

Fonksiyonel Gıdalarda Nanopartiküllerin Kullanımı: Fırsatlar ve Zorluklar

Nilay Akkus Taş¹

Özet

Nanoteknoloji, gıda biliminde fonksiyonel bileşenlerin stabilitesini koruma, biyoyararlanımını artırma ve hedefe yönelik kontrollü salımını sağlama gibi yenilikçi çözümler sunarak gıda endüstrisinde önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu kitap bölümü, nanoemülsiyonlar, lipozomlar ve biyopolimer bazlı nanotaşıyıcı sistemlerin fonksiyonel gıdalara entegrasyonunu ve metal oksit nanopartiküllerin antimikrobiyal ambalajlama teknolojilerindeki rolünü kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışmada, nanoteknolojinin sunduğu bu fırsatların yanı sıra, nanopartiküllerin potansiyel toksikolojik etkileri, yasal düzenlemelerdeki küresel farklılıklar ve tüketici kabulü gibi kritik zorluklar ele alınmaktadır. Ayrıca, nanomalzemelerin gıdalardaki varlığını tespit etmek için kullanılan elektron mikroskopisi ve dinamik ışık saçılımı gibi ileri analiz teknikleri ile risk değerlendirme prosedürleri tartışılmaktadır. Sonuç olarak, nanoteknolojinin gelecekteki başarısının, yeşil nanoteknoloji yaklaşımları, sürdürülebilir üretim modelleri ve şeffaf yasal çerçevelerin geliştirilmesine bağlı olduğu vurgulanmaktadır.

1. Giriş

Nanoteknoloji, son yıllarda gıda biliminde devrim niteliğinde gelişmelere yol açarak gıda işleme, ambalajlama, koruma ve besin takviyeleri gibi pek çok alanda yenilikler sunmaktadır (Shah vd., 2024). Bu alandaki hızlı büyüme, yalnızca gıdanın kalitesini ve güvenliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda tüketicinin beslenme gereksinimlerine uygun fonksiyonel gıdaların geliştirilmesine de olanak tanımaktadır (Singh, 2016). Fonksiyonel gıdalarda kullanılan nanoteknolojik uygulamalar, belirli biyoaktif bileşenlerin hedefe yönelik taşınması, biyoyararlanımlarının artırılması ve stabilitelerinin

1 Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Amasya, Türkiye, nilayakkustas@amasya.edu.tr, 0009-0004-8644-6659

korunması gibi özelliklerle öne çıkmaktadır. Ancak, bu hızlı büyüme, sağlık ve güvenlik kaygıları, yasal düzenlemeler ve toplumun bu yeni teknolojiyi kabul etme düzeyi gibi çeşitli zorlukları da beraberinde getirmiştir (Bouwmeester vd., 2009).

Nanoteknoloji, gıda bilimi bağlamında yenilikçi çözümler sunarak hem fonksiyonel hem de geleneksel gıda üretimini dönüştürme potansiyeline sahiptir. Gıda matriksine entegre edilen nanopartiküller, biyoaktif bileşenlerin kontrollü salınımını ve stabilitesini artırarak belirli sağlık etkileri sağlamada önemli bir rol oynar (He ve Hwang, 2016). Bunun yanı sıra, nanokapsülasyon teknikleriyle vitaminler, probiyotikler ve antioksidanlar gibi bileşenlerin bağırsaklarda daha etkili bir şekilde emilmesi sağlanır. Örneğin, omega-3 yağ asitleri gibi oksidasyona duyarlı bileşenler nanoteknoloji sayesinde oksidatif bozulmadan korunabilmekte ve daha uzun raf ömrü elde edilebilmektedir (Sekhon, 2010). Gıda paketlenme sistemlerinde de nanoteknoloji kullanımı, gıdaların raf ömrünü uzatmak ve dış etkenlere karşı koruma sağlamak açısından önemlidir. Antimikrobiyal nanopartiküller veya aktif ambalajlama materyalleri, mikroorganizma gelişimini önleyerek gıda güvenliğini artırır (Silvestre vd., 2011). Nanoteknolojinin gıda sektöründe yükselişi hem akademik hem de endüstriyel alanda yoğun araştırmalara konu olmuştur. Bu yükselişin arkasındaki temel nedenlerden biri, tüketicilerin sağlık ve zindelik konularına artan ilgisidir. Fonksiyonel gıdalar, bireylerin özel beslenme ihtiyaçlarına cevap verebilecek şekilde biyoaktif bileşenlerle zenginleştirilmektedir (Das vd., 2009). Nanopartiküller sayesinde gıdalara daha küçük miktarda biyoaktif bileşen eklenerek istenilen sağlık etkisine ulaşılabilir ve bu durum maliyet etkinliğini de artırır (Sozer ve Kokini, 2009). Ancak nanoteknolojinin hızla gelişmesi, bilimsel topluluk ve kamuoyunda güvenlik ve etik konularına dair endişeleri de beraberinde getirmiştir. Özellikle, nanopartiküllerin insan sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkilerinin tam olarak bilinmemesi, daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır (Bouwmeester vd., 2009). Bununla birlikte, Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri gibi büyük pazarlarda gıda ürünlerinde kullanılan nanomalzemelerin düzenleyici çerçevelerle kontrol altına alınması, bu teknolojinin güvenli kullanımını sağlamak adına kritik bir adımdır.

2. Nanopartiküllerin Fonksiyonel Gıdalarda Kullanım Potansiyeli

Nanopartiküllerin gıda bilimine entegrasyonu, fonksiyonel gıdaların sağlık üzerindeki etkisini daha etkili kılacak çok çeşitli uygulamaları kapsamaktadır. Özellikle, biyoaktif bileşenlerin korunması, biyoyararlanımlarının artırılması ve hedefe yönelik kontrollü salınım sistemleri, bu teknolojiyle mümkün hale gelmiştir. Nanoteknoloji sayesinde

belirli besin maddelerinin biyokimyasal stabilitesi korunurken, insan vücudu tarafından daha verimli bir şekilde emilim sağlanabilmektedir (Sekhon, 2010; Sozer ve Kokini, 2009).

2.1. Gıda Bileşenlerinin Fonksiyonel Etkilerini Artırmada Nanopartiküller

Nanopartiküller, gıda bileşenlerinin fonksiyonel etkilerini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Vitaminler, mineraller, probiyotikler ve polifenoller gibi biyoaktif bileşenlerin stabilitesi, nanokapsülasyon ve nanoemülsiyon teknolojileri sayesinde korunabilmekte ve bu sayede etkinlikleri artırılmaktadır (Singh, 2016). Örneğin, yağda çözünen vitaminlerin su bazlı sistemlere etkili bir şekilde eklenmesi nanoteknolojinin sunduğu çözümlerden biridir (He ve Hwang, 2016). Bu durum, geleneksel yöntemlere göre daha az biyoaktif madde kullanımıyla aynı fonksiyonel faydanın sağlanmasına olanak tanır.

Özellikle, polifenoller gibi oksidasyona karşı hassas bileşenlerin nanokapsüllerle korunması hem fonksiyonel etkinliği artırır hem de uzun raf ömrü sağlar. Omega-3 yağ asitleri içeren fonksiyonel gıdalarda kullanılan nanoteknoloji uygulamaları, bu yağların oksidatif bozulmasını önler ve biyoaktifliğini uzun süre koruyarak sağlık faydalarını sürdürür (Sekhon, 2010).

2.2. Nanotaşıyıcı Sistemler: Besin Biyoyararlanımını Artırma

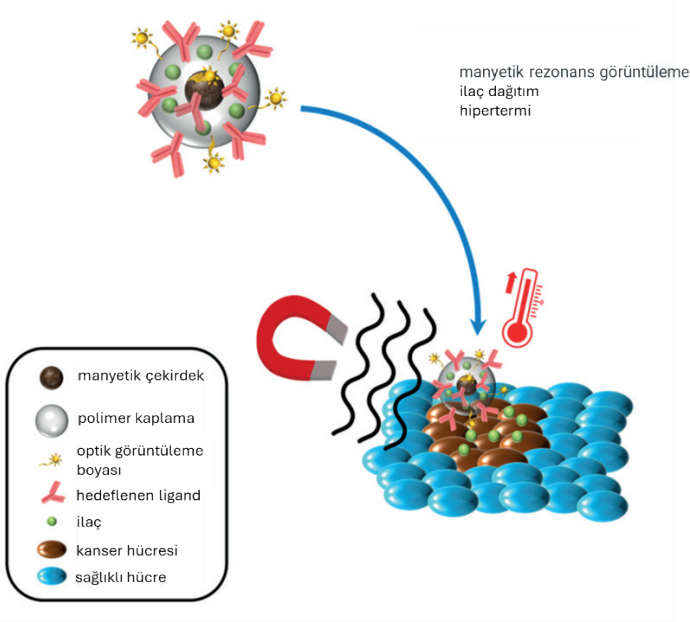
Biyoaktif bileşenlerin biyoyararlanımı, sindirim sistemi boyunca karşılaştıkları enzimatik ve pH değişimlerinden etkilenebilir. Nanotaşıyıcı sistemler, bu tür bileşenlerin gastrointestinal sistemde parçalanmadan hedef bölgeye ulaşmasını sağlar ve emilimini artırır (Bouwmeester vd., 2009). Nanokapsüller, nanoemülsiyonlar ve lipit bazlı taşıyıcı sistemler, özellikle zayıf çözünürlüğe sahip bileşiklerin biyoyararlanımını artırmada etkilidir (Das vd., 2009).

Bu tür taşıyıcı sistemlerin etkisi en çok vitaminler ve antioksidanlar gibi bileşenlerde görülmektedir. Örneğin, C vitamini ve likopen gibi biyoaktiflerin nanokapsüller içinde stabil tutulması, bu bileşiklerin ince bağırsakta emilimini artırır ve biyoyararlanımda önemli kazanımlar sağlar (Shah vd., 2024). Ayrıca, probiyotik mikroorganizmaların nanotaşıyıcılarla korunması, mide asidi gibi olumsuz ortamlara karşı dayanıklılığı artırarak bu mikroorganizmaların etkili olmasını sağlar (He ve Hwang, 2016).

2.3. Kontrollü Salınım ve Hedefe Yönelik Besin Dağıtımı

Nanoteknolojinin en önemli avantajlarından biri, gıda bileşenlerinin kontrollü salınımını ve hedefe yönelik taşınmasını sağlayan sistemler sunmasıdır. Bu sistemler, biyoaktif bileşenlerin belirli bir süre veya belirli bir vücut bölgesine salınmasını kontrol ederek etkinliklerini optimize eder (Sozer ve Kokini, 2009). Örneğin, kan şekerini düzenleyen biyoaktif bileşenlerin kontrollü salınımı, ani kan şekeri dalgalanmalarını önleyebilir ve metabolik fayda sağlayabilir (Singh, 2016). Kemoterapinin başlıca dezavantajlarından biri, antikanser ilaçlarının çoğunun seçici olmamasıdır, yani yalnızca kötü huylu hücreleri değil aynı zamanda sağlıklı hücreleri de öldürebilirler (Yavuz vd., 2018). Bu nedenle, araştırmacılar ilacın vücudun geri kalanı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltarak ilaç moleküllerini hedef bölgeye taşımak için çeşitli ilaç dağıtım sistemlerini geliştirmektedirler (Ailincai vd., 2018; Cetin ve Denizli, 2015; Çetin vd., 2017; Sadhukha vd., 2018). Manyetik nanopartiküller (MNP) hedef-spesifik ilaç taşıyıcıları olarak umut vadeden adaylardır. Bu nedenle, antineoplastik ajanları tümör bölgesine taşıyabilir ve sağlıklı dokuların etkilenmemesine yardımcı olabilirler. Dahası, MNP'ler terapötik ajanın lokal uygulanmasına yol açabildiğinden, kullanılan ilacın hacmi azalır ve ilaçların yan etkilerinde azalmaya yol açar. MNP'ler yalnızca antineoplastik ajanların değil, aynı zamanda antikorlar, peptitler, proteinler, genler vb. dahil olmak üzere diğer terapötik ajanların dağıtımında kullanılır (Şekil 1).

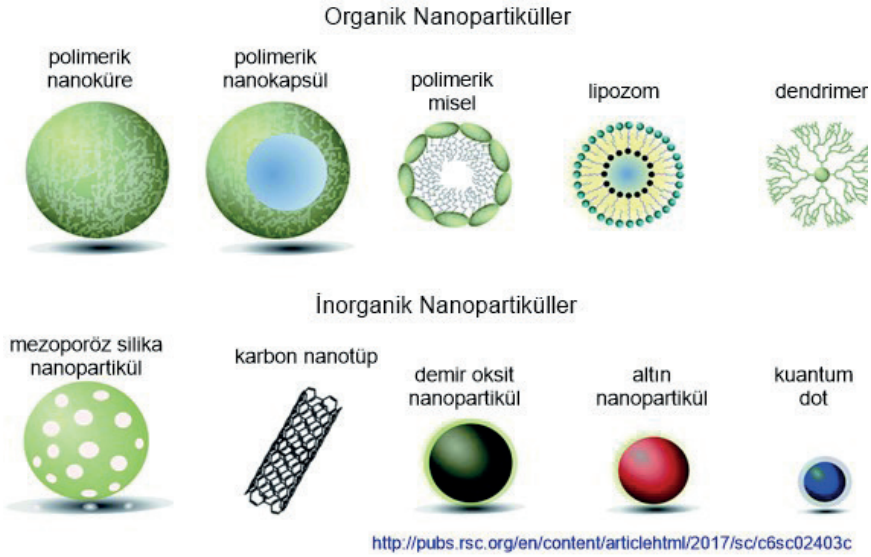
Hedefe yönelik besin dağıtımında, nanopartiküller, belirli dokular veya organlara besin maddelerini yönlendirebilen sofistike taşıyıcı sistemler olarak çalışır. Bu, özellikle kronik hastalıkları yönetmek amacıyla belirli bölgelerde aktif olması gereken bileşenler için büyük bir potansiyel sunar (Das vd., 2009). Örneğin, probiyotiklerin kolon bölgesinde salınmasını sağlayan nanotaşıyıcılar, bağırsak sağlığını doğrudan destekleyen kontrollü etkiler sunar (Silvestre vd., 2011).



Şekil 1. MNP'ler manyetik rezonans görüntüleme, ilaç iletimi ve hipertermi için iyi adaylardır (Çetin vd., 2019).

3. Fonksiyonel Gıdalarda Kullanılan Temel Nanomateryal Türleri

Fonksiyonel gıda uygulamalarında kullanılan nanomateryaller, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu nanomateryaller, besin bileşenlerinin taşınmasından biyoyararlanımlarının artırılmasına ve kontrollü salınımlarına kadar geniş bir yelpazede uygulamalara sahiptir. Şekil 2 de biyomedikal uygulamalarda kullanılan farklı nanopartikül tipleri verilmiştir. Her bir nanomateryal türü, farklı işlevsellikler sunarak gıda teknolojisinin farklı ihtiyaçlarına yanıt verir (Weiss vd., 2006).



Şekil 2. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan farklı nanopartikül tipleri (Richards vd., 2017).

3.1. Lipid Bazlı Nanopartiküller

Lipid bazlı nanopartiküller, özellikle yağda çözünen biyoaktif bileşiklerin kapsüllenmesinde yaygın olarak kullanılan nanotaşıyıcılardır. Bunlar, nanoemülsiyonlar, katı lipid nanopartiküller (SLN) ve nanoyapılı lipid taşıyıcılar (NLC) gibi alt sınıflara ayrılır (García-Pinel vd., 2019). Nanoemülsiyonlar, küçük damlacık boyutları sayesinde aktif bileşenlerin biyoyararlanımını artırır ve oksidatif bozulmaya karşı koruma sağlar. Örneğin, omega-3 yağ asitleri ve vitamin E gibi yağda çözünen besin maddeleri, bu teknoloji sayesinde stabil halde taşınarak besinlerde etkili şekilde kullanılabilir (Puri vd., 2009).

SLN ve NLC'ler ise aktif bileşenlerin kontrollü salınımını sağlayarak uzun süreli etki yaratır. Özellikle antioksidanlar ve fenolik bileşiklerin korunması ve taşınmasında bu sistemler oldukça etkilidir (Samimi vd., 2019).

3.2. Protein ve Polimer Tabanlı Nanopartiküller

Protein ve polimer bazlı nanopartiküller, biyolojik olarak parçalanabilir ve toksik olmayan özelliklere sahip olmaları nedeniyle gıda uygulamalarında büyük ilgi görmektedir. Bu tür nanotaşıyıcılar, gıda bileşenlerinin kontrollü salınımını sağlarken çevresel etkilere karşı da yüksek stabilite sunar (DeFrates vd., 2018).

Protein bazlı nanopartiküller arasında kazein ve soya proteinleri gibi doğal proteinler ön plana çıkar. Bu proteinler, su ve yağda çözünen bileşiklerin stabilitesini artırabilir ve emilimini destekler (Haque ve Patra, 2023). Polimer bazlı nanopartiküller ise doğal veya sentetik olabilir. Örneğin, kitosan ve alginat gibi doğal polimerler biyoyoumlu olup, biyoaktif bileşenlerin mide asidine dayanıklı bir şekilde taşınmasını sağlar. Sentetik polimerler arasında ise poli(laktik-ko-glikolik asit) (PLGA) gibi polimerler, kontrollü salınım uygulamalarında kullanılır (Danhier vd., 2012).

3.3. Metal ve Metal Oksit Nanopartikülleri

Metal ve metal oksit nanopartikülleri, özellikle antimikrobiyal özellikleri ile dikkat çekmektedir. Gümüş (Ag), titanyum dioksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) gibi nanopartiküller, gıda ürünlerinde mikroorganizmaların büyümesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır (Gold vd., 2018). Bu nanopartiküller, gıda paketlenme ve koruma sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.

Örneğin, ZnO nanopartikülleri hem UV koruması sağlar hem de bakteri gelişimini önleyerek gıda güvenliğini artırır. Bununla birlikte, metal nanopartiküllerin sağlık üzerindeki uzun vadeli etkileri henüz tam olarak anlaşılmadığından bu alanda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Mohd Yusof vd., 2019).

3.4. Karbon Nanotüpleri ve Grafen Türevi Nanomalzemeler

Karbon nanotüpleri (CNT'ler) ve grafen türevi nanomalzemeler, güçlü mekanik özellikleri ve yüksek yüzey alanları ile dikkat çekmektedir. Bu özellikleri sayesinde gıda ambalajlarında ve sensör teknolojilerinde kullanılmaktadır. Grafen oksit kaplamalar, gaz geçirmez özellikler sunarak gıdaların raf ömrünü uzatabilir ve dış ortamdan kaynaklanan olumsuz etkileri minimize edebilir (Barra vd., 2020).

Bunun yanında, CNT'ler, antimikrobiyal özellikleri sayesinde gıda güvenliğini artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, karbon bazlı nanomalzemelerin toksikolojik etkileriyle ilgili araştırmalar devam etmekte olup, bu teknolojinin güvenli kullanımını sağlamak adına daha fazla düzenleme ve denetim mekanizması gereklidir (Zhang vd., 2014).

4. Nanopartiküllerin Kullanımına Yönelik Zorluklar

Nanoteknolojinin gıda bilimindeki hızlı yükselişi, besinlerin etkinliğini artıran pek çok avantaj sağlasa da bu teknolojinin yaygın uygulamalarını sınırlayan önemli zorluklar bulunmaktadır. Nanopartiküllerin gıda

ürünlerinde kullanılmasına yönelik zorluklar üç ana başlık altında incelenebilir: toksikolojik ve sağlık üzerindeki etkiler, düzenleyici ve hukuki engeller ile tüketici kabulü ve sosyal algı. Bu zorlukların üstesinden gelinmesi, teknolojinin sürdürülebilir gelişimi ve güvenli kullanımı açısından hayati öneme sahiptir (Chaudhry ve Castle, 2011).

4.1. Toksikoloji ve Sağlık Üzerindeki Etkiler

Nanopartiküllerin sağlık üzerindeki etkileri, nanoteknolojiyle ilgili en büyük tartışma konularından biridir. Geleneksel malzemelere göre daha küçük boyutlarda olmaları, hücre zarlarını geçme ve biyolojik sistemlere nüfuz etme potansiyellerini artırır (Handy ve Shaw, 2007). Bu durum, nanopartiküllerin insan vücudunda istenmeyen toksik etkiler yaratma riskini de beraberinde getirebilir. Özellikle metal ve metal oksit nanopartiküllerinin uzun süreli kullanımda potansiyel oksidatif stres, hücresel DNA hasarı ve enflamatuvar tepkilere yol açabileceği öne sürülmektedir (Hardy vd., 2018).

Nanopartiküllerin bağırsak mikrobiyotasını nasıl etkilediği ve bu etkinin metabolik sağlık üzerindeki sonuçları gibi konular henüz tam olarak aydınlatılamamıştır (He ve Hwang, 2016). Bu nedenle, nanopartiküllerin güvenli kullanımını sağlamak için kapsamlı toksikolojik testlere ve uzun vadeli etkilerin değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

4.2. Düzenleyici ve Hukuki Engeller

Nanoteknolojinin gıda sektöründeki uygulamaları, yasal düzenlemeler ve standartların eksikliği nedeniyle sınırlandırılmaktadır (Sandoval, 2009). Dünyanın farklı bölgelerinde nanoteknolojik ürünlerin güvenliği ve kullanımına yönelik düzenleyici çerçeveler farklılık göstermektedir. Avrupa Birliği (AB), gıda ürünlerinde nanomalzemelerin kullanımına dair katı düzenlemelere sahiptir ve bu malzemelerin piyasaya sürülmeden önce ayrıntılı güvenlik değerlendirmelerinden geçmesini şart koşmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise bu konudaki düzenlemeler nispeten daha esnek, ancak FDA (Food and Drug Administration) bu teknolojiyi denetleme yetkisine sahiptir (Amenta vd., 2015).

Düzenleyici engellerin temel nedeni, nanopartiküllerin geleneksel kimyasallardan farklı olarak vücutta nasıl davrandığının tam anlamıyla bilinmemesidir (Coles ve Frewer, 2013). Bu nedenle, hem uluslararası standartların uyumlaştırılması hem de gıda güvenliği açısından daha kapsamlı protokollerin geliştirilmesi gerekmektedir.

4.3. Tüketici Kabulü ve Sosyal Algı

Tüketici algısı ve kabulü, nanoteknoloji tabanlı gıdaların pazardaki başarısını doğrudan etkileyen faktörlerden biridir. Tüketicilerin büyük bir kısmı, nanoteknