genişliği ve dağınıklığı göz önünde bulundurulduğunda, **yarı kristalin nanoselüloz** olduğu söylenebilir.
- Yani selülozun kristalin yapısı büyük ölçüde korunmuş, ancak nano boyutta parçalanma

nedeniyle pikler genişlemiş olabilir.

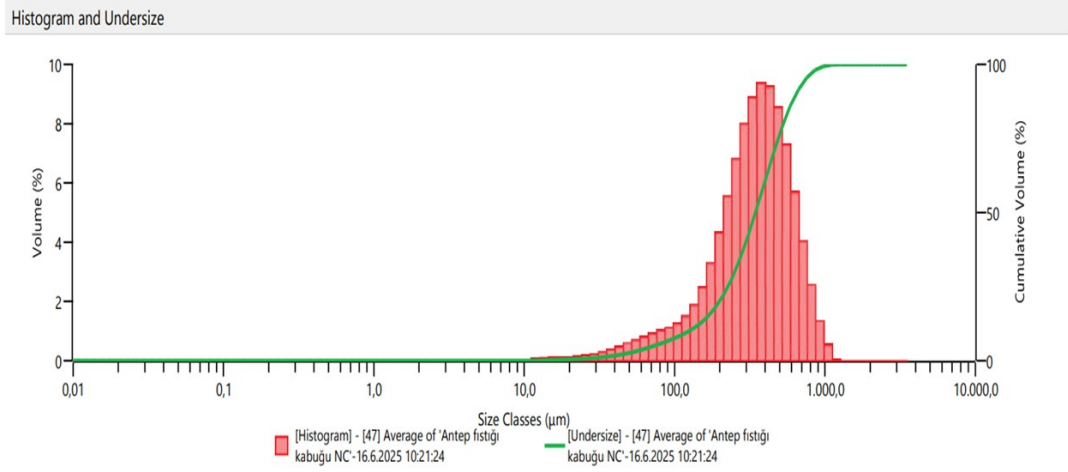
XRD verisi, Antep fıstığı kabuğundan elde edilen nanoselülozun **kısmen kristalin bir yapıya sahip olduğunu** göstermektedir. Bu yapı, selülozun doğal kristal özelliklerinin **asidik hidroliz** veya **mekanik işlem** sırasında büyük ölçüde korunduğunu gösterir.



Şekil 4.3. Fıstık Kabuğundan elde edilen nanoselülozun XRD analizi

4.2.4. Parçacık Boyut Analizi

Antep fıstığı kabuğundan elde edilen nanoselüloz numunelerinin boyut dağılımı ve partikül karakteristikleri lazer difraksiyon yöntemi ile belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.4. Antep fıstığı kabuğu nanoselüloz numunesinin partikül boyut dağılımı (histogram) ve birikimli hacimsel dağılım (undersize) grafiği

Analiz sonuçlarına göre numunenin hacimsel çap dağılım değerleri şöyledir:

- **D_v (10):** 125 µm
- **D_v (50) (Medyan Çap):** 345 µm
- **D_v (90):** 644 µm

Grafik incelendiğinde, parçacıkların büyük çoğunluğunun **100 ile 1000 µm** aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Numunenin ortalama hacimsel çapı D[4,3] **370 µm** ve spesifik yüzey alanı **27,49 m² kg** olarak tespit edilmiştir.

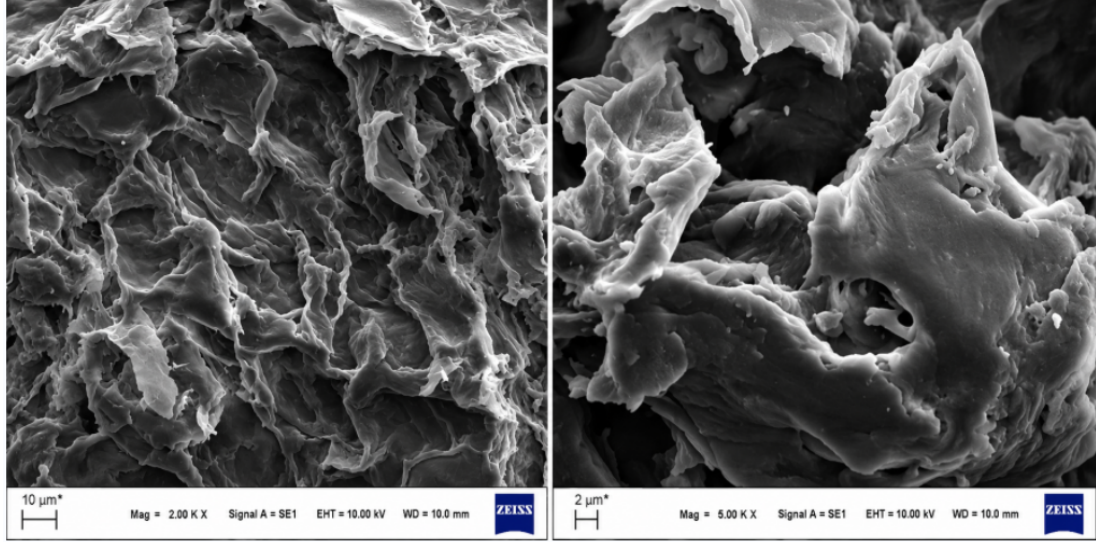
Boyut dağılım genişliğini ifade eden **Span değeri 1,504** olarak hesaplanmıştır. Bu değer, partikül boyut dağılımının göreceli olarak dar bir aralıkta olduğunu ve homojen bir dağılım sergilendiğini göstermektedir. Ayrıca, 45 µm altındaki parçacıkların toplam hacmin yalnızca **%2,15'**ini oluşturması, mekanik veya kimyasal işlemler sonrası elde edilen yapının mikronize boyutta lif kümeleri içerdiğini ortaya koymaktadır. 2 µm altındaki partikül oranının **%0** olması, numunenin tamamen izole edilmiş bireysel nano liflerden ziyade, bu liflerin oluşturduğu mikro ölçekli agregatlar veya demetler halinde olduğunu göstermektedir.

4.3. Nar Kabuğu Nanoselüloz Karakterizasyon Bulguları

Nanoselüloz karakterizasyonu sonucu elde edilen bulgular, aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmaya çalışılmıştır.

4.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM analizlerine göre Nar kabuğundan elde edilen nanoselülozların bağ yapısı Şekil 4.5’de görülmektedir.



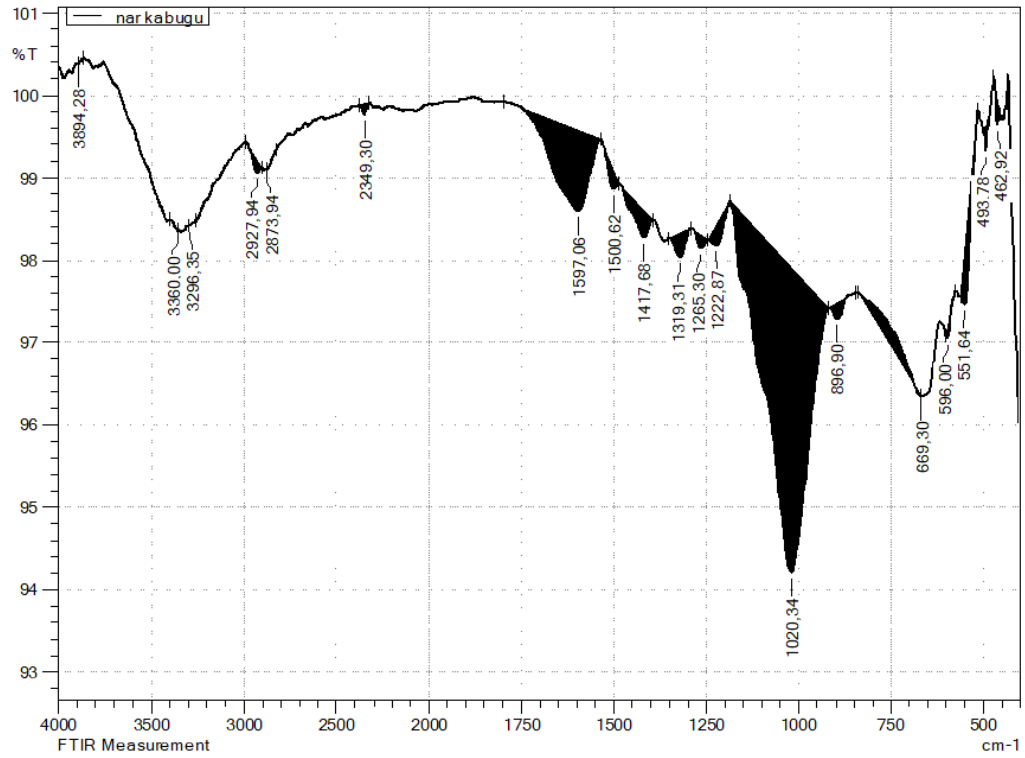
Şekil 4.5. Nar Kabuğundan elde edilen nanoselülozun SEM görüntüleri

Sol görüntüde lifsi ve düzensiz bir yapı gözlemlenirken, yüzeydeki girinti ve çıkıntılar, nanoselüloz liflerinin birbirine yapışmamış olduğunu, gevşek bir matris oluşturduğunu göstermektedir. Bu görünüm, nanofibrillerin ayrışmaya başladığını ancak tam anlamıyla homojen bir dağılımın sağlanamadığını düşündürülebilir. Liflerin uçlarının ve katmanlarının görünmesi, parçalanma ya da kimyasal işlemle oluşmuş olabilir. Sağ görüntüde ise, liflerin daha düzenli bir şekilde tabakalanmış olduğu ve bir ağ benzeri yapı oluşturduğu görülüyor. Nanoselüloz lifleri daha ince tabakalar halinde yayılmış gibi; bu da mekanik veya kimyasal işlemlerin daha etkili olduğunu gösteriyor olabilir. Liflerin arasında mikro boşluklar mevcut, bu da yüksek yüzey alanı sağlayabilir – bu da malzemenin kompozitlerde veya filtreleme gibi uygulamalarda kullanılabilirliğini artırır. Her iki görüntü de nanoselüloz liflerinin başarılı şekilde elde edildiğini göstermektedir. Sol görüntüdeki düzensiz yapı başlangıç safhasını veya daha az işlenmiş durumu temsil edebilirken, sağdaki daha organize yapı işlemin ileri

aşamasını ya da daha iyi homojenleştirilmiş bir ürünü gösterebilir. Bu tip yapı analizleri, nanoselülozun yüzey morfolojisi hakkında bilgi vererek hangi yöntemin daha etkili olduğunu belirlemede kullanılabilir.

4.3.2. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Nanoselülozun FTIR spektrumu $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında incelenmiştir. Nar kabuğundan elde edilen nanoselüloza ait FTIR spektrumu, lignoselülozik biyokütlenin karakteristik fonksiyonel gruplarını açıkça yansıtmaktadır. $3360\text{--}3298\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen geniş bant, selüloz ve hemiselüloz yapılarında bulunan hidroksil (--OH) gruplarına karşılık gelmekte olup, aynı zamanda hidrojen bağları ve bağlı su moleküllerinin titreşimlerini de içermektedir. $2927\text{--}2873\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen pikler, alifatik --CH_2 ve --CH_3 gruplarının asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerini temsil etmekte olup, lignin ve hemiselüloz bileşenlerinin varlığını desteklemektedir. 2349 cm^{-1} civarında gözlenen pik, genellikle atmosferik CO_2 kaynaklı olup çevresel etkilerden kaynaklanan bir sinyal olarak değerlendirilmektedir. $1597\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen pikler, lignin yapısına ait aromatik $\text{C}=\text{C}$ gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. Bu durum, lignin bileşenlerinin yapıda tamamen uzaklaştırılmadığını göstermektedir. $1417\text{--}1319\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bantlar, CH bükülme titreşimlerine karşılık gelmekte ve selülozik yapıların karakteristik özelliklerini yansıtmaktadır. $1263\text{--}1222\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen pikler, C--O gerilme titreşimleri ile ilişkilidir ve hemiselüloz ile ester gruplarının varlığına işaret etmektedir. 1020 cm^{-1} civarında gözlenen güçlü pik, selülozun karakteristik C--O--C glikozidik bağlarının gerilme titreşimine karşılık gelmekte olup, numunedeki selüloz içeriğinin yüksek olduğunu göstermektedir. $669\text{--}596\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen bantlar, aromatik yapıların düzlem dışı bükülme titreşimleri veya metal–oksit bağlarına ait titreşimlerle ilişkilendirilebilir. 462 cm^{-1} civarında gözlenen düşük frekanslı pikler ise genellikle mineral kalıntılar veya iz metalik bileşenlerden kaynaklanmaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Nar kabuğundan elde edilen nanoselülozun FTIR analizi

Elde edilen FTIR spektrumu Şekil 4.5’te verilmiş olup, tüm piklerin detaylı atamaları Tablo 4.3’te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Nar Kabuğundan Elde Edilen Nanoselülozun FTIR Pik Atamaları

