

DÖNÜŞEN TEKNOLOJİLER: Malzeme Biliminden Endüstriyel Otomasyona

EDİTÖR
Doç. Dr. Merivan ŞAŞMAZ



IKSAD
Publishing House

DÖNÜŞEN TEKNOLOJİLER:

Malzeme Biliminden Endüstriyel Otomasyona

EDİTÖR

Doç. Dr. Merivan ŞAŞMAZ

YAZARLAR

Prof. Dr. Ümit GEÇGEL

Prof. Dr. Ümit Hüseyin KAYNAR

Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

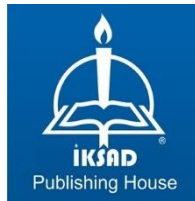
Doç. Dr. Tuğba ANDAÇ GÜZEL

Dr. Öğr. Üyesi Güllü AKKAŞ

Öğr. Gör. Dr. Ersan KIRAR

Arş. Gör. Burak TAŞ

Arş. Gör. Muhammed Talha AKBULUT



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-466-9

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	1
-------------------	----------

BÖLÜM 1

NANOMALZEME TABANLI PİEZOELEKTRİK MALZEMELERDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ELDESİ, DEPOLANMASI VE KULLANIMI

Arş. Gör. Burak TAŞ

Prof. Dr. Ümit Hüseyin KAYNAR

Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN.....	3
---------------------------------	---

BÖLÜM 2

BİYOKOMPOZİT MALZEMELER VE GÜNCEL KULLANIM ALANLARI

Öğr. Gör. Dr. Ersan KIRAR.....	21
--------------------------------	----

BÖLÜM 3

YAPISAL SAĞLIK İZLEMEDE GERİNİM ÖLÇER KULLANIMI

Öğr. Gör. Dr. Ersan KIRAR.....	39
--------------------------------	----

BÖLÜM 4

MOBİLYA İMALATINDA ROBOTİK KOLLAR İLE OTOMATİK MONTAJ SİSTEMLERİNİN VERİMLİLİK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Güllü AKKAŞ

Doç. Dr. Tuğba ANDAÇ GÜZEL.....	55
---------------------------------	----

BÖLÜM 5

BİTKİSEL KAYNAKLI FİTOSTEROLLERİN ELDE EDİLMESİ VE FONKSİYONEL GIDA AMAÇLI KULLANILMASI

Arş. Gör. Muhammed Talha AKBULUT

Prof. Dr. Ümit GEÇGEL.....	75
----------------------------	----

Önsöz

Malzeme bilimi, teknolojinin görünmez kahramanıdır. Günlük yaşamımızda kullandığımız cihazlardan, enerji üretim sistemlerine; sağlık teknolojilerinden, sürdürülebilir üretim süreçlerine kadar her alanda malzemelerin rolü belirleyicidir. “Dönüşen Teknolojiler: Malzeme Biliminden Endüstriyel Otomasyona” bu kritik alanın geleceğini şekillendiren yenilikçi yaklaşımları ve uygulamaları bir araya getirerek okura hem teorik hem de pratik bir yol haritası sunmayı amaçlıyor.

Bu çerçevede, bu çalışmada yer alan her bölüm, kendi alanında uzman yazarlar tarafından hazırlanmıştır. Bölümlerde sunulan bilgi, yorum ve değerlendirmeler, ilgili yazarların bilimsel birikimlerini ve bakış açılarını yansıtmaktadır. Editör olarak amacımız, bu farklı perspektifleri bir araya getirerek okura zengin bir içerik sunmaktır; ancak her bölümün içeriğinden doğan sorumluluk, tamamen ilgili yazarlarına aittir. Bu yaklaşım, kitabın disiplinler arası niteliğini korurken, özgün fikirlerin ve yöntemlerin okura ulaşmasını kolaylaştırmaktadır.

Bu kitapta yer alan bölümler, farklı disiplinlerin kesişim noktasında doğan fikirleri ve teknolojileri keşfetmenizi sağlayacak. Nanomalzeme tabanlı piezoelektrik malzemelerden elektrik enerjisi eldesi, depolanması ve kullanımı başlıklı bölüm, enerji dönüşümünde nanoteknolojinin sunduğu çığır açıcı olanakları gözler önüne seriyor. Biyokompozit malzemeler ve güncel kullanım alanları, doğa dostu üretim anlayışının endüstriyel uygulamalara nasıl yansıdığını anlatıyor.

Yapısal sağlık izlemede gerinim ölçer kullanımı, mühendislik yapılarının güvenliğini artıran teknolojileri detaylandırırken; mobilya imalatında robotik kollar ile otomatik montaj sistemlerinin verimlilik üzerindeki etkileri, endüstri 4.0’ın üretim süreçlerine getirdiği dönüşümü somut örneklerle açıklıyor. Son olarak, bitkisel kaynaklı fitosterollerin elde edilmesi ve fonksiyonel gıda amaçlı kullanılması, malzeme biliminin gıda teknolojileriyle kurduğu güçlü bağı ortaya koymaktadır.

Bu kitap, yalnızca bir bilgi kaynağı değil; aynı zamanda yeni fikirler, projeler ve işbirlikleri için bir ilham kaynağıdır. Lisansüstü öğrencilerden araştırmacılara, mühendislerden girişimcilere kadar geniş bir okur kitlesine hitap eden Dönüşen Teknolojiler: Malzeme Biliminden Endüstriyel

Otomasyona, disiplinler arası diyalogu güçlendirmeyi ve sürdürülebilir teknolojiler için ortak bir vizyon geliştirmeyi hedeflemektedir.

Katkı sunan tüm yazarlarımıza ve bu çalışmanın yayımlanmasını mümkün kılan İKSAD Yayınevi'ne teşekkür ederim. Dilerim bu kitap, malzeme bilimi alanında yeni ufuklar açar, yenilikçi çözümler üreterek ve geleceğin teknolojilerine giden yolda rehberiniz olacaktır.

Doç. Dr. Merivan Şaşmaz
Editör

BÖLÜM 1

NANOMALZEME TABANLI PİEZOELEKTRİK MALZEMELERDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ELDESİ, DEPOLANMASI VE KULLANIMI

Arş. Gör. Burak TAŞ¹

Prof. Dr. Ümit Hüseyin KAYNAR²

Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17973549>

¹ İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye. burak.tas@bakircay.edu.tr , orcid id: 0000-0002-9928-5004

² İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye. umit.kaynar@bakircay.edu.tr , orcid id: 0000-0002-3321-0341

³ İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye. ozge.ozmen@bakircay.edu.tr , orcid id: 0000-0002-5204-3737

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte ülkelerin enerji tüketimi artmış ve enerji, ülkeler arasında stratejik bir tehdit/yaptırım unsuru olarak kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel enerji kaynaklarının tükenmeye başlaması son yıllarda alternatif enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Büyük ölçekli enerji ihtiyacını karşılamak için güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, dalga enerjisi gibi sınırsız kaynağa sahip temiz enerjiden faydalanma fikri ağırlık kazanmıştır. Ancak nanoteknolojinin hayatımıza girmesiyle birlikte, daha küçük seviyeli enerjiye de ihtiyaç duyulmuş ve bunu elde etmek için geliştirilen dönüştürücüler sıklıkla kullanılmıştır. Ancak zaman içerisinde, kullanılan devre elemanı sayısı arttığından dolayı fazla sayıda dönüştürücü kullanmak hem maliyeti hem de karmaşıklığı artırmıştır. Bu durum bilim insanlarını ve firmaları, düşük seviyeli enerji talebini karşılama konusunda dolaylı çözüm yerine doğrudan çözüm yöntemlerini araştırmaya sevk etmiştir. Bu konuda akla ilk gelen alanlardan biri nanoteknolojidir. 2000’li yıllarda nano boyutlu malzemelerden elde edilen mikrowatt seviyesindeki enerji sayesinde bu dönüştürücülere duyulan ihtiyaç büyük oranda azalmıştır.

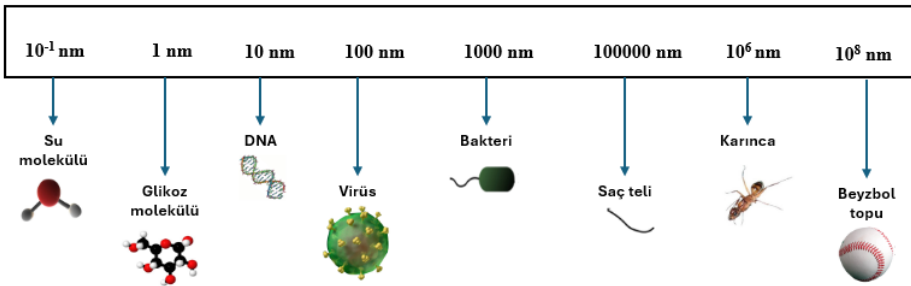
Teknolojik kalkınma ve donanım kullanımının artmasıyla elektronik cihazların kullanım alanı genişledi. Bu durum taşınabilir enerji kaynaklarına ihtiyacı artırdı. Elektrik üretiminde yeni yöntemler geliştirildi. Örneğin insan hareketliliğinden, malzeme boyutlarının değiştirilmesinden faydalanmak temelli yöntemler ön plana çıktı. Özellikle son elli yılda nanoteknolojinin hızlı gelişimi, piezoelektrik malzemelerin nano boyutlu hale getirilmesine olanak sağladı ve bu malzemelerden enerji elde edilme konusu bilim dünyasının dikkatlerini bu yöne çekti. Günümüze gelinceye kadar piezoelektrik etki sıklıkla sinyal oluşturma ve tanımlama, alçak gerilim üretimi, elektronikte frekans uygulaması, ultra ince optik montaj konsantresi gibi farklı uygulamalarda kullanılmıştır [1].

Nanojeneratörler, mekanik enerjiyi nano ölçekli elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır ve dünyadaki en küçük jeneratörler olarak kabul edilmektedir. Mekaniksel olarak baskı altına alınan piezoelektrik malzemelerin pozitif ve negatif yük merkezlerinde bir kayma meydana gelir. Dolayısıyla harici bir elektrik alanı meydana getirir. Bu durum tersine çevrildiğinde ise, piezoelektrik malzemeyi geren yahut sıkıştıran bir dış elektrik alan vardır.

Malzeme biliminde piezoelektrik malzemeler, ilk olarak Wang ve arkadaşlarının çinko oksit(ZnO) nanotel dizilerine uygulanan basınç neticesinde elektrik üretmesi sayesinde PENJ'lerin keşfiyle kısa sürede popüler hale gelmiştir [2]. Yarıiletken malzeme endüstrisinin ve buna paralel olarak mikroelektronik cihazların hızla gelişmesiyle birlikte özellikle sağlık alanında hastalıkların teşhisinde ve takibinde kullanılan cihazlar açısından yeni bir yol açılmış oldu. Kendinden enerjili ve biyomalzemeli olmaları sayesinde kolaylıkla vücuda entegre edilebilen bu cihazlar, anatomik açıdan da uyumlu çalışabilme yeteneği sayesinde daha sık tercih edilmektedirler [3].

2. NANOTEKNOLOJİ

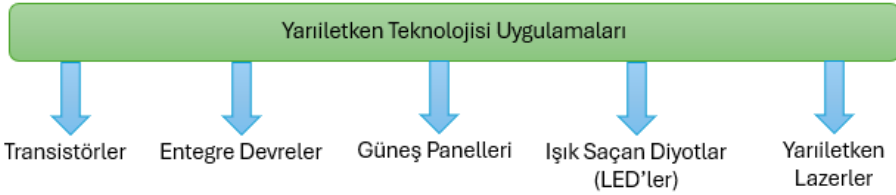
İlk defa 1974'te Taniguchi tarafından ortaya atılan nanoteknoloji kavramı, teknolojinin maddeyi nano boyutlarda incelemesini amaçlayarak araştırmacılar için yepyeni bir dünyanın keşfedilmesini sağlamış oldu. Malzemenin nano boyutuna inildiğinde yeni özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu da her malzemenin ayrı ayrı incelenmesi ve kendine has yeni özelliklerinin keşfedilmesi anlamına geliyordu. Örneğin, elektrik iletimi için kullanmada ilk akla gelen bakır, nano boyuta indirildiğinde elektrik iletme özelliğini kaybetmektedir. Sağlık açısından zararlı olan gümüş, nano boyutta bu özelliğini kaybetmekle beraber ilaç üretiminde kullanılmaktadır. Nanoteknolojinin hayatımıza kazandırdığı en önemli gelişmelerden birisi de sensör teknolojisi. Nanoteknolojinin gelişmesi ve ilerlemesiyle fiberoptik sensör alanında [4] yeni bir dönem başlamış ve çeşitli kimyasalların tespiti başarıyla araştırılmıştır [5]. Şekil 1, nanoteknoloji dünyasında boyutları görsellerle ifade etmektedir.



Şekil 1. Nano boyutun (1-100 nm) bazı varlıkların boyutlarına göre ifade edilmesi [6].

3. YARIİLETKEN TEKNOLOJİ

Elektriksel özellikleri yalıtkanlık ile iletkenlik arasında bir değer sergileyen malzemelerdir. Bu özellik sayesinde, çok kritik ve teknolojik uygulamalarda kullanımları. En yaygın yarıiletken malzeme, silikondur (Si), ancak germanyum (Ge) gibi başka yarıiletkenler de bulunmaktadır. Yarıiletkenlerin temel özellikleri, elektriksel iletkenlik, bant aralığı ve doping yani katkılamadır. Elektriksel iletkenlik sıcaklık, elektrik alanı, kimyasal katkı ve sıcaklık gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu etkilenme sayesinde kontrol edilebilirlik özelliğine sahiptirler. Yarıiletkenlerin bant aralığı belirli bir değere sahiptir. Örneğin silisyum için yaklaşık 1,1 eV (elektronvolt) olup bu değer malzemenin iletkenlik özelliklerine de etki eder. Katkılamada ise, yarıiletken malzeme içerisine belirli bir miktarda farklı atom eklenir ve malzeme yapısı değiştirilir. Bu etki de malzemenin elektriksel iletkenliğini değiştirebilir. İki ana dopant türü n tipi ve p tipidir. n tipi katkılamada negatif yük taşıyıcı elektronlar artarken, p tipi katkılamada pozitif yük taşıyıcıları olan holler artmaktadır. Şekil 2, yarıiletken teknolojisinin yoğun olarak kullanıldığı uygulama alanlarını göstermektedir.



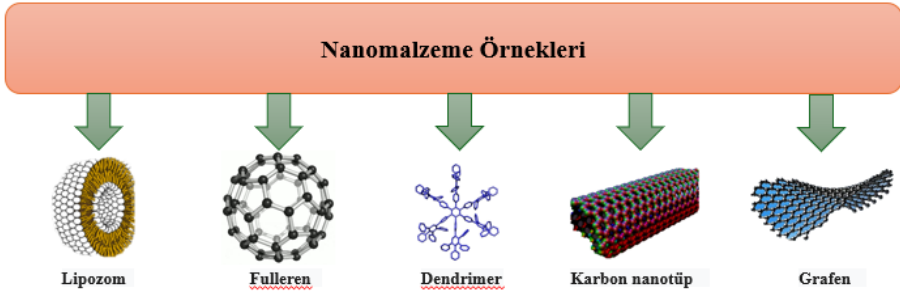
Şekil 2. Yarıiletken teknolojisinin yoğun olarak kullanım alanları.

Yarıiletken teknolojisini sadece elektronik cihazlarda kullanılmamaktadır. Aynı zamanda yapay zeka ve kuantum teknolojisi gibi birçok ileri teknolojinin de temelini oluşturmaktadır. Bu konumundan dolayı her bilim dünyası açısından önemi her geçen gün daha da artmaktadır.

4. NANOMALZEMELER

Boyutları 1-100 nm aralığında olan malzemeler nanomalzeme olarak adlandırılmaktadır. Nanoteknolojinin temelini oluşturan bu malzemeler, fiziksel yapısının değişmesiyle birlikte yeni kimyasal özellikler sergileyebildikleri için karakteristik özellik itibarıyla çeşitli avantajlar

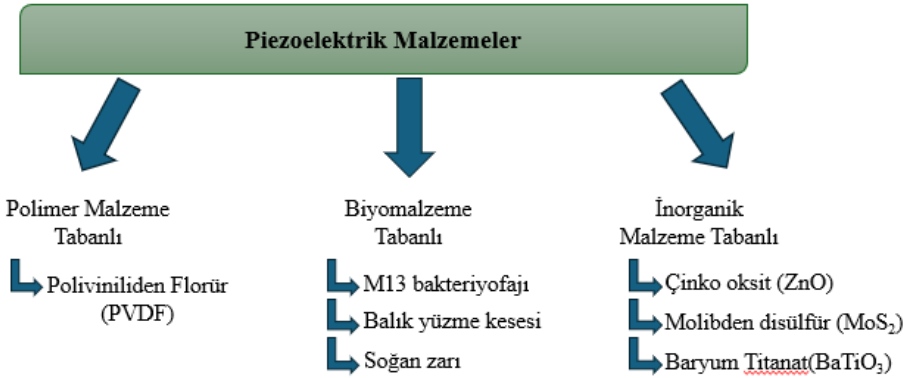
sağlamaktadırlar. Örneğin, malzeme nano boyutlu hale getirildiğinde yüzey alanı, hacmine oranla çok büyür. Bu durum malzemenin kimyasal tepkimelerde daha etkili olmasını sağlar. Ayrıca, karbon nanotüpler gibi malzemeler, yüksek mukavemet ve sertlik özelliği gösterirler. Nanomalzemelerin kazandığı bir başka yeni özellik de ışığı farklı bir şekilde etkileme eğilimleridir. Boyut küçüldükçe, optik özellik (ışık yansıması veya emilmesi gibi) farklılaşır. Aynı şekilde elektriksel iletkenlikler de değişmektedir. Örneğin bazı nanometaller yalıtkan hale gelirken, karbon nanotüpler çok iyi derecede iletkenlik kazanır. Aynı şekilde termal, kimyasal reaktivite, kuantum efektleri ve biyolojik etkileşimleri de değişmektedir. Nanomalzemeler, bu özelliklerinden ötürü nanoteknolojinin temelini oluşturmakta ve elektronik, tıp, enerji, çevre koruma gibi pek çok sektörde uygulama alanlarına sahiptir.



Şekil 3. Nanoteknoloji dünyasında kullanılan bazı nanomalzeme örnekleri [6].

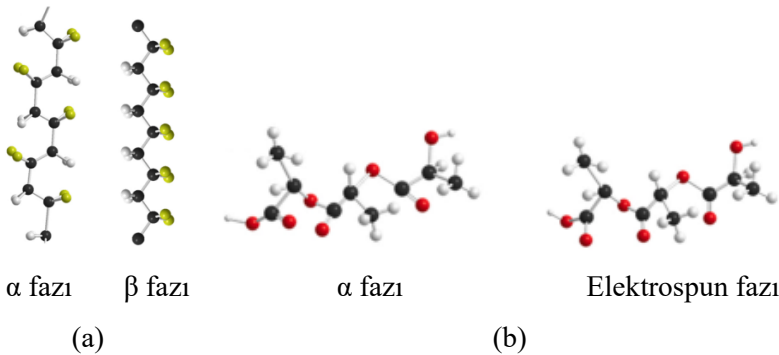
5. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER

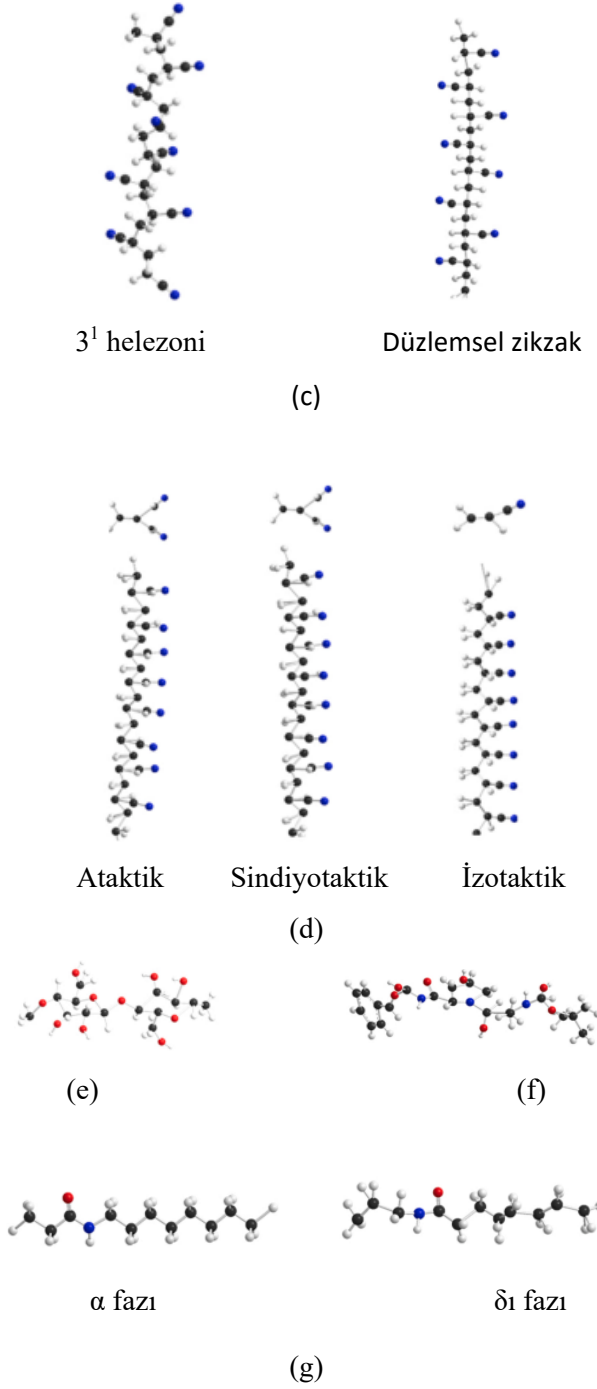
Piezo, baskı veya basınç anlamına gelmekte olup, basınçtan dolayı elektrik üretimine ise piezoelektrik denilmektedir. Piezoelektriklik de, belirli miktarda mekanik basınca maruz bırakılan malzemelerin elektrik üretebilme kabiliyeti ve bunun tersi olarak da bu malzemelere bir elektrik alan uygulandığında deforme olma veya titreşme yönündeki doğal özelliktir. Piezoelektriklik özelliğinden faydalanılarak üretilen elektrik enerjisine piezoelektrik enerji adı verilir. İki farklı piezoelektrik etkileşim vardır. İlki doğrudan ikincisi ise ters piezoelektrik etkidir. İlkinde mekanik enerji (basınç) elektrik enerjisine dönüştürülürken, ikincisinde ise elektrik enerjisi titreşime yani mekanik enerjiye dönüştürülür.



Şekil 4. Piezoelektrik malzemelerin sınıflandırılması.

Piezoelektrik polimerler, seramikler kadar mükemmel özellikler sergilemeseler de toksik değildir ve son derece esnektir. Bu da onların çevre dostu, biyouyumluluk, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve esneklik gerektiren uygulamalar da dahil olmak üzere daha geniş bir uygulama alanlarında kullanılmasına olanak tanır. Elektrosinning işlemi, genellikle polimerin elektroaktif fazını indüklemek için sentez sonrasında yapılan piezoelektrik polimerin yerinde kutuplanmasını ve gerilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda elektrospun nanoliflerin piezoelektrik özelliklerini geliştirmek için işlem öncesinde, sırasında ve sonrasında çeşitli proses kontrollerine de izin verir. Böylece, çeşitli elektrospun organik nanofiberlerin piezoelektrik özelliklerinin geliştirilmesi ve optimizasyonunda optimum noktaya ulaşmak amaçlanır. Ek olarak, elektrospin piezoelektrik polimer nanofiberlerin enerji ve biyo ile ilgili uygulamaları da bulunmaktadır. Şekil 5, 3 boyutlu moleküler yapıya sahip piezoelektrik polimerleri göstermektedir.





Şekil 5. Piezoelektrik polimerlerin 3 boyutlu moleküler yapısı. (a) PVDF; (b) PLLA; (c) PAN; (d) PAN'ın taktikliği; (e) selüloz; (f) kollajen; (g) Naylon-11 [7].

6. NANOJENERATÖR ve PİEZOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER

Nanojeneratörler, dünyanın en küçük jeneratörleri olup, mekanik enerjiyi nano seviyede elektrik enerjisine dönüştürebilen cihazlardır. Yüksek çıkış performansına sahip olan nanojeneratör teknolojisinin bir diğer öne çıkan özelliği, esnek ve gerilebilir elektroniklere uygulanabilen basit ve çeşitli yapısal özellikleridir. Elektrik güç sistemlerinin algılanması ve takibinin [8] yanısıra esnek elektronikler, giyilebilir elektronikler, bükülebilir ekranlar ve biyoilham verici yapay deriler gibi pek çok alanda ümit verici uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir [9].

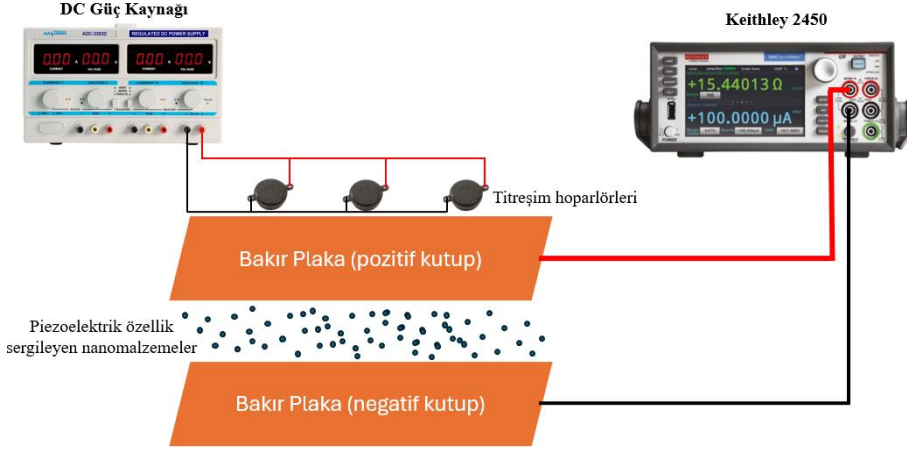
Büyük ölçekli sensör ağları ve sistemleri için kablosuz, sürdürülebilir ve bağımsız çalışmaya yönelik talepler günden güne önem kazanmıştır. Bu yüzden, kendi ürettiği enerjiyi kullanarak sensörleri çalıştırabilen ve dış uyaranları doğrudan algılayabilen, kendi kendine çalışan bir algılama sistemi büyük ilgi çekmektedir. PENJ'lerin icadı ve hızlı gelişimi, kendi kendine çalışan aktif mekanik sensörler, elektronik kaplamalar ve insan-robotik etkileşimi üzerine araştırmaları ileriye taşımıştır [10]. Mekanikten elektriksel enerji dönüşümüne dayalı olarak çalışan piezoelektrik nanojeneratörler, giyilebilir elektronikler, kendi kendine çalışan sensörler ve enerji toplayıcılar gibi modern cihazlarda araştırılmıştır. Yüksek performanslı PENJ'ler, yarıiletken malzemeler, seramik malzemeler ve polimerler dahil olmak üzere çeşitli piezoelektrik malzemeler kullanılarak üretilebilir. Polivinil klorür (PVC), plastik polimerler içerisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. PVC, monomer haldeki vinil klorürün polimerleştirilmesi sonucu elde edilir. Dünyada en çok üretilen ilk üçteki sentetik plastik polimerler sırasıyla, polietilen, polipropilenden ve plastik polimerdir. Temsili bir piezoelektrik polimer olan poliviniliden florür (PVDF), PENJ'deki potansiyel uygulama açısından büyük ilgi görmüştür [11]. Nanojeneratörlerden enerji üretimi, su arıtma (ultra ince filtreleme membranları) ve algılama teknolojileri (giyilebilir elektronikler) alanlarındaki uygulamalar sayesinde polimerik poliviniliden florür (PVDF) nanofiberleri daha çok dikkat çekmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, PVDF kristal ve fiberlerinde β -fazının artırılmasının daha sonra elektromekanik özelliğini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Elektrosinning teknolojisinin ortaya çıkışı, β -fazının ayarlanması üzerinde etkili bir kontrol sağlamıştır. Böylece, daha önce belirtilen alanlarda çok çeşitli uygulamalara

işlevsel entegrasyon ve uygulamaya olanak sağlar. PVDF nanofiberlerinin diğer önemli uygulamaları arasında gerçek zamanlı sağlık teşhisleri, izleme ve kendi kendine çalışan biyo-implantlar bulunmaktadır [12].

Malzeme seçimi ve yapısal tasarım, PENJ'lerin geliştirilmesindeki temel faktörlerdir. Esnek enerji toplama cihazları için temel zorluk, iyi esnekliğe ve mekanik stabiliteye sahip uygun malzemeleri seçmenin yanı sıra tamamen esnek bir yapı tasarlamak ve üretmektir. Kurşun zirkonat titanat (PZT), kimyasal olarak $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ formülü ile ifade edilir. Özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek hassasiyetli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, kristalimsi perovskit yapıya sahip piezoelektrik bir seramik malzemedir. PZT, mekaniği elektriğe dönüştürmede gerekli malzemeler için ideal özelliklerden olan yüksek dielektrik sabitleri ve piezoelektrik voltajına sahip, yaygın olarak kullanılan bir piezoelektrik seramik malzemedir. Ancak ince filmin kırılğan yapısından dolayı PZT malzemeleri esnek ve gerilebilir çalışma modlarına dayanamaz. PVDF veya benzer kopolimeri P(VDF-TrFE) gibi polimer bazlı piezoelektrik malzemeler, esneklik, yeterli mekanik mukavemet, işlenme kolaylığı ve yüksek kimyasal direnç gibi avantajlı özelliklerinden dolayı piezoelektrik uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Polimerlerin kimyasal stabilitesi ve biyouyumluluğu, implante edilebilir algılama ve enerji toplama gibi biyolojik sistemlerde uygulanmasını desteklemektedir. Dikkate değer bir dezavantaj, iyi performans elde etmenin, mekanik germe işlemlerinin PVDF yapılarının polar β -fazının dipollerini hizalamasının gerekli olduğu elektriksel kutuplamaya ihtiyaç duymasıdır [13].

Nanokompozit tekstiller, tekstil bazlı nanojeneratörlerin elektriksel performansını arttırmak için gelişmiş nanojeneratörlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Giyilebilir nanokompozit tekstil bazlı piezoelektrik ve triboelektrik nanojeneratörlerdeki son gelişmelere bakıldığında, piezoelektrik ve triboelektrikliğin temellerini, nanojeneratörlerin çalışma prensiplerini ve malzeme seçimi gibi kritik konular üzerinde sıklıkla durulmuştur. Piezoelektrik ve triboelektrik nanojeneratörlerde kullanılan fiberler veya iplikler, kumaşlar ve elektrospun nanolifli ağlar gibi çeşitli formlardaki nanokompozit tekstilleri ayrıntılı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, nanokompozit tekstil bazlı piezoelektrik ve triboelektrik nanojeneratörlerin, geleneksel tekstil bazlı nanojeneratörlerle karşılaştırıldığında daha iyi elektrik çıkışı ve mekanik mukavemet sergiledikleri gözlemlenmiştir. Bu gelişmelere paralel olarak,

nanokompozit yapının, tekstil bazlı nanojeneratörlerin verimini ve dayanıklılığını artırabildiği halde, çıktıyı, stabiliteyi ve dayanıklılığı tekstil bazlı olmayan cihazlarla elde edilebilecek seviyelere getirmek için ek araştırmalara ihtiyaç vardır [14].

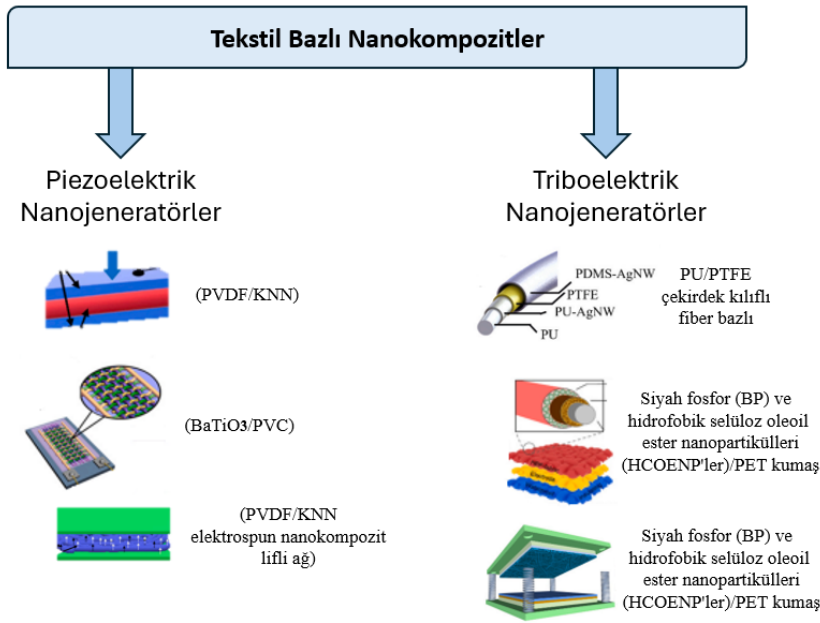


Şekil 6. PENJ'lerden enerji elde etmek için kurulan üretim ve ölçüm sistemi [15].

Tablo 1. Çeşitli enerji toplama teknolojilerinin karşılaştırılması [14].

Enerji Türü	Foto-voltaik	Termo-elektrik	Elektro-manyetik	Piezo-elektrik	Tribo-elektrik
Enerji kaynağı	<i>Işık</i>	<i>Isı</i>	<i>Elektromanyetik alan</i>	<i>Basınç</i>	<i>Sürtünme</i>
Gerilim	0,5-0,9V	0,1-1,0V	0,1-10V	1-100V	3-1500V
Akım	100-500uA	5-30uA	-	0.01-10uA	10-2000uA
Güç yoğunluğu	5-30mW/m ²	0,01-3 mW/cm ²	-	0,001-30 mW/cm ²	0,1-100 mW/cm ²
Verim	0,5-45	0,1-25	5,0-90,0	0,01-21	10,0-85,0

Avantajlar	Yüksek güç çıkışı. Devamlı güç çıkışı.	Kolay ölçek küçültme. Hareketli bileşen yok.	Yüksek dönüşüm verimliliği. Düşük voltajda büyük akım	Uyaranlara karşı yüksek hassasiyet. Kolay entegrasyon. Kolay minyatürleştirme	Yüksek güç çıkışı. Yüksek dönüşüm verimliliği. Maddi kısıtlama yok. Uygun maliyetli. Yapısal esneklik.
Dezavantajlar	Işık mevcut olması gereklidir. Organik güneş hücreleri için düşünüm verimliliği.	Yüksek sıcaklık farkı gerekli. Düşük dönüşüm verimliliği. Düşük çıkış.	Ağır yük. Kısa mesafeli güç iletimi. Yapısal karmaşıklık.	Yüksek empedans. Düşük dönüşüm verimliliği. Düşük çıkış. Darbe çıkışı.	Yüksek empedans. Yüksek sürtünme hasarı. Darbe çıkışı.



Şekil 7. Çeşitli nanokompozit tekstil bazlı piezoelektrik ve triboelektrik nanojeneratörler [14].

Esnek Piezoelektrik Nanojeneratörler

Esnek PENJ'ler, ortamdaki mekanik enerjiyi toplama yetenekleri nedeniyle kendi kendini şarj eden giyilebilir elektronik cihazlar için sürdürülebilir güç kaynakları olarak ortaya çıkmıştır. Polimer piezoelektrik malzemeler, günlük yaşamda var olan küçük kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme kabiliyetine sahip olan esneklik, hafiflik, mükemmel işlenebilirlik, geniş alanlar ve kavisli yüzeyler hazırlayabilme gibi doğal avantajlarından dolayı yaygın olarak geliştirilmiştir [16,17]. 2 boyutlu malzemelerde piezoelektrikliğin keşfi, giyilebilir elektronik cihazlar, geliştirilmiş fotovoltaikler, hibrit spintronikler, kataliz, kuvvet sensörü ve implante edilebilir tıbbi cihazlar gibi nanoelektromekanik sistemlerdeki potansiyel uygulamaları nedeniyle büyük ilgi toplayan elektronik cihazların minyatürleştirilmesinde bir dönüm noktasıdır. 2D malzemelerin eşsiz bir sınıfı olan MXene, yüzey fonksiyonelliğinin ayarlanabilirliği, yüksek elektronik iletkenliği, kolay çözünürlüğü ve sahte kapasitansı ile avantaj sağlamaktadır. Bu da onları çeşitli enerji depolama uygulamaları, iyon pilleri, kataliz, elektromanyetik koruma ve sensörler için oldukça cezbedici kılmaktadır.

Ayrıca titanyum karbür belirgin bir piezoelektrik tepki sergiler [18]. Süpersonik soğuk püskürtme tekniği kullanılarak biriktirilen PENJ'ler için piezopolimer poliviniliden florür (PVDF) ve piezoseramik baryum titanat (BaTiO_3) esnek kompozit malzemeler olarak kullanılmıştır [19]. Gerçekleştirilen bir çalışmada [20], enerji elde etmek ve depolamak için kobalt ferrit (CoFe_2O_4) bazlı polivinil diflorür(PVDF)'ün esnek nanojeneratörler üzerindeki piezoelektrik ve manyetoelektrik etkilerini incelenmiştir. İlk olarak PVDF ve CoFe_2O_4 nanopartiküllerinin (NP'ler:16 nm çapındadır) ağırlıkça %1, 3, 5, 7 ve 10 konsantrasyonunda birleştirilmesiyle kompozit fiberler hazırlanmıştır. Bu kompozit fiberlerden faydalanılarak esnek PVDF/ CoFe_2O_4 bazlı nanojeneratörler üretilmiştir. Elde edilen nanojeneratörler için, XRD (X-ray diffraction: X-ışını toz kırınımı) , FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy: Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi) ve SEM (Scanning electron microscopy: Taramalı elektron mikroskobu) cihazları kullanılarak karakterizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kompozit olarak çalışmalar gerçekleştirme, verimliliğin artırılması açısından çok önemlidir. Örneğin, yapılan bir çalışmanın sonucuna bakıldığında, 10 Hz'de saf PVDF ile karşılaştırıldığında 20 Hz'deki %3 konsantrasyonlu CoFe_2O_4 / PVDF'in güç verimliliği %27,2 artış göstermiştir. Ayrıca %10 konsantrasyona sahip CoFe_2O_4 'li PVDF malzemeden yapılan nanojeneratörün manyetoelektrik özellikleri, aynı yük direncinde en yüksek gerilim değerine ulaşmıştır (18,87mV) [21].

Esnek piezoelektrik malzemelerin en çok ilgi çektiği alanlar:

- Elektronik
- Yumuşak robotik
- Yapay deriler veya kaslar.

Dolgu maddelerinin iyi bağlantısının bir yük aktarım yolu sağlayabildiği ve polarizasyon dipolleri üzerindeki dolgu morfolojisinin topolojik kısıtlamasını kırabildiği bulunmuştur. Daha sonra, farklı sıkıştırma, germe ve bükme modları altında genel piezoelektrik tepkiyi büyük ölçüde artırabilecek '3-3' kompozitlerdeki uyumsuzluk sorununu çözmek için bir arayüz tasarım stratejisi önerilmektedir. Özellikle son yıllarda yürütülen çalışmalarla, bağlantı ve uyumsuzluk sorunlarını sinerjik olarak düzenleyerek esnek piezoelektrik kompozitler tasarlamak için bir yol sunulmuş, bunun aynı zamanda

elektromekanik bağlantı etkisi ile ilgili diğer aktüatörlerin veya sensörlerin optimizasyonuna da imkan tanınması öngörülmüştür [22].

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, makro dünyadan mikro dünyaya ve nanoteknolojiye ciddi yönelim olmuştur. Çünkü malzemelerin boyutları değiştikçe, fiziksel özelliklerinin yanında kimyasal özelliklerinin de değiştiği keşfedilmiştir. Bu durum gerek yarıiletken teknoloji açısından gerekse nanoteknoloji açısından büyük avantajları da beraberinde getirmiştir.

Yarıiletken malzemeler, elektronik teknolojisi için hammadde olmanın yanı sıra kuantum ve yapay zeka teknolojileri için de çok önemlidir. Nanomalzemeler ise yarıiletken teknolojinin temelini oluşturmaktadır. Özellikle, nano boyuta indirgendikten ve üzerine basınç ya da titreşim uygulandıktan sonra elektriksel potansiyel fark oluşumu gösteren piezoelektrik malzemeler, insan hayatına giyim, elektronik cihazlar, sağlık ve biyomedikal teknoloji alanlarında kolaylıklar getirmiştir. Doğası gereği kendi enerjisini sağlayabildiği için harici bir kaynağa ihtiyaç duymamaktadır. PENJ tabanlı kendi kendine çalışan cihazlar hakkında yapılacak yeni çalışmalar sayesinde, yakın gelecekte dokunmatik ekranlarda, elektronik kaplamalarda, sağlık hizmetlerinde, çevresel izlemede ve istihbarat sistemlerinde daha etkin ve yaygın şekilde kullanılacağı tahmin edilmektedir. İnsanın sağlık durumunu izlemek için kullanılan sensörlerin veya kalp hastalarında kullanılan kalp pillerinin enerjilerinin kesintisiz olması, hastanın enfeksiyon kapmaması ve yaşamını stabil şekilde devam ettirebilmesi için önemlidir. Bu yüzden piezoelektrik malzemelerin biyoyumlu olması ve bu cihazlarda kullanılabilir hale gelmesi gerekmektedir. Teknolojinin çok hızlı geliştiği bu dönemde piezoelektrik malzemeler, hem biyoyumluluk yönü geliştirildikten sonra vücudumuza entegre olma noktasında hem de yaşam koşullarımızı iyileştirme noktasında büyük bir potansiyele sahip olduğu için yakın gelecekte hayatımızda çok daha fazla yer edinecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Ganesh, R. J., Shanmugam, D. B., Munusamy, S., & Karthikeyan, T. (2021). Experimental study on footstep power generation system using piezoelectric sensor. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1633-1637.
- [2] Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312(5771), 242-246.
- [3] Bettinger, C. J. (2015). Materials advances for next-generation ingestible electronic medical devices. *Trends in biotechnology*, 33(10), 575-585.
- [4] Pandurangan, P., Dinesh, R. A., MohanaSundaram, A., Samrat, A. V., Meenambika, S. S., Vedanarayanan, V. & Moovendhan, M. (2023). Integrating cutting-edge technologies: AI, IoT, blockchain and nanotechnology for enhanced diagnosis and treatment of colorectal cancer- A review. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 105197.
- [5] Vo-Dinh, T., Cullum, B. M., & Stokes, D. L. (2001). Nanosensors and biochips: frontiers in biomolecular diagnostics. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 74(1-3), 2-11.
- [6] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_of_nanomaterial_s_sizes.jpg
- [7] Yu, S., Tai, Y., Milam-Guerrero, J., Nam, J., & Myung, N. V. (2022). Electrospun organic piezoelectric nanofibers and their energy and bio applications. *Nano Energy*, 97, 107174.
- [8] Deng, H., Xiao, S., Yang, A., Wu, H., Tang, J., Zhang, X., & Li, Y. (2023). Advances in nanogenerators for electrical power system state sensing and monitoring. *Nano Energy*, 108738.
- [9] Fan, F. R., Tang, W., & Wang, Z. L. (2016). Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics. *Advanced Materials*, 28(22), 4283-4305.
- [10] Cao, X., Xiong, Y., Sun, J., Zhu, X., Sun, Q., & Wang, Z. L. (2021). Piezoelectric nanogenerators derived self-powered sensors for multifunctional applications and artificial intelligence. *Advanced Functional Materials*, 31(33), 2102983.

- [11] He, X., Zheng, J., Yang, T., Ou, D., Bowen, C. R., Shi, S. & Yang, W. (2023). High- performance piezoelectric nanogenerators based on Cs₂Ag_{0.3}Na_{0.7}InCl₆ double perovskites with high polarity induced by Zr/Te codoping. *Nano Energy*, 115, 108741.
- [12] Varun, S., George, N. M., Chandran, A. M., Varghese, L. A., & Mural, P. K. S. (2023). Multifaceted PVDF nanofibers in energy, water and sensors: A contemporary review (2018 to 2022) and future perspective. *Journal of Fluorine Chemistry*, 265, 110064.
- [13] Fan, F. R., Tang, W., & Wang, Z. L. (2016). Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics. *Advanced Materials*, 28(22), 4283-4305.
- [14] Bairagi, S., Kumar, C., Babu, A., Aliyana, A. K., Stylios, G., Pillai, S. C., & Mulvihill, D. M. (2023). Wearable Nanocomposite Textile-Based Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators: Progress and Perspectives. *Nano Energy*, 108962.
- [15] Burak TAŞ, Ahmet Batuhan TOĞRUL, Ümit Hüseyin KAYNAR, Özge Tüzün ÖZMEN (2025), Comparative Analysis Of Piezoelectric Output Performances Of Gd And Al Doped ZnO Produced In Nanofiber Structure With Respect To Their Non-Doped (Pure) Form, 16th ULPAS Symposium, 1068.
- [16] S.D. Mahapatra, P.C. Mohapatra, A.I. Aria, et al., Piezoelectric materials for energy harvesting and sensing applications: roadmap for future smart materials, *Adv. Sci.* 8 (17) (2021), 2100864.
- [17] S. Mishra, L. Unnikrishnan, S.K. Nayak, et al., Advances in piezoelectric polymer composites for energy harvesting applications: a systematic review, *Macromol. Mater. Eng.* 304 (1) (2019), 1800463.
- [18] Jiang, C., Zeng, L., Tan, D., Yan, P., Sun, N., Guo, Q. & Xu, R. (2023). Piezoelectric behavior of single-layer oxidized-MXene for nanogenerators and piezotronics. *Nano Energy*, 114, 108670.
- [19] Kim, T., Joshi, B., Lim, W., Samuel, E., Aldalbahi, A., Periyasami, G. & Yoon, S. S. (2023). Scalable, flexible BaTiO₃/PVDF piezocomposites prepared via supersonic spraying for use in energy harvesting and integrated energy storage devices. *Nano Energy*, 115, 108682.
- [20] Gao, R., Chen, C., Ren, K., Li, H., Sun, G., Deng, X., ... & Fu, C. (2024). Enhanced magnetoelectric properties of flexible CoFe₂O₄/PVDF

composite films with different CoFe₂O₄ particle concentrations. *Materials Today Chemistry*, 42, 102386.

- [21] Koç, M., Dönmez, Ç. E. D., Paralı, L., Sarı, A., & Aktürk, S. (2022). Piezoelectric and magnetoelectric evaluations on PVDF/CoFe₂O₄ based flexible nanogenerators for energy harvesting applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(10), 8048- 8064.
- [22] Shen, Z. H., Tang, T. X., Wang, J., Zhou, M. J., Liu, H. X., Chen, L. Q. & Nan, C. W.(2023). Computation-guided design of flexible piezoelectric composites by optimizing charge- stress transmission. *Nano Energy*, 117, 108933.

BÖLÜM 2

BİYOKOMPOZİT MALZEMELER VE GÜNCEL KULLANIM ALANLARI

Öğr. Gör. Dr. Ersan KIRAR¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17974001>

¹ Harran Üniversitesi, Şanlıurfa Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, Şanlıurfa, Türkiye. ekirar@harran.edu.tr, orcid id: 0000-0002-7980-4815

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme, birbirinden farklı yapıda iki ya da daha fazla malzemenin karışımı olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeler, kısaca kompozitler veya bileşim malzemeleri olarak da isimlendirilir (Garima, 2017). Biyokompozit kelimesinin, birden fazla tanımı bulunmaktadır. Yalnızca biyolojik elementler içeren bir kompozit malzeme, en az bir organik bileşen içeren bir kompoziti veya doğal olarak oluşan bir kompoziti tanımlayabilir (Badamasi ve ark, 2017).

Mevcut yapılan çalışmada biyokompozit malzemelerin güncel uygulamaları ele alınmıştır. Bu kapsamda ilk bölümde kompozit malzemeler üzerinde durulmuştur. Sonraki bölümde biyokompozit malzemeler konusu kapsamlı olarak ele alınmıştır. Son bölümde ise biyokompozit malzemeler üzerine yapılan güncel çalışmalar incelenmiştir. Literatür incelemesiyle hem literatüre güncel bir kaynak oluşturmuş hem de biyokompozit malzemeler konusundaki son gelişmeler belirtilmiştir.

2.KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, bileşimleri farklı iki veya daha fazla malzemenin karışımı olarak tanımlanabilir. Bileşim olarak elde edilen kompozit malzemeler üstün özellikleri nedeniyle yıllardır kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanımına örnek olarak binlerce yıl önce çamur yardımıyla üretilmiş tuğla verilebilir. Günümüzde ise bazı alanlarında kompozit malzemelere bağımlılık gün geçtikçe artmaktadır (Şekil 1) (Tripathi, 2017; Sai, 2016; Kaya, 2016).

Kompozit malzeme, "Bir araya getirildiğinde bileşenlerinin özelliklerini aşan ve özünde farklı iki malzeme" olarak tanımlanabilir. Kompozit malzemedeki takviye elemanları, ortaya çıkan kompozitin özelliklerini değiştirmek için farklı şekillerde kesilebilir, hizalanabilir ve yerleştirilebilir. Bir reçine kullanılan matris ise takviyeyi istenen yönde tutar. Ayrıca takviye elemanını çevresel ve kimyasal etkilerden korur ve uygulanan yüklerin takviye elemanına aktarır (Sai, 2016).



Şekil 1: Kompozit malzemenin kullanım alanlarına örnekler (Gülmez, 2018)

Kompozit malzemeler geleneksel malzemelerin aşağıda sıralanan bazı özelliklerinin bir veya birkaçını iyileştirmek amacıyla yapılmaktadır. Bunlar (Kaya, 2016; Tanoğlu, 2005; Tripathi, 2017);

- Estetik görünüm
- Akustik iletkenlik
- Termal dayanım
- Elektrik iletkenliği
- Ağırlık
- Korozyon dayanımı
- Mukavemet

-Kompozit Malzeme Yapımında Temel Elemanlar (Gülmez, 2018; Özsoy, 2015);

Kompozit malzemeler takviye elemanı, matris ve arayüzey elemanlarından oluşmaktadır (Şekil 2). Bu elemanlar incelendiğinde;

Matris: Kompozit malzemelerde matris, takviye elemanını bir arada tutan maddeye verilen isimdir. İmalat aşamasında matris sıvı olup, daha sonra katı forma kolaylıkla geçmektedir. Kompozit malzemeler matris elemanına göre üçe ayrılır (Gülmez, 2018; Özsoy, 2015):

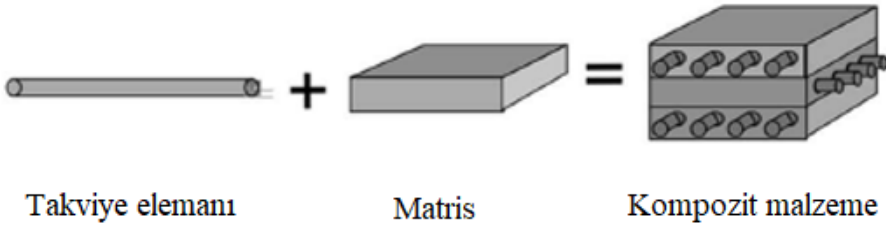
- a. Metal matrisli kompozitler

b. Seramik matrisli kompozitler

c. Polimer matrisli kompozitler

Kompozit malzemelerde matrisin üç temel görevi bulunmaktadır. Bunlar, yükü elyaflara dağıtmak, elyafları bir arada tutmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi ilk başta akışkan bir yapıda iken daha sonrasında elyafları uygun ve sağlam bir şekilde çevreleyebilecek katı forma geçebilmelidir (Gülmez, 2018; Özsoy, 2015).

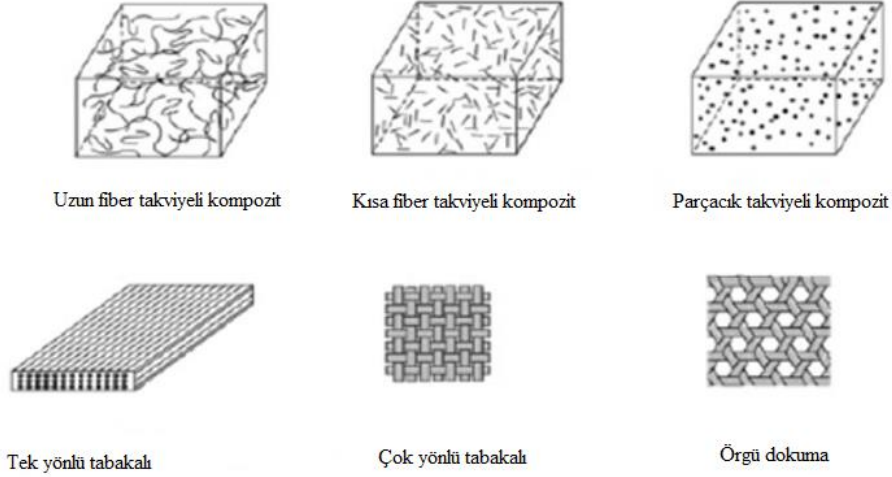
Fiber: Elyaf veya lif olarak adlandırılmaktadır. Matris malzemenin içinde yer alıp kompozit malzemenin en önemli mukavemet sağlayan elemanıdır. Kompozit malzemeler genellikle elyaf takviyeli, parçacık takviyeli ve yapısal olarak üç ana gruba ayrılabilir (Şekil 3) (Gülmez, 2018; Özsoy, 2015).



Şekil 2: Kompozit malzemenin bileşimi (Abid ve ark., 2022)

-Kompozit Malzemenin Uygulamaları (Gülmez, 2018; Tripathi, 2017);

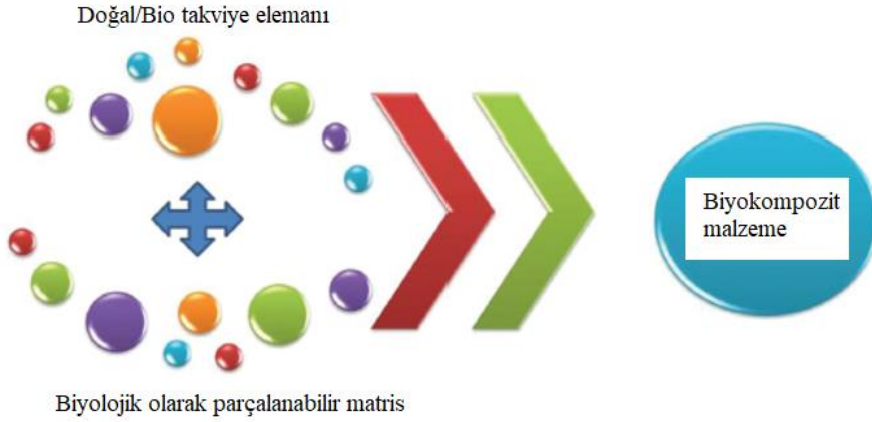
- Medikal uygulamalarda
- Uzay ve havacılık sanayisinde
- Askeri alanda kullanım
- Otomotiv alanında
- Silah, roket ve diğer mühimmat sanayisinde
- Günlük ve ticari hayatta kullanım



Şekil 3: Takviye elemanı türüne göre kompozit malzemeler (Özsoy, 2015)

3. BİYOKOMPOZİT MALZEMELER

Biyokompozit malzeme, yenilenebilir bir kaynaktan elde edilmiş bir veya daha fazla bileşenden oluşan kompozitlerdir (Şekil 4). Takviye malzemesi olarak jüt, kenevir, kenaf, pamuk, keten vb. gibi doğal bitki lifleri kullanılabilir. Geri dönüştürülmüş odundan veya atık kağıtlardan elde edilen biyo lifler ve ayrıca odun lifleri, gıda ürünlerinin yan ürünleri kategori içindedir. Ayrıca günümüzde doğal liflerle birlikte sıklıkla kullanılan matrisler fosil kaynaklı polimerler malzemelerdir. Bu matrislere örnek olarak polivinil klorür, polietilen ve polipropilen gibi termoplastik polimerler ve epoksiler, fenolikler vb. gibi termoset polimerler verilebilir. Biyokompozit malzemelerdeki ideal matrisler de, bitkisel yağlar ve nişasta gibi yenilenebilir kökenli olanlardır (Singh ve ark., 2019).



Şekil 4: Biyokompozitlerin şematik gösterimi (Rathinavel ve ark., 2025)

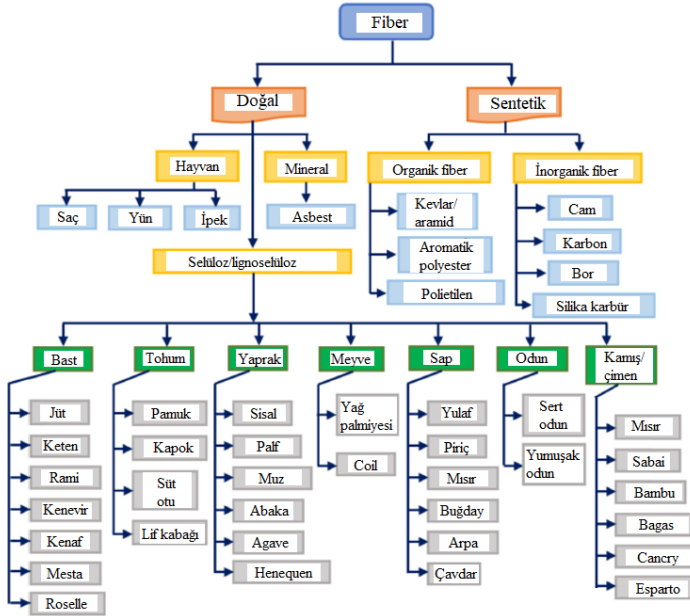
Çevre konusundaki artarak devam eden endişeler sebebiyle, biyokompozitlerin teşviki ve tanıtımı yoluyla çevre dostu malzeme incelemelerinde önemli derecede ilerlemeler katedilmiştir. Endüstri ve bilim toplulukları, artan kaynak talebine yanıt olarak ekolojik ürünlere, yeniden kullanıma ve geri dönüşüme olan ihtiyacı kabul etmektedir. Biyokompozit malzemeler, çevreye zararı olmadan daha kolay geri dönüştürülebilir veya biyolojik olarak parçalanabilen matrislerden ve takviyeler oluşmaktadır. Yakın zamanda yapılan bir incelemede, küresel biyokompozit malzeme pazarının 2016 ile 2024 yılları arasında yıllık %11,8 büyüme oranına sahip olabileceği öngörülmektedir. Biyokompozit malzemeler çok uzun bir zamandan beri kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanımları, MÖ 121 yıllarında kil tuğla, taş, kil kamışları, kırmızı söğüt kamışları, kum ve söğüt dalı içeren Çin Seddi'nin inşası gibi tarih öncesi dönemlere uzanmaktadır (Ahmad ve ark., 2025).

Biyokompozit malzemeler, otomotiv sanayisinin gelecekteki uygulamaları için umut verici malzemeleri arasındadır. Otomotiv ürünlerinin daha güvenli, daha ucuz ve daha hafif hale getirme zorluğu, gelişmiş malzeme türlerinin araştırılmasına yol açmaktadır. Ayrıca çevre sorunları nedeniyle araştırmacılar ve üreticiler biyokompozit malzemeler alanında çaba harcamak zorunda kalmaktadır. Son yıllarda küresel olarak, maliyet ve sürdürülebilirlik gibi çevresel sorunlar ve endişelerle karşı karşıya kalınmıştır. Bu sebeple araştırmalar umut verici fırsatlar sunan biyomalzemelere odaklanmıştır.

Sentetik malzemelerle genellikle mümkün olmayan, biyokompozitlerde ise son kullanma tarihinden sonra kolaylıkla kompostlanabilmesi ve imha edilebilmesi, birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Ayrıca biyokompozitlerdeki doğal liflerin korozyon direnci, düşük ağırlık ve sentetik muadillerine kıyasla yüksek derecede dayanım gibi avantajları, biyolifleri ilgi çekici kılmaktadır (Yıldızhan ve ark., 2018; Kıratlı, 2023; Badamasi ve ark., 2017).

Biyokompozit malzemelerin avantajlarına rağmen, hâlâ çözülmesi gereken sorunlar da bulunmaktadır. Endüstriyel alanlar için biyokompozit malzeme üretiminin artırılması, takviye lifleri ile matrisin uyumluluğunun artırılması ve hammadde maliyetlerinin düşürülmesi bu zorluklardan birkaç tanesidir. Bu sorunları çözmek için mühendislik, kimya ve malzeme bilimi gibi disiplinler arası araştırmalara oldukça ihtiyaç vardır (Kıratlı, 2023).

Doğrudan doğadan elde edilebilen doğal lifler, kökenlerine göre sınıflandırılmaktadır: mineraller, hayvanlar ve bitkiler (Şekil 5). Bu lifler işleme, ekstraksiyon veya hasat gibi çeşitli metotlarla elde edilir ve çok çeşitli alanlarda kullanılır. Mineral, bitkisel ve hayvansal bazlı kategorilere ayrılması, çeşitli kökenlerini yansıtır (Santhosh ve ark., 2024).



Şekil 5: Fiber çeşitleri (Santhosh ve ark., 2024)

Bitkisel Lifler: Farklı bitkilerden elde edilen bitki temelli lifler, hemiselüloz ve selüloz gibi temel elementler de dahil olmak üzere çeşitli bir bileşime sahiptirler. Keten, kenevir, jüt, kenaf, rami, sisal ve hindistan cevizi lifi gibi bu lifler bitkisel liflere örnek verilebilir. Bitkisel liflerin içeriğinde bulunan selüloz, malzemeye büyük ölçüde sertlik ve mukavemet kazandırır (Santhosh ve ark., 2024).

Hayvansal Lifler: Hayvansal lifler onları belirli uygulamalar için uygun olmasını sağlayan benzersiz özelliklere sahiptirler. İpek ve yün hayvansal liflerin önde gelen örnekleri arasındadır (Santhosh ve ark., 2024).

Mineral Bazlı Lifler: Doğal minerallerden elde edilen mineral bazlı lifler arasında volastonit, bazalt ve asbest bulunmaktadır. Bu lifler mineral kaynaklardan elde edilir ve çeşitli uygulamalar için işlenir (Santhosh ve ark., 2024).

-Biyokompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Biyokompozit malzemeler otomotiv, biyomedikal ve ambalaj gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu kullanımlar yenilenebilirlik, mekanik dayanıklılık ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi özel nitelikleri sayesinde mümkün olmaktadır. Otomotiv uygulamalarında da bu malzemeler yakıt verimliliğini artırmak, ağırlığı azaltmak ve karbon emisyonlarını azaltmak için tercih edilmektedir (Kıratlı, 2023).

Doğal lif kompozitleri daha düşük maliyet, orta düzeyde mukavemet ve çevre dostu özelliklerin gerekli olduğu yapısal uygulamalarda daha çok ilgi çektiğini göstermiştir. Şekil 6 çeşitli doğal lifli kompozit malzemelerden üretilmiş E-Serisi aracın iç bileşenlerini göstermektedir. Ayrıca Almanya'da Ford, Audi, Volkswagen ve Mercedes gibi büyük otomobil üreticileri araçlardaki çeşitli dış ve iç uygulamalar için biyokompozit malzemeleri tercih etmektedir (Bharath ve ark., 2016).



Ŗekil 6: Biyokompozit malzemelerin uygulama örnekleri (Kıratlı, 2023)

Biyolojik olarak çözünebilen matrislere doğal liflerin eklenmesi, elde edilen kompozit malzemelerin termal, mekanik, kristalinite ve ayrışma gibi fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu biyo malzemelerin çeşitli alanlardaki uygulamalarında daha verimli olsa da, maksimum şekillendirme sıcaklığı nedeniyle hazırlanmaları önemli dezavantaj oluşturmaktadır (Santhosh ve ark., 2024).

4. GÜNCEL BİYOKOMPOZİT MALZEME UYGULAMALARI

Literatürde son yıllarda biyokompozit malzemelere olan ilginin arttığı görülmüştür. Mevcut konu üzerine yapılan son iki yıla (2024-2025) ait çalışmalar incelendiğinde konu üzerinde araştırmaların arttığı belirlenmiştir. Bu güncel çalışmalara bakıldığında;

Sruthimol ve ark. (2025), çalışmalarında biyokompozit plakaları, taro hamurunun pirinç samanı, ananas lifi, guar zımkı ve mısır nişastasıyla harmanlanmasıyla oluşturulmuşlardır. Elde ettikleri plakaların çekme dayanımını incelemiştir. Ayrıca toprak altındaki yaşlandırma durumundaki doğal çözünme durumunu incelemiştir.

Mollaei ve ark. (2024), buğday samanı destekli biyokompozit malzeme üretmişlerdir. Ürettikleri plakaların içi yapısını XRD ve FTIR testleriyle inceleyerek takviyenin etkilerini incelemiştir.

Greco ve ark. (2024), çalışmalarında İspanyol süpürgesi takviyeli biyokompozit malzemelerin yapılar da kullanılabilirliğini incelemiştir.

Gioffrè ve ark. (2024), yapı harcında kenevirin etkisini incelemiştir. Kenevir destekli biyokompozit malzeme üreterek mekanik dayanımlarını araştırmışlardır.

Greco ve ark. (2024), çalışmalarında İspanyol süpürgesi ve kenevir destekli biyokompozit malzemelerin basma ve eğme testlerini yaparak karşılaştırmışlardır.

Homkhiew ve ark. (2024), doğal kauçuk, kauçuk ağacı talaşı ve PLA malzeme karışımlarından doğal kompozit malzeme üreterek çekme, sertlik ve eğme dayanım incelemelerini yapmışlardır. Çalışma sonucunda elde ettikleri veriler göre kullandıkları biyomalzemenin çocuk oyuncaklarındaki kullanılabilirliğini araştırmışlardır.

Srivastava ve ark. (2024), çalışmalarında kitosan takviyeli bambu, kenevir ve nano-biyo-silika takviyeli biyokompozitlerin mekanik, termal ve biyoyumlu özelliklerini incelemiştir.

Villamizar ve ark. (2024), hidrolik rotor pervanesinin üretiminde kullanılan fique doğal lif katkılı biyokompozit malzemeleri el yatırması yöntemiyle üretilip sonrasında ise incelemiştir. Çalışma sonucunda uygulama için olumlu sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Al-Oqla ve ark. (2023), çalışmalarında doğal lif katkısının biyokompozit malzemelere etkisinin inceleyebilecek genetik programlama yapmıştır. Elde ettikleri programlamayla takviyenin malzeme dayanımına etkisini araştırmışlardır.

Luna ve ark. (2025), güney Amerika bölgesindeki bambulardan lif çıkarma işlemini biyokompozit malzemeler açısından araştırmışlardır.

Martínez ve ark. (2024), çalışmalarında kolofan, arap zıncı ve mısır nişastasından oluşan çevre dostu bir bağlayıcı kullanılarak biyokompozit malzeme üretilmiştir. Ürettikleri plakaları çekme ve eğme testleriyle incelemiştir. En olumlu sonucu arap zıncıdan elde etmişlerdir.

Srivastava ve ark. (2024), implantlar için uzun kemik malzemesi geliştirmede nano biyo-silika, bambu lifi ve kenevir lifi ile güçlendirilmiş kitosan matrisindeki su emilimini ve gözenekliliği incelemiştir.

Lalaymia ve ark. (2024), çalışmalarında agave americana L. bitkisinden elde edilen çiçek sapı liflerinin morfolojik, fiziksel, termal ve mekanik

özellikleri ileriki biyokompozit malzemelerdeki kullanımı açısından araştırmışlardır.

Petaloti ve ark. (2024), çalışmalarında kahve zarı tozu takviyeli PLA malzeme matrisli biyokompozit malzemenin kimyasal ve iç yapısını incelemişlerdir. Elde edilen verilere göre takviyenin etkilerini ortaya koymuşlardır.

Mario ve ark. (2025), çalışmalarında bira fabrikasında oluşan üretim atıklarını biyokompozit üretimi için uygun hale getirerek kullanmışlardır. Elde ettikleri biyokompozit malzemeleri mekanik açıdan incelemişlerdir.

Kumar ve ark. (2024), muz kabuklarını öğütürerek biyokompozit malzeme üretimine uygun hale getirmişlerdir. Elde ettikleri muz kabuk tozunu epoksi reçineye farklı oranlarda katarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

Hamdi ve ark. (2024), çalışmalarında biyokompozit malzemelerin hibrid olarak kullanımını istatistiksel olarak araştırmışlardır.

5.SONUÇLAR

Çalışmada ilk aşamada kompozit malzemeler üzerine kapsamlı derleme çalışma yapılmıştır. Sonrasında biyokompozit malzemelerin tanımı, önemi ve avantaj/dezavantajları üzerinde durulmuştur. Son aşamada ise biyokompozit malzemeler üzerine son iki yılda (2024-2025) yapılan çalışmalar ve güncel biyokompozit malzeme uygulamaları literatürde incelenmiştir. Literatür incelemesi sonucunda;

- Biyokompozit malzeme üretimi için kullanılabilecek doğal takviye elemanları üzerine oldukça çalışmaya rastlanmıştır.
- Son yıllarda popüler olan bitkilerden takviye elemanı elde etme üzerine çalışmalar görülmüştür.
- Güncel belirlenen doğal takviye elemanlarının matris malzemesine uyumunu artırıcı yöntemler üzerine oldukça çalışma belirlenmiştir.
- Güncel doğal takviye elemanı katkılı biyokompozit malzemeler üzerinde mekaniksel ve fiziksel açıdan incelemeler yapıldığı tespit edilmiştir.
- Yapay zekâ kullanımıyla biyokompozit malzemelerin incelendiği güncel çalışmalarda sıklıkla görülmüştür.

Literatür incelemesinin sonucunda özetle güncel doğal bitkilerden takviye elemanı ve biyokompozit üretimine ve yapay zekanın biyokompozit malzeme alanına entegrasi üzerine ağırlıklı olarak çalışmalara rastlanmıştır. Mevcut çalışmayla güncel biyokompozit malzeme trendleri belirtilerek literatüre katkı sağlanmıştır.

KAYNAKÇA

- Abid, Z. T. and Abdulsamad, H. J. (2022). Mechanical Specification Review of Composite Materials and its Applications. *Journal of Current Research on Engineering, Science and Technology*, 8 (2), 17-36.
- Ahmad, W., McCormack, S. J., Byrne, A. (2025). Biocomposites for sustainable construction: A review of material properties, applications, research gaps, and contribution to circular economy. *Journal of Building Engineering*, 105, 112525.
- Al-Oqla, F. M., Faris, H., Habib, M. and Castillo, P. A. (2023). Evolving Genetic Programming Tree Models for Predicting the Mechanical Properties of Green Fibers for Better Biocomposite Materials. *Emerging Science Journal*, 7(6), 1863–1874.
- Badamasi, H. and Ibrahim, A. (2017). Development and Characterization of Bio-Composite: A Review. 2ND International Conference on Green Engineering for Sustainable Development (IC-GESD 2017).
- Bharath, K. N. and Basavarajappa, S. (2016). Applications of biocomposite materials based on natural fibers from renewable resources: a review. *Sci Eng Compos Mater*, 23(2)123–133.
- Gioffrè, M., Pepi, C. (2024). Environmental aging effects on mechanical behavior of an hemp based biocomposite material for structural strengthening. *Journal of Building Engineering*, 91, 109571.
- Greco, P. F., Pepi, C., Gioffrè, M. (2024). A novel biocomposite material for sustainable constructions: Metakaolin lime mortar and Spanish broom fibers. *Journal of Building Engineering*, 83, 108425.
- Greco, P. Francesco, Pepia, C., Gioffrè, M., Latterini, L., Tomassoli, L., Vinti, Fr., Petrucci, R. (2024). A new biocomposite material mixing past and present to look toward the future. *Procedia Structural Integrity*, 64, 1888–1895.
- Gülmez, S. (2018). Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Hamdi, L., Asma, B., Ali, B. (2024). Tensile mechanical performance of natural/natural fiber reinforced hybrid bio-composite materials – A

- statistical approach. *Journal of Industrial Textiles*, 54. doi:10.1177/15280837241264014.
- Homkhiew, C., Khamtree, S. Srivabut, C., Petdee, T. (2024). Biocomposite materials from natural rubber/polylactic acid blends reinforced rubberwood sawdust for producing children's toys. *Cleaner Engineering and Technology*, 22, 100803.
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composites*, 45.
- Kıratlı, S. (2023). Advanced Biocomposites: Processing, Characterization and Applications. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, volume 7, pp. 192-197, 3.
- Kumar, A., Kumar, S., Kumar, D., Mahakur, V. K., Bhowmik, S. (2024). Utilization of banana peel as bio-filler to develop bio-composite materials and characterize their physical, mechanical, thermal, and tribological characteristics. *Polymer Bulletin*, 81, 16175–16196.
- Lalaymia, I., Belaadi, A., Bedjaoui, A., Alshahrani, H., Khan, M. K. A. (2024). Extraction and characterization of fiber from the flower stalk of the Agave plant for alternative reinforcing biocomposite materials. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 32271–32287.
- Luna, P., Lizarazo-Marriaga, J. (2025). Transforming bamboo-guadua: Fiber extraction and characterization for biocomposite materials. *Materiales de Construcción*, 75, (358) 378.
- Mario, J. D., Bertoldi, A., Priolo, D., Calzoni, E., Gambelli, A. M., Dominici F., Rallini, M., Buono, D. D., Puglia, D., Emiliani, C. and Gigliotti, G. (2025). Characterization of Processes Aimed at Maximizing the Reuse of Brewery's Spent Grain: Novel Biocomposite Materials, High-Added-Value Molecule Extraction, Codigestion and Composting. *Recycling*, 10, 124.
- Martínez, B., Mendizabal, V., Bernat-Masó, E. and Gil, L. (2024). Experimental Assessment of Hemp Shiv and Green Adhesives to Produce a Biocomposite Material. *Materials*, 17, 3900.
- Mollaei, M., Karbasi, F., Haddad, A. S. (2024). Hossein Baniasadi, Fabrication of biocomposite materials with polycaprolactone and activated carbon extracted from agricultural waste. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 702, 135175.

- Özsoy, N. (2015). Polimer esaslı fiber takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Petaloti, A. and Achilias, D. S. (2024). The Development of Sustainable Biocomposite Materials Based on Poly(lactic acid) and Silverskin, a Coffee Industry By-Product, for Food Packaging Applications. *Sustainability*, 16, 5075.
- Rathinavel, S., Saravanakumar, S. S., Senthilkumar, T. S., Senthamaraikannan, P., Suyambulingam, I. and Kumar, R. (2025). Natural Particulate Reinforced Biocomposite Film: A Review. *Journal of Natural Fibers*, 22:1, 2500641.
- Sai, M. K. S. (2016). Review of Composite Materials and Applications. *IJILTET*, vol:6 issue:3.
- Santhosh, N., An, B., Praveena, A. C., Gowda, A. A., Duhduh, A. A., Rajhi, S., Alamri, P. B., Khan, M. A. and Wodajo, A. W. (2024). Innovative eco-friendly bio-composites: A comprehensive review of the fabrication, characterization, and applications. *Reviews on Advanced Materials Science*, 63, 20240057.
- Singh, J. I., Bahl, A., Gulati, P., Kumar, R., Singh, M., Sehon, M. S. (2019). Biocomposites: A Review. *JETIR*, Volume 6, Issue 1.
- Srivastava, S., Sarangi, S. K. (2024). Fabrication and Testing of Nano Bio-silica, Hemp, and Bamboo Fibre-Reinforced Chitosan Bio-composite Material. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Volume 18, Number 2.
- Srivastava, S., Sarangi, S. K., Singh, S. P. (2024). Water Absorptivity and Porosity Investigation of Nano Bio-silica, Hemp, and Bamboo Fibre-reinforced Chitosan Bio-composite Material. *Silicon*, 16, 4723–4728.
- Sruthimol, J. J., Haritha, K., Warriar, A. S., Nandhu, Lal, A. M., Harikrishnan, M. P., Rahul, C. J., Kothakot, A. (2025). Tailoring the properties of natural fibre biocomposite using chitosan and silk fibroin coatings for eco-friendly packaging. *Industrial Crops & Products*, 225, 120465.
- Tanoğlu, M. ve Toğulga, M. (2005). Kompozit Malzemeler ve Jeotermal Uygulamaları. *Jeotermal Enerji Semineri*, (23-26 Kasım 2005), <https://mmoteskon.org/images/2025/01/2003jeo-18.pdf>.

- Tripathi, G. (2017). Application and Future of Composite Materials: A Review. IJCCM (2017) 1–4, JournalsPub.
- Villamizar, J., Ramon, B. and Vargas, M. (2024). Selection of a biocomposite material as an alternative for the manufacture of the rotor of a gravitational vortex turbine. 22nd International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'24) Bilbao (Spain), 26 th to 28 th June.
- Yıldızhan, Ş., Çalık, A., Özcanlı, M., Serin, H. (2018). Bio-composite materials: a short review of recent trends, mechanical and chemical properties, and applications. European Mechanical Science, 2(3), 83-91.

BÖLÜM 3

YAPISAL SAĞLIK İZLEMEDE GERİNİM ÖLÇER KULLANIMI

Öğr. Gör. Dr. Ersan KIRAR¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17974169>

¹ Harran Üniversitesi, Şanlıurfa Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, Şanlıurfa, Türkiye. ekirar@harran.edu.tr, orcid id: 0000-0002-7980-4815

1.GİRİŞ

Yapısal sağlık izleme (YSİ) köprüler, binalar, barajlar ve tüneller gibi kritik yapıların güvenliği ve mevcut durumu hakkında önemli bilgiler sağlayarak son senelerde oldukça önem kazanmıştır. YSİ gömülü veya altyapıya yerleştirilmiş sensörlerden toplanan veriler yardımıyla bir yapı sağlığının periyodik ya da sürekli olarak incelenmesine sağlar. YSİ'nin temel amaçları; bozulmayı veya hasarı erken tespit etmek ve bu bilgiye dayanarak zamanında bakım müdahalelerini sağlamaktır. Bu şekilde de büyük arıza risklerini azaltmaktır (Aktan ve ark., 2024; Plevris ve ark., 2024).

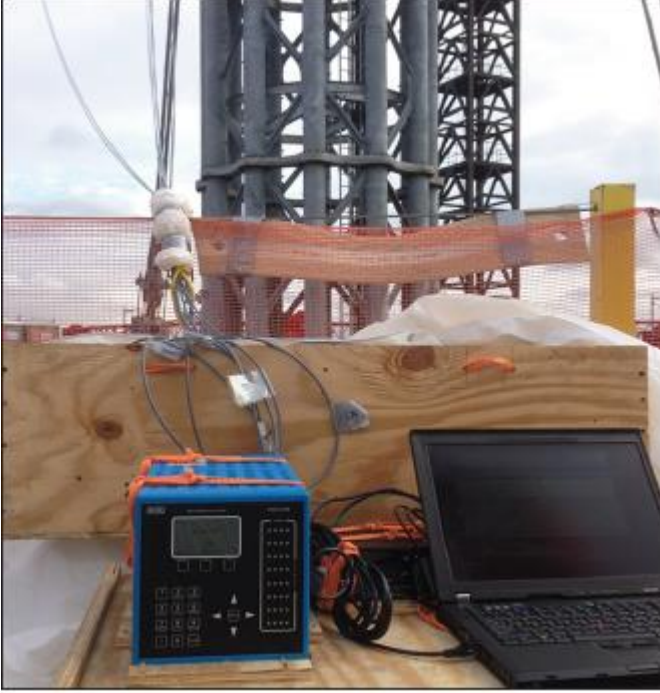
Literatürde çeşitli malzemelerde ve alanlarda sıklıkla kullanılan yapısal sağlık izleme yöntemi ele alınmaktadır. Bu nedenle çalışmada yapısal sağlık izleme konusu üzerine yapılan son iki yıla (2024-2025) ait çalışmalar ele alınarak güncel bilgiler özet olarak verilmiştir. Çalışma kapsamında ilk bölümde yapısal sağlık inceleme konusu kapsamlı olarak ele alınmıştır. Sonrasında makine alanında yapısal sağlık incelemede sıklıkla kullanılan gerinim ölçerler üzerinde durulmuştur. Son bölümde ise yapısal sağlık inceleme konusunda son iki yıla ait çalışmalar incelenmiştir. Elde edilen literatür bilgileri özet olarak yorumlanarak konunun son güncel noktaları ve güncel uygulamaları verilmiştir. Çalışmanın konu hakkında güncel veriler sunmasıyla literatüre katkı sağlamaktadır.

2.YAPISAL SAĞLIK İNCELEME

Yapısal sağlık izleme, bir yapının fiziksel durumu hakkında bilgi edinme sürecidir. YSİ teknolojisiyle, yapıların sürekli gerçek zamanlı izlenmesi/incelenmesi ve hasar tespiti yapılabilir. YSİ teknolojisi korozyon veya yorulma, darbelere maruz kalan, yapısal bozulmaya veya ağır yüklere maruz kalan yapılarının izlenmesinde de muazzam bir uygulama potansiyeline sahiptir. Ayrıca son otuz yılda mekanik, havacılık ve inşaat yapılarında sağlık izleme için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Yapısal sağlık izleme sisteminin amacı, bir yapıdaki hasarları ve yerlerini ömrü boyunca tespit etmektir (Şekil 1). Bu YSİ değerlendirmeleri sonucunda, yapı için iyileştirme eylemleri belirlenir ve hasarlı yapının ömrü tahmin edilebilir (Kefal, 2020; Rao ve ark., 2006; Sethi, 2006).

YSİ teknolojinin temel amacı, yapısal davranışları sürekli izlemek ve olumsuz bir yapısal durumu belirlemektir. YSİ sistemlerinin uygulanmasıyla

çevre ve insan güvenliğini artırmanın yanı sıra bakım maliyeti de düşürülebilmektedir. Bu nedenle YSİ sistemleri birçok sivil, deniz ve havacılık yapıları için oldukça gerekli teknolojidir. Son zamanlarda gemi ve deniz yapıları, kompozit ve sandviç malzeme sistemleri, rüzgâr türbinleri ve sivil ve askeri hava taşıtları gibi birçok farklı mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Kefal, 2020).



Şekil 1: Yapısal sağlık izleme örnek uygulama (Micro measurements, 2021)

Birçok yapıdaki dış yükler kaynaklı gerinim dağılımları ve hasar oluşumlarının sürekli olarak izlenmesini gerektirir ve bu sayede yüksek düzeyde güvenlik sağlanır. Yapısal sağlık izleme sistemi, mühendislere yapı hakkında erken uyarı vererek olası can kayıplarını önleyebilir (Şekil 2). Aynı zamanda bu sistemler tasarım doğrulama aracı olarak da görülebilir (Sethi, 2006).



Şekil 2: Köprüdeki yapısal sağlık izleme (Micro measurements, 2021)

YSİ için Sensör Sistemleri

Kapsamlı bir yapısal izleme izlenecek yapının tüm kritik noktalarına bir dizi sensör sistemiyle donatılmasıyla gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda herhangi bir sensör tek başına tüm yapısal davranışı izleyemez ve olası tüm yapısal olumsuzlukları belirleyemez. Bu nedenle kapsamlı izleme için yeterli sayıda sensörün kullanılması gereklidir; böylece birkaç sensör arızalanması durumunda bile izleme sistemi aktifliğini korur. Ayrıca sensörler ve veri alma sistemleri, zorlu koşullara dayanabilmelidir (Sethi, 2006).

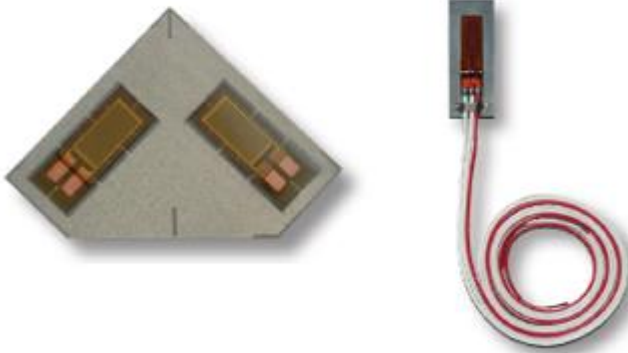
Genel olarak YSI sensörleri gömülü tip ve yüzey bağlantılı olarak sınıflandırılabilir. Yüzey bağlantılı sensörler, arızalanırsa değiştirilebilir. Ancak gömülü sensörler için değiştirme veya onarım oldukça sorun yaratmaktadır (Sethi, 2006).

- **Yapıştırılan gerinim ölçer:** Gerinim verilerini toplamak için en yaygın kullanılan sensörlerdir. Bu sensörler kablolarının ve genel sensör yapısının sağlam olması uzun vadeli stabiliteyi artırır (Şekil 3). Ayrıca gerinim ölçerler çatlak tespiti ve yayılma ölçümü, kalıntı veya ölü yük gerilimi tespiti yapabilir (Micro measurements, 2021).



Ŗekil 3: Gerinim ölçer (Micro measurements, 2021)

- **Kaynaklanabilir gerinim ölçerler:** Kaynaklanabilir gerinim ölçerler, çevre veya test koşullarının yapışkanla birleştirilmesinde gerinim ölçer kurulumunu engellediği durumlarda için ideal bir sensördür (Ŗekil 4). Bu gerinim ölçer için yüzey hazırlama gereksinimleri minimumdur. İnce metal plakalara tutturulmuş ızgaralara sahip bu sensörler, çelik yapılara nokta kaynağı yapmak için özel olarak tasarlanmıştır (Micro measurements, 2021).



Ŗekil 4: Kaynak edilen gerinim ölçer (Micro measurements, 2021)

- **Gömme gerinim ölçerler:** Gömme gerinim ölçerler (Ŗekil 5), betondaki iç gerinimlerin ölçümünü kolaylaştırdığı için inŖaat alanında sıklıkla tercih edilmektedir (Micro measurements, 2021).



Şekil 5: Gömme gerinim ölçer (Micro measurements, 2021)

- **Kardeş Çubuk Gerinim Ölçer:** Gömme kardeş çubuk gerinim ölçerler (Şekil 6), çelik takviyeli beton yapılarda gerinimi izlemek için kullanılır (Micro measurements, 2021).



Şekil 6: Kardeş çubuk gerinim ölçer (Micro measurements, 2021)

3. GERİNİM ÖLÇER

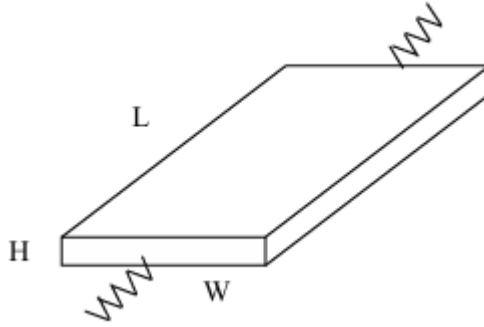
Mühendislik uygulamalarında makine elemanlarının veya cismin herhangi bir noktasındaki gerilme durumunu analiz etmek her zaman direkt olarak mümkün olmayabilir. Cisimdeki gerilmelerin belirlenmesi için gerinimler ölçülür ve ölçülen gerinim değerleri üzerinden gerilme verileri elde edilir. Bu sebeple mühendislik uygulamalarında gerinim ölçerler köprü ve yapılarda, basınç veya yük altında çalışan parçalarda ve doğrudan basınç, kuvvet veya yer değişikliğine maruz kalan parçaların gerilme değerlerini elde etmek için sıkça kullanılmaktadır (Kuleyin, 2022).

Gerinim ölçerler, bir cisim üzerindeki kuvvetleri ve bunların sonucunda oluşan gerinimi ölçmek için kullanılırlar. Bir nesne üzerindeki gerilme, mekanik bir deformasyona (gerinim) sebep olur. Cisim üzerinde elde edilecek gerinim Denklem 1'e göre hesaplanır. Hesaplanan gerinim doğrudan gerinim ölçerle elde edilebilir (ScienceDirect, 2025):

$$\text{Gerinim} = \frac{\text{uzunluk değişimi}}{\text{uzunluk}}$$

Denklem 1

Cisim üzerindeki çok küçük şekil değişimlerinin ölçülmesinde bir elastik cismin elektriksel direncinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminden yararlanılır. Şekil 7’de gösterilen iletkenin elektriksel direnci “R” kesit alanı ile ters orantılı iken boyu ile doğru orantılıdır (Topal ve ark. 2010).

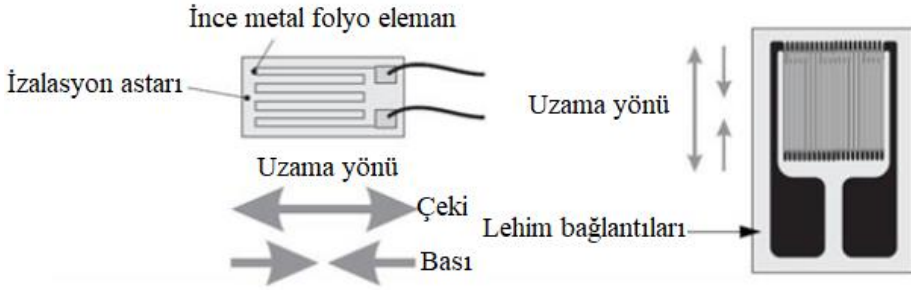


Şekil 7: Bir iletkenin elektriksel direnci (Topal ve ark., 2010)

Gerinim ölçerlerin direnci gerinime göre değişen iletken malzemelerdir (genellikle metalik). Örneğin, bir tel gerildikçe direnci artmaktadır. Gerinim ölçerler, gerilme altındaki nesneye yapıştırılır ve aynı kuvvetlere maruz bırakılır. Bunun sonucunda da yalnızca tek bir yöndeki (iletkenin eksenini) gerinime karşı çok hassas veriler elde edilir (ScienceDirect, 2025).

Gerinim ölçer, kuvvet uygulanan yüzeye yapıştırılmış destekler üzerindeki serbest tellerden oluşmaktadır. Yapıştırılmış gerinim ölçer, iletkenin zikzak desenini yalıtkan bir yüzeye yerleştirmesiyle bu sorunların üstesinden gelmektedir. Gerinim ölçerler nispeten küçüktür, iyi hassasiyete sahiptir ve test edilen yüzeye kolayca yapıştırılabilmektedir. Yapıştırılmış gerinim ölçer (Şekil 8) iletken teller, metalik bir tel, folyo ve ince bir filminden oluşmaktadır (ScienceDirect, 2025).

Bir metalik malzemenin elektriksel direnci, uygulanan dış kuvvetin neden olduğu deformasyonla doğru orantılı olarak değişir. İnce bir metalin, ince bir elektrik yalıtkanı aracılığıyla bir ölçüm nesnesine yapıştırılmasıyla, metal ölçüm cisminin deformasyonuna bağlı olarak deforme olur ve elektriksel direnci değişir. Gerinim ölçer de cismin direnç değişimini ölçerek gerinimi ölçen bir sensördür (Tokyo Measuring Instruments LAB, 2020).



Şekil 8: Gerinim ölçer yapısı (Kuleyin, 2022)

Bir ölçüm nesnesinde gerinim meydana geldiğinde gerinim, gerinim ölçerin tabanı aracılığıyla gerinim ölçerin direnç teline veya folyosuna aktarılır. Bu durum sonucunda, tel bir direnç değişimine uğrar. Bu değişimde Denklem 2’de olduğu gibi gerinim parametresiyle doğru olarak orantılıdır (Tokyo Measuring Instruments LAB, 2020). Denklem 2’de ε gerinim, L orjinal boy, ΔL boydaki değişim, R geyc direnci, ΔR geyc direnç değişimi ve K geyc faktörüdür.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{K}$$

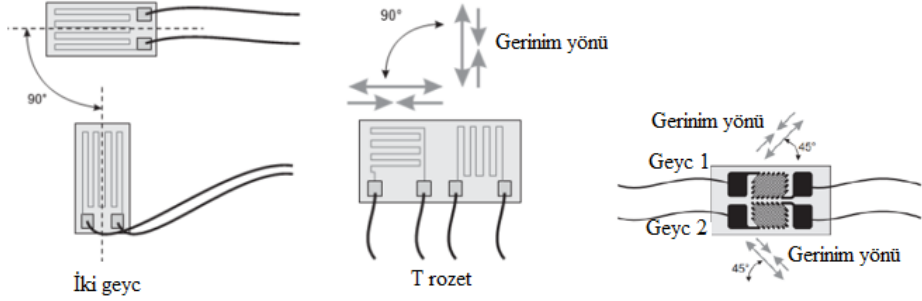
Denklem 2

Folyo gerinim ölçerler, ince bir plastik veya polyester destek malzemesi (folyo) üzerine ışıklı baskı yöntemiyle çok ince bir metal ızgara tabakası oluşturularak üretilir (Şekil 9). Folyo gerinim ölçerler duyarlılığının en düşük olduğu pasif bir eksene ve en yüksek olduğu aktif bir eksene sahiptir. Gerinim ölçerdeki aktif eksen ile pasif eksenin duyarlılıkları arasındaki oran “çapraz duyarlılık” olarak isimlendirilir (Topal ve ark., 2010).

Folyo gerinim ölçerler ile yapılacak başarılı bir ölçme işleminin ön şartı dikkatli bir yapıştırma yapılmasıdır. Çünkü gerinim ölçerin ölçtüğü şekil değişiminin üzerinde yapıştırıldığı nesnenin şekil değişimine eşit olması oldukça önemlidir. Halen kullanımda olan birçok reçine veya yapıştırıcı gerinim ölçerin ölçüm hassasiyetini azaltan bir yavaşlatma etkisine sahiptir (Topal ve ark., 2010).

Mekanik yüklenen cisimde gerinim ölçümünün gerçekleştirilmesi için bir veya daha fazla doğrultuda gerinim ölçere ihtiyaç duyulabilir. Bu tür durumlarda birden fazla gerinim ölçer ile ölçüm alınacağı gibi birden fazla gerinim ölçerin tek bir gerinim ölçer tabanında birlikte kullanımı da mümkün

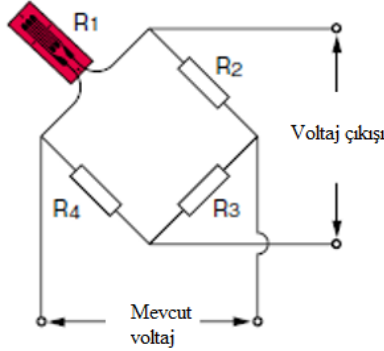
olmaktadır (Şekil 9). Bu şekilde tasarlanan gerinim ölçerler gerinim ölçer rozetler olarak isimlendirilir (Kuleyin, 2022).



Şekil 9: Gerinim ölçer çeşitleri (Kuleyin, 2022)

Gerinim ölçerin sahip olduğu gösterge faktörü (K_s), kullanılan malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Genellikle, bakır-nikel alaşımlı malzemeden üretilen gerinim ölçerlerin gösterge faktörü yaklaşık 2 veya 2,1 olmaktadır. Gerinim ölçerler sıklıkla 350 veya 120 Ω dirence sahiptirler. Gerinim ölçerlerdeki bu kadar küçük direnç değişimlerini doğru olarak ölçmek oldukça zordur. Ayrıca küçük direnç değişimlerini bir ohmmetre kullanarak da ölçmek mümkün değildir. Bu sebeple, küçük direnç değişimlerini ölçmek için Wheatstone köprüsü elektrik devreleri kullanılmaktadır. Wheatstone köprüsü elektrik sistemi, gerinim ölçer üzerindeki direncin anlık değişimini ölçmek için kullanılmaktadır (Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, 2015).

Bir gerinim ölçerin direnci büyük gerinim değerlerinde dahi oldukça küçük değişiklikler göstermektedir. Bu durum nedeniyle doğrudan gerinim ölçer ile çıkış gerilimi ölçülmesini zorlaştırır. Gerinim ölçer ile doğru bir ölçümün elde edilebilmesi için Şekil 10'da gösterildiği gibi Wheatstone köprüsü kurulur. Wheatstone köprüsü ile bilinmeyen bir direnç değeri bilinen dirençler yardımıyla tespit edilmektedir (Topal ve ark., 2010).



Şekil 10: Çeyrek Wheatstone köprüsü (Tokyo Measuring Instruments LAB, 2020)

4. YAPISAL SAĞLIK İNCELEME ALANINDAKİ GÜNCEL UYGULAMALAR

Literatürde yapıların yapısal sağlık incelemesi üzerine yapılan son iki yıla (2024-2025) ait çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalara bakıldığında;

Bardiani ve ark. (2026), çalışmalarında gemilerdeki yapısal sağlık incelemesinde iFEM yönteminin uygunluğunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda iFEM yönteminin deniz yapıları için oldukça uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Esposito (2024), kompozit yapılarda sağlık incelemeyi iFEM ve modal inceleme ile yapmıştır. Yapılardan elde ettikleri verileri deneysel ile karşılaştırdıklarında oldukça yakın sonuçlar elde ettiklerini belirtmiştir.

Pinello ve ark. (2026), çalışmalarında karbon nano tüp katkılı cam takviyeli kompozit malzemelerde yapısal sağlık incelemeyi mekanik testler ile test etmişlerdir. Bu malzemelerde yapısal sağlık izleme için olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Khalid ve ark. (2025), çalışmalarında ince levhaların yükleme altındaki davranışını yapısal izleme yöntemlerinden iFEM ile yapmışlardır. Çalışma sonucunda havacılık alanında kullanılan ince levhalar için iFEM yönteminden olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Hassani ve ark. (2024), çalışmalarından yapısal izleme yöntemiyle yapıdan elde edilen verilerin depolanması ve işlenmesi üzerine derleme çalışma yapmışlardır.

Azad ve ark. (2024), karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin yüklenme altındaki tabakalar arası ayrılmayı yapısal sağlık inceleme ile araştırmışlardır. Ayrıca yapısal sağlık izleme sistemine yapay sinir ağıda ekleyerek verileri işlemeye katkı sağlamışlardır. Bu sayede kompozit malzemelerde tabakalar arası ayrılmaya karşı erken uyarı alınabileceğini belirtmişlerdir.

Bardıanı ve ark. (2024), çalışmalarında basınçlı kaplarda yapısal sağlık izleme yönteminde deneysel en iyi uyumlu iFEM metodu üzerinde inceleme yapmışlardır.

Petriconi ve ark. (2025), çalışmalarında dönen shaftlardaki gerinim ve gerilme incelemesini anlık olarak yapısal sağlık izleme yöntemlerinde iFEM ile yapmışlardır. Uygulamada deneysel ile yakın değerler elde etmişlerdir.

Aktan ve ark. (2024), köprülerin sürekli olarak anlık incelenmesinin yapısal sağlık incelemeyle yapılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda yapısal sağlık inceleme yönteminin köprüler için oldukça uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Plevris ve ark. (2024), çalışmalarında yapısal sağlık izlemde yapay zekâ kullanımını incelemişlerdir. YSİ yönteminde yapay zekanın entegre edilmesiyle verileri daha hızlı işlenerek erken bakım/onarım ya da arıza teşhislerinin yapılabilceğini belirtmişlerdir.

Dirik ve ark. (2025), deniz ortamında korozyona uğrayan yapıları çekme ve eğilme yüklemesi altında iFEM ve deneysel olarak incelemişlerdir. iFEM yönteminden oldukça iyi sonuçlar elde ederek ileriki deniz araçlarının bakım ve arıza konularına katkı sağlamışlardır.

Chen ve ark. (2024), köprü kirişlerinin gerinim ve gerilme incelemesinde yapısal sağlık inceleme yöntemlerinden iFEM yöntemini kullanmışlardır. iFEM yönteminden deneysel verilere yakın sonuçlar elde ederek ileriki çalışmalara yol göstermişlerdir.

Sharma ve ark. (2023), çalışmalarında petrol ve gaz taşınan boruların çeşitli yüklemelere maruz kaldığını belirtmişlerdir. Bu nedenle kullanım ömürlerinde sürekli olarak yapısal sağlık izlemeyle takibi üzerine çalışmışlardır.

Kosova ve ark. (2024), hava araçlarındaki yapısal sağlık izlemenin önemini, avantaj ve dezavantajlarını literatürde araştırarak çalışma yapmışlardır.

Craiu ve ark. (2024), çalışmalarında mekanik yapılarda yapısal izleme metotlarından olan iFEM yönteminin kullanımı için gerekli olan sensör sayısını azaltıcı geliştirilmiş giriş teoremini kullanmışlardır. Çalışmadan olumlu sonuçlar elde ederek sensör sayısını azaltabilmişlerdir.

Poloni ve ark. (2025), körü yapılarındaki halatların ağırlığının yapı hasarına etkisini iFEM yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışmalarında sensör sayısını azaltıcı geliştirilmiş giriş teoremini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda parametrenin köprülere etkisini araştırmışlardır.

Chen ve ark. (2025), çalışmalarında uzak ve hava araçlarında kullanılan büyük ebatlı kompozit yapıların değişken yükleme koşulları altındaki inceleme zorluğu üzerine yeni bir metot geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda eski metoda kıyasla %44 daha yakın sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

5. SONUÇLAR

Çalışmada ilk aşamada yapısal sağlık izleme yöntemi üzerinde durulmuştur. Sonrasında yapısal sağlık izlemede makine alanında en çok tercih edilen gerinim ölçerler üzerinde derleme yapılmıştır. Son aşamada ise son iki yılda (2024-2025) yapısal sağlık izleme konusu üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar;

- Yapısal sağlık izleme alanında ciddi anlamda çalışma eksikleri bulunmaktadır.
- Güncel çalışmalarda yapısal sağlık izleme yönteminin çeşitli malzemelere uygulanabilirliğinin incelendiği görülmüştür.
- Son zamanlarda mevcut yöntemin çeşitli uygulamalar için kullanılabilirliği ve olası sorun çözümleri üzerine oldukça çalışmaya rastlanmıştır.
- Yapısal sağlık incelemede sensör sayısını azaltıcı yeni yöntemler üzerine çalışmalar belirlenmiştir.
- Günümüzde yapay zekâ ve derin öğrenme yöntemlerinin yapısal sağlık izleme yöntemine veri işleme için entegre edilmesi üzerine çalışmalara rastlanmıştır.

Özet olarak son iki yılda gerçekleşen teknoloji ve sanayi ihtiyaçlarına göre çalışmaların yönlendiği belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Aktan, E., Bartoli, I., Glišić, B. and Rainieri, C. (2024). Lessons from Bridge Structural Health Monitoring (SHM) and Their Implications for the Development of Cyber-Physical Systems. *Infrastructures*, 9, 30.
- Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi. (2015). Makine Mühendisliği Bölümü. Mekanik lab föyü. Strain measurement by using strain gauge. 13s.
- Azad, M. M., Kumar, P., Kim, H. S. (2024). Delamination detection in CFRP laminates using deep transfer learning with limited experimental data. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 3024–3035.
- Bardiani, J., Gıglio, M., Manes, A., Sbarufatti, C. (2024). Shape sensing with iFEM on a type IV pressure vessel based on experimental measurements. *e-Journal of Nondestructive Testing*, ISSN 1435-4934.
- Bardiani, J., Ragani, R. F., Manes, A., Sbarufatti, C., Kefal, A. (2026). Real-time damage detection and localization in ship structures using iFEM and machine learning techniques. *Ocean Engineering* Volume 343, Part 3, 15.
- Chen, J., Duan, W., Yuan, S., Zhang, A. (2025). A regional integral iFEM for deformation sensing of the large-scale composite panel under complex service conditions. *Composite Structures*, volume 365, (1) 119149.
- Chen, G., Wang, X., Zhao, N., Jiang, Z., Li, F., Chen, H., Wei, P. and Zhang, T. (2024). Study on Strain Field Reconstruction Method of Long-Span Hull Box Girder Based on iFEM. *J. Mar. Sci. Eng.*, 12, 1482.
- Dirik, Y., Oterkus, S., Oterkus, E. (2025). Monitoring of Corrosion Damage by Using iFEM Methodology. *International Journal of Mechanical System Dynamics*, 5, 495–517.
- Esposito, M. (2024). A novel shape sensing approach based on the coupling of Modal Virtual Sensor Expansion and iFEM: Numerical and experimental assessment on composite stiffened structures. *Computers and Structures*, 305, 107520.
- Hassani, S., Dackermann, U., Mousavi, M., Li, J. (2024). A systematic review of data fusion techniques for optimized structural health monitoring. *Information Fusion*, 103, 102136.

- Ionel, D. C., Nedelcu, M. (2024). Combining iFEM and GBT for accurate shape sensing and damage detection in truncated conical shells with circular cross-section. *Ocean Engineering*, volume 311, Part 1, (1) 118811.
- Kefal, A. (2020). A novel four-node inverse-plate element for shape and stress sensing of laminated composite and sandwich plates. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35:4, 1767-1781.
- Khalid, I., Qureshi, Z. A., Oterkus, S., Oterkus, E. (2025). Structural Health Monitoring of aerospace thin plate and shell structures using the inverse finite element method (iFEM). *Thin-Walled Structures*, 209, 112923.
- Kosova, F., Altay, Ö. ve Ünver, H. Ö. (2024). Structural health monitoring in aviation: a comprehensive review and future directions for machine learning. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 40(1), 1–60. <https://doi.org/10.1080/10589759.2024.2350575>.
- Kuleyin, H. (2022). Gerinim Ölçer (Strain Gauge Trainer) Deney Föyü. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
- Micro measurements. (2021). Guide to Structural Health Monitoring. micro-measurements.com. 8s.
- Petriconi, E., Lucii, L., Giglio, M. and Sbarufatti, C. (2025). iFEM Implementation on a Rotating Shaft for Imbalance Identification. Conference: Structural Health Monitoring, DOI:10.12783/shm2025/37486.
- Pinello, L., Bhavik, P., Giglio, M., Sbarufatti, C. (2026). Exploiting the self-sensing capabilities of buckypapers for in-situ monitoring of impacts and compression after impact on GFRP panels. *Composite Structures*, 375, 119787.
- Plevris, V. and Papazafeiropoulos, G. (2024). AI in Structural Health Monitoring for Infrastructure Maintenance and Safety. *Infrastructures*, 9, 225.
- Poloni, D., Wang, C., Morgese, M., et al. (2025). IFEM method for distributed monitoring of cable forces in cable-stayed bridges. *Structural Health Monitoring*, 0(0). doi:10.1177/14759217251385449.
- Rao, M. B., Bhat, M.R. and MurthyK, C. R. L., Madhav, V. and Asokan, S. (2006). Structural Health Monitoring (SHM) Using Strain Gauges,

PVDF Film and Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors: A Comparative Study. Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec, 7-9, Hyderabad.

ScienceDirect. Strain gage.

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/strain-gage>, Erişim tarihi:24.11.2025.

Sethi, A. (2006). Structural Health Monitoring of Steel Structures using Electrical Strain Gauges. Bachelor of Technology to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Delhi.

Sharma, V.B., Tewari, S., Biswas, S. (2023). Sharma A. A comprehensive study of techniques utilized for structural health monitoring of oil and gas pipelines. Structural Health Monitoring, 23(3), 1816-1841. doi:10.1177/14759217231183715.

Tokyo Measuring Instruments LAB. (2020). Strain gauges. Japan. 96s.

Topal, E. S., Coğun, C., Odabaş, D. (2010). Tornalama işleminde kesme kuvvetlerini ölçen gerinim ölçer esaslı dinamometre tasarımı ve imalatı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fen Bilimleri Dergisi, Cilt: 26 Sayı: 2, 190–202.

BÖLÜM 4

MOBİLYA İMALATINDA ROBOTİK KOLLAR İLE OTOMATİK MONTAJ SİSTEMLERİNİN VERİMLİLİK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Güllü AKKAŞ¹

Doç. Dr. Tuğba ANDAÇ GÜZEL²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17974383>

¹ Kayseri Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kayseri, Türkiye. gullu.akkas@kayseri.edu.tr, orcid id: 0000-0001-7836-9746

² Kayseri Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu , Tasarım Bölümü, Kayseri, Türkiye. tugbaandac@kayseri.edu.tr, orcid id: 0000-0002-4281-6652

1. GİRİŞ

1.1. Mobilya

Mobilya, yaşam veya çalışma alanlarını uygun ve konforlu hale getirmek amacıyla bir yapının içine yerleştirilen sandalye, masa, yatak, dolap gibi çeşitli eşyaları kapsamaktadır (Dictionary, 2025). Tanıma göre mobilya; oturma, uyuma ve depolama gibi farklı insan faaliyetlerini desteklemek için tasarlanmış çok yönlü ve işlevsel bir nesnedir. Mobilya parçalarının tasarımı ve üretimi, belirli ihtiyaçlara göre değişkenlik göstererek farklı malzemeler, yapılar ve işlevler içerebilir.

Mobilya elemanları; işlevsellik, estetik ve kültürel anlam açısından zengin özellikler ve bileşenler barındırır. Özellikle estetik, fonksiyonel, malzeme, teknik ve teknoloji ve benzeri gibi birçok faktörün özelliklerin doğru sentezlenmesi ile ortaya çıkan birleşimden mobilya üretilir. Efe'ye göre (2017) mobilya tasarımı, insanların oturma, dinlenme, çalışma, eğlenme, eşyaları düzenleme ve alanları bölme gibi ihtiyaçlarını karşılamak üzere işlevsel olarak geliştirilse de, yalnızca işlev nadiren iyi bir tasarımı ortaya çıkarır. Gerçek anlamda başarılı bir mobilya tasarımı; estetik, tasarım ilkeleri, tarihsel referanslar, ergonomi, malzeme özellikleri, üretim teknolojileri, çevresel etkiler, mekânsal bağlam ve ekonomik-etkileşimsel süreçleri bir arada değerlendiren çok boyutlu bir disiplindir. Bu bağlamda tasarımı etkileyen unsurlar arasında görsel estetik, tasarım süreçleri, malzeme ve üretim teknikleri, sürdürülebilirlik, çevreyle uyum ve profesyonel uygulamalar da yer alır (Efe, 2017).

Mobilya, yalnızca işlevsel değil, aynı zamanda estetik, kültürel ve sembolik anlamlar taşıyan çok yönlü bir nesnedir; bireylerin sosyal statüsünü ve zevklerini yansıtarak içinde bulunduğu mekânın kimliğini tanımlar (Özel ve Ürük, 2021). Tarihsel olarak mobilya, sanayi öncesi dönemde zanaat teknikleriyle üretilen dekoratif bir sanat ürünü iken, sanayileşmeyle birlikte seri üretime uygun, işlev odaklı bir tasarım nesnesine dönüşmüştür (Pedroso, 2019). Geleneksel mobilyalar, kültürel motif ve semboller aracılığıyla toplumun yaşam tarzını, estetik anlayışını ve tarihsel birikimini yansıtan değerli kültürel eserler olarak kabul edilir (Yinqiu, 2019; Zhi-hui, 2009). Günümüzde ise mobilya tasarımı, sürdürülebilir malzeme kullanımı, çevresel farkındalık ve teknolojik gelişmelerle şekillenmekte; geleneksel estetiği çağdaş işlevsellikle harmanlayan bir anlayışı yansıtmaktadır (Lü ve Shanat, 2024; Puspita vd.,

2016). Bu dinamik yapı, mobilyayı geçmişten günümüze kültürel mirasla yenilik arasında köprü kuran canlı bir tasarım alanına dönüştürmektedir.

Bu bağlamda, mobilya tasarımına dair değerlendirmeler yalnızca kültürel ve estetik boyutlarla sınırlı kalmayıp, üretim sürecinin yapısal ve işlevsel dinamiklerini de kapsamaktadır. Mobilya tasarım süreci, yalnızca estetik kaygılarla değil, işlevsellik ve kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda kurgulanan çok aşamalı bir gelişim sürecidir. Diğer bir ifade ile mobilya tasarımı, kullanıcılardan, zaman diliminden ve mobilyaların kullanılacağı alandan etkilenen işlevsellik ihtiyacından kaynaklanmaktadır (Sulistyono, 2017). Mobilya tasarımında işlevselliği ve kullanıcı ihtiyaçlarını doğru şekilde anlamak, konforu ve kullanılabilirliği ön planda tutarak çalışma, dinlenme ve öğrenme gibi etkinlikleri destekleyen, kullanıcı memnuniyeti ve üretkenliği artıran ortamlar oluşturmak açısından büyük önem taşır.

Genel olarak, mobilyadaki işlevsellik, sadece estetik açıdan hoş değil, aynı zamanda son derece pratik ve çeşitli ihtiyaç ve ortamlara uyarlanabilir parçalar oluşturmak için tasarım, teknoloji ve kullanıcı merkezli özelliklerin entegrasyonunu içeren çok yönlü bir kavramdır (Antal vd., 2017; Özel ve Ürük, 2021). Mobilyada gerçek konforu sağlamak için ergonomik tasarım şarttır. Örneğin koltuk yüksekliğinin ayarlanabilmesi ya da bel desteği gibi detaylar, kişiye özel olarak uyarlandığında fark edilir düzeyde rahatlık sunar (Min, 2024).

Mobilya alanında tasarım kararlarının hayata geçirilmesinde en belirleyici unsurlardan biri, seçilen malzeme ve üretim tekniğidir. Namichev ve Petrovski'ye göre (2019), mobilya üretiminde malzeme seçimi büyük önem taşır. Bu süreç; malzemenin fiziksel özellikleri, çevresel etkisi ve maliyet etkinliği gibi çeşitli faktörlerin bir arada değerlendirilmesini gerektirir. Ahşap, sahip olduğu sertlik, mukavemet ve esneklik gibi üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri sayesinde, mobilya tasarımı ve kalitesi açısından hala en çok tercih edilen malzeme konumundadır (Namichev ve Petrovski, 2019). Bununla birlikte, metal, plastik, cam, taş, karton, kağıt ve kağıt hamuru gibi alternatif malzemeler ile bambu ve mantar gibi çevre dostu seçenekler, estetik ve işlevsel avantajları sayesinde günümüzde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Ishmakhova vd., 2018; Namichev ve Tasevska, 2019). Malzeme seçimi sadece işlevselliği değil, aynı zamanda geleneksel ile yeniyi

harmanlayan yaratıcı ve sanatsal mobilya tasarımlarının da önünü açmaktadır (Ishmakhova vd., 2018).

Mobilya üretiminde kullanılan teknikler, her biri belirli malzeme türlerine ve istenen tasarım sonuçlarına göre uyarlanan geniş bir yöntem ve teknoloji yelpazesini kapsar. Yüzyıllar boyunca gelişen geleneksel üretim yöntemleri, kültürel mirası ve el işçiliğini yansıtmaları nedeniyle, çağdaş mobilya tasarımında hem estetik hem de işlevsel katkılar sunarak önemini korumaktadır. Gutmane ve diğerlerine göre (2022) mobilya üretiminde geleneksel yöntemler arasında ölçüm, işaretleme, testere kullanımı, planyalama, keskiyle oyma, yüzey düzeltme ve şekillendirme amacıyla yapılan törpüleme ve zımparalama gibi el aletleriyle yapılan işlemler yer alır. Bu teknikler, işçiliği ve malzemenin doğasını ön plana çıkararak hem işlevsel hem de estetik açıdan nitelikli ahşap ürünlerin ortaya çıkmasını sağlar. El aletlerinin kullanımı, zanaatkâr ile malzeme arasında doğrudan ve dokunsal bir bağ kurar; bu etkileşim ahşabın özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlar ve genel zanaatkârlık becerisini geliştirir (Gütmane vd., 2022)

Modern mobilya üretimi, ileri teknolojilerin ve yeni üretim yaklaşımlarının entegrasyonu sayesinde önemli ölçüde gelişmiştir. Bu gelişmeler arasında, üretim hızını ve doğruluğunu artırırken daha karmaşık tasarımların önünü açan bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve dijital üretim teknikleri öne çıkmaktadır (Kılıç, 2016). Lazer teknolojisi, ahşap ve metalde hassas kesim ve oyma imkânı sunarak üretimde esneklik ve verimlilik sağlar. CNC yönlendirme, su jeti, alev ve plazma kesim gibi modern yöntemler ise malzeme israfını azaltarak karmaşık tasarımların uygulanmasını kolaylaştırır (Atwee vd., 2023). Günümüzde hızlı prototipleme, yüksek hızlı işleme ve eklemeli üretim gibi yöntemler, yeni malzemelere ve minyatür tasarımlara yönelik artan talepleri karşılamak için yaygın şekilde kullanılmaktadır (Velayudham, 2007). Ayrıca, Endüstri 4.0 ilkeleri doğrultusunda bilgisayar simülasyonları ile üretim sistemleri optimize edilmekte, böylece verimlilik ve malzeme akışı iyileştirilmektedir (Bambura vd., 2020). Mobilya üretim teknikleri, verimliliği, sürdürülebilirliği ve tasarım esnekliğini artırmak için hem geleneksel yöntemleri hem de modern teknolojik gelişmeleri birleştirerek önemli ölçüde gelişmiştir. Çağdaş mobilya üretiminde önemli bir odak noktası, üretkenliği en üst düzeye çıkarmak ve maliyetleri en aza indirmek için üretim süreçlerini optimize etmektir (Sujova vd., 2017).

1.2. Mobilya Sektörünün Mevcut Durumu

Mobilya endüstrisi günümüzde dijital teknolojilerin entegrasyonu ve sürdürülebilirlik hedefleriyle şekillenen dönüşümsel bir aşamadan geçmektedir. Endüstri 4.0 kapsamında otomasyon, robotik, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve yapay zekâ gibi teknolojiler, üretim verimliliğini artırırken malzeme israfını azaltmakta ve akıllı üretim süreçlerini mümkün kılmaktadır (Atwee vd., 2023; Popescu vd., 2018). Özellikle Çin ve Malezya gibi ülkeler, teknolojik altyapılarını güçlendirerek rekabet avantajı yaratmaya odaklanmakta; Çin’de gömülü sistemler ve yapay zekâ destekli ürünler pazarda hâkimiyet hedefiyle geliştirilmektedir (Ratnasingam vd., 2018; Xiong vd., 2017). Ancak bu hızlı dijital dönüşüm, yalnızca büyük üreticiler için değil, küçük ve orta ölçekli işletmeler için de önemli etkiler doğurmaktadır. Bu geçiş, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler açısından uygulama zorluklarını beraberinde getirmekte ve etkin iş birliği ile metodolojik desteği gerekli kılmaktadır. Mobilya sektöründe Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesi, iletişim süreçlerini sadeleştirip hataları azaltarak operasyonel verimliliği %30–50 oranında artırmaktadır. Bununla birlikte, bilgi eksikliği nedeniyle yöneticilerin bu süreci etkin biçimde yönetebilmeleri için rehberliğe ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca bu teknolojiler, verimlilik artışının yanı sıra sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmada da önemli katkılar sunmaktadır (Cerveny vd.SloupCervena, 2022; Cerveny vd.Sloup vd., 2022)

Mobilya sektörü, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ürün-hizmet sistemleri (PSS) ve blokzincir gibi teknolojileri çevresel etkileri azaltmak amacıyla değerlendirmektedir (Liu vd., 2022). Bu yaklaşım yalnızca üretim süreçlerine değil, kullanıcı odaklı tasarım anlayışına da yansımaktadır. Akıllı mobilya çözümleri, özellikle gelişmiş konfor ve erişilebilirlik ihtiyaçları olan bireyler için yaşam kalitesini artırmayı amaçlayarak, teknolojiyi erişilebilir, düşük maliyetli ve kurulumu kolay tasarımlarla bütünleştirmektedir. Kullanıcı merkezli bu yaklaşım, yalnızca işlevsellik değil, aynı zamanda ürünlerin satın alınabilirliği ve pazarda erişilebilirliği açısından da büyük önem taşımaktadır (Frischer vd., 2020). Öte yandan, dijitalleşmenin etkisiyle çok kanallı pazarlama stratejileri ve değişen tüketici beklentileri, tasarım eğilimlerini yeniden şekillendirmekte; uluslararası fuarlar ve sergiler ise mobilya estetiği, malzeme ve renk tercihlerinde yönlendirici rol oynamaktadır (Efimova vd., 2020; Sann ve Siegfried, 2021).

Türkiye’de ise mobilya sektörü, büyük ölçüde küçük ölçekli işletmelerden oluşmakta olup, geniş iç pazarı, stratejik coğrafi konumu, nitelikli iş gücü ve zengin hammadde kaynaklarıyla önemli bir üretim potansiyeline sahiptir. Ancak bu güçlü yönlerine rağmen, üretim süreçlerinde hâlâ geleneksel yöntemlerin ağırlıklı olduğu, teknolojik entegrasyonun ise sınırlı düzeyde kaldığı gözlemlenmektedir. Sektörde dijitalleşme ve otomasyon henüz yaygınlaşmamış olup, yalnızca bazı firmaların makine yatırımları, akıllı üretim çözümleri ve e-ticaret altyapılarına yöneldiği görülmektedir. Yapılan araştırmalara göre, firmaların yalnızca %35,4’ü dijital gelişmelerden haberdardır; bu da sektörde teknolojik dönüşüm ihtiyacının hâlen güncelliğini koruduğunu göstermektedir. Öte yandan, yüksek vergi yükleri, düşük Ar-Ge yatırımları, yetersiz teknolojik altyapı, kayıt dışı ekonomi ve enerji maliyetleri gibi yapısal sorunlar, sektörün yenilikçi ve katma değerli ürün üretimini kısıtlamaktadır. Ayrıca, pazarlama ve markalaşma alanlarındaki yetersizlikler, uluslararası rekabette sektörü zayıf düşürmektedir. Tüm bu nedenlerle, Türkiye mobilya sektörünün küresel ölçekte rekabet gücünü artırması ve sürdürülebilir bir büyüme yakalayabilmesi için dijitalleşme, Ar-Ge yatırımları ve nitelikli iş gücü yetiştirme alanlarında stratejik ve bütüncül adımlar atması gerekmektedir (İSO, 2023).

Yukarıdaki verilerden de anlaşılacağı üzere, dünya mobilya sektörü dijitalleşme, otomasyon ve sürdürülebilirlik konularında hızlı bir dönüşüm içerisindeyken; Türkiye, sahip olduğu üretim potansiyeline rağmen bu dönüşümde geri planda kalmaktadır. Gelişmiş ülkeler Endüstri 4.0 teknolojilerini üretim süreçlerine entegre ederek verimliliği artırırken, Türkiye’de hâlâ geleneksel yöntemlerin ağırlıkta olması, dijitalleşme oranının düşük kalmasına neden olmaktadır. Ancak Türkiye’nin nitelikli iş gücü, stratejik konumu ve zengin hammadde kaynakları gibi avantajları, doğru politikalar ve yatırımlarla sektörde küresel rekabet gücünü artırmak için önemli bir fırsat sunmaktadır.

1.3. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, mobilya imalatında robotik kollar ve otomatik montaj sistemlerinin üretim verimliliği, kalite kontrolü ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Sanayi 4.0 ilkeleri doğrultusunda artan otomasyon ihtiyacı, mobilya sektöründe dijital dönüşümü kaçınılmaz hale

getirmektedir. Bu bağlamda, robotik sistemlerin teknik altyapısı, uygulama alanları ve üretim süreçlerine katkıları güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu teknolojilerin uygulanmasında karşılaşılan teknik, ekonomik ve iş gücüne yönelik zorluklar ile geleceğe dair öngörüler tartışılmıştır. Çalışma, hem teknolojik gelişmeleri hem de sektörel ihtiyaçları göz önünde bulundurarak, mobilya üreticilerine stratejik ve pratik düzeyde yol gösterici olmayı amaçlamaktadır.

2. ROBOTİK VE OTOMATİK SİSTEMLERİN MOBİLYA İMALATINDAKİ YERİ VE ÖNEMİ

Robotik ve otomatik sistemler, mobilya üretiminde yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz; kalite kontrol, sürdürülebilirlik ve iş güvenliği gibi alanlarda da stratejik avantajlar sunar. Yapay zekâ ve makine öğrenimiyle desteklenen bu teknolojiler, geleceğin akıllı fabrikalarının temel taşları olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, bu teknolojilerin mobilya endüstrisindeki dönüştürücü etkilerini incelemek önem kazanmaktadır.

Mobilya üretimi, robotik sistemler, yapay zekâ uygulamaları ve ileri sensör teknolojileriyle birlikte kapsamlı bir dönüşüm sürecindedir. Özellikle işbirlikçi robotlar (cobotlar), dijital ikizler ve gelişmiş algılama sistemleri, otomasyonu derinleştirerek üretkenlik ve esnekliği artırmaktadır (Adebayo vd., 2024; Agarwal vd., 2024). Cobotlar, insanlarla koordineli çalışarak verimliliği ve ürün kalitesini yükseltirken, üretim süresini kısaltmaktadır. Bu süreçte yapay zekâ ile donatılmış robotlar, karar alma yetenekleri kazanmakta; ancak bu dönüşüm, iş gücünün yeni becerilerle desteklenmesini ve stratejik işgücü planlamasını gerekli kılmaktadır (Li vd., 2023).

Güncel robotik ve otomasyon eğilimleri, gelişmiş yapay zekâ ve makine öğrenimi uygulamalarıyla şekillenmektedir. Robotların çevrelerini algılayarak uyum sağlayabilmesi, insan-robot işbirliğini daha güvenli ve etkin hale getirmektedir. Özellikle montaj ve malzeme taşıma gibi alanlarda cobotlar, koordineli çalışmalarıyla verimliliği artırmaktadır. Bilgisayarlı gözü, derin pekiştirmeli öğrenme ve taklit öğrenme gibi teknikler sayesinde robotlar, nesneleri tanıma ve kavrama gibi karmaşık görevlerde yüksek hassasiyet göstermektedir. Bu gelişmeler; otomotiv ve gıda gibi hızlı üretim gerektiren sektörlerde hız, doğruluk ve sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve siber-fiziksel sistemlerin

entegrasyonuyla akıllı fabrikalar yaygınlaşmakta, üretim süreçleri gerçek zamanlı verilerle daha verimli şekilde yönetilmektedir. Böylece üretim, Endüstri 4.0 ve 5.0 vizyonları doğrultusunda daha rekabetçi ve akıllı hale gelmektedir (Arents ve Greitans, 2022; Kaur ve Sharma, 2025).

Bu teknolojiler, hem insan-robot işbirliğini güvenli hale getirir hem de gerçek zamanlı veri desteğiyle karar alma süreçlerini iyileştirerek ürün kalitesini artırır, üretim döngüsünü kısaltır (Arents ve Greitans, 2022; Kaur ve Sharma, 2025). Akademik araştırmaların desteklediği endüstriyel uygulamalar, ileri robotik teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlayarak inovasyonu teşvik etmektedir (Adebayo vd., 2024). Bununla birlikte, yeni teknolojilere uyum sağlayacak yetkinlikte bir iş gücü oluşturulması, sektörün dönüşümünde kritik rol oynamaktadır (Li vd., 2023).

Dijital ikiz teknolojisi, üretimin sanal bir kopyasını oluşturarak gerçek zamanlı izleme, tahmine dayalı bakım ve süreç optimizasyonu gibi uygulamalarla verimliliği artırmaktadır Robotik otomasyon, yüksek işlem gücü ve veri erişimiyle desteklenerek tahmine dayalı ve öğrenmeye açık sistemlerin üretime entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda işbirlikçi robotlar ve dijital ikizler öne çıkmaktadır. Cobotlar, operasyonel verimliliği ve iş güvenliğini artırırken; dijital ikizler, üretimi izleyip optimize ederek hataları önlemeye katkı sunar (Dassanayake vd., 2024; Rupenyan ve Balta, 2024). Yapay zekâ destekli makine görme sistemleri, nesne tanıma ve hassas görevlerde önemli avantajlar sunarak daha esnek ve ekonomik üretim yaklaşımlarını mümkün kılar. Ancak, insan-robot faaliyetlerinin dengelenmesi ve karmaşık programlama süreçleri hâlâ aşılması gereken teknik zorluklar arasında yer almaktadır (Dassanayake vd., 2024).

Düşük maliyetli sensörler ve Robot İşletim Sistemi (ROS) gibi yazılım altyapıları, entegrasyon kolaylığı ve sistemler arası uyumluluğu artırmaktadır (De San Bernabe vd., 2024). Bu sayede hem enerji tüketimi hem de atık miktarı azalarak sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlanmaktadır (Kaur ve Sharma, 2025).

Mobilya sektöründe robotik kolların kullanımı, Endüstri 4.0 ilkeleriyle uyumlu şekilde özelleştirme ve yüksek kaliteyi mümkün kılmaktadır. Robotic Woodcraft ve IKEAbot gibi projelerde, robotlar karmaşık montaj görevlerini başarıyla yerine getirmekte ve üretimde standardizasyon sağlamaktadır (Hornung vd., 2015; Knepper vd., 2013).

Robotik kolların ve arduino tabanlı akıllı sistemlerin mobilya üretimine sağladığı avantajlar şunlardır (Hornung vd., 2015; Murali vd., 2022):

- **Tasarım Esnekliği ve Özelleştirme:** Robotik sistemler, karmaşık ve özgün mobilya tasarımlarını yüksek hassasiyetle üretebilir; bu da estetik çeşitliliği ve müşteri odaklı çözümleri artırır.
- **Üretkenlik ve Hız:** Otomatik toplama, yerleştirme ve montaj gibi görevlerde insan müdahalesini azaltarak süreçleri hızlandırır, zaman ve iş gücü tasarrufu sağlar.
- **Hassasiyet ve Kalite Kontrol:** Gelişmiş hareket kontrol mekanizmaları ve görsel algı sistemleriyle donatılmış robotik yapılar, düşük hata oranıyla yüksek üretim kalitesi sağlar.
- **İş Güvenliği ve Ergonomi:** Tehlikeli veya zorlayıcı görevleri üstlenerek çalışan güvenliğini artırır, ergonomik riskleri azaltır.
- **Mobilite ve Alan Uyumu:** Çok yönlü hareket kabiliyeti sunan modüler taşıyıcı sistemler sayesinde, sınırlı üretim alanlarında dahi etkin ve esnek çalışma imkânı sağlar.
- **Uygun Maliyetli Dijitalleşme:** Düşük maliyetli mikrodenetleyiciler ve kablosuz iletişim modülleriyle geliştirilen sistemler, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için erişilebilir ve ölçeklenebilir otomasyon çözümleri sunar.
- **İnsan-Makine Bütünleşmesi:** Geleneksel zanaatkarlık bilgisini dijital sistemlerle buluşturarak hem üretim kalitesini artırır hem de iş gücünün niteliğini dönüştürür.
- **Eğitim ve Beceri Gelişimi:** Yeni nesil üreticilerin robotik teknolojilere hâkim olmasını sağlayarak sektörde dijital dönüşüme uyumlu iş gücü oluşturur.
- **Disiplinlerarası İnovasyon:** Tasarımcılar, mühendisler ve zanaatkarlar arasındaki işbirliğini teşvik ederek yenilikçi çözümlerin gelişmesine katkı sağlar.
- **Genişletilebilirlik ve Uyarlanabilirlik:** Sistemler, çizgi takibi, engel algılama gibi yeni özelliklerle geliştirilebilir; farklı üretim ihtiyaçlarına kolayca entegre edilebilir.

Bu teknolojiler, özellikle döşeme çerçevesi montajında geleneksel yöntemlere kıyasla daha az hata ve daha yüksek kalite sağlamıştır (Turbański vd., 2021).

Robotik sistemler, yalnızca üretimi değil kalite kontrol süreçlerini de dönüştürmektedir. Görüntü işleme teknolojileri ve robotik konveyör sistemleri, ürün kusurlarını yüksek doğrulukla tespit edebilmektedir. Örneğin, 2D görüş sistemleri %95 doğrulukla kusur tespiti yaparken; çok işlevli robotik kafalar, yapıştırıcı uygulaması gibi hassas görevleri başarıyla yürütmektedir (Alghamdi vd., 2017; Bélanger ve Collin, 2022). Altı eksenli robotlarla yapıştırma ve gravür kontrolleri otomatikleştirilerek hata oranı düşürülmüş ve süreç esnekliği artmıştır (Lee vd., 2018). Ayrıca yapay sinir ağları ile üretim süresi ve maliyetleri optimize edilmektedir (Azizi, 2020; Mineo vd., 2020; Mineo vd., 2019).

Robotik teknolojiler, üretim maliyetlerini düşürerek rekabet gücünü artırmaktadır. Özellikle yüksek işçilik maliyetine sahip ülkelerde robotlar, iş gücü uyum maliyetlerini azaltmakta ve ekonomik verimliliği artırmaktadır (Georg ve Guy, 2015; Marzwell ve Chen, 1991). Ekonomik uygulanabilirlik büyük ölçekli üretimlerde daha belirgin olsa da; düşük hata oranı, yüksek üretkenlik ve ergonomik avantajlar gibi uzun vadeli faydalar, yatırımın geri dönüşünü desteklemektedir (Gervasi vd., 2023; Kocsi ve Oláh, 2017). İnsan-robot işbirliği, hem fiziksel yükü azaltmakta hem de süreç kalitesini yükseltmektedir (Roach ve Montague, 1985).

Bu gelişmelere rağmen, bu sistemleri kullanabilecek nitelikte iş gücünün yetiştirilmesi ve siber güvenlik risklerinin yönetilmesi büyük önem taşımaktadır (Adebayo vd., 2024; Kaur ve Sharma, 2025). Tüm bu zorluklara karşın, robotik alanındaki ilerlemeler sayesinde mobilya üretiminde kalite, verimlilik ve inovasyon alanlarında kayda değer gelişmeler sağlanmaktadır (Agarwal vd., 2024; Dassanayake vd., 2024; Park, 2014).

3. TARTIŞMA

Bu çalışmada, mobilya üretiminde robotik sistemlerin kullanımının üretkenlik, kalite kontrol ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bulgular, robotik teknolojilerin sadece üretim verimliliğini artırmakla kalmadığını; aynı zamanda iş güvenliğini iyileştirdiğini, ürün kalitesini yükselttiğini ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı

sunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle, robotik sistemlerin entegrasyonu, mobilya sektörünü Endüstri 4.0 ilkeleri doğrultusunda yeniden yapılandırmakta ve dijital dönüşümün önemli bir parçası haline getirmektedir.

Özellikle işbirlikçi robotlar (cobotlar) ve dijital ikiz teknolojisinin yükselişi, üretim süreçlerinin esnekliğini ve öngörülebilirliğini artırarak hem büyük ölçekli işletmeler hem de KOBİ'ler için yeni fırsatlar sunmaktadır. Bu bulgu, Rupenyan ve Balta (2023) ile Dassanayake vd. (2024) tarafından da desteklenmekte; dijital ikizlerin, üretim hatalarını azaltmada ve bakım süreçlerini optimize etmede etkin olduğu vurgulanmaktadır. Benzer şekilde, yapay zekâ destekli görsel algı sistemlerinin kalite kontrol süreçlerini otomatikleştirmesi, üretimde hataları minimize etmeye yönelik umut verici uygulamalar sunmaktadır (Alghamdi vd., 2017; Lee vd., 2018).

Bununla birlikte, bu teknolojik ilerlemelerin getirdiği bazı sınırlılıklar ve zorluklar da göz ardı edilmemelidir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, nitelikli iş gücü eksikliği, teknolojik adaptasyon sürecini yavaşlatan temel etkenlerden biridir. Li vd. (2023) tarafından da belirtildiği gibi, robotik sistemlerin etkin kullanımı, yalnızca teknik yatırım değil, aynı zamanda stratejik iş gücü planlamasını da gerektirmektedir. Ayrıca insan-robot etkileşiminde oluşabilecek bilişsel yük ve programlama süreçlerindeki karmaşıklık, bazı uygulamalarda performans düşüşüne neden olabilmektedir.

Ek olarak, ekonomik uygulanabilirlik konusu, küçük ölçekli üreticiler için kritik bir değerlendirme noktasıdır. Graetz & Michaels (2015) ve Gervasi vd. (2023), robotik yatırımların büyük ölçekli üretim ortamlarında daha çabuk geri dönüş sağladığını belirtirken, KOBİ'ler için bu dönüşümün daha fazla metodolojik ve mali destek gerektirdiğini vurgulamaktadır.

Son olarak, siber güvenlik riskleri ve sistem entegrasyonundaki karmaşıklıklar, bu teknolojilerin yaygınlaşmasında dikkate alınması gereken bir diğer boyuttur. Özellikle üretim verilerinin gerçek zamanlı takibi ve dış sistemlerle entegrasyonu, hem güvenlik açıkları hem de veri bütünlüğü açısından yeni sorumluluklar doğurmaktadır (Kaur ve Sharma, 2025).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, mobilya imalatında robotik kollar ve otomatik sistemlerin entegrasyonunun üretim verimliliği, kalite kontrolü ve sürdürülebilirlik açısından sağladığı katkıları çok yönlü biçimde ortaya koymuştur. Yapay zekâ

destekli işbirlikçi robotlar, dijital ikiz teknolojileri ve görsel algı sistemleri; üretim süreçlerinde esneklik, doğruluk ve hız sağlarken, insan-robot işbirliği yoluyla iş güvenliğini artırmakta ve üretim maliyetlerini azaltmaktadır. Özellikle karmaşık montaj görevlerinin standartlaştırılması, kalite kontrolün otomasyonu ve düşük hata oranları, robotik teknolojilerin mobilya üretimindeki etkinliğini ortaya koymaktadır. Bu teknolojiler, geleneksel zanaatkârlıkla dijital üretimi birleştirerek hem üretim kalitesini hem de rekabet gücünü artırmakta; aynı zamanda kaynak verimliliği ve atık azaltımı ile çevresel sürdürülebilirliğe hizmet etmektedir. Bu bağlamda, robotik sistemler sadece teknik bir yenilik değil, mobilya sektörünün dijital geleceğini şekillendiren stratejik bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Mobilya sektöründe robotik ve otomatik sistemlerin yaygınlaşması için hem teknolojik hem de yapısal düzeyde hedefe yönelik politikaların geliştirilmesi gereklidir. İlk olarak, Türkiye'deki mobilya üreticilerinin büyük çoğunluğunu oluşturan KOBİ'lerin dijital dönüşüme erişimini kolaylaştırmak için düşük maliyetli robotik çözümler, modüler sistemler ve açık kaynak yazılım altyapılarının desteklenmesi önem arz etmektedir. Ayrıca sektöre özel yatırım teşvikleri ve hibe programları, firmaların üretim hatlarına cobot, dijital ikiz ve makine görme sistemlerini entegre etmesini kolaylaştıracaktır. Eğitim politikalarının da sektörel odaklı biçimde şekillendirilmesi, mobilya tasarımı ve üretiminde görev alan teknik personelin robotik sistemler, veri analizi ve otomasyon yazılımları konusunda yetkinleşmesini sağlamalıdır. Mobilya üretimi çoğu zaman özelleştirilmiş, müşteri odaklı ve estetik kaygıları yüksek üretim süreçlerini içerdiğinden; bu sistemlerin yaratıcı tasarım süreçleriyle bütünleşmesini sağlayacak disiplinlerarası eğitim modelleri teşvik edilmelidir. Son olarak, dijitalleşmenin hız kazanmasıyla birlikte artan veri paylaşımı ve sistem entegrasyonları, sektörde siber güvenlik yatırımlarının da önceliklendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Türkiye mobilya sektörü, sahip olduğu üretim gücünü dijital teknolojilerle birleştirerek küresel rekabet gücünü artırabilir; ancak bu dönüşüm, bütüncül bir strateji ve sektörel farkındalıkla yönetilmelidir.

KAYNAKÇA

- Adebayo, R. A., Obiuto, N. C., Festus-Ikhuoria, I. C. & Olajiga, O. K. (2024). Robotics in manufacturing: A review of advances in automation and workforce implications. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*, 4(2), 632-638.
- Agarwal, N., Yadav, U., Singh, G., Singh, R. K., Pachorkar, P. & Gupta, D. (2024). A Critical Review on the Future of Robotics in Manufacturing. Paper presented at the 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES).
- Alghamdi, B., Lee, D., Schaeffer, P. & Stuart, J. (2017). An Integrated Robotic System: 2D-Vision based Inspection Robot with Automated PLC Conveyor System. Paper presented at the Proceedings of the 4th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR'17), Toronto, ON, Canada.
- Antal, M. R., Domljan, D. & Horvath, P. G. (2017). Functionality and Aesthetics of Furniture - Numerical Expression of Subjective Value. *Drvna Industrija*, 67, 323 - 332 , publication_type = article.
- Arents, J. & Greitans, M. (2022). Smart industrial robot control trends, challenges and opportunities within manufacturing. *Applied Sciences*, 12(2), 937.
- Atwee, T., Swidan, A. & Zahra, N. (2023). An Overview Study on Laser Technology and Conventional Technology's Effect on Wood and Sheet Metal Manufacturing for The Furniture Industry. *International Design Journal*, 13(2), 287-299.
- Azizi, A. (2020). Applications of artificial intelligence techniques to enhance sustainability of industry 4.0: design of an artificial neural network model as dynamic behavior optimizer of robotic arms. *Complexity*, 2020(1), 8564140.
- Bambura, R., Sujová, E. & Čierna, H. (2020). Utilizing computer simulation to optimize furniture production system. *BioResources*, 15(3), 6752-6765.
- Bélanger, L. & Collin, J.-p. (2022). Robotic systems and methods for assembling furniture. In: Google Patents.
- Cervený, L., Sloup, R. & Cervená, T. (2022). The potential of smart factories and innovative Industry 4.0 technologies—A case study of different-

- sized companies in the furniture Industry in Central Europe. *Forests*, 13(12), 2171.
- Cervený, L., Sloup, R., Cervená, T., Riedl, M. & Palatová, P. (2022). Industry 4.0 as an opportunity and challenge for the furniture industry—a case study. *Sustainability*, 14(20), 13325.
- Dassanayake, D., Buddhika, M., Maduranga, I., Seneviratne, J. & Kumarage, W. (2024). Revolutionizing Manufacturing: The Role of Robotics in the 21st Century. *Journal of Desk Research Review and Analysis*, 2(1).
- De San Bernabe, A., Srinivasan, L., Kendrick, C., Bisma, M., Sheila, S., Fei, X. & Shaowei, F. (2024). Chapter Two - Robots in manufacturing: Current technology trends. In D. P. Chandrakant ve C. Chun-Hsien (Eds.), *Digital Manufacturing* (pp. 39-83): Elsevier.
- Dictionary, C. (Ed.) (2025). Cambridge University Press.
- Efe, H. (2017). Mobilya Tasarımında Dikkate Alınacak Temel Faktörler ve Temel Tasarım İlkelerinin Uygulanması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(3), 1249-1267.
- Efimova, T. V., Ishchenko, T. L. & Pikalov, L. D. (2020). MODERN FURNITURE MARKET TRENDS 2019. Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice(8), 4.
- Frischer, R., Krejcar, O., Maresova, P., Fadeyi, O., Selamat, A., Kuca, K., Tomsone, S., Teixeira, J. P., Madureira, J. & Melero, F. J. (2020). Commercial ICT smart solutions for the elderly: State of the art and future challenges in the smart furniture sector. *Electronics*, 9(1), 149.
- Georg, G. & Guy, M. (2015). Robots at Work. *Social Science Research Network*, publication_type = article.
- Gervasi, R., Capponi, M., Mastrogiamomo, L. & Franceschini, F. (2023). Manual assembly and Human–Robot Collaboration in repetitive assembly processes: a structured comparison based on human-centered performances. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(3), 1213-1231.
- Gūtmane, I., Kukle, S., Kalniņš, J., Zotova, I. & Ķīsis, A. (2022). An Example of the Use of Traditional Woodworking Hand Tools in Product Design Studies at the Institute of Design Technologies of the Faculty of Materials Science and Applied Chemistry of Riga Technical University.

- History of Engineering Sciences and Institutions of Higher Education, 6, 117-141.
- Hornung, P., Braumann, J., Krobath, R., Brell-Çokcan, S. & Glaeser, G. (2015). Robotic woodcraft creating tools for digital design and fabrication. Paper presented at the Real-Time: Conference Proceedings of the Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe.
- Ishmakhova, L., Pushkar, T., Emanova, J. & Yao, M. (2018). Alternative materials in the art of furniture. Вісник Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв(1).
- İSO. (2023). Sektör Raporları: Mobilya İmalatı Sanayi. Erişim adresi: https://www.iso.org.tr/Sites/1/upload/files/mobilya_sanayi_sektor_rapo ru_01-12116.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Kaur, N. & Sharma, A. (2025). Robotics and Automation in Manufacturing Processes. In Intelligent Manufacturing (pp. 97-109): CRC Press.
- Kılıç, O. (2016). Role of digital production techniques in furniture manufacturing. Mugla Journal of Science and Technology, 2(2), 72-76.
- Knepper, R. A., Layton, T., Romanishin, J. & Rus, D. (2013). Ikeabot: An autonomous multi-robot coordinated furniture assembly system. Paper presented at the 2013 IEEE International conference on robotics and automation.
- Kocsi, B. & Oláh, J. (2017). Potential connections of unique manufacturing and industry 4.0. LogForum, 13(4).
- Lee, J.-D., Li, W.-C., Shen, J.-H. & Chuang, C.-W. (2018). Multi-robotic arms automated production line. Paper presented at the 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR).
- Li, M., Belzile, B., Imran, A., Birglen, L., Beltrame, G. & St-Onge, D. (2023). From assistive devices to manufacturing cobot swarms. Paper presented at the 2023 32nd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN).
- Liu, J., Liu, Z., Yang, Q., Osmani, M. & Demian, P. (2022). A conceptual blockchain enhanced information model of product service systems framework for sustainable furniture. Buildings, 13(1), 85.
- Lü, J. & Shanat, M. (2024). Aesthetic Value of Furniture Design for the Elderly: Cultural Identity and Era Evolution. International journal of religion, 5, 1695 - 1707 , publication_type = article.

- Marzwell, N. I. & Chen, A. Y. (1991). A cost-effective intelligent robotic system with dual-arm dexterous coordination and real-time vision. Paper presented at the NASA Conference Publication.
- Min, G. (2024). Analyze the physical interaction between the user and the furniture design to optimize comfort and functionality. *Molecular & cellular biomechanics*, 21, 457 , publication_type = article.
- Mineo, C., Vasilev, M., Cowan, B., MacLeod, C., Pierce, S. G., Wong, C., Yang, E., Fuentes, R. & Cross, E. (2020). Enabling robotic adaptive behaviour capabilities for new industry 4.0 automated quality inspection paradigms. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 62(6), 338-344.
- Mineo, C., Wong, C., Vasilev, M., Cowan, B., MacLeod, C. N., Pierce, S. G. & Yang, E. (2019). Interfacing toolbox for robotic arms with real-time adaptive behavior capabilities.
- Murali, S., Ruchika, R., Lalit, S. M., Kundan, H., Adithya, T. G., Pavithra, G., Sindhu Sree, M. & Manjunath, T. C. (2022). Smart robotic arm development (pick & place robo) for domestic applications – A new concept in working of automated machines. *International journal of engineering technology and management sciences*, 6, 226 - 229 , publication_type = article.
- Namicev, P. & Petrovski, M. (2019). Wood as a primary selection of material for furniture production. *Journal of process management and new technologies*, 7(4).
- Namicev, P. & Tasevska, V. (2019). Specifications of eco-materials and their influence in the design of modern furniture. *Journal of process management and new technologies*, 7(1).
- Özel, Y. & Ürük, Z. F. (2021). Mobilya-biçim-tercih. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(23), 589-600.
- Park, F. (2014). Robotics and manufacturing. Paper presented at the 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV).
- Pedroso, G. (2019). Furniture as a Piece of Design and as a Piece of Decorative Arts. In *Perspective on Design: Research, Education and Practice* (pp. 341-356): Springer.

- Popescu, D., Dragomir, M., Popescu, S. & Neamțu, C. (2018). From smart products to smart manufacturing in emerging economies: challenges and insights from the furniture industry. Paper presented at the 24th International Conference on Production Research.
- Puspita, A. A., Sachari, A. & Sriwarno, A. B. (2016). Indonesia wooden furniture: transition from the socio-cultural value leading to the ecological value. *Journal of Arts and Humanities*, 5(7), 01-14.
- Ratnasingam, J., Chin, K., Latib, H., Subramaniam, H. & Khoo, A. (2018). Innovation in the Malaysian furniture industry: Drivers and challenges. *BioResources*, 13(3), 5254-5270.
- Roach, J. & Montague, P. (1985). Coordinating Multiple Robot Arms to Increase Productivity. *Computer-Based Automation*, 245-265.
- Rupenyan, A. & Balta, E. C. (2024). Robotics and manufacturing automation. The impact of automatic control research on industrial innovation: enabling a sustainable future, 169-197.
- Sann, M. & Siegfried, P. (2021). The opportunities and threats of the omnichannel in terms of the logistical challenges of the furniture industry. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Economics*, 2(215), 47-55.
- Sujova, A., Marcinekova, K. & Hittmar, S. (2017). Sustainable optimization of manufacturing process effectiveness in furniture production. *Sustainability*, 9(6), 923.
- Sulistiyono, I. B. (2017). Plywood Furniture Designs (A Study on Shapes, Functions, Materials, Construction Techniques, and Production Processes). *Bandung Creative Movement (BCM)*, 4(1).
- Turbański, W., Matwiej, Ł., Wiaderek, K. & Sydor, M. (2021). Comparative analysis of the manual and robotic upholstery frame assembly processes. Study based on many years of research. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Velayudham, A. (2007). Modern manufacturing processes: a review. *Journal on Design and Manufacturing Technologies*, 1(1), 30-40.
- Xiong, X.-q., Guo, W.-j., Fang, L., Zhang, M., Wu, Z.-h., Lu, R. & Miyakoshi, T. (2017). Current state and development trend of Chinese furniture industry. *Journal of Wood Science*, 63, 433-444.

Yinqiu, H. (2019). Analysis of Modern Furniture Design Based on Traditional Culture Perspective.

Zhi-hui, W. U. (2009). Component factors and design philosophy of furniture's cultural characteristics. Hundred Schools in Arts

BÖLÜM 5

BİTKİSEL KAYNAKLI FİTOSTEROLLERİN ELDE EDİLMESİ VE FONKSİYONEL GIDA AMAÇLI KULLANILMASI

Arş. Gör. Muhammed Talha AKBULUT¹

Prof. Dr. Ümit GEÇGEL²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17974470>

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. talhaakbulut@nku.edu.tr, orcid id: 0009-0008-0513-2981

² Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. ugecgel@nku.edu.tr, orcid id: 0000-0002-7092-5899

1. GİRİŞ

Kolesterol, steroller olarak bilinen lipit sınıfına ait organik bir bileşik olup canlı hücre zarlarının yapısal bütünlüğünün korunmasında temel rol oynar (Song vd., 2021). Hayvan hücrelerinde baskın olarak kolesterol bulunurken, bitkilerde benzer yapısal özellikler gösteren farklı sterol bileşikler yer almakta ve bu bileşikler genel olarak fitosteroller olarak adlandırılmaktadır (Ogbe vd., 2015). Hücre zarlarının akışkanlık ve geçirgenlik özelliklerinin düzenlenmesi, organizmanın yaşamsal fonksiyonlarının sürdürülebilmesi açısından kolesterolün varlığını zorunlu kılar. Ayrıca kolesterol, vücutta steroid hormonlar, safra asitleri ve D vitamini sentezi için öncü bir molekül olarak görev yapar (Warren vd., 2021). Kimyasal olarak kolesterole oldukça benzeyen fitosteroller, yalnızca bitkisel dokularda sentezlenir ve özellikle tohum yağlarında, tahıllarda, kuruyemişlerde ve baklagillerde doğal olarak bulunurlar.

Fitosteroller, bitkisel steroller ve stanoller olmak üzere iki temel grupta sınıflandırılan fitosteroidlerdir. Diyetle en sık alınan üç temel fitosterol türü kampesterol (24α -metilkolesterol), β -sitosterol (24α -etilkolesterol) ve stigmasterol'dür ($\Delta 22$, 24α -etilkolesterol). Buna karşılık, stanoller grubunda kampestanol ve sitostanol en yaygın türler olarak tanımlanmıştır (Nattagh-Eshtivani vd., 2021).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, fitosterollerin plazma kolesterol seviyelerini düşürme potansiyeli sayesinde kalp-damar hastalıklarının önlenmesinde önemli bir rol üstlenebileceğini göstermektedir. Fitosteroller, bağırsaklarda kolesterolün emilimini engelleyerek vücuda alınan kolesterol miktarını sınırlar ve böylece LDL-kolesterol düzeylerinin azalmasına katkı sağlarlar (Ogbe vd., 2015). Bu özellikleriyle fitosteroller, sağlıklı beslenme alışkanlıklarını destekleyen fonksiyonel bileşenler arasında değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, bu bileşiklerin düşük çözünürlükleri ve sınırlı biyoyararlanımları, doğrudan gıda formülasyonlarına eklenmelerinde bazı teknolojik zorluklar doğurmaktadır. Bu nedenle, günümüzde fitosterollerin elde edilmesi, saflaştırılması ve fonksiyonel gıdalarda etkin biçimde kullanılmasına yönelik çalışmalar giderek artmaktadır.

2. Fitosterollerin Kimyasal Yapısı ve Özellikleri

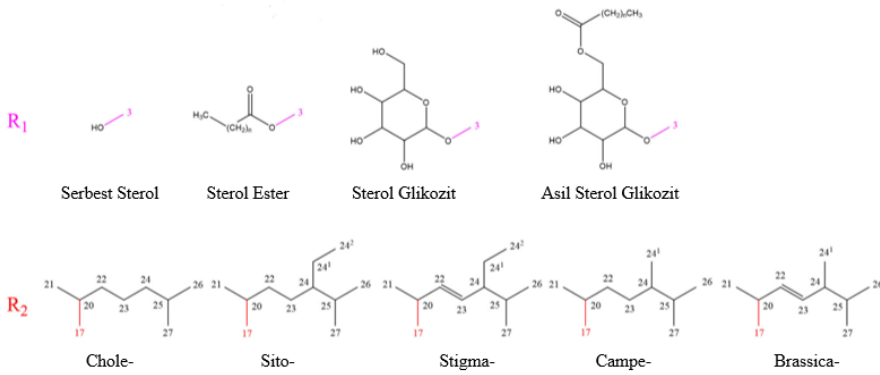
Fitosteroller, bitkisel kaynaklı doğal bileşikler olup, kimyasal yapı ve fizyolojik işlev bakımından kolesterole benzerlik gösteren, ancak yan zincirleri ve halka doygunluk dereceleri açısından farklılıklar içeren sterol türevleridir. Bu bileşikler doğada serbest formda bulunabildikleri gibi, ester veya glikozid bağlarıyla kovalent şekilde başka moleküllere bağlı olarak da yer alabilirler. Fitosterollerin yapısal çeşitliliği, onların biyolojik aktiviteleriyle yakından ilişkilidir (Shen vd., 2024).

Kimyasal olarak, perhidrosiklopentano-fenantren iskeletine sahip triterpen türevleridir. Bu yapı, C-3 pozisyonunda bir hidroksil grubunu, C-17 pozisyonunda 8–10 karbon atomundan oluşan bir yan zinciri ve genellikle C-5 pozisyonunda bir çift bağı içerir (Mohammadi vd., 2020). Fitosteroller, yapısal olarak kolesterole oldukça benzer olmalarına rağmen, genellikle C-24 pozisyonunda bir metil veya etil grubu taşımaları ve bazı yaygın türlerinde C-22 pozisyonunda doymamış bir çift bağı bulunması açısından farklılık gösterirler (Comunian ve Favaro-Trindade, 2016).

Fitosteroller doğada çeşitli kimyasal formlarda bulunabilirler: serbest steroller, sterol esterleri, sterol glikozitleri ve asil sterol glikozitleri (Şekil 1). Bu formlar hem çözünürlük hem de biyoyararlanım üzerinde önemli etkiye sahiptir. C-4 pozisyonundaki metil grubu sayısına göre fitosteroller üç ana sınıfa ayrılır (Feng vd., 2022):

- 4-demetil steroller (örneğin β -sitosterol, stigmasterol, kampesterol ve brassikasterol),
- 4 α -monometil steroller (örneğin gramisterol, sitrostadienol ve lofenol)
- 4,4-dimetil steroller (örneğin sikloartanol, sikloartenol ve 2,4-metilensikloartanol).

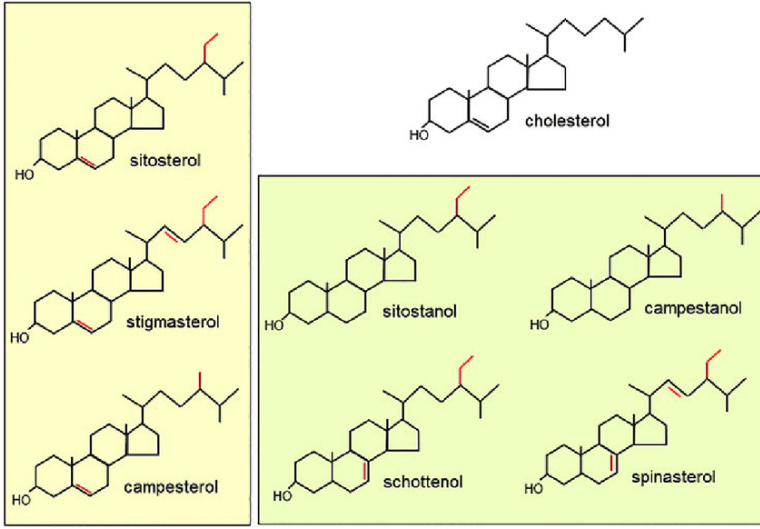
Fitosterollerin yapısında bulunan çok halkalı steroid çekirdeği ve C-17 pozisyonundaki uzun yan zincir, bileşiklerin suda düşük çözünürlüğüne yol açarken; C-3 pozisyonundaki hidroksil grubu ise yağda çözünürlüğü sınırlamaktadır. Ayrıca yüksek erime noktaları, gıda sistemlerinde doğrudan kullanımını güçleştirmektedir. Bu nedenle, fitosterollerin gıdalarda kullanımını artırmak amacıyla çözünürlük, dağılabilirlik ve biyoyararlanımlarının çeşitli kimyasal ve fiziksel yöntemlerle geliştirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 1. Fitosterol ve türevlerinin kimyasal yapıları (Feng vd., 2022)

Fitosteroller fiziksel olarak genellikle beyaz-açık sarı renkli, kokusuz ve kristal yapıda katı bileşiklerdir. Moleküler yapılarında bulunan hidroksil grubu nedeniyle bir miktar polar karakter gösterirken, çok halkalı steroid çekirdeği ve uzun yan zinciri genel olarak hidrofobik karaktere yol açar. Bu nedenle fitosteroller suda hemen hemen çözünmez. Buna karşın hekzan, etil asetat veya izopropanol gibi organik çözücülerde çözünabilirlik gösterirler (FAO/WHO, 2008). Erime noktaları yüksek olup, ortam koşullarında yaklaşık 130-150 °C civarında tespit edilmiştir; örneğin bazı ticari fitosterol örneklerinde 138-145 °C arasında erime geçişleri gözlenmiştir (Liu vd., 2021; Amiri vd., 2024). Kimyasal açıdan, yapısında bulunan doymamış bağlar ve steroid çekirdeği nedeniyle oksidasyona karşı duyarlıdırlar. Yüksek sıcaklık, ışık ve oksijen mevcudiyetinde fitosterol oksit türevleri oluşabilir ve bu durum hem stabiliteyi hem de biyoyararlanımı olumsuz yönde etkiler (Feng vd., 2022). Bu bağlamda, gıda uygulamalarında fitosterollerin etkin kullanımını sağlamak için oksidatif stabilitenin korunması, çözünürlük ve dağılılabilirlik özelliklerinin iyileştirilmesi kritik öneme sahiptir.

Bitkisel steroller kolesterol ile karşılaştırıldığında yalnızca yan zincir yapısındaki küçük farklarla ayrılırlar. Buna karşın, stanoller olarak adlandırılan doymuş steroller, B halkasındaki çift bağın yokluğu ile karakterizedir. Örneğin, en yaygın bitkisel sterol olan β -sitosterolün doyunlaştırılmasıyla sitostanol, kampesterolün doyunlaştırılmasıyla ise kampestanol oluşur (Şekil 2) (Thompson ve Grundy, 2005).



Şekil 2. Fitosterol ve fitostanollerin kimyasal yapıları ve karşılaştırmaları (Catani vd., 2018)

3. Fitosterol Kaynakları

Fitosteroller açısından en zengin kaynakların bitkisel yağlar olduğu; bunu sırasıyla kuruyemişler ve tohumlar, tam tahıllar, baharatlar, baklagiller, sebzeler ve meyvelerin izlediği bildirilmiştir. Rafine tahıllar, işleme sırasında kepek ve embriyo kısımlarının uzaklaştırılması nedeniyle tam tahıllara kıyasla daha düşük fitosterol içeriğine sahiptir. Bitkisel yağlar doğal olarak yüksek miktarda fitosterol içeriyor olsa da bu yağların tipik tüketim miktarları (yaklaşık 14 g/öğün) kuruyemişler (30–33 g), tahıl ürünleri (30–140 g), sebzeler (85 g) ve meyveler (90–220 g) gibi diğer gıda gruplarına göre daha düşüktür (Racette vd., 2015). Dolayısıyla gıda seçimleri ve porsiyon büyüklükleri, günlük diyetle alınan toplam fitosterol miktarını doğrudan etkilemektedir.

Son yıllarda bazı sebzelerdeki fitosterol düzeyleri belirlenmiş ve yenilebilir kısımlarda 1,1–53,7 mg/100 g arasında değişen değerler rapor edilmiştir. En yüksek konsantrasyonların bezelye, karnabahar, brokoli ve romana marulunda bulunduğu bildirilmiştir. Meyvelerdeki fitosterol miktarları ise 1,6–32,6 mg/100 g arasında değişmekte olup, en yüksek değerler portakal, mandalina ve mango gibi meyvelerde tespit edilmiştir. Kuruyemişlerde fitosterol içeriği 95 ile 280 mg/100 g arasında değişmektedir. Meyve ve sebzelerde fitosterol miktarı; olgunlaşma süreci ve hasat sonrası

uygulamalardan da önemli ölçüde etkilenmektedir (Bacchetti vd., 2011). Bitkisel yağlarda ise, meyve veya tohumlardan yağ elde etmede uygulanan teknolojik işlemler fitosterol düzeylerini etkilemektedir. Araştırmacılar, yağların rafinasyonu sırasında fitosterol oksidasyonunun meydana geldiğini bildirmişlerdir (Ferrari vd., 1997; Awad vd., 2000). Fitostanoller ve bunların esterleri başlıca mısır, buğday, pirinç ve tritikale gibi tahıllarda bulunmaktadır. Bitkisel yağ, meyveler, sebzeler, tahıl ve tahıl ürünleri ve baklagillerin toplam fitosterol içerikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Bitkisel yağ, meyveler, sebzeler, tahıl ve tahıl ürünleri ile baklagillerin toplam fitosterol içerikleri (TFS) (Bacchetti vd., 2011).

Bitkisel Yağlar	TFS (mg/100 g)	Meyveler	TFS (mg/100 g)
Pirinç Kepeği Yağı	1.055	Çarkıfelek	44
Buğday Rüşeymi Y.	919	Portakal	24
Mısır Yağı	909	İncir	22
Kolza Yağı	668	Greyfurt	18
Ayçiçek Yağı	411	Limon	18
Keten Tohumu Yağı	338	Ananas	17
Pamuk Yağı	327	Mandalina	16
Soya Fasulyesi Yağı	320	Muz	16
Yer Fıstığı Yağı	258	Şeftali	15
Margarin	217	Elma	13
Zeytin Yağı	154	Armut	12
Hindistan Cevizi Y.	91	Kiraz	12
Palm Yağı	39	Kivi	9
		Kavun	2
		Karpuz	1
Tahıl ve Ürünleri	TFS (mg/100 g)	Sebzeler	TFS (mg/100 g)
Buğday Rüşeymi	344	Siyah Zeytin	50
Buğday Kepeği	200	Brüksel Lahanası	43
Karabuğday Unu	99	Karnabahar	40
Tam Buğday Ekmeği	86	Brokoli	39
Çavdar Unu	86	Yeşil Zeytin	35
Buğday	69	Kereviz	17
Tam Buğday Unu	70	Havuç	16
Çavdar	69	Lahana	11
Mısır Unu	52	Rezene	10
Beyaz Ekmek	44	Tatlı Patates	10
Pirinç	30	Soğan	8

Buğday Unu	28	Pırasa	8
Pirinç Unu	23	Yeşil Biber	7
		Domates	5
		Patates	4
Baklagiller	TFS (mg/100 g)		
Bezelye	135		
Barbunya	127		
Bakla	124		

4. Fitosterollerin Teknolojik Eldesi

Bitkisel kaynaklı çözünür metabolitlerin ayrıştırılması, uygun çözücüler kullanılarak gerçekleştirilen ekstraksiyon teknikleriyle mümkündür. Fitosterollerin izolasyonu ise, bulunduğu matriksin türüne ve fitosterollerin formuna (serbest, esterleşmiş veya glikozillenmiş) bağlı olarak değişmektedir. Her ekstraksiyon yöntemi için uygun koşulların belirlenmesi, bitkisel kaynaktan optimum ekstrakt veriminin elde edilmesi açısından önemlidir. Elde edilen ekstraktın kalitesi; bitkisel materyalin özellikleri, kullanılan çözücü, uygulanan ekstraksiyon prosedürü ve diğer işlem parametrelerinden önemli ölçüde etkilenir. Bu nedenle, ekstraksiyon sürecinde tüm parametreler optimize edilerek hedef bileşiğin yüksek miktarda ve yüksek saflıkta elde edilmesi amaçlanır (Uddin vd., 2018). Ekstraksiyondaki temel amaçlar:

- Bitkisel matrikslerden biyolojik olarak aktif bileşiklerin elde edilmesi,
- Hedef bileşiklerin konsantrasyonunu artırarak biyolojik analizlerin duyarlılığını yükseltmek,
- Analitik yöntemlerin seçiciliğini artırmak,
- Biyolojik olarak aktif bileşiklerin tespit ve ayırma için daha uygun forma dönüştürmek,

Örnek matriksindeki değişimlerden bağımsız, sağlam ve tekrarlanabilir bir yöntem geliştirmektir (Smith, 2013).

4.1. Sabunlaşma

Sabunlaşma işlemi, genellikle toplam ve bireysel fitosterollerin analizini kolaylaştıran yoğunlaştırılmış bir sterol fraksiyonu sağlar. Bitkisel matrislerde steroller, serbest formda olduğu kadar ester formunda da bulunabilir. Bu sterol

esterlerinin serbest sterollere dönüştürülmesi gerekir; bu bileşikler sabunlaşmayan fraksiyonu oluşturur. Esterlerin hidrolizi iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Birincisi bitkisel matriksin su ile yüksek sıcaklık (200–260°C) ve basınç (1.5–50 MPa) altında ısıtılması veya sodyum ya da potasyum hidroksitle 90–120°C arasında karıştırılarak ısıtılmasıdır. İkinci yöntem ise hidroliz ve sabunlaşmanın aynı anda gerçekleşmesi avantajını sunar (Rohr vd., 2005).

Alkollü potasyum hidroksit ile sabunlaşma, oda sıcaklığında veya ısıtma yoluyla gerçekleştirilebilir. Oda sıcaklığında yapılan uygulamada, lipid ekstraktı 1 M alkollü potasyum hidroksit ile karıştırılarak bir gece boyunca sabunlaştırılır. Sıcak sabunlaşmada ise lipid ekstraktları alkollü potasyum hidroksit ile ısıtılır. Analiz doğruluğunu artırmak için betulin, kolestan, 5 α -kolestan-3 β -ol ve 5 β -kolestan-3 α -ol gibi çeşitli iç standartlar kullanılmaktadır (Uddin vd., 2018). Bu iç standartlar, cihaz kaynaklı hataları ve deneysel değişkenleri en aza indirir. Sabunlaşma sonrasında sabunlaşmayan madde ayrılır ve kromatografik yöntemlerle analiz edilir. Bu fraksiyon, dietil eter, petrol eteri, n-heksan veya heptan gibi organik çözücülerle çoklu ekstraksiyon yoluyla elde edilir ve çözücüler düşük sıcaklıkta uzaklaştırılır.

4.2. Soxhlet Ekstraksiyonu

Soxhlet ekstraksiyonunda, bitkisel örnekler özel bir ekstraksiyon kartuşu içerisine yerleştirilir ve bu kartuş, seçilen çözücüyle doldurulmuş bir damıtma balonuna koyulur. Çözücü buharlaştıktan sonra yoğunlaşarak kartuş içindeki örnek üzerinden geçer ve çözünmüş bileşenleri taşır. Çözücü seviyesi belirli bir yüksekliğe ulaştığında, sifon etkisiyle çözelti tekrar balona aktarılır. Böylece, çözücü döngüsel biçimde sürekli olarak yenilenir ve hedef bileşiklerin maksimum verimle ekstraksiyonu sağlanır (Wang ve Weller, 2006).

Ekstraksiyon verimi ve elde edilen fraksiyonun bileşimi, kullanılan çözücünün tipiyle yakından ilişkilidir. Soxhlet yönteminde hedef bileşenlerin çözünürlüğüne uygun çözücü seçimi oldukça önemlidir. Fitosterol ekstraksiyonunda en sık kullanılan çözücüler n-heksan, petrol eteri, etanol ve metilen klorürdür. Her ne kadar soxhlet yöntemi yüksek ekstraksiyon verimi sunsa da, uzun işlem süresi ve büyük miktarda organik çözücü kullanımı nedeniyle hem çevresel, hem de sağlık açısından riskler taşımaktadır. Bu

nedenle, günümüzde soxhlet ekstraksiyonunun yerini daha hızlı, enerji tasarruflu ve çevre dostu ekstraksiyon teknikleri almaya başlamıştır.

4.3. Maserasyon

Maserasyon, fitosterollerin elde edilmesinde kullanılan basit ve düşük maliyetli bir ekstraksiyon yöntemidir. Uygun çözücüler, öğütülmüş bitki materyaline kapalı bir kap içerisinde, oda sıcaklığında eklenir. Karışımın ara sıra karıştırılması, ekstraksiyon hızını artırabilir. Ekstraksiyon işlemi, bitki materyali ile çözelti arasındaki derişim dengesi sağlanana kadar devam eder. İşlem tamamlandıktan sonra, sıvı kısım bitki artıklarından (mark) dekantasyon yoluyla ayrılır. Mark içerisindeki kalan özütü geri kazanmak için presleme yapılır. Elde edilen sıvı özüt, safsızlıkların giderilmesi amacıyla süzülür. Eğer bitki parçacıkları çok küçükse, süzme işlemi yerine santrifüj uygulanabilir. Ekstraksiyonun tam gerçekleşmesi için, mark taze çözücüyle birkaç kez yeniden işleme tabi tutulabilir (Seidel, 2012). Ancak maserasyon yöntemi uzun zaman alır; tam bir ekstraksiyonun sağlanması saatler hatta haftalar sürebilir. Ayrıca bu yöntem, oda sıcaklığında düşük çözünürlüğe sahip bileşiklerin ekstraksiyonunda yeterince verimli değildir.

4.4. Fitosterollerin Eldesinde Yenilikçi Yöntemler

4.4.1. Mikrodalga Destekli Ekstraksiyon (MDE)

MDE, bitkisel kaynaklardan biyoaktif bileşikler elde etmek için kullanılan basit ve maliyet açısından avantajlı bir yöntemdir. Mikrodalgalar, 300 MHz–300 GHz frekans aralığında çalışan ve 1 cm - 1 m dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalardır. Elektrik ve manyetik alanların birbirine dik olarak ilerlediği bu dalgalar, bitki materyalindeki bileşenler tarafından iyonik iletkenlik ve dipol rotasyon mekanizmaları ile ısıya dönüştürülür: (Jain vd., 2009).

Mikrodalga ışıınımı çözücü üzerinden geçerek doğrudan katı örneğe ulaşır; çözücü tarafından emilmediği için, katı materyalin içindeki nem çok hızlı şekilde ısınır. Bu ani ısınma, suyun buharlaşmasına ve yüksek buhar basıncı oluşmasına yol açar. Oluşan basınç, hücre duvarlarında yırtılmaya neden olur ve hedef bileşikler çözücüye geçer (Gupta vd., 2012). MDE üç temel aşamadan oluşur. Artan basınç ve sıcaklık altında hedef bileşiklerin bitki matriksinden ayrılması, çözücünün matrikse difüzyonu ve hedef bileşiklerin çözücüye salınması. Ayrıca MDE'nin klasik ekstraksiyon tekniklerine kıyasla

birçok avantajı vardır. Hedef bileşikler çok daha kısa sürede elde edilebilir, daha az organik çözücüye gereksinim duyar, düşük termal gradyentler ve daha kompakt ekipman gereksinimi sağlar.

4.4.2. Ultrason Destekli Ekstraksiyon (UDE)

Ultrason destekli ekstraksiyon (UDE), temelde yüksek frekanslı ses dalgalarının (20 kHz–100 MHz) çözücü ortama iletilmesiyle çalışan bir tekniktir. Ultrasonun ekstraksiyon verimini artırmasına dair birkaç mekanizma öne çıkar: hücre duvarının zayıflatılması veya parçalanması, çözücünün bitki dokusu içine daha iyi nüfuz etmesi, şişme ve hidrasyon süreçlerinin hızlanması. Ultrason dalgaları altında katı ve sıvı parçacıklar titreşir ve hızlanır; böylece katı fazdaki bileşenler çözeltideki çözücüye çok daha hızlı geçer (Cares vd., 2010). Ultrasonun oluşturduğu yüksek enerji, moleküller arası etkileşimleri zayıflatır ve yapısal bütünlüğün bozulmasına yol açar. Bu etki kaviteasyon olarak bilinir; kabarcıkların oluşumu, büyümesi ve ani çökmesi süreçlerini içerir. Kabarcıkların çökmesi, hücre zarının parçalanmasına neden olur; böylece ekstrakte edilebilir bileşenler serbest kalır. Aynı zamanda çözücünün hücre yapısına daha iyi nüfuz etmesini sağlayarak kütle transferini ciddi ölçüde hızlandırır (Metherel vd., 2009).

UDE'nin en büyük avantajlarından biri, karmaşık veya pahalı bir cihaza ihtiyaç duymamasıdır. Hem analitik ölçekte hem de endüstriyel ölçekte uygulanabilir. Ek olarak, ekstraksiyon süresi kısalmır, enerji ve çözücü tüketimi azalır. Ultrason dalga enerjisinin oluşturduğu daha düşük sıcaklık farkları sayesinde daha kontrollü bir süreç sağlanır; hızlı enerji aktarımı, seçici ekstraksiyon, daha küçük ekipman ihtiyacı, hızlı çalışma ve daha yüksek üretim verimliliği elde edilir (Uddin vd., 2018).

4.4.3. Darbeli Elektrik Alan Destekli Ekstraksiyon (DEADE)

DEADE, özellikle gıda endüstrisinde kütle transferini artırma potansiyeli nedeniyle ilgi gören yeni nesil bir teknolojidir. Bu yöntemin temeli, hücre zarlarında elektroporasyon oluşturarak çözünen maddelerin difüzyonunu hızlandıran dış elektrik alanlarının uygulanmasına dayanır. DEADE'de canlı hücre süspansiyonu, iki elektrottan oluşan ve üstel olarak azalan elektrik darbeleri üreten bir işlem haznesine yerleştirilir. Uygulanan elektrik potansiyeli, süspansiyondaki biyolojik hücre zarından geçerek zar moleküllerini dipol yapılarına bağlı olarak birbirinden ayırır. Zar boyunca

oluşan potansiyel farkı yaklaşık 1 volt olan kritik eşiği geçtiğinde, yüklü moleküller arasında itme kuvveti ortaya çıkar ve bu durum hücre zarında elektriksel bir bozulmaya neden olur. Sonuç olarak zar yapısı değişir ve geçirgenlik keskin biçimde artar (Bryant ve Wolfe, 1987). DEADE'nin en önemli avantajlarından biri, orta seviyelerde elektrik alanı ile çalışabilmesi sayesinde ısıya duyarlı bileşenlerin bozulmasını en aza indirmesidir.

4.4.4. Basınçlı Sıvı Ekstraksiyonu (BSE)

Bu yöntemde yüksek sıcaklık ve basınç kullanılarak ekstraksiyon verimi önemli ölçüde arttırılır. Temel prensip, sıcaklığın artmasıyla ekstraksiyon kinetiğinin hızlanması; 4–20 MPa aralığındaki basınçla da çözücünün normal kaynama noktasının üzerinde bile sıvı halde tutulmasıdır (Wijngaard vd., 2012). Yüksek basınç ayrıca çözücünün örnek matriksinin gözeneklerine daha kolay nüfuz etmesini sağlar. Buna karşılık yüksek sıcaklık, çözücünün viskozitesini düşürür ve difüzyon hızını artırarak çözücünün matrikse daha iyi işlemlerini ve ekstraksiyonun daha etkin gerçekleşmesini sağlar (Kaufmann ve Christen, 2002). BSE yöntemi, yüksek sıcaklık ve basıncın birleşmesi sayesinde hem ekstraksiyon süresini hem de çözücü miktarını azaltabilir.

4.4.5. Süperkritik Akışkanlı Ekstraksiyon (SAE)

SAE, geleneksel olmayan teknikler arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Pek çok bitkisel kaynaktan biyoaktif bileşiklerin, özellikle de sterollerin elde edilmesinde tercih edilmektedir. Günümüzde gıda ve ilaç endüstrilerinde kullanılan organik çözücülerin sağlığa zararlı etkileri daha iyi bilindiğinden, büyük miktarlarda çözücü kullanılan klasik sıvı ekstraksiyon yöntemlerine olan ilgi azalmaktadır. Ayrıca, ekstraksiyon ve çözücü uzaklaştırma aşamalarında yüksek sıcaklık uygulanması, ısıya duyarlı bileşiklerin bozulmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle SAE, doğal kaynaklardan fonksiyonel bileşiklerin elde edilmesinde organik çözücülere kıyasla daha güvenli ve etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem çevresel, farmasötik, polimer ve gıda analizleri gibi pek çok alanda başarılı şekilde kullanılmaktadır (Uddin vd., 2018).

Süperkritik akışkan, bir maddenin kritik sıcaklık ve basıncının üzerinde bulunduğu fiziksel hali ifade eder. Bu durumda madde hem sıvıya hem de gazla benzer özellikler gösterir ve akışkan fazda bulunur. Gazlara benzer düşük viskozite, yüksek difüzyon, düşük yüzey gerilimi ile sıvılara özgü yoğunluk ve

çözücü gücünün aynı anda bulunması, süperkritik akışkanı kısa sürede yüksek verimle ekstraksiyon yapmaya uygun hale getirir (Sihvonen vd., 1999). Süperkritik akışkanların çözücü gücü yoğunluklarına bağlı olduğundan, sıcaklık ve basınçtaki küçük değişikliklerle kolayca ayarlanabilir. Ayrıca yüksek difüzyon katsayısı ve düşük viskozitesi, kütle transferini sıvı çözücülere göre çok daha avantajlı hale getirir (Capuzzo vd., 2013).

Süperkritik ekstraksiyonda en sık tercih edilen çözücü karbondioksittir (CO_2). CO_2 'nin apolar yapısı, yağ ve yağda çözünen bileşiklerin ekstraksiyonu için oldukça idealdir. Ancak ilaç bileşiklerinin çoğu gibi polar moleküller için tek başına yeterli olmayabilir. Bu durumda metanol veya etanol gibi polar yardımcı çözücüler (modifiye ediciler) kullanılarak çözünürlük artırılır (Ghafoor vd., 2010). Tipik bir SFE sistemi CO_2 tankı, yüksek basınç pompası, CO_2 'yi soğutmak için bir soğutucu, sıcaklık kontrolü için bir fırın veya su banyosu, yardımcı çözücü pompası, basınç düzenleyici, ekstraksiyon kabı ve ayrıştırıcı gibi temel parçalardan oluşur.

4.5. Enzim Destekli Ekstraksiyon (EDE)

Bitkilerden biyolojik olarak aktif bileşenlerin elde edilmesinde kullanılan EDE yöntemi, geleneksel çözücü ekstraksiyonuna güçlü bir alternatif olarak görülmektedir. Bu yöntemin temelinde, enzimlerin yüksek özgüllükle reaksiyonları katalize edebilmesi ve bunu nispeten hafif işlem koşullarında gerçekleştirebilmesi yatar. Bitki hücrelerinde bazı fitokimyasallar hücre duvarı bileşenlerine bağlı halde bulunur ve klasik çözücü yöntemleriyle kolayca ekstrakte edilemez. Numunenin ekstraksiyon öncesinde uygun bir enzimle muamele edilmesi, bu bağlı bileşiklerin çözünür hâle geçmesini sağlar ve böylece hedef bileşiğin toplam verimi artar. Selüloz, hemiselüloz, α -amilaz ve pektinaz gibi enzimler; hücre duvarını parçalayarak yapısal polisakkaritleri ve lipid yapılarını kırar, böylece hücre içindeki bileşiklerin çözücüye daha kolay geçmesini sağlar (Latif ve Anwar, 2009).

5. Fitosterollerin Fonksiyonel Gıdalarda Kullanımı

Fitosteroller, fonksiyonel gıdalar alanında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Özellikle kolesterol düşürücü etkileri nedeniyle, bu bileşikler sağlık odaklı besin formülasyonları için ideal bir bileşen sunmaktadır (Wang vd., 2023). Fonksiyonel gıdalar, yalnızca temel besin değerini karşılamakla kalmayıp ek fayda sağlayan gıdalardır. Avrupa Birliği'nde fitosterollerin sağlık

beyanı EFSA tarafından değerlendirilmiş ve bitkisel steroller ve stanollerin günlük 1,5–2,4 g tüketiminin LDL kolesterolü düşürebileceği görüşü kabul edilmiştir (EFSA, 2012).

Fonksiyonel gıdalarda fitosterol kullanımı oldukça çeşitlidir. Margarin, yoğurt ve süt ürünleri, fitosterol takviyeli gıdalarda en yaygın taşıyıcılardır. Ayrıca meyve suları, ekmek, çikolata ve enerji barları gibi ürünlerde de fitosteroller eklenmiş formülasyonlar geliştirilmiştir. Klinik ve epidemiyolojik çalışmalarda, fitosterol ile zenginleştirilmiş yoğurt ve süt ürünlerinin hayati lipoprotein düzeylerinde anlamlı LDL kolesterol düşmesine yol açtığı gösterilmiştir (Clifton vd., 2004). Fitosterollerin fonksiyonel gıdalarda kullanımı üzerine yürütülen çalışmaların özeti Tablo 2’de verilmiştir.

Fitosteroller suda zayıf çözünmediği için emülsiyonlar, bunları gıdalara entegre etmede yaygın kullanılan bir stratejidir. Lipid fazına eklenen fitosteroller, uygun emülgatörler (protein bazlı taşıyıcılar gibi) sayesinde kararlılık kazanır ve biyoyararlanım artar. Fitosterollerin biyoyararlılığı ve stabilitesi, gıda matrisi, taşıyıcı sistem ve işleme koşullarına bağlı olarak değişir. Protein bazlı nanokompleksler (soya proteini gibi) ile fitosterollerin çözünürlüğü ve mideden emilimini artırılabilir. Ayrıca, ester formunda olan fitosteroller (fitosterol esterleri) daha düşük kristallik yapısı ve oksidatif stabilite avantajı sunar (Wang vd., 2023). Yüksek erime noktası ve sınırlı çözünürlük gibi dezavantajları olan fitosterolleri daha pratik hale getirmek için esterifikasyon yaygın şekilde kullanılır. Lipaz-katalize esterifikasyon yöntemleri ile üretilen fitosterol esterleri hem emülsiyon içinde hem de gıda yapılarında daha kolay entegre edilebilir. Bu sayede biyoyararlanım önemli ölçüde artar.

Tablo 2. Fitosterollerin fonksiyonel gıdalarda kullanımı üzerine yürütülen çalışmaların özeti.

Ürün	Fitosterol Formu	Çalışma Özeti	Kaynak
Margarin	Bitkisel sterol esterleri (1,6 g/gün)	Hiperkolesterolemik bireylerde, sterol esterli margarin kullanımı toplam kolesterolde ve LDL-kolesterolde anlamlı düşüş sağlamıştır (%6,4 ve %8,8).	Nigon vd., 2001
Yoğurt	Serbest fitosteroller (1,6 g/gün)	Hiperkolesterolemik katılımcılar üzerinde gerçekleştirilen çalışmada fitosterol içeren yoğurt tüketimi 6 hafta sonunda LDL-kolesterolde %10 azalma sağlamıştır.	Plana vd., 2008
Düşük Yağlı Yoğurt	Bitkisel stanol esterleri (1,9 g/gün)	Katılımcılarda 4 hafta sonunda toplam kolesterol %4,6, LDL-kolesterol ise %6,3 oranında azalmıştır.	Büyüktuncer vd., 2013
Ekmek, Kahvaltılık Gevrek, Süt, Yoğurt	Fitosterol esterleri (1,6 g/gün)	Farklı matrislerdeki fitosterol esterlerinin kolesterol düşürücü etkisi karşılaştırılmıştır. Süt ve yoğurt tüketimi ile LDL-kolesterol seviyesindeki azalma ekmek ve gevreğe göre daha yüksek bulunmuştur.	Clifton vd., 2004
Bitter Çikolata	Mikroenkapsüle fitosterol esterleri	%64-85 kakao oranlı çikolatalara %0-15 mikroenkapsüle fitosterol eklenerek üretim yapılmıştır. Oksidatif stabilite üzerine olumlu sonuçlar elde edilmiştir.	Tolve vd., 2018
Bitter Çikolata	Fitosterol + stanol esterleri	Fitosterol esterleri ile zenginleştirilmiş bitter çikolatalarda profili olumlu düzeyde etkilenmiştir.	Topka vd., 2024

6. Sağlık Etkileri ve Etki Mekanizması

Fitosterollerin temel lipid-düşürücü mekanizması, ince bağırsak lümeninde kolesterol ile karışık mikeller içinde rekabete girmeleridir. Fitosteroller hem diyetle alınan hem de safra yoluyla bağırsağa gelen kolesterolün mikellerde yer almasını azaltır; böylece enterosit tarafından emilebilen kolesterol miktarı düşer. Ayrıca fitosteroller, bağırsaktaki taşıyıcılar ve esterifikasyon süreçleri (ACAT2, MTP yolları) üzerinde dolaylı düzenleyici etki göstererek, enterositte karşılama (chylomicron biyosentezi) süreçlerini etkileyebilir (Li vd., 2022). Bu mekanizma intestinal kompetisyon olarak özetlenir: fitosterollerin mikeldeki varlığı kolesterolün çözünürlüğünü ve dolayısıyla absorpsiyon potansiyelini azaltır. İşlevsel sonuç olarak bağırsak kolesterol emilimi tipik olarak önemli ölçüde azalır; bu etki, plazma LDL-C düzeylerinde güvenilir bir gerilemeye yol açmaktadır. Çalışmalar günlük 1.5–3 g arası fitosterol/stanol alımının LDL-kolesterolde ortalama % ~7–12 aralığında bir azalma sağladığını göstermektedir. (EFSA, 2012).

Fitosterollerin kalp-damar koruyucu etkileri yalnızca lipid düşürücü mekanizmalarla sınırlı değildir. Son yıllarda yayımlanan çalışmalar fitosterollerin antienflamatuvar etkiler ve bazı antikanserojen mekanizmalar gösterdiğini bildirmektedir. Bu etkinin mekanizmaları arasında sitokin profillerinin modülasyonu, oksidatif stres belirteçlerinde iyileşme ve hücre büyümesini dengeleyici yollarda (apoptozis, hücre döngüsü düzenleyici yollar) etkiler yer almıştır. Ancak bu bulguların çoğu prelinik ve küçük ölçekli insan çalışmaları düzeyindedir. Geniş, iyi kontrollü klinik çalışmalarla bu etkilerin kardiyovasküler olaylar veya kanser insidansı üzerindeki net etkisinin tanımlanması gerekmektedir (Shen vd., 2024).

Genel olarak sağlıklı yetişkinlerde önerilen dozlarda fitosterol kullanımının kısa ve orta vadeli güvenlik profili iyi raporlanmıştır; ciddi toksisite yaygın değildir. Bununla birlikte iki önemli güvenlik konusu vurgulanmıştır:

1. Nadir kalıtsal bir bozukluk olan sitosterolömi durumunda fitosterol alımı ciddi problemlere yol açar; bu nedenle bilinen sitosterolemi hastalarında kesinlikle kontrendikedir (Poli vd., 2021).
2. Fitosterol takviyesi, karotenoidler (β -karoten, likopen vb.) ve bazı yağda çözünen vitaminlerin serum düzeylerinde hafif düşüklere yol

açabilir. Bu etki mikellerdeki rekabetten kaynaklanır ve genelde diyetle yeterli meyve-sebze alımı veya karotenoid açısından zengin besinlerle telafi edilebilir. Bazı düzenleyici otoriteler bu yüzden ürün etiketlerinde uygun tüketim uyarılarını şart koşturmuştur (Borel, 2023; Tolve vd., 2020).

7. Sonuç

Fitosteroller, bitkisel kaynakların doğal bileşikler olmalarına rağmen beslenme ve sağlık alanında sundukları etki, onları yalnızca bir besin ögesi olmaktan çıkarıp fonksiyonel gıdaların anahtar bileşenlerinden biri haline getirmektedir. Kimyasal yapıları kolesterole son derece benzer olduğu için bağırsakta kolesterol ile rekabete girerek LDL düzeylerini düşürebilmeleri, günümüzde kardiyovasküler riskin azaltılmasına yönelik beslenme stratejilerinde fitosteroller önemli bir konuma taşınmaktadır. Bununla birlikte, düşük çözünürlükleri ve sınırlı biyoyararlanımları, fitosterollerin doğrudan gıdalara eklenmesini güçleştirdiğinden hem klasik hem de yenilikçi ekstraksiyon teknikleri üzerine yapılan çalışmalar giderek daha fazla önem kazanmıştır.

Mikrodalga, ultrason, süperkritik akışkan gibi modern yöntemlerin, daha yüksek verim, daha kısa işlem süresi ve daha az çözücü gereksinimi gibi avantajlarla fitosterol eldesinde güçlü alternatifler sunduğu görülmektedir. Ayrıca fitosterollerin fonksiyonel gıdalara entegre edilmesinde esterifikasyon, mikroenkapsülasyon ve stabil taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesi gibi teknolojik yaklaşımlar, bu bileşiklerin hem duyu kaliteyi hem de biyoyararlanımı koruyacak şekilde ürüne dahil edilebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, fitosteroller yalnızca kolesterol düşürücü etkileriyle değil, oksidatif stres ve inflamasyon gibi süreçler üzerindeki potansiyel etkileriyle de gelecek araştırmalar için umut vadeden bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Ancak bu etkilerin klinik düzeyde daha sağlam biçimde ortaya konulması için geniş ölçekli insan çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Fitosterollerin elde edilmesi, stabilize edilmesi ve gıda sistemlerine etkin şekilde entegre edilmesine yönelik teknolojik gelişmeler sürdükçe, bu bileşiklerin fonksiyonel gıda sektöründeki kullanım alanlarının daha da genişleyeceği öngörülebilir.

KAYNAKÇA

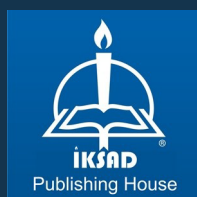
- Amiri, N., Pourjahed, A., Abbasi, H., & Karimi, S. (2024). Preparation and physicochemical evaluation of phytosterol-enriched sesame oil microemulsions. *Journal of Food Process Engineering*, 47(3), e14570.
- Awad, A. B., Chan, K. C., Downie, A. C., & Fink, C. S. (2000). Peanuts as a source of β -sitosterol, a sterol with anticancer properties. *Nutrition and Cancer*, 36(2), 238-241.
- Bacchetti, T., Masciangelo, S., Bicchiega, V. *et al.* Phytosterols, phytostanols and their esters: from natural to functional foods. *Mediterr J Nutr Metab* 4, 165–172 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12349-010-0049-0>
- Borel, P., Dangles, O., & Kopec, R. E. (2023). Fat-soluble vitamin and phytochemical metabolites: Production, gastrointestinal absorption, and health effects. *Progress in lipid research*, 90, 101220.
- Bryant, G., & Wolfe, J. (1987). Electromechanical stresses produced in the plasma membranes of suspended cells by applied electric fields. *The Journal of membrane biology*, 96(2), 129-139.
- Cares, M. G., Vargas, Y., Gaete, L., Sainz, J., & Alarcon, J. (2010). Ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from Quillaja Saponaria Molina. *Physics Procedia*, 3(1), 169-178.
- Buyuktuncer, Z., Fisunoğlu, M., Guven, G. S., Unal, S., & Besler, H. T. (2013). The cholesterol lowering efficacy of plant stanol ester yoghurt in a Turkish population: a double-blind, placebo-controlled trial. *Lipids in health and disease*, 12(1), 91.
- Capuzzo, A., Maffei, M. E., & Occhipinti, A. (2013). Supercritical fluid extraction of plant flavors and fragrances. *Molecules*, 18(6), 7194-7238.
- Catani, M. V., Gasperi, V., Bisogno, T., & Maccarrone, M. (2018). Essential dietary bioactive lipids in neuroinflammatory diseases. *Antioxidants & Redox Signaling*, 29(1), 37-60.
- Clifton, P. M., Noakes, M., Sullivan, D., Erichsen, N., Ross, D., Annison, G., ... & Nestel, P. (2004). Cholesterol-lowering effects of plant sterol esters differ in milk, yoghurt, bread and cereal. *European Journal of Clinical Nutrition*, 58(3), 503-509.
- Comunian, T. A., & Favaro-Trindade, C. S. (2016). Microencapsulation using biopolymers as an alternative to produce food enhanced with

- phytosterols and omega-3 fatty acids: A review. *Food Hydrocolloids*, 61, 442-457.
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). (2012). Scientific Opinion on the substantiation of a health claim related to 3 g/day plant sterols/stanols and lowering blood LDL-cholesterol and reduced risk of (coronary) heart disease pursuant to Article 19 of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 10(5), 2693.
- Feng, S., Wang, L., Shao, P., Sun, P., & Yang, C. S. (2022). A review on chemical and physical modifications of phytosterols and their influence on bioavailability and safety. *Critical reviews in food science and nutrition*, 62(20), 5638-5657.
- Ferrari, R. A., Esteves, W., Mukherjee, K. D., & Schulte, E. (1997). Alteration of sterols and steryl esters in vegetable oils during industrial refining. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(12), 4753-4757.
- Food and Agriculture Organization / World Health Organization (FAO/WHO). (2008). *Phytosterols, phytostanols and their esters*.
- Ghafoor, K., Park, J., & Choi, Y. H. (2010). Optimization of supercritical fluid extraction of bioactive compounds from grape (*Vitis labrusca* B.) peel by using response surface methodology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(3), 485-490.
- Gupta, A., Naraniwal, M., & Kothari, V. (2012). Modern extraction methods for preparation of bioactive plant extracts.
- Jain, T., Jain, V., Pandey, R., Vyas, A., & Shukla, S. S. (2009). Microwave assisted extraction for phytoconstituents—an overview. *Asian Journal of Research in Chemistry*, 2(1), 19-25.
- Kaufmann, B., & Christen, P. (2002). Recent extraction techniques for natural products: microwave-assisted extraction and pressurised solvent extraction. *Phytochemical Analysis: An International Journal of Plant Chemical and Biochemical Techniques*, 13(2), 105-113.
- Latif, S., & Anwar, F. (2009). Physicochemical studies of hemp (*Cannabis sativa*) seed oil using enzyme-assisted cold-pressing. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 111(10), 1042-1048.

- Li, X., Xin, Y., Mo, Y., Marozik, P., He, T., & Guo, H. (2022). The bioavailability and biological activities of phytosterols as modulators of cholesterol metabolism. *Molecules*, 27(2), 523.
- Liu, W., Xiao, B., Wang, X., Chen, J., & Yang, G. (2021). Solvent-free synthesis of phytosterol linoleic acid esters at low temperature. *RSC advances*, 11(18), 10738-10746.
- Metherel, A. H., Taha, A. Y., Izadi, H., & Stark, K. D. (2009). The application of ultrasound energy to increase lipid extraction throughput of solid matrix samples (flaxseed). *Prostaglandins, leukotrienes and essential fatty acids*, 81(5-6), 417-423.
- Mohammadi, M., Jafari, S. M., Hamishehkar, H., & Ghanbarzadeh, B. (2020). Phytosterols as the core or stabilizing agent in different nanocarriers. *Trends in food science & technology*, 101, 73-88.
- MS, U., Ferdosh, S., Haque Akanda, M. J., Ghafoor, K., AH, R., Ali, M. E., ... & Islam Sarker, M. Z. (2018). Techniques for the extraction of phytosterols and their benefits in human health: A review. *Separation Science and Technology*, 53(14), 2206-2223.
- Nattagh-Eshivani, E., Barghchi, H., Pahlavani, N., Barati, M., Amiri, Y., Fadel, A., ... & Ghavami, A. (2022). Biological and pharmacological effects and nutritional impact of phytosterols: A comprehensive review. *Phytotherapy Research*, 36(1), 299-322.
- Nigon, F., Serfaty-Lacrosnière, C., Beucler, I., Chauvois, D., Neveu, C., Giral, P., ... & Bruckert, E. (2001). Plant sterol-enriched margarine lowers plasma LDL in hyperlipidemic subjects with low cholesterol intake: effect of fibrate treatment.
- Ogbe, R. J., Ochalefu, D. O., Mafulul, S. G., & Olaniru, O. B. (2015). A review on dietary phytosterols: Their occurrence, metabolism and health benefits. *Asian J. Plant Sci. Res*, 5(4), 10-21.
- Plana, N., Nicolle, C., Ferre, R., Camps, J., Cos, R., Villoria, J., ... & DANACOL group*. (2008). Plant sterol-enriched fermented milk enhances the attainment of LDL-cholesterol goal in hypercholesterolemic subjects. *European Journal of Nutrition*, 47(1), 32-39.

- Poli, A., Marangoni, F., Corsini, A., Manzato, E., Marrocco, W., Martini, D., ... & Visioli, F. (2021). Phytosterols, cholesterol control, and cardiovascular disease. *Nutrients*, 13(8), 2810.
- Racette, S. B., Lin, X., Ma, L., & Ostlund, Jr, R. E. (2015). Natural dietary phytosterols. *Journal of AOAC International*, 98(3), 679-684.
- Rohr, R., Rohr, R., & Trujillo-Quijano, J. A. (2005). *U.S. Patent No. 6,846,941*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Seidel, V. (2012). Initial and bulk extraction of natural products isolation. *Natural products isolation*, 27-41.
- Shen, M., Yuan, L., Zhang, J., Wang, X., Zhang, M., Li, H., ... & Xie, J. (2024). Phytosterols: Physiological functions and potential application. *Foods*, 13(11), 1754.
- Sihvonen, M., Järvenpää, E., Hietaniemi, V., & Huopalahti, R. (1999). Advances in supercritical carbon dioxide technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 10(6-7), 217-222.
- Smith, R. M. (2003). Before the injection—modern methods of sample preparation for separation techniques. *Journal of chromatography A*, 1000(1-2), 3-27.
- Song, Y., Liu, J., Zhao, K., Gao, L., & Zhao, J. (2021). Cholesterol-induced toxicity: An integrated view of the role of cholesterol in multiple diseases. *Cell metabolism*, 33(10), 1911-1925.
- Thompson, G. R., & Grundy, S. M. (2005). History and development of plant sterol and stanol esters for cholesterol-lowering purposes. *The American journal of cardiology*, 96(1), 3-9.
- Tolve, R., Cela, N., Condelli, N., Di Cairano, M., Caruso, M. C., & Galgano, F. (2020). Microencapsulation as a tool for the formulation of functional foods: the phytosterols' case study. *Foods*, 9(4), 470.
- Tolve, R., Condelli, N., Caruso, M. C., Barletta, D., Favati, F., & Galgano, F. (2018). Fortification of dark chocolate with microencapsulated phytosterols: Chemical and sensory evaluation. *Food & Function*, 9(2), 1265-1273.
- Topka, P., Rudzińska, M., Poliński, S., Szydłowska-Czeraniak, A., & Tańska, M. (2024). Enhancing Antioxidant Activity and Nutritional Profile of Dark Chocolate Through Enrichment with Plant Sterols: A Study on

- Phytosterol Concentrations and Functional Properties. *Foods*, 13(22), 3578.
- Wang, L., & Weller, C. L. (2006). Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. *Trends in Food Science & Technology*, 17(6), 300-312.
- Wang, T., Ma, C., Hu, Y., Guo, S., Bai, G., Yang, G., & Yang, R. (2023). Effects of food formulation on bioavailability of phytosterols: Phytosterol structures, delivery carriers, and food matrices. *Food & function*, 14(12), 5465-5477.
- Warren, T., McAllister, R., Morgan, A., Rai, T. S., McGilligan, V., Ennis, M., ... & Watterson, S. (2021). The interdependency and co-regulation of the vitamin D and cholesterol metabolism. *Cells*, 10(8), 2007.
- Wijngaard, H., Hossain, M. B., Rai, D. K., & Brunton, N. (2012). Techniques to extract bioactive compounds from food by-products of plant origin. *Food Research International*, 46(2), 505-513.



ISBN: 978-625-378-466-9