Dalga Sayısı (cm ⁻¹)	Atama	Yorum
3360–3298	–OH gerilme titreşimi	Selüloz ve hemiselülozun hidroksil gruplarını temsil eder, hidrojen bağları içerir
2927–2873	–CH / –CH ₂ gerilme	Lignin ve hemiselülozda bulunan alifatik yapıları gösterir
~2349	CO absorpsiyonu	Atmosferik kaynaklı, çevresel kontaminasyon göstergesi
1597–1500	C=C aromatik gerilme	Lignin bileşenlerinin varlığına işaret eder
1417–1319	CH bükülme titreşimi	Selülozik yapıların karakteristik titreşimleri
1263–1222	C–O gerilme	Hemiselüloz ve ester gruplarını temsil eder
~1020	C–O–C gerilme	Selülozun glikozidik bağ yapısını gösterir
669–596	Parmak izi bölgesi	Aromatik yapıların düzlem dışı titreşimleri veya metal–oksit bağları
~462	Düşük frekans titreşimleri	Mineral kalıntılar veya iz metalik bileşenler

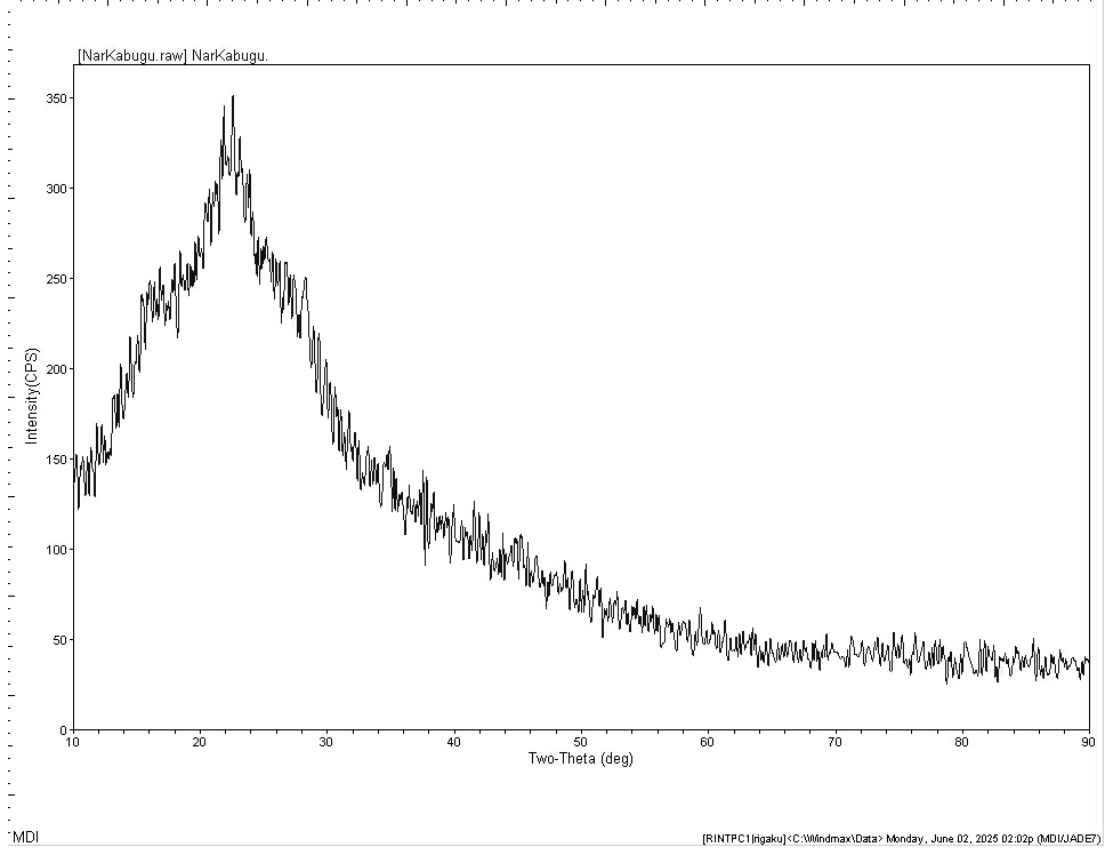
4.3.3. X ışınları Kırınımı Spektrometresi (XRD)

Nar kabuğunun XRD (X-ray difraksiyon) spektrumu, yapısal özelliklerini ve kristalinite düzeyini anlamak için önemli bilgiler sunar. Grafik, 2θ (iki teta) değeri 10° ile 90° arasında ölçülmüş olup, özellikle $2\theta \approx 22^\circ$ civarında belirgin bir tepe (pik) gözlemlenmektedir. Grafikteki geniş ve belirgin olmayan pikler, numunenin büyük ölçüde amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 4.6).

$2\theta \approx 22^\circ$ civarındaki tepe, selülozik yapıların karakteristik kristalin tepe noktalarından biridir ve selüloz II tipi kristal yapı ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, piklerin keskin olmaması ve geniş yayılım göstermesi, numunede kristalin yapıdan çok amorf yapının baskın olduğunu ortaya koyar. Bu durum, bitkisel atık kaynaklı biyopolimerlerde sıkça rastlanan bir özelliktir.

Nar kabuğu, doğal olarak lignin, hemiselüloz ve selüloz içerir. Bu bileşenlerden lignin

ve hemiselüloz amorf yapıda, selüloz ise kısmen kristalin yapıdadır. Gözlemlenen XRD patern, bu üç bileşenin birlikte bulunduğunu ve selülozun kristalin bölgelerinin, amorf matris içinde dağılmış halde olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 4.7. Nar kabuğundan elde edilen nanoselülozun XRD analizi

XRD analizi sonucunda nar kabuğunun büyük oranda amorf karakterli lignoselülozik bir yapı içerdiği anlaşılmaktadır. Kristalin selüloz varlığına işaret eden 22° civarındaki pik, selülozun korunduğunu ancak çevresindeki lignin ve hemiselüloz matrisinin baskın olduğunu göstermektedir. Bu yapı, nanoselüloz eldesi öncesi yapılan ön işlemlerle kristalinliğin artırılacağı potansiyelini göstermektedir.

4.3.4. Parçacık Boyut Analizi

Nar kabuğundan elde edilen selüloz numunelerinin partikül boyut analizi aşamasında, numunelerin yüksek higroskopik (nem çekici) özelliği ve buna bağlı gelişen güçlü aglomerasyon (topaklanma) eğilimi nedeniyle kuru sistem ölçüm hücresine iletiminde

teknik aksaklıklar yaşanmıştır. Numunelerin cihaz kanallarında tutunması ve akışkanlık limitlerinin altında kalması sebebiyle sağlıklı bir veri elde edilememiştir. Bu durum, nar kabuğu nanoselülozunun antep fıstığı kabuğuna kıyasla daha yüksek yüzey enerjisine veya farklı bir yüzey kimyasına sahip olabileceğine işaret etmektedir.

5. TARTIŞMA

Lignoselülozik atıklardan asit hidrolizi yöntemiyle selüloz nanokristal (CNC) izolasyonunu konu alan literatür verileri incelendiğinde, nihai ürünün karakteristik bir "çubuk benzeri" (rod-like) morfoloji sergilemesi beklendiği görülmektedir (Marett vd., 2017). Söz konusu çalışmalarda, CNC yapılarının saflık derecesi ve morfolojik bütünlüğü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile doğrulanırken; numune hazırlık süreçlerinden kaynaklanabilecek olası dış kontaminantların veya amorf yapı kalıntılarının varlığına da dikkat çekilmektedir. Bu durum, izolasyon sürecindeki saflaştırma adımlarının hassasiyetini ve hedeflenen kristalin yapının başarısını teyit eden kritik bir göstergedir.

Mevcut çalışma kapsamında elde edilen SEM görüntüleri (Şekil 3.1) analiz edildiğinde ise, literatürdeki saf CNC yapılarından farklı olarak, lignoselülozik biyomateryalin doğal mikro-hiyerarşik yapısını yansıtan karakteristik özellikler gözlemlenmiştir (Klemm vd., 2011). Şekil 3.1'deki sol görüntüde izlenen lifli, gözenekli ve kaba yüzey morfolojisi, kompleks lignoselülozik matrislerle tam uyum içerisindedir. Bu lifli oluşumlar, hammadde içeriğindeki yüksek selüloz ve lignin ağının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Sağ görüntüdeki yüksek büyütme analizlerde ortaya çıkan daha sıkı bükülmüş, katmanlı ve kıvrımlı formlar; materyalin henüz tam ayrıştırılmamış bileşenlerinin (lignin ve hemiselüloz kalıntıları) yapıya kazandırdığı heterojenliği sergilemektedir.

Literatürle kıyaslandığında (Siqueira vd., 2010), saflaştırılmış ve homojenize edilmiş CNC morfolojisine karşın, bu çalışmada kullanılan lignoselülozik hammaddenin daha kompleks ve hiyerarşik bir form sergilediği görülmektedir. Bu yapısal heterojenlik, malzemenin doğal mekanik özelliklerinin korunduğuna işaret etmekle birlikte, potansiyel uygulama alanlarında kompozit matris etkileşimlerini optimize edebilecek bir yüzey alanı sunmaktadır.

Sonuç olarak, saf nanoselüloz odaklı çalışmalar ile mevcut çalışmamız arasındaki morfolojik farklılıklar, hammadde işleme derecesinin ve saflaştırma düzeyinin son ürün geometrisi üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Saf CNC morfolojisi tanımlanabilir ve tekdüze bir yapı sunarken, çalışmamızdaki doğal lignoselülozik yapı, hiyerarşik düzenini koruyan daha kompleks bir biyomateryal karakteri sergilemiştir.

Literatürde, Antep fıstığı kabuğu gibi lignoselülozik tarımsal atıkların alkali ve fiziksel (ultrasonik) işlemler ile modifiye edilerek biyopolimer kompozitlerde takviye dolgu maddesi olarak kullanılabildiği rapor edilmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, alkali ve ultrasonik ön işlemlerin kabuk yüzeyinde aşındırma, inceltme ve boşluk oluşumu gibi morfolojik değişimlere neden olduğu ve bu sayede selüloz, hemiselüloz ve lignin bileşenlerinin daha aktif hale geldiği belirtilmiştir (Romero-Cerón vd., 2025). SEM analizleri, bu yapısal değişimlerin mikro ölçekte belirgin yüzey modifikasyonları oluşturduğunu ortaya koyarken, XRD analizleri kristallik indeksinin %31,41'den %46,91'e yükseldiğini göstermiştir.

Mevcut literatür verileri, modifiye edilmiş kabuk yapılarının nişasta bazlı biyokompozit sistemlerde önemli bir ara yüzey etkileşimi sağladığını da ortaya koymaktadır. Özellikle XPS analizleri, hidroksil gruplarının azalmasına bağlı olarak O=C=O ve O=C bağlarının artış gösterdiğini ve bunun kimyasal etkileşimlerin güçlendiğini doğruladığını göstermektedir. Bu durum, kabuk atıklarının yalnızca fiziksel dolgu elemanı olarak değil, aynı zamanda kimyasal etkileşim sağlayan aktif bir faz olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir.

TGA analizleri ise modifiye edilmiş fıstık kabuğunun nişasta matrisi ile etkileşime girmesi sonucu malzemenin termomekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlandığını ortaya koymuştur. Özellikle depolama modülünün 198 MPa'dan 721 MPa'a yükselmesi, bu tür lignoselülozik takviyelerin kompozit sistemlerde rijitliği artırıcı etkisini açıkça göstermektedir.

Mevcut çalışma ile karşılaştırıldığında, literatürde yer alan bu yaklaşımın daha çok yüzey modifikasyonu ve kompozit performans artırımı üzerine odaklandığı görülmektedir. Buna karşın bu tez çalışması, tarımsal atıkların temel selüloz içeriklerinin belirlenmesi ve nanoselüloz elde edilmesine yönelik yapısal karakterizasyon aşamasına odaklanarak daha temel bir malzeme geliştirme yaklaşımı sunmaktadır. Bu yönüyle literatürdeki uygulama odaklı kompozit geliştirme çalışmalarına zemin oluşturan bir altyapı niteliği taşımaktadır.

Son yıllarda gerçekleştirilen güncel çalışmalar da, lignoselülozik hammaddeden elde edilen nanoselüloz yapıların morfolojisinin büyük ölçüde uygulanan ön işlem ve saflaştırma derecesine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, mikrodalga destekli asidik

ön işlemlerle lignin ve hemiselülozun büyük ölçüde uzaklaştırıldığı çalışmalarda, daha homojen, düzgün yüzeyli ve belirgin çubuksu CNC morfolojilerinin elde edildiği rapor edilmiştir (Zhu vd., 2023). Bu durum, literatürde tanımlanan ideal CNC morfolojisinin yüksek saflık derecesi ile doğrudan ilişkili olduğunu desteklemektedir. Buna karşılık, daha sürdürülebilir ve yumuşak işlem koşullarına sahip derin ötektik çözücü (DES) veya benzeri “green” yöntemlerin kullanıldığı güncel çalışmalarda, lignoselülozik yapının tamamen parçalanmadığı ve kısmen korunarak daha heterojen, lifsi ve yüzey açısından daha kompleks morfolojilerin elde edildiği bildirilmektedir (Xie vd., 2023). Bu bulgular, mevcut çalışmada gözlemlenen mikro-hiyerarşik ve düzensiz yapının, tam ayrıştırılmamış lignoselülozik bileşenlerin varlığı ile uyumlu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Dolayısıyla, literatürdeki güncel yaklaşımlar da dikkate alındığında, bu çalışmada elde edilen kompleks ve çok ölçekli morfolojik yapı, yalnızca bir saflaştırma eksikliği olarak değil, aynı zamanda doğal lif mimarisinin korunmasına bağlı olarak ortaya çıkan fonksiyonel bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Özellikle artan yüzey pürüzlülüğü ve yapısal heterojenlik, kompozit uygulamalarda ara yüzey etkileşimlerini artırma potansiyeli açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

Lignoselülozik atıklardan elde edilen nanoselülozun yapısal düzenliliğini ve kristalinitesini belirlemek amacıyla başvuru en yaygın yöntemlerden biri X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizidir. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda, fıstık kabuğu kaynaklı selüloz nanokristallerin (CNC) kristalinite indeksi (CrI) hesaplamalarında genellikle Segal yöntemi tercih edilmekte ve Cu K α radyasyonu kullanılarak geniş bir tarama aralığında ($2\theta = 5-50^\circ$) pik ayrıştırmaları gerçekleştirilmektedir (Görgüç vd., 2024).

Mevcut çalışma kapsamında elde edilen Antep fıstığı kabuğu nanoselüloz numunelerinin XRD paternleri incelendiğinde; piklerin genişliği, simetrisi ve dağılım karakteristiği üzerinden yarı-nicel (semi-quantitative) bir değerlendirme yapılmıştır. Spesifik bir $\$CrI\$$ değeri hesaplanmamış olsa da, klasik Segal prensibi temel alınarak $2\theta = 22^\circ$ civarındaki (200) düzlemi piki ile 18° civarındaki amorf bölge (I_{am}) yoğunlukları analiz edilmiştir. Gözlemlenen piklerin nispeten geniş ve dağınık bir morfoloji sergilemesi, malzemenin yarı-kristalin bir karakterde olduğunu göstermektedir. Bu yapısal görünüm, selülozun

doğal kristal kafesinin muhafaza edildiğini, ancak nano boyuta indirgenme sürecindeki mekanik etkiler ve yapıdaki olası amorf kalıntılar nedeniyle pik netliğinin modifiye olduğunu düşündürmektedir.

İki çalışma arasındaki veriler sentezlendiğinde, kristalinite derecesinin uygulanan ön işlem protokolünün şiddeti ve seçiciliği ile doğrudan korelasyon içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar farklı çözücü sistemlerinin kristalinite üzerindeki kantitatif etkilerini vurgularken; bu çalışmadaki bulgular, yapının morfolojik bütünlüğünün ve amorf/kristalin dengesinin korunmasına odaklanmıştır. Özellikle asidik ortamların kristal bölgeleri belirginleştirdiği gerçeğiyle birlikte, çalışmamızda gözlenen daha kompleks yapı, doğal lif hiyerarşisinin korunması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Sonuç olarak XRD analizleri, nanoselülozun sadece saflık derecesini değil, aynı zamanda uygulanan işlemin materyal üzerindeki yapısal "ayak izini" de başarıyla yansıtmaktadır.

Literatürde, Antep fıstığı kabuğundan elde edilen nanoselülozun polimer matrislerde takviye elemanı olarak kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, elde edilen nanoselülozun yüksek kristallik derecesine (%95) sahip olduğu ve bu durumun malzemenin mekanik ve termal özelliklerini doğrudan etkilediği görülmektedir (Movva ve Kommineni, 2017). Söz konusu çalışmada, kimyasal işlemlerle izole edilen nanoselülozun SEM, FTIR, XRD ve TGA analizleri ile karakterize edildiği; özellikle XRD sonuçlarının yüksek kristalin yapı oluşumunu doğruladığı rapor edilmiştir. Ayrıca, elde edilen nanoselülozun polyester matris içerisinde %5 oranında takviye edilmesi sonucunda, kompozit malzemenin çekme ve eğilme dayanımında belirgin artışlar (sırasıyla 43 MPa ve 127 MPa) sağladığı ortaya konulmuştur. Bu bulgular, yüksek kristallik derecesine sahip nanoselüloz yapıların kompozit performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Mevcut çalışma kapsamında elde edilen XRD verileri incelendiğinde ise, literatürde rapor edilen yüksek kristallik derecesine sahip nanoselüloz yapılarından farklı olarak, yarı kristalin bir yapı sergilendiği görülmektedir. Özellikle $2\theta \approx 22^\circ$ civarında gözlenen kristalin pik (I200) ile $2\theta \approx 18^\circ$ civarındaki amorf bölge yoğunluğu (I_{am}) arasındaki farkın sınırlı olması ve piklerin geniş yapıda gözlenmesi, kristalin bölgelerin tamamen baskın olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, nanoselülozun belirli ölçüde amorf faz içermeye devam

ettiğini ve kristallik derecesinin literatürde belirtilen %95 seviyesinin altında kaldığını göstermektedir.

FTIR analiz sonuçları da bu durumu destekler niteliktedir. Özellikle $3346,50\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısında gözlenen geniş –OH gerilme bandı, yoğun hidrojen bağları ve aktif yüzey hidroksil gruplarına işaret ederken; $1029,99\text{ cm}^{-1}$ ve $1153,43\text{ cm}^{-1}$ piklerinin belirginliği, selülozun temel yapısının korunduğunu doğrulamaktadır. Bununla birlikte, $1600,92\text{ cm}^{-1}$ ve $1502,55\text{ cm}^{-1}$ dalga sayılarında gözlenen zayıf lignin pikleri, yapının tamamen saflaştırılmadığını ve lignoselülozik bileşenlerin kısmen korunduğunu göstermektedir. Ayrıca $894,97\text{ cm}^{-1}$ piki, β -1,4-glikozidik bağların varlığını doğrulayarak selülozun kristalin bölgelerinin korunduğunu ortaya koymaktadır.

Literatürle kıyaslandığında, yüksek kristallik derecesine sahip ve homojen yapıdaki nanoselülozların daha kontrollü mekanik performans sağladığı bilinmekle birlikte, mevcut çalışmada elde edilen yarı kristalin ve kısmen heterojen yapı farklı bir malzeme karakteri sunmaktadır. SEM analizlerinde gözlemlenen lifsi, gözenekli ve çok katmanlı yapı ile birlikte değerlendirildiğinde, bu morfolojik özelliklerin lignin ve hemiselüloz kalıntılarının tamamen uzaklaştırılmamasıyla ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, literatürde rapor edilen yüksek saflık ve kristallik derecesine sahip nanoselüloz yapılar ile mevcut çalışmada elde edilen ve FTIR ($3346,50$, $1029,99$, $1153,43$, $1600,92$, $1502,55\text{ cm}^{-1}$) ve XRD analizleri ile desteklenen yarı kristalin yapı arasındaki fark, uygulanan işlem koşullarının ve saflaştırma derecesinin son ürün özellikleri üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, mevcut çalışmada elde edilen yapı, doğal lignoselülozik bileşenlerin kısmen korunmasına bağlı olarak gelişen, daha kompleks ve fonksiyonel bir biyomalzeme karakteri sergilemektedir.

Literatürde, Antep fıstığı kabuğundan elde edilen selüloz nanokristallerin (CNC) yüksek kristallik derecesine ulaşabildiğini gösteren çalışmalar incelendiğinde, çok aşamalı kimyasal saflaştırma süreçlerinin bu yapı üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir (Kayahan ve Alay Aksoy, 2024). Söz konusu çalışmada, nitrik asit–etanol karışımı ile ön işlem uygulanmış, ardından alkali (NaOH) ve peroksit ağartma işlemleri ile lignin ve diğer safsızlıklar büyük ölçüde uzaklaştırılmıştır. Son aşamada sülfürik asit hidrolizi ile CNC

üretimi gerçekleştirilmiş ve XRD analizleri sonucunda kristallik indeksinin %30,2'den %86,4'e yükseldiği rapor edilmiştir. Bu durum, agresif kimyasal işlemlerin selülozun amorf bölgelerini büyük ölçüde ortadan kaldırarak daha düzenli ve kristalin bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

Mevcut çalışma kapsamında elde edilen XRD verileri incelendiğinde ise, literatürde bildirilen yüksek kristallik derecesine sahip CNC yapılarından farklı olarak, daha geniş pik yapıları ve sınırlı yoğunluk farkları ile karakterize edilen yarı kristalin bir yapı gözlemlenmiştir. Özellikle $2\theta \approx 22^\circ$ civarındaki kristalin pik ile $2\theta \approx 18^\circ$ civarındaki amorf bölge arasındaki farkın belirgin olmaması, kristalin bölgelerin baskın ancak tam saflaştırılmış olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, uygulanan işlem koşullarının daha kontrollü veya nispeten daha düşük şiddette olmasından kaynaklanmaktadır.

FTIR analizleri de bu farklılığı destekler niteliktedir. Literatürde, non-selülozik bileşenlerin büyük ölçüde uzaklaştırıldığı sistemlerde lignine ait piklerin tamamen kaybolduğu rapor edilirken; mevcut çalışmada $1600,92 \text{ cm}^{-1}$ ve $1502,55 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılarında gözlemlenen zayıf lignin pikleri, yapıda kısmi lignoselülozik kalıntıların bulunduğunu göstermektedir. Buna karşılık, $3346,50 \text{ cm}^{-1}$ (–OH), $1153,43 \text{ cm}^{-1}$ ve $1029,99 \text{ cm}^{-1}$ piklerinin belirginliği, selüloz omurgasının korunduğunu ve nanoselüloz yapının başarıyla elde edildiğini doğrulamaktadır.

Literatürle kıyaslandığında, yüksek kristallik derecesine sahip CNC yapılarının daha homojen ve saf bir morfoloji sunduğu bilinmekle birlikte, mevcut çalışmada elde edilen yarı kristalin yapı ve kısmen korunmuş lignoselülozik bileşenler, daha kompleks ve çok ölçekli bir biyomalzeme karakteri ortaya koymaktadır. Bu farklılık, yalnızca bir saflaştırma derecesi değişimi olarak değil, aynı zamanda yüzey kimyası ve potansiyel uygulama performansını etkileyen önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, literatürde rapor edilen yüksek kristallik indeksine (%86,4) sahip CNC yapılar ile mevcut çalışmada FTIR ($3346,50$, $1029,99$, $1153,43$, $1600,92$, $1502,55 \text{ cm}^{-1}$) ve XRD analizleri ile ortaya konulan yarı kristalin yapı arasındaki fark, uygulanan kimyasal işlem şiddeti ve saflaştırma derecesinin nanoselülozun nihai yapısal özellikleri üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

Literatürde kabuklu yemiş atıklarının nanobiyokompozit üretiminde değerlendirilmesi-ne yönelik çalışmalarda, bu biyokütlelerin SEM analizleri ile ortaya konulan lifsi ve heterojen yapısının, malzemenin yüzey alanını artırarak kompozit uygulamalar için önemli bir avantaj sağladığı belirtilmektedir (Coltelli vd., 2025). Bu tür lignoselülozik yapıların mikroyapısal olarak tamamen homojen bir formdan ziyade, doğal lif ağını koruyan kompleks bir morfoloji sergilediği ve bu durumun ara yüzey etkileşimlerini güçlendirebildiği rapor edilmiştir. Mevcut çalışmada elde edilen SEM görüntülerinde gözlenen lifsi, gözenekli ve katmanlı yapı da literatürde tanımlanan bu mikro-hiyerarşik morfoloji ile uyum göstermektedir.

FTIR analizleri açısından değerlendirildiğinde, literatürde kabuk atıklarından elde edilen selülozik yapıların karakteristik olarak 3300–3500 cm⁻¹ aralığında –OH gerilme titreşimleri, 1000–1200 cm⁻¹ aralığında C–O–C ve C–O bağlarına ait pikler ve 1500–1600 cm⁻¹ aralığında ise lignin kaynaklı aromatik yapıların gözlemlendiği bildirilmektedir. Bu durum, biyokütlenin tamamen saflaştırılmak yerine kısmi lignoselülozik yapısını koruyarak fonksiyonel özellikler kazanabileceğini göstermektedir. Mevcut çalışmada FTIR spektrumunda 3346,50 cm⁻¹, 1153,43 cm⁻¹ ve 1029,99 cm⁻¹ piklerinin belirgin şekilde gözlenmesi selüloz yapısının korunduğunu doğrularken, 1600,92 cm⁻¹ ve 1502,55 cm⁻¹ bölgelerinde gözlenen zayıf pikler lignin varlığının tamamen uzaklaştırılmadığını göstermekte ve literatürle uyumlu bir yapı ortaya koymaktadır.

XRD analizleri kapsamında literatürde, yüksek saflıkta elde edilen selüloz nanokristallerinde keskin ve belirgin kristalin pikler gözlenirken, daha az şiddetli kimyasal işlemler sonucunda yarı kristalin yapıların oluştuğu rapor edilmektedir. Bu kristalin yapıların genellikle 2θ ≈ 22° civarında selüloz I yapısına ait pikler ile temsil edildiği, amorf bölgelerin ise 2θ ≈ 18° civarında geniş bantlar oluşturduğu belirtilmektedir. Mevcut çalışmada elde edilen XRD sonuçlarında da benzer şekilde genişlemiş kristalin pikler ve belirgin amorf katkılar gözlenmiş olup, bu durum yarı kristalin bir nanoselüloz yapısına işaret etmektedir. Bu yapı, tamamen saflaştırılmış CNC sistemlerinden farklı olarak doğal lignoselülozik bütünlüğün kısmen korunduğunu göstermektedir.

Lignoselülozik atıklardan nanoselüloz izolasyonu sürecinde meydana gelen kimyasal değişimleri ve fonksiyonel gruplardaki dönüşümleri izlemek amacıyla FTIR spektrosko-

pisinden yararlanılmıştır. Literatürde Antep fıstığı kabuğu kaynaklı selüloz nanokristaller (CNC) üzerine yapılan çalışmalar, saflaştırma adımlarının etkinliğini belirli karakteristik bantlar üzerinden doğrulamaktadır (Kasiri vd., 2018). Özellikle 3600–3000 cm^{-1} aralığında gözlenen geniş absorpsiyon bandı, selüloz yapısındaki hidroksil (–OH) gruplarının ve alifatik hidrokarbon (C–H) zincirlerinin gerilme titreşimlerine atfedilmektedir. Literatür verileriyle paralel olarak, kimyasal işlemler neticesinde 1741 cm^{-1} (hemiselülozun karbonil grubu), 1500 cm^{-1} ve 1244 cm^{-1} (ligninin aromatik iskelet titreşimleri) bölgelerindeki piklerin sönümlenmesi, amorf bileşenlerin yapıdan büyük oranda uzaklaştırıldığına temel göstergesidir. Ayrıca, 1057 cm^{-1} (piranoz halkası titreşimi) ve 897 cm^{-1} (β -glikozidik bağlar) bölgelerindeki şiddet artışı, hidroliz sonrası kristalinitenin yükseldiğini kanıtlamaktadır.

Mevcut çalışma kapsamında elde edilen spektrumlar incelendiğinde, elde edilen nanoselülozun temel kimyasal iskeletinin başarıyla korunduğu ve kristalin karakterini muhafaza ettiği görülmektedir. 3346,50 cm^{-1} bölgesindeki yayvan –OH bandı, yüzeyde halen aktif hidroksil gruplarının bulunduğu işaret etmekte olup, bu durum malzemenin su tutma kapasitesi ve olası fonksiyonelleştirme işlemleri için reaktif bölgeler sunduğunu doğrulamaktadır. 1029,99 cm^{-1} ve 1153,43 cm^{-1} bölgelerindeki keskin pikler, C–O ve C–O–C bağlarının varlığını; 894,97 cm^{-1} 'deki sinyal ise selülozun karakteristik β -1,4-glikozidik bağ yapısını teyit etmektedir. Bununla birlikte, spektrumda 1600,92 cm^{-1} ve 1502,55 cm^{-1} civarında gözlenen zayıf sinyaller, lignin kalıntılarının yapıdan tamamen elimine edilmediğini, ancak önemli ölçüde seyreltildiğini göstermektedir. Her iki çalışmanın sentezi yapıldığında, tarafından rapor edilen tam saflık durumuna karşın, mevcut çalışmadaki zayıf lignin sinyalleri, uygulanan izolasyon protokolünün şiddeti ve hammaddeye özgü bileşen etkileşimleri ile ilişkilendirilmektedir (Kasiri vd., 2018). Bu durum, malzemenin daha doğal bir lignoselülozik karakter sergilediğini ve tam ayrışma yerine hiyerarşik yapının korunmasına dayalı bir üretim stratejisinin yansıması olduğunu ortaya koymaktadır.

Literatürde nanocellulose (NC), sürdürülebilir malzeme geliştirme ve çevre dostu üretim yaklaşımları kapsamında en önemli biyopolimerlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Nanoselülozun yüksek mekanik dayanım, düşük yoğunluk, yüksek kristallik derecesi, biyobozunurluk ve toksik olmama gibi üstün özelliklere sahip olması, onu özellikle yeşil

malzeme teknolojileri açısından ön plana çıkarmaktadır (Banerjee vd., 2023). Bu kapsamda selüloz nanokristaller (CNC) ve selüloz nanofibriller (CNF) olmak üzere iki temel formda sınıflandırılan nanoselülozun, tarımsal ve kentsel atıklardan elde edilmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Söz konusu literatür çalışmalarında, kabuklu yemiş atıkları gibi lignoselülozik kaynaklardan elde edilen nanoselülozun, özellikle fonksiyonel kağıtlar, ambalaj malzemeleri, biyosensörler, enerji depolama sistemleri ve polimer nanokompozitler gibi geniş bir uygulama alanına sahip olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte, nanoselülozun yüzeyinde bulunan yoğun hidroksil grupları nedeniyle hidrofilik karakter göstermesi, hidrofobik polimerlerle uyumluluğunu sınırlayan önemli bir faktör olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle literatürde, yüzey modifikasyonu teknikleri ile bu uyumsuzluğun giderilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Mevcut çalışma ile literatür karşılaştırıldığında, kabuklu yemiş atıklarından elde edilen nanoselülozun hem sürdürülebilir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesi hem de fonksiyonel biyomalzeme üretimine uygunluğu açısından benzer yaklaşımlar sergilediği görülmektedir. Ancak bu tez çalışmasında, nanoselülozun yalnızca potansiyel uygulamalarına değil, aynı zamanda farklı tarımsal atıklardan elde edilen yapısal ve kimyasal farklılıklarına odaklanılarak daha temel bir karakterizasyon yaklaşımı benimsenmiştir. Bu durum, literatürde belirtilen uygulama odaklı çalışmaların aksine, malzemenin temel özelliklerinin anlaşılmasına yönelik önemli bir katkı sunmaktadır.

Antep fıstığı kabuğundan elde edilen numunelerin boyut dağılımı ve partikül karakteristikleri lazer difraksiyon yöntemi ile belirlenmiş; hacimsel çap dağılım değerleri $D_v(10)$: 125 μm , $D_v(50)$: 345 μm ve $D_v(90)$: 644 μm olarak tespit edilmiştir. Elde edilen numunelerin medyan çapının $D_v(50)$: 345 μm mikro ölçekte olması, çalışmanın 'nanoselüloz' hedefinden saptığını değil; aksine lignoselülozik hiyerarşinin belirli bir aşamada korunduğunu göstermektedir. Fıstık kabuğundan elde edilen selülozik yapıların kurutma ve analiz aşamalarında güçlü bir 'hornification' (boynuzlaşma/sertleşme) ve agregasyon eğilimi gösterdiğini, bu durumun ölçülen partikül boyutlarını yukarı çektiğini belirtmiştir (Heshmatiafshar vd., 2019). Dolayısıyla, lazer difraksiyon sonuçlarımızda

gözlenen mikro-boyutlu dağılım, 'bireysel nano-liflerin oluşturduğu mikro-ölçekli agregatlar' olarak tanımlanmalıdır.

Literatür verileriyle kıyaslandığında, Antep fıstığı kabuğu gibi lignoselülozik atıklardan elde edilen selüloz türevlerinin boyut dağılımının, uygulanan mekanik ve kimyasal işlemlerin şiddetine bağlı olarak geniş bir spektrum sergilediği görülmektedir. Yürütülen çalışmada, fıstık kabuklarından izole edilen selüloz nanokristallerin (CNC) ve nanofibrillerin (CNF) morfolojik analizleri, partiküllerin mikron altı seviyeye indirgenebildiğini ancak bu süreçte güçlü hidrojen bağları nedeniyle agregasyon (kümelenme) eğiliminin baskın olduğunu ortaya koymuştur (Heshmatiafshar vd., 2019). Mevcut çalışmamızda elde edilen ortalama hacimsel çapın $D[4,3]$: 370 μm ve 2 μm altındaki partikül oranının %0 olması, bu "yüksek yüzey enerjisine bağlı demetlenme" (bundling) olgusu ile ilişkilendirilmektedir.

Numunenin boyut dağılım genişliğini ifade eden Span değerinin 1,504 olarak hesaplanması, partikül dağılımının göreceli olarak dar bir aralıkta ve homojen bir karakter sergilediğini göstermektedir. Bu durum, hammadde üzerindeki parçalanma etkisinin kontrol edilebilir düzeyde olduğunu kanıtlamaktadır. Ancak, 45 μm altındaki parçacıkların toplam hacmin yalnızca %2,15'ini oluşturması, malzemenin henüz tamamen bireysel nanofibrillere ayrılmadığını, bunun yerine "mikro-ölçekli hiyerarşik lif ağları" formunda kaldığını doğrulamaktadır. Bu bulgu, malzemenin kompozit yapılar içerisinde mekanik bir "iskelet" görevi görerek matris takviyesinde etkin rol oynayabileceğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, mevcut çalışma bulguları sentezlendiğinde; fıstık kabuğu kaynaklı nanoselüloz üretiminde tam bir nano-boyut izolasyonu için daha ileri ultrasonikasyon veya homojenizasyon adımlarının kritik olduğu anlaşılmaktadır (Heshmatiafshar vd., 2019). Bununla birlikte, elde edilen mikro-agregat yapısı, malzemenin fiziksel bütünlüğünü koruması ve yüksek spesifik yüzey alanı 27,49 m^2/kg sunması bakımından literatürdeki "yarı-kristalin biyomateryal" tanımlamalarıyla tam uyum içerisinde.

Tarımsal atıklardan elde edilen selüloz türevlerinin kristalinitesi, malzemenin mekanik dayanımı ve termal kararlılığı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Literatürde nar kabuğu kaynaklı selüloz nanokristaller (PCNCs) üzerine yapılan çalışmalar, ileri kimyasal saflaştırma işlemleri neticesinde selüloz I yapısına özgü karakteristik yansımaların (2 $\theta \approx$

15,4°, 22,2° ve 34,5°) net bir şekilde açığa çıktığını göstermektedir (Zeng vd., 2022). Bu keskin pikler, asit hidrolizi sırasında hidronyum iyonlarının selüloz zincirlerindeki amorf bölgelere nüfuz ederek β -1,4-glikozidik bağlarını selektif olarak koparmasının ve kristalin bölgeleri serbest bırakmasının bir sonucudur. Amorf fazı temsil eden lignin ve hemiselülozun uzaklaştırılması, XRD paterninde şiddetli ve dar piklerin oluşmasını sağlayarak yüksek bir kristalinite indeksi (*CrI*) değerine imkan tanımaktadır. Elde edilen bu yüksek kristalinité, biyopolimer kompozitlerin mekanik ve bariyer özelliklerini güçlendirmede kritik bir parametredir.

Mevcut çalışma kapsamında analiz edilen ham nar kabuğu numunelerinde ise, literatürdeki saflaştırılmış formların aksine, geniş bir tarama aralığında (10° – 90°) oldukça farklı bir difraksiyon karakteri gözlemlenmiştir. Özellikle 20 $\approx$ 22° civarında izlenen geniş (broad) ve düşük şiddetli pik, kristalin bölgelerin varlığına işaret etse de, yapının amorf karakterinin baskın olduğunu teyit etmektedir. Piklerdeki bu yayılım ve netlik kaybı, selülozun doğal lignoselülozik matris içerisinde; yani amorf yapıdaki lignin ve hemiselüloz ağları arasında hapsolmuş (entrapment) halde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, bitkisel atık kökenli doğal biyokütlelerde selülozun kristalin sinyallerini çevreleyen amorf matris tarafından maskelenmesiyle açıklanabilir. Sonuç olarak, uygulanan şiddetli ön işlemler kristaliteyi maksimize ederken, bu çalışmada kullanılan ham nar kabuğu örneğinde biyokütlenin doğal hiyerarşik yapısı korunmuş, dolayısıyla kristalite düşük seviyede kalmıştır (Zeng vd., 2022). Bu amorf yapı, malzemenin daha yüksek higroskopik (nem çekici) karakter sergilemesine yol açarak, karakterizasyon aşamalarında (örneğin parçacık boyut analizi) gözlenen aglomerasyon eğilimini de bilimsel olarak desteklemektedir. Bu bulgular, nar kabuğunun fonksiyonel bir biyopolimer takviyesi olarak kullanılabilmesi için kristalin yapı oranını artıracak kimyasal veya enzimatik modifikasyonların gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Literatürde nanoselülozun bitkisel ve bakteriyel kaynaklardan elde edilerek doku mühendisliği başta olmak üzere farklı ileri biyomedikal uygulamalarda değerlendirildiği çalışmalar incelendiğinde, bu materyalin yüksek erişilebilirlik, yenilenebilirlik, üstün mekanik özellikler ve biyouyumluluk gibi önemli avantajlara sahip olduğu görülmektedir.

Özellikle bitkisel liflerden elde edilen nanoselülozun top-down mekanik ve kimyasal yöntemlerle nanofibril ve nanokristal yapılara dönüştürülebildiği; bakteriyel selülozun ise bottom-up mekanizma ile yüksek kristallik, yüksek porozite ve elastik modül gibi üstün yapısal özellikler kazandığı rapor edilmiştir. Bu durum, nanoselülozun hem yapısal hem de fonksiyonel açıdan çok yönlü bir biyomalzeme olduğunu ortaya koymaktadır (Gouripriya vd., 2024).

Mevcut çalışmada SEM analizleri ile elde edilen lifsi, gözenekli ve heterojen yapı, literatürde tanımlanan bitkisel kaynaklı nanoselülozun hiyerarşik ve çok ölçekli morfolojik yapısı ile uyum göstermektedir. Özellikle liflerin tam olarak homojen dağılmamış olması ve mikro boşluklu ağ yapısının gözlenmesi, nanoselülozun doğal lif mimarisini kısmen koruduğunu göstermekte olup, bu durum literatürde belirtilen yüksek yüzey alanı ve etkileşim kapasitesi ile örtüşmektedir.

FTIR analizleri açısından değerlendirildiğinde, literatürde nanoselülozun yüzey kimyasının büyük oranda hidroksil grupları (-OH) tarafından kontrol edildiği ve bu fonksiyonel grupların biyouyumluluk ve kimyasal modifikasyon kabiliyeti açısından kritik rol oynadığı belirtilmektedir. Mevcut çalışmada $3360\text{--}3298\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen geniş -OH bandı, 1020 cm^{-1} civarındaki C-O-C glikozidik bağ pikleri ve lignin kaynaklı aromatik bantların kısmen korunmuş olması, literatürde tanımlanan lignoselülozik nanocellulose yapısıyla uyumlu bir kimyasal yapı ortaya koymaktadır.

XRD analizleri kapsamında literatürde nanoselülozun yarı kristalin yapıya sahip olduğu ve kristallik derecesinin üretim yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ifade edilmektedir. Bitkisel kaynaklı nanoselülozda selüloz I ve selüloz II kristal yapılarının $2\theta \approx 22^\circ$ civarında gözlemlendiği, amorf lignin ve hemiselüloz fazlarının ise pik genişlemesine neden olduğu bildirilmektedir. Mevcut çalışmada da $2\theta \approx 22^\circ$ civarındaki geniş kristalin pik ve belirgin amorf katkı, nanoselülozun tam kristalin bir yapıdan ziyade yarı kristalin ve heterojen bir lignoselülozik yapı sergilediğini göstermektedir.

Partikül boyut analizinde nar kabuğu nanoselülozunun yüksek aglomerasyon eğilimi göstermesi ve ölçüm sistemine düzgün akış sağlayamaması, literatürde nanoselülozun yüzey hidroksil grupları nedeniyle yüksek yüzey enerjisine ve güçlü hidrojen bağlanma eğilimine

sahip olması ile açıklanabilir. Bu durum, özellikle bitkisel kaynaklı nanoselülozun su tutma kapasitesi ve yüzey etkileşim potansiyelinin yüksek olduğunu göstermekte olup, doku mühendisliği ve biyomedikal uygulamalarda önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak literatürde nanoselülozun hem bitkisel hem de bakteriyel kaynaklardan elde edilerek çok çeşitli biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabildiği vurgulanırken, mevcut çalışmada elde edilen SEM, FTIR ve XRD bulguları bu genel çerçeve ile uyumlu olarak, tarımsal atıklardan elde edilen nanoselülozun doğal hiyerarşik yapısını koruyarak fonksiyonel biyomalzeme potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır.

Nar kabuğundan elde edilen nanoselülozun FTIR analizi ile nar kabuğu ekstraktı içeren karboksimetil selüloz (CMC) kompozit filmler üzerine yaptıkları FTIR çalışmaları, lignoselülozik materyallerin fonksiyonel gruplarına dair önemli yapısal bilgiler sunmaktadır (Baniasadi vd., 2025). Her iki analiz, nar kabuğunun temel bileşenleri olan selüloz, hemiselüloz ve ligninin karakteristik titreşimlerini ortaya koymaktadır. Nanoselüloz çalışmasında, 3360–3298 cm^{-1} aralığında gözlenen geniş hidroksil (-OH) grubuna ait absorpsiyon bandı, selüloz ve hemiselüloz moleküllerinde bolca bulunan hidroksil gruplarının varlığını doğrulamaktadır. Bu bant, hidrojen bağları nedeniyle genişlemiş olup numunedeki su moleküllerinden kaynaklanan titreşimleri de içermektedir. Benzer şekilde, Baniasadi vd. (2025) çalışmasında da CMC ve gliserol bileşenlerinde 3500–3000 cm^{-1} aralığında geniş OH bantları tespit edilmiştir. Her iki çalışma, lignoselülozik matrisin yoğun hidroksil grubuna sahip olduğunu göstermesi bakımından uyumludur.

Alifatik C–H bağlarına karşılık gelen 2927–2873 cm^{-1} bölgesindeki titreşimler nanoselüloz spektrumunda lignin ve hemiselüloza özgü asimetric ve simetric gerilme titreşimleri olarak yer alırken, çalışmada da benzer dalga sayılarına sahip C–H gerilme pikleri, özellikle gliserol ve CMC bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, her iki materyalde alifatik zincirlerin varlığını doğrulamaktadır (Baniasadi vd., 2025). Nanoselüloz spektrumunda 1597–1500 cm^{-1} bölgesinde lignine özgü aromatik C=C gerilme titreşimleri gözlenmiştir. FTIR analizinde ise 1604 cm^{-1} 'de aromatik C=C ve 1722 cm^{-1} 'de karbonil (C=O) gerilme titreşimleri net biçimde ortaya konmuştur (Baniasadi vd., 2025). Bu karbonil piklerinin varlığı, çalışmada nar kabuğu ekstraktındaki fenolik ve ester gruplarının

fonksiyonel özelliklerini göstermektedir (Baniasadi vd., 2025) .

Her iki çalışmada da 1020–1035 cm⁻¹ bölgesinde güçlü C–O–C glikozid bağına ait titreşimler tespit edilmiştir. Nanoselüloz çalışmasında bu pik, selülozun yüksek oranda korunduğuna ve dolayısıyla biyokütlenin nanoselüloz üretimi için uygunluğuna işaret ederken, çalışmasında ise CMC matrisinde ve nar kabuğu katkısında bulunan polisakkarit yapılarının varlığını desteklemektedir (Baniasadi vd., 2025) . Düşük dalga sayılarında gözlemlenen bantlar ise iki çalışma arasında farklılık göstermektedir. Nanoselüloz spektrumunda 669–596 cm⁻¹ ve 462 cm⁻¹ aralıklarında aromatik halka dışı titreşimler ve muhtemel mineral kalıntılar izlenirken, çalışmasında 3620 cm⁻¹, 1635 cm⁻¹ ve 920–850 cm⁻¹ aralığında killerin karakteristik titreşimleri belirgin olarak görülmüştür (Baniasadi vd., 2025) . Bu farklılık, film kompozitinde kullanılan kil katkısına bağlıdır ve bu inorganik bileşenlerin varlığını yansıtmaktadır.

Sonuç olarak, her iki çalışma da nar kabuğunun lignoselülozik bileşenlerinin karakterizasyonu açısından tutarlı bulgular sunmakla birlikte, nanoselüloz üretimine yönelik çalışma daha çok selülozun yapısal bütünlüğü ve fonksiyonel gruplarının korunması üzerine odaklanmıştır. Çalışması ise çok bileşenli fonksiyonel film matrislerinde lignoselülozik ekstraktların kimyasal etkileşimlerini ve katkılarını detaylandırmıştır (Baniasadi vd., 2025). Bu bağlamda, nanoselüloz eldesinde lignoselülozik yapıların temel bileşenlerinin varlığı doğrulanırken, fonksiyonel filmler için yapılan kompozit tasarımında ekstraktın kimyasal ve fizikokimyasal özellikleri kapsamlı biçimde analiz edilmiştir.

Bakteriyel nanoselüloz (BNC) ve okside türevinin (o-BNC) yüzey morfolojisi, Filipović vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen FESEM analizleri ile karakteristik olarak ortaya konmuştur. Saf dondurularak kurutulmuş BNC'nin üç boyutlu (3D) fibröz ağ yapısına sahip olduğu, fibrillerin rastgele dağıldığı ve lifler arasında bağlantılı gözenekli bir morfoloji sergilediği rapor edilmiştir. Oksidasyon işlemi sonucunda o-BNC'nin yapısının daha yüksek gözeneklilik kazandığı, yüzeydeki karboksilat gruplarının hidroksil gruplarına kıyasla daha yüksek hidrofilite sahip olması nedeniyle mikro-fibriller arası itici kuvvetlerin arttığı belirtilmiştir. Nar kabuğu ekstraktı (PPE) eklenmesiyle hem BNC hem de o-BNC üzerinde PPE partiküllerinin mikrofibrillere bağlandığı ve bu durumun BNC yüzeyinde düzensiz,

kümelenmiş partikül kümelerinin oluşmasına neden olduğu, o-BNC yüzeyinde ise daha az ve daha küçük PPE partiküllerinin bağlandığı gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, o-BNC üzerindeki karboksilat gruplarının PPE aktif bileşenleriyle daha seçici bağlanma eğiliminde olmasına bağlanmıştır.

Nar kabuğundan elde edilen nanoselülozun SEM görüntülerinde ise iki farklı yapısal durum ortaya konulmaktadır. Sol görüntüde (Şekil 3.4), lifsi ve düzensiz bir yapı hakim olup, lifler arasında yapışmanın düşük olduğu ve gevşek bir matris olduğu görülmektedir. Bu durum, nanofibrillerin ayrışmaya başladığını ancak henüz homojen bir dağılımın sağlanamadığını düşündürmektedir. Lif uçlarının ve katmanlarının görünmesi, kimyasal veya mekanik işlemlerle parçalanmanın gerçekleştiğini işaret etmektedir. Sağ görüntü (Şekil 3.4) ise daha düzenli tabakalanmış, ağ benzeri yapıyı göstermekte olup, liflerin daha ince tabakalar halinde ve mikro boşluklar içerecek şekilde yayılmış olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yapı, işlemin ileri aşaması veya daha etkin bir homojenleştirme sonucunu yansıtmakta ve yüksek yüzey alanı ile potansiyel uygulama alanlarına işaret etmektedir.

Her iki çalışmanın SEM analizleri nanoselülozun yapısal özelliklerini başarılı biçimde ortaya koymakla birlikte çalışması biyoteknolojik yöntemle üretilmiş bakteriyel nanoselülozun ve modifikasyonunun yüzey karakteristiklerine odaklanırken, çalışmamız bitkisel kaynaklı lignoselülozik biyokütleden elde edilen nanoselülozun farklı işlem aşamalarına bağlı morfolojik değişimlerini vurgulamaktadır (Filipovic vd., 2025). Sonuçları fonksiyonel grupların yüzey kimyası ve bunların aktifleştirici bileşenlerle etkileşimleri üzerine yoğunlaşırken, elde ettiğimiz veriler daha çok lif yapısının ayrışması, tabakalanması ve dağılım homojenliği bağlamında işlem verimliliğinin göstergesi olarak değerlendirilebilir (Filipovic vd., 2025).

Sonuç olarak, iki çalışmada da nanoselülozun fibröz ve gözenekli yapılarının başarıyla elde edildiği ve yüzey morfolojisinin işlem türü ve aşamasına göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Ancak yapılan çalışmada oksidasyonun ve fonksiyonel grup modifikasyonlarının nanofibril morfolojisi ve biyomolekül bağlanmasına etkisini detaylandırırken, çalışmamız biyokütleden elde edilen nanoselülozun mekanik/kimyasal işlem süreçlerinin morfolojik gelişimine dair önemli bilgiler sunmaktadır. Bu farklı odaklar, nanoselüloz

uygulamalarında yapı-işlem ilişkilerinin kapsamlı anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Literatürde nar kabuğu ekstraktlarının nanoselüloz temelli sistemlerle birleştirilerek fonksiyonel biyomalzemeler geliştirilmesine yönelik çalışmalar incelendiğinde, bu bileşenlerin özellikle antibakteriyel özellik kazandırmada etkin rol oynadığına değinilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen bir çalışmada, selüloz nanofiberler ile nar kabuğu ekstraktı kullanılarak sentezlenen altın nanopartiküllerin (AuNP) oluşturduğu biyokompleksin pamuk kumaş yüzeyine kaplanmasıyla antibakteriyel özellik kazandırılmıştır (Silva vd., 2024). Yapılan analizlerde, TEM ve SEM görüntüleri ile nanokompozit yapının yüzeye başarılı şekilde tutunduğu ve yüzey morfolojisinde belirgin bir pürüzlülük artışı sağladığı rapor edilmiştir.

Mevcut çalışma kapsamında elde edilen SEM bulguları ile karşılaştırıldığında, nar kabuğundan elde edilen nanoselülozun lifsi, gözenekli ve heterojen yapısının literatürde belirtilen yüzey etkileşimini artırıcı özelliklerle uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle lifler arası boşlukların ve düzensiz morfolojinin varlığı, nanomalzemenin yüzey kaplama ve fonksiyonel bileşen taşıma kapasitesini artırabilecek bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

FTIR analizleri açısından literatürde, nar kabuğu ekstraktı içeren nanokompozit sistemlerde fenoller, tanenler ve ester gruplarının varlığının doğrulandığı belirtilmektedir. Bu fonksiyonel grupların hem biyolojik aktivite hem de malzeme yüzeyi ile etkileşim açısından kritik rol oynadığı ifade edilmektedir. Mevcut çalışmada FTIR spektrumunda gözlenen geniş –OH bantları ve lignin kaynaklı aromatik pikler, nar kabuğu türevli fenolik bileşenlerin varlığı ile uyumlu olup, literatürde rapor edilen biyolojik aktivite potansiyelini destekler niteliktedir.

Fonksiyonel açıdan değerlendirildiğinde, söz konusu çalışmada geliştirilen nanokompozit sistemin *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* ve *Enterococcus faecalis* gibi bakterilere karşı etkili antibakteriyel aktivite gösterdiği rapor edilmiştir. Bu durum, nar kabuğu ekstraktının içerdiği fenolik bileşikler ile metal nanopartiküllerin sinerjik etkisinden kaynaklanmaktadır. Mevcut tez çalışmasında doğrudan antibakteriyel analiz yapılmamış olsa da, nar kabuğu nanoselülozunun yüksek yüzey aktivitesi ve fenolik bileşen içeriği göz önüne alındığında, benzer fonksiyonel uygulamalarda kullanılabilecek potansiyele sahip

olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak, literatürde nanoselüloz temelli sistemlerin nar kabuğu ekstraktı ile birlikte kullanılarak tekstil ve biyomedikal uygulamalarda fonksiyonel özellikler kazandırdığı görülmektedir. Bu durum, mevcut çalışmada elde edilen yapısal ve kimyasal bulguların yalnızca temel karakterizasyon ile sınırlı kalmayıp, ileri uygulamalara yönelik güçlü bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

Nar kabuğu selüloz numunelerinin kuru sistem partikül boyut analizinde karşılaşılan teknik aksaklıklar, materyalin yüksek yüzey enerjisi ve hidroksil yoğunluğuna bağlı gelişen ekstrem aglomerasyon eğilimi ile açıklanmaktadır. Benzer bir durum Yapılan çalışmada da ele alınmıştır (Yaghoobi vd., 2024). Araştırmacılar, nar kabuğundan elde ettikleri selüloz nanokristallerinin (CNC) toz formunda mikron düzeyinde büyük kümeler oluşturduğunu, ancak bu engeli aşmak için Dinamik Işık Saçılması (DLS) yöntemini kullanarak sulu süspansiyon içerisinde ölçüm yaptıklarını rapor etmişlerdir. Nar kabuğu nanoselülozunun sıvı fazda dağıtıldığında ortalama parçacık boyutunun 120–180 nm aralığında olduğunu saptamışlardır (Yaghoobi vd., 2024). Bu literatür verisi, bizim çalışmamızdaki nar kabuğu numunelerinin kuru sistemde cihaz kanallarına tutunmasına neden olan ”yüksek bağlanma kapasitesini” desteklemektedir. Vurguladığı yoğun hidroksil (-OH) ağ yapısı (Baniasadi vd., 2025), gözlemlediği nano boyuttaki taneciklerin havadaki nemle hızla birleşerek makro-aglomeratlar oluşturma eğilimi ile paralellik göstermektedir (Yaghoobi vd., 2024).

Sonuç olarak, nar kabuğu nanoselülozunun Antep fıstığı kabuğuna göre daha zor analiz edilmesi, onun çok daha reaktif bir yüzey alanına sahip olduğunu ve sıvı fazda (hidrodinamik çap olarak) ölçüldüğünde çok daha küçük boyutlara inebileceğini dolaylı yoldan kanıtlamaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma, Antep fıstığı kabuğu ve nar kabuğu gibi stratejik tarımsal atıkların, biyoteknolojik süreçler aracılığıyla yüksek katma değerli biyomateryallere dönüştürülme potansiyelini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Karakterizasyon çalışmaları, her iki atık kaynağının da kendine özgü yapısal avantajlar sunduğunu kanıtlamıştır. Yüksek selüloz içeriği ve yapısal sertliği ile Antep fıstığı kabuğu, mekanik dayanımı yüksek nanoselüloz üretimi için ideal bir ham madde olarak öne çıkarken; nar kabuğu, zengin fenolik profili ve yüksek yüzey aktivitesi sayesinde antioksidan özellikli fonksiyonel kompozitlerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynayacağı öngörülmektedir.

Çalışmanın teknik analiz safhasında, nar kabuğu türevli numunelerin parçacık boyut analizi aşamasında sergilediği yüksek aglomerasyon (topaklanma) eğilimi, materyalin karakteristik bir özelliği olarak kaydedilmiştir. Kuru sistem ölçümlerinde karşılaşılan bu durum, nar kabuğu nanoselülozunun Antep fıstığı kabuğuna kıyasla çok daha aktif bir yüzey kimyasına ve yoğun hidroksil (-OH) ağ yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Bu yüksek yüzey enerjisi, her ne kadar standart toz analizlerini zorlaştırsa da, polimer matrisler içerisinde güçlü moleküller arası bağlar kurma potansiyeline işaret ederek, özellikle biyoplastik ve ambalaj teknolojilerinde üstün arayüzey etkileşimi sağlama kapasitesini doğrulamaktadır.

Tarımsal atıkların katma değerli biyopolimerlere dönüştürülmesi, sadece atık yönetimi stratejilerini iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda fosil kaynaklı plastiklere olan bağımlılığı azaltarak karbon ayak izinin düşürülmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular; bu biyokompozitlerin gıda ambalajlarından biyomedikal iskelelere, tekstilden inşaat sektörüne kadar geniş bir yelpazede "yeşil alternatif" olarak konumlandırılabilceğini desteklemektedir.

7. ÖNERİLER

Tarımsal atıkların yüksek katma değerli biyomalzemelere dönüştürülmesi süreci, hem teknik açıdan hassas optimizasyon gerektirmesi hem de endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik açısından değerlendirilmesi gereken çeşitli fırsat ve zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu tez kapsamında, Antep fıstığı ve nar kabuğu atıklarından kontrollü asit hidrolizi yöntemi ile elde edilen nanoselülozların yapısal ve karakteristik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve yerel biyokütle kaynaklarının nanoteknolojik potansiyeli ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, bu alanda çalışma yürütecek araştırmacılar ve sanayi paydaşları için aşağıda belirtilen öneriler sunulmaktadır:

Gelecekteki araştırmalar ve endüstriyel uygulamalar için şu öneriler sunulabilir:

Farklı İzolasyon Yöntemleri ve Yeşil Kimya Yaklaşımları Denenmelidir: Bu çalışmada kontrollü asit hidrolizi yöntemi kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda, çevresel etkiyi daha da azaltmak amacıyla derin ötektik çözücüler (DES) veya iyonik sıvılar gibi "yeşil çözücülerin" Antep fıstığı ve nar kabuğu üzerindeki etkinliği araştırılmalıdır. Ayrıca, asit tüketimini azaltmak için enzim destekli hidroliz yöntemlerinin verimliliği karşılaştırılmalıdır.

Proses Parametrelerinin Optimizasyonu İçin İstatistiksel Modellemeler Kullanılmalıdır: Nanoselülozun kristallik derecesi ve boyut dağılımı; sıcaklık, süre ve asit konsantrasyonuna doğrudan bağlıdır. Gelecekteki çalışmalarda "Yanıt Yüzey Yöntemi" (RSM) gibi istatistiksel tasarım araçları kullanılarak, en az hammadde ve kimyasal kullanımıyla en yüksek verimi sağlayan optimum noktalar belirlenmelidir.

Nanoselülozun Fonksiyonelleştirilmesi ve Yüzey Modifikasyonu Çalışılmalıdır: Elde edilen nanokristallerin (CNC) hidrofilik doğası, bazı apolar polimer matrislerle uyumunu zorlaştırabilir. Bu nedenle, fıstık ve nar kaynaklı nanoselülozların yüzeyine asetilleme veya silanizasyon gibi kimyasal modifikasyonlar uygulanarak, farklı endüstriyel kompozitlerdeki performansları test edilmelidir.

Karma Tarımsal Atık Kokteylleri Üzerine Araştırmalar Yapılmalıdır: Bu tezde iki atık türü ayrı ayrı incelenmiştir. Gelecekte, bölgedeki farklı tarımsal atıkların (örneğin fıstık dış kabuğu ile nar kabuğunun) belirli oranlarda karıştırılarak işlenmesinin, nihai ürünün

mekanik ve termal özelliklerinde sinerjik bir etki yaratıp yaratmadığı analiz edilmelidir.

Endüstriyel Ölçeklenebilirlik ve Yaşam Döngü Analizi (LCA) Yapılmalıdır:

Laboratuvar ölçeğinde elde edilen başarılı sonuçların sanayiye aktarılması için "Yaşam Döngü Analizi" çalışmaları yürütülmelidir. Bu analizler, tarımsal atıktan nanoselüloz üretmenin karbon ayak izini ve ekonomik maliyetini sentetik alternatiflerle kıyaslayarak projenin ticari sürdürülebilirliğini kanıtlayacaktır.

Yeni Uygulama Alanları Keşfedilmelidir:

Bu tezde yapısal karakterizasyona odaklanılmıştır. Gelecek çalışmalarda, elde edilen bu nanoselülozların gıda ambalajlarında "bariyer özelliği" artırıcı olarak kullanımı, biyomedikal alanda "ilaç taşıyıcı sistemler" olarak etkinliği veya atık su arıtımında "nanofiltre" olarak performansı üzerine spesifik uygulama testleri yapılmalıdır.

Bölgesel Atık Toplama ve Ön İşleme Merkezleri Kurulmalıdır:

Şanlıurfa ve GAP bölgesindeki yüksek potansiyelin ekonomiye kazandırılması için, hasat sezonunda açığa çıkan kabuk atıklarının lojistik planlaması yapılmalı ve bu atıkların standardizasyonunu (kurutma, öğütme vb.) sağlayacak yerel tesislerin kurulması teşvik edilmelidir.

KAYNAKLAR

- A., H., A., K., & G, A. (2015). Biyoyakıt bitkileri ve teknolojisi. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 3(2), 69–81.
- Açıklan, K., Karaca, F., & Bolat, E. (2012). Pyrolysis of pistachio shell: Effects of pyrolysis conditions and analysis of products. *Fuel*, 95, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.037>
- Akçay, Ç., Ceylan, F., & Arslan, R. (2023). Production of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) from some waste lignocellulosic materials and FTIR characterization of structural changes. *Scientific Reports*, 13, 12897. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40156-z>
- Akdağ, E. (2011). *Türkiye meyve suyu vb. ürünler sanayi raporu*. MEYED.
- Al, K. (2021). Biyokütle enerji santralleri için tarımsal atıklar: Şanlıurfa ilinde tarımsal atık ve artıkların değerlendirilmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4(2), 67–76.
- Altuntaş, E., & Mutlu, A. (2007). Antepfıstığı (*Pistacia vera* L.) kabuklu ve iç meyvesinin bazı fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 24(1), 19–25. <https://izlik.org/JA47LE89ZG>
- Anonim. (2023). Sıfır atık. <https://sifiratik.gov.tr/> arazilerinde kullanımı. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1, 14–19.
- Araki, J., Wada, M., Kuga, S., & Okano, T. (1998). Flow properties of microcrystalline cellulose suspension prepared by acid treatment of native cellulose. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 142(1), 75–82. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00404-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00404-X)
- Arslan, M., Karakuş, B., & Güntekin, E. (2007). Tarımsal atıklardan lif ve yonga levha üretimi. *ZKÜ Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 9(12), 54–62.
- Arslan, Z. (2020). Üniversitemiz, tarımsal atıkları endüstriye geri kazandırmak için çalışmalarını sürdürüyor. Düzce Üniversitesi Tarımsal Atıkların Endüstriye Geri Kazanımı Uygulama ve Araştırma Merkezi. <https://www.duzce.edu.tr/akademik/merkez/tag/duyuru/bf46/03102020---universitemiz-tarimsal-atiklariendustriye-geri-kazandirmak-cin-calismalarini-surduruyor>
- Aydın, S., Deviren, H., & İlkiliç, C. (2017). Biyogaz üretiminde kullanılabilen materyaller ve biyogazın kullanım alanları. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 79–89.
- Azeredo, H., Rosa, M., & Mattoso, L. (2017). Nanocellulose in bio-based food packaging: A review. *Soft Matter*, 13(28), 4881–4893. <https://doi.org/10.1039/C7SM00701A>
- Baccile, N., Falco, C., & Titirici, M. (2011). Morphological and structural differences between glucose, cellulose and lignocellulosic biomass derived hydrothermal carbons. *Green Chemistry*, 13(11), 3273–3281.

- Bahçegül, E. (2011). Tarımsal atıkların çevre dostu plastiklere dönüşümü. *Bilim ve Teknik*, 521, 68–74.
- Bajwa, S., Bajwa, D., Holt, G., Coffelt, T., & Nakayama, F. (2011). Properties of thermoplastic composites with cotton and guayule biomass residues as fiber fillers. *Industrial Crops and Products*, 33(3), 747–755. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.01.018>
- Banerjee, M., Sachdev, P., Joshi, A., Choudhary, A., Nagar, S., & Mukherjee, G. (2023). Nanocellulose: Extraction, properties and applications from nutshells. İçinde *Synthesis and characterization of polymer/metal nanocomposite magnetic material* (1st, ss. 13–62). Apple Academic Press.
- Baniasadi, H., Fathi, Z., Lizundia, E., Cruz, C., Abidnejad, R., Fazeli, M., Tammela, P., Kontturi, E., Lipponen, J., & Niskanen, J. (2025). Development and characterization of pomegranate peel extract-infused carboxymethyl cellulose composite films for functional, sustainable food packaging. *Food Hydrocolloids*, 158, 110525. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110525>
- B.E.P.A. (2021). Biyokütle enerjisi potansiyeli atlası. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://bepa.enerji.gov.tr/map.aspx>
- Berglund, L., Svagan, A., & M.A.S.A. Samir. (2008). Biomimetic foams of high mechanical performance based on nanostructured cell walls reinforced by native cellulose nanofibrils. *Advanced Materials*, 20(7), 1263–1269. <https://doi.org/10.1002/adma.200701215>Digital
- Bharimalla, A., Deshmukh, S., Patil, P., & Vigneshwaran, N. (2015). Energy efficient manufacturing of nanocellulose by chemo- and bio-mechanical processes: A review. *World Journal of Nano Science and Engineering*, 5(4), 204–212. <https://doi.org/10.4236/wjnse.2015.54021>
- Bilek, S., Meliokoğlu, A. Y., & Cesur, S. (2019). Tarımsal atıklardan selüloz nanokristallerinin eldesi, karakteristik özellikleri ve uygulama alanları. *Akademik Gıda*, 17(1), 140–148.
- Bocco, A., Cuvelier, M., Richard, H., & Berset, C. (1998). Antioxidant activity and phenolic composition of citrus peel and seed extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(6), 2123–2129. <https://doi.org/10.1021/jf9709562>
- Bondeson, D., Mathew, A., & Oksman, K. (2006). of the isolation of nanocrystals from microcrystalline cellulose by acid hydrolysis. *Cellulose*, 13(2), 171–180. <https://doi.org/10.1007/s10570-006-9061-4>
- Bras, J., Rol, F., Belgacem, M., & Gandini, A. (2019). Recent advances in surface-modified cellulose nanofibrils. *Progress in Polymer Science*, 88, 241–264. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.09.002>

- Brethauer, S., Shahab, R., & Studer, M. (2020). Impacts of biofilms on the conversion of cellulose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(12), 5201–5212. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10595-y>
- Bunn, A. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Campano, C., Merayo, N., Balea, A., Tarrés, Q., Aguilar, M., Mutjé, P., Negro, C., & Blanco, A. (2018). Mechanical and chemical dispersion of nanocelluloses to improve their reinforcing effect on recycled paper. *Cellulose*, 25, 269–280. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1552-z>
- Chen, C., Wang, M., Zhu, L., Liang, K., Xing, T., & Wang, Q. (2023). Microwave-assisted formic acid/cold caustic extraction for separation of cellulose and hemicellulose from biomass. *BioResources*, 18(4), 6896–6912.
- Cherian, B., Leão, A., Souza, S., Costa, L., Olyveira, G., Kottaisamy, M., & Nagarajan, E. (2010). Isolation of nanocellulose from pineapple leaf fibres by steam explosion. *Carbohydrate Polymers*, 81(3), 720–725. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.046>
- Coltelli, M., Aliotta, L., Gigante, V., & Lazzeri, A. (2025). Use of Nut Shells in the Production of Nanobiocomposites. İçinde S. Singh, D. Jabborova, D. Sarkar, R. S. & R. Datta (Ed.), *Nanomaterials in Agroforestry Systems*. Smart Nanomaterials Technology. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1337-3_4
- Commission, E. (2010). *Europe 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*. Publications Office of the European Union.
- Costa, L., Olyveira, G., Mualla, S., Farahat, R., Basmaji, P., Oliveira, J., & Francozo, G. (2016). Study on nanoskin ECM-bacterial cellulose wound healing. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 7, 9. <https://doi.org/10.4236/jbnnb.2016.72012>
- Çam, M., İçyer, N., & Erdoğan, F. (2014). Pomegranate peel phenolics: Microencapsulation, storage stability and potential ingredient for functional food development. *LWT - Food Science and Technology*, 58(1), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.006>
- Çelik, Ç., & Gürdal, E. (2005). Yerfistiği kabuğunun agrega olarak kullanım olanakları. *İTÜdergisi/a: Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 4(1), 37–46.
- D., Santos, R., Neto, W. F., Silverio, H., Martins, D., & Dantas, N. P. (2013). Cellulose nanocrystals from pineapple leaf, a new approach for the reuse of this agro-waste. *Industrial Crops and Products*, 50, 707–714. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.049>
- Demiral, İ., Gülmezoğlu-Atılgan, G., & Şensöz, S. (2008). Production of biofuel from soft shell of pistachio (*Pistacia vera* L. *Chemical Engineering Communications*, 196(1-2), 104–115. <https://doi.org/10.1080/00986440802290623>

- Doğan, A. (2009). Ekonomik gelişme sürecine tarımın katkısı: Türkiye örneği. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 9(17), 365–392.
- Dufresne, A. (2012). Nanocellulose: Potential reinforcement in composites. İçinde M. John & S. Thomas (Ed.), *Natural polymers: Volume 2: Nanocomposites (Cilt 2* (ss. 1–32). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849735315-00001>
- Dufresne, A., Bras, J., & Siqueira, G. (2010). Luffa cylindrica as a lignocellulosic source of fiber, microfibrillated cellulose, and cellulose nanocrystals. *BioResources*, 5(2), 727–740.
- Dufresne, A., Eichhorn, S., Aranguren, M., Marcovich, N., Capadona, J., Rowan, S., Weder, C., Thielemans, W., Roman, M., Renneckar, S., Gatenholm, P., Nyström, M., & Peijs, T. (2010). Review: Current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 45, 1–33. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3874-0>
- Dufresne, A., & Lin, N. (2014). Nanocellulose in biomedicine: Current status and future prospect. *European Polymer Journal*, 59, 302–325. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.07.025>
- E., K., Avinc O.O., A., B., & A, Y. (2016). Tarımsal atıklardan elde edilen sürdürülebilir tekstil lifleri: Ananas yaprağı lifleri.
- Erkoç, M. (2020). Bulgur Kepeği Hemiselülozu Katkılı Biyobozunur Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi.
- F.A.O. (2022). Land, inputs and sustainability - Land use. *The Food and Agriculture Organization of United Nations*. <https://www.fao.org/faostat/en/%5C#compare>
- Farhat, W., Venditti, R., Quick, A., Taha, M., Mignard, N., Becquart, F., & Ayoub, A. (2017). Hemicellulose extraction and characterization for applications in paper coatings and adhesives. *Industrial Crops and Products*, 107, 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.055>
- Filipovic, V., Nikodinovic-Runic, J., Savikin, K., Zivkovic, J., Mudric, J., Krgovic, N., & Ponjavic, M. (2025). Bacterial nanocellulose and its oxidized form as functional carriers for pomegranate peel extract: A sustainable approach to bioactive delivery. *Future Foods*, 11, 100560. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100560>
- French, A. (2014). Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs. *Cellulose*, 21, 885–896. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0133-3>
- G., K., C., G., Öztürk, H., & Akdemir, Ş. (2015). Tarımsal artıklardan biyopelet üretimi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2), 137–145.
- G., Ö., Subaşı, B., S., K., & E, Ç. (2022). Sürdürülebilir gıda ve tarımsal atık yönetimi. Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik. *İtü dergisi-e*, 23(2), 145–160.
- Gatenholm, P., Nimeskern, L., Martinez, A., Sudnberg, J., Müller, R., & Stok, K. (2013). Mechanical evaluation of bacterial nanocellulose as an implant material for ear

- cartilage replacement. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 22, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.03.005>
- George, J., & Sabapathi, S. (2015). Cellulose nanocrystals: Synthesis, functionalization and applications: A review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 54(14), 1469–1491. <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1010232>
- Gorinstein, S., Martin-Belloso, O., Lojek, A., Čiz, M., Soliva-Fortuny, R., Park, Y., Caspi, A., Libman, I., & Trakhtenberg, S. (2002). Comparative content of some phytochemicals in Spanish apples, peaches and pears. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(10), 1166–1170. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1159>
- Gouripriya, D., Debnath, P., & Saha, P. (2024). Nanocellulose from plant and bacterial sources for tissue engineering applications. İçinde G. Yang, S. Thomas, M. Sreedharan, N. Kalarikkal, R. Vijayamma & Y. Grohens (Ed.), *Nanocellulose-based hybrid systems for tissue engineering* (ss. 16–36, C. 18). Royal Society of Chemistry.
- Gölkücü, M., Tokgöz, H., & Özdemir, F. (2011). Narın (*Punica granatum* L.) bileşimi ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Gıda*, 36(4), 239–246.
- Gustavson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). *Global food losses and food waste*. FAO.
- Gülüç, S., Şahin, S., & Celebi, H. (2021). Valorization of pistachio shells for high-performance bio-based materials. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 5521–5535. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01389-w>
- Habibi, Y., Lucia, L., & Rojas, O. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110(6), 3479–3500. <https://doi.org/10.1021/cr900339w>
- Hamad, W., & Hu, T. (2010). Structure–process–yield interrelations in nanocrystalline cellulose extraction. *Cellulose*, 17(2), 321–332. <https://doi.org/10.1007/s10570-009-9386-8>
- Hazal, F., Özbek, N., Göğüş, F., & Yanık, K. (2023). Fıstık sert kabuğunun mikrodalga-CO2 destekli hidroliz sistemi ile ksiloza hidrolizi. *Gıda ve Yem Bilimi - Teknolojisi Dergisi*, 29, 38–45. <https://doi.org/10.56833/bursagida.1232447>
- Heidarian, P., Behzad, T., & Karimi, K. (2022). Isolation and characterization of nanocellulose from pistachio shell agricultural waste. *Journal of Polymers and the Environment*, 30, 1234–1245.
- Heshmatiafshar, S., Tseng, Y., & Shakeri, A. (2019). Extraction and characterization of cellulose nanocrystals and nanofibers from pistachio shell. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 956–967. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.002>

- Hubbe, M., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2017). Rheology of nanocellulose-rich aqueous suspensions: A review. *BioResources*, 12(4), 9556–9661. <https://doi.org/10.15376/biores.12.4.hubbe>
- I.P.C.C. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. IPCC.
- Isogai, A. (2013). Wood nanocelluloses: Fundamentals and applications as new bio-based nanomaterials. *Journal of Wood Science*, 59(6), 449–459. <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1365-z>
- Isogai, A., Saito, T., & Fukuzumi, H. (2011). Tempo-oxidized cellulose nanofibers. *Nanoscale*, 3(1), 71–85. <https://doi.org/10.1039/C0NR00583E>
- Işıkgör, F., & Becer, C. (2015). Lignocellulosic Biomass: a Sustainable Platform for the Production of Bio-Based Chemicals and Polymers. *Polymer Chemistry*, 6(25), 4497–4559. <https://doi.org/10.1039/C5PY00263J>
- İncikarakaya, S., Beyaz, K., & Rezaei, F. (2013). Doğal kaynaklar ve tarım. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 6(1), 104–109.
- İsmail, T., Sestili, P., & Akhtar, S. (2012). Pomegranate peel and fruit extracts: A review of potential anti-inflammatory and anti-infective effects. *Journal of Ethnopharmacology*, 143(2), 397–405. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.07.004>
- Jayaprakash, K., Osama, A., Rajagopal, R., Goyette, B., & Karthikeyan, O. (2022). Agriculture waste biomass repurposed into natural fibers: A circular bioeconomy perspective. *Bioengineering*, 9(7), 296.
- John, M., Naidu, D., & Hlangothi, S. (2018). Bio-based products from xylan: A review. *Carbohydrate Polymers*, 179, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.064>
- Kallel, F., Bettaieb, F., Khiari, R., García, A., Bras, J., & Chaabouni, E. (2016). Isolation and structural characterization of cellulose nanocrystals extracted from garlic straw residues. *Industrial Crops and Products*, 87, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.060>
- Kandemir, A., Proud, W., Murphy, R., & Jesson, D. (2021). Mechanical and thermal properties of pistachio shell reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4627–4632.
- Karaağaç, A., Bilgiç, A., & Çukur, Ü. (2006). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Şanlıurfa Tarım Master Planı.
- Kasiri, N., & Fathi, M. (2018). Production of cellulose nanocrystals from pistachio shells and their application for stabilizing Pickering emulsions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 106, 1023–1031. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.112>
- Kasyapi, N., Chaudhary, V., & Bhowmick, A. (2013). Bionanowhiskers from jute: Preparation and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1116–1123.

- Kayahan, E., & Aksoy, S. A. (2024). Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from pistachio soft shells. *Proceedings of the 19th Romanian Textiles and Leather Conference, Iași*. <https://doi.org/10.2478/9788367405829-044>
- Khalil, H. A., Bhat, A., & Yusra, A. I. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 963–979. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.078>
- Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(24), 5438–5466. <https://doi.org/10.1002/anie.201001273>
- Korhonen, J., Kettunen, M., Ras, R., & Ikkala, O. (2011). Hydrophobic nanocellulose aerogels as floating, sustainable, reusable and recyclable oil absorbents. *Applied Materials and Interfaces*, 3, 1813–1816. <https://doi.org/10.1021/am200475b>
- Korkmaz, K. (2018). Ticari enzimler kullanılarak farklı balık türü atıklarından hidrolizat üretimi ve kalitesinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kumar, M., & Turner, S. (2015). Protocol: A medium-throughput method for determination of cellulose content from single stem pieces of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Methods*, 11, 46. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0090-6>
- Kurschner, K., & Hoffer, A. (1969). Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Zellulose in Hölzern und Zellstoffen. *Technologie und Chemie der Papier- u. Zellstoff-Fabrikation*, 26, 125–139.
- Kurt, H., & Şahin, G. (2013). Bir Ziraat Coğrafyası Çalışması: Türkiye’de Nar (*Punica granatum* L.) Tarımı. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 27, 551–574. <https://izlik.org/JA55GN64DT>
- L. Brinchi, Cotana, F., Fortunati, E., & Kenny, J. (2013). Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: Technology and applications. *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.033>
- Lansky, E., & Newman, R. (2007). *Punica granatum* (pomegranate) and its potential for prevention and treatment of inflammation and cancer. *Journal of Ethnopharmacology*, 109(2), 177–206. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2006.09.006>
- Lee, K., Oksman, K., Aitomäki, Y., Berglund, L., & Bismarck, A. (2014). On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites. *Composites Science and Technology*, 105, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.08.032>
- Li, W., Zhou, X., Mabon, R., & Broadbelt, L. (2017). A critical review on hemicellulose pyrolysis. *Energy Technology*, 5(1), 52–79. <https://doi.org/10.1002/ente.201600327>
- Limayem, A., & Ricke, S. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(4), 449–467. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2012.03.002>

- Ludueña, L., Fasce, D., Alvarez, V., & Stefani, P. (2011). Nanocellulose from rice husk following alkaline treatment to remove silica.
- Marett, J., Aning, A., & Foster, E. (2017). The isolation of cellulose nanocrystals from pistachio shells via acid hydrolysis. *Industrial Crops and Products*, 109, 869–874. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.039>
- Metreveli, G., Wagberg, L., Emmoth, E., Belak, S., Stromme, M., & Mihranyan, A. (2014). A size-exclusion nanocellulose filter paper for virus removal. *Advanced Healthcare Materials*, 3, 1546–1550. <https://doi.org/10.1002/adhm.201300641>
- Miyashiro, D., Hamano, R., & Umemura, K. (2020). A review of applications using mixed materials of cellulose, nanocellulose and carbon nanotubes [10(2).]. *Nanomaterials*. <https://doi.org/10.3390/NANO10020186>
- Mood, S., Golfeshan, A., Tabatabaei, M., Jouzani, G., Najafi, G., Gholami, M., & Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>
- Moon, R., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941–3994. <https://doi.org/10.1039/C0CS00108B>
- Movva, M., & Kommineni, R. (2017). Extraction of cellulose from pistachio shell and physical and mechanical characterisation of cellulose-based nanocomposites. *Materials Research Express*, 4, 045014. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa6863>
- Oksman, K., Ursu, M., & Gherman, V. (2021). Pomegranate peel as a source of nanocellulose for functional food packaging. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 632345.
- Okutucu, C., Duman, G., Ucar, S., Yasa, I., & Yanik, J. (2011). Characterization of pistachio shell and its thermochemical conversion. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91(1), 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.01.011>
- Opara, L., Al-Ani, M., & Al-Shuaibi, Y. (2009). Physico-chemical properties, vitamin C content, and antimicrobial properties of pomegranate fruit (*Punica granatum* L. *Food Bioprocess Technology*, 2, 315–321. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0095-5>
- Özkal, N., & Dinç, S. (1993). *Punica granatum* L. (nar) bitkisinin kimyasal bileşimi ve biyolojik aktiviteleri. *Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 22(1-2).
- Park, S., Baker, J., Himmel, M., Parilla, P., & Johnson, D. (2010). Cellulose crystallinity index: Measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance. *Biotechnology for Biofuels*, 3, 10.
- Rebouillat, S., & Pla, F. (2013). State of the art manufacturing and engineering of nanocellulose: A review of available data and industrial applications. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 4, 165–188. <https://doi.org/10.4236/jbnnb.2013.42022>

- Robles, E., Izaguirre, N., Martin, A., Moschou, D., & J. Labidi. (2021). Assessment of Bleached and Unbleached Nanofibers from Pistachio Shells for Nanopaper Making. *Molecules*, 26(5), 1371. <https://doi.org/10.3390/molecules26051371>
- Rojas, O., Thomas, B., Burgess, M., Bhat, N., & Biswas, A. (2018). Nanocellulose, a versatile green platform: From biosources to materials and their applications. *Chemical Reviews*, 118(24), 11575–11625. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00627>
- Romero-Cerón, Z., Flores-Silva, P., & Saucedo-Salazar, E. (2025). Modified pistachio shell waste: Structure, chemical interaction, and viscoelastic performance in biopolymer composites-based starch. *Polymer Composites*, 46(9), 8025–8036. <https://doi.org/10.1002/pc.29474>
- Salimi, S., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R., Chan, S., & Yuen, K. (2019). Production of nanocellulose and its applications in drug delivery: A critical review. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(19), 15800–15827. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02744>
- Sarıca, Ş. (2011). Nar suyu yan ürünlerinin hayvan beslemede kullanım olanakları. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 28(2), 97–101. <https://izlik.org/JA46JG85NB>
- Sezer, K., & Arıkan, O. (2011). Waste characterization at mixed municipal solid waste composting and recycling facility units. *Desalination and Water Treatment*, 26(1–3), 92–97. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2115>
- Silva, J., Rana, T., Narzary, D., Verma, N., Meshram, D., & Ranade, S. (2013). Pomegranate biology and biotechnology: A review. *Scientia Horticulturae*, 160, 85–107. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.05.017>
- Silva, L., Oliveira, N., Valotto, R., Monteiro, F., Alvarez, L., Cesário, L., & Guimarães, M. (2024). Antibacterial properties of cotton fabric coated with cellulose nanofibers conjugated with pomegranate nanoparticles. *The Journal of The Textile Institute*, 115(4), 639–646. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2191291>
- Siro, I., & Plackett, D. (2010). Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: A review. *Cellulose*, 17, 459–494. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9405-y>
- Sirviö, J., Visanko, M., & Liimatainen, H. (2016). Deep eutectic solvent system based on choline chloride-urea as a pretreatment for the nanocellulose production. *Biomacromolecules*, 17(9), 3025–3032.
- S.K., S., Y., K., & G, Ç. (2016). Türkiye’de tarımsal ve hayvansal atıklardan sürdürülebilir tekstil lifleri: Ananas yaprağı lifleri.
- Someya, S., Yoshiki, Y., & Okubo, K. (2002). Antioxidant compounds from banana (Musa Cavendish. *Food Chemistry*, 79(3), 351–354.
- Sönmez, S., Çitak, S., & Öktüren, F. (2006). Bitkisel kökenli atıkların tarımda kullanılabilirlik olanakları. *Derim*, 23(1), 40–53.
- Şanlıurfa Valiliği ve Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2015. (2015). *Şanlıurfa*.

- Şengül, H. (2013). Narda bulunan antosiyaninlerin biyoyararlılığına gıda matrisi ve bileşenlerinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 123s.*
- T., D., N., A., & U, B. (2010). Utilization of waste pine cone in manufacture of wood / plastic composite. *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.*
- Taşyürek, M., & Acaroğlu, M. (2007). Biyoyakıtlarda (biyomotorinde) emisyon azatımı ve küresel ısınmaya etkisi. Uluslararası Küresel İklim Değişikliği ve Çevresel Etkileri Konferansı.
- T.B.B. (2023). Türkiye Bankalar Birliği Tarım Sektörü Raporu, Haziran. https://www.tbb.org.tr/Content/Upload/Dokuman/8960/Tarim_Sektor_Raporu_130723.pdf
- Teixeira da Silva, J. A., Rana, T. S., Narzary, D., Verma, N., Meshram, D. T., & Ranade, S. A. (2013). Pomegranate biology and biotechnology: A review. *Scientia Horticulturae, 160*: 85–107.
- Terrett, O., & Dupree, P. (2019). Covalent interactions between lignin and hemicelluloses in plant secondary cell walls. *Current Opinion in Biotechnology, 56*, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.10.010>
- Thomas, S., Thomas, J., & Stephen, R. (2024). Nanocellulose extracted from pistachio nut shells as a template for nanosilver synthesis and its antimicrobial activity. *Cellulose, 31*, 293–308. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05643-5>
- Tibolla, H., Pelissari, F., Rodrigues, M., & Menegalli, F. (2014). Cellulose nanofibers produced from banana peel by chemical and mechanical treatments. *Carbohydrate Polymers, 98*(1), 1491–1498. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.014>
- T.Ü.İ.K. (2022). *Bitkisel üretim istatistikleri, tarım alanı*. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111%5C&dil=1>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2017). Bitkisel üretim istatistikleri: Meyveler, içecek ve baharat bitkileri üretim miktarları. <https://data.tuik.gov.tr/>
- U.N.E.P. (2024). *Food waste index report 2024*. United Nations Environment Programme.
- Volić, M., Pajić-Lijaković, I., Djordjević, V., Knežević-Jugović, Z., Pecarski, D., & Bugarski, B. (2018). Alginate/soy protein system for controlled release of thyme essential oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 98*(11), 4153–4164.
- Wang, P., Zhao, J., Xie, Y., Ling, Z., & Yong, Q. (2023). *Natural arginine-based deep eutectic solvents for rapid microwave-assisted pretreatment on crystalline bamboo cellulose*. Bioresource Technology.
- Weder, C., Foster, E., & Mueller, S. (2014). Isolation of cellulose nanocrystals from pseudostems of banana plants. *RSC Advances, 4*, 907–915. <https://doi.org/10.1039/C3RA46390G>
- Wicklein, B., Kocjan, A., Salazar-Alvarez, G., Carosio, F., Camino, G., Antonietti, M., & Bergström, L. (2014). Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic

- foams based on nanocellulose and graphene oxide. *Nature Nanotechnology*, 10, 277–283. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.248>
- Xu, G., Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Abudula, A., & Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, 1(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.05.004>
- Yaghoobi, M., Abdan, K., & Mazlan, N. (2024). Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from pomegranate peel (*Punica granatum* L.) using acid hydrolysis: Morphological, thermal, and structural properties. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 9(1), 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.09.003>
- Yıldırım, N. (2018). Nanoteknoloji ve geleceğin çevreci polimeri nanoselüloz. *Ormancılık Araştırma Dergisi, Turkish Journal of Forestry Research*, 5(2), 185–195. <https://doi.org/10.17568/ogmoad.419758>
- Yıldırım, N., Shaler, S., Gardner, D., Rice, R., & Bousfield, D. (2014). Cellulose nanofibrils (CNFs) reinforced starch insulating foams. *Cellulose*, 21, 4337–4347. <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0450-9>
- Yılmaz, C., Yılmaz, M., Özgüven, A., İmrak, B., & Dikkaya, Y. (2015). Nar yetiştiriciliği: Kıbrıs ekolojik koşullarında değişik nar çeşitlerinin adaptasyonu. KKTC Gıda Tarım ve Enerji Bakanlığı, TAGEP Proje No:5.2.2.3.
- Yılmaz, H., Gündoğdu, M., & Canan, İ. (2015). Nar (*Punica granatum* L.) Çeşit ve Genotiplerin Fizikokimyasal Karakterizasyonu. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 1(2), 57–65. <https://izlik.org/JA25RH45CJ>
- Yılmaz, M., Tokgöz, H., & Toker, R. (2019). Characterization of cellulose and pectin from pomegranate peel waste. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 120–127.
- Yılmaz, S., Görgüç, A., Bayraktar, B., Gençdağ, E., Demirci, K., Zungur-Bastıoğlu, A., & Yılmaz, F. (2024). Cellulose nanofibrils and nanocrystals valorized from pistachio hull possess unique chemo structural and rheological properties depending upon solvent system: Potencies of green techniques and genetic algorithm. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 7077–7096. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02645-7>
- Zeng, J., Ren, X., Zhu, S., & Gao, Y. (2022). Cellulose nanocrystals from pomegranate peel: Isolation, characterization, and its reinforcement for chitosan film. *Journal of Materials Science*, 57(18), 11062–11076. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07385-0>
- Zhang, M., Liu, Y., Chen, W., Yu, H., Hai, Y., & Chen, P. (2011). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from four plant cellulose fibers using a chemical-ultrasonic process. *Cellulose*, 18(2), 433–442. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9497-z>

ÖZ GEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Ad Soyadı : BENGÜ KELENDER
Öğrenci No : 245104011
E-posta : benguklndr@gmail.com
Telefon : 05522717827
Doğum Yeri : GAZİANTEP
Doğum Tarihi : 1999-08-24
ORCID : 0009-0009-0160-6366
ABD (TR) : Biyoloji
ABD (EN) : Biology
:

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Adı, Bölüm	Yıl
1.	Harran Üniversitesi / Biyoloji Anabilim Dalı	2024-Devam
2.	Harran Üniversitesi / Moleküler Biyoloji ve Genetik	2019-2024

T.C
YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
ULUSAL TEZ MERKEZİ

TEZ VERİ GİRİŞ FORMU

Referans No	10815695
Yazar Adı / Soyadı	BENGÜ KELENDER
Orcid	0009-0009-0160-6366
T.C.Kimlik No	35600228882
Telefon	5522717827
E-Posta	benguklndr@gmail.com
Tezin Dili	Türkçe
Tezin Özgün Adı	ANTEP FISTIĞI KABUĞU VE NAR KABUĞUNDAN NANOSELÜLOZ ELDESİ VE MALZEME KARAKTERİZASYON TESTLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI
Tezin Tercümesi	PRODUCTION OF NANOCELLULOSE FROM PISTACHIO SHELL AND POMEGRANATE PEEL AND COMPARATIVE EVALUATION OF MATERIAL CHARACTERIZATION TESTS
Konu	Biyoteknoloji = Biotechnology ; Kimya = Chemistry
Üniversite	HARRAN ÜNİVERSİTESİ
Enstitü / Hastane	FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ana Bilim Dalı	BİYOLOJİ ANABİLİM DALI
Bilim Dalı	Biyoloji Bilim Dalı
Tez Türü	Yüksek Lisans
Yılı	2026
Sayfa	95
Tez Danışmanları	PROF. DR. ARİF PARMAKSIZ PROF. DR. YUSUF KURT
Dizin Terimleri	
Önerilen Dizin Terimleri	

12.07.2026

İmza:.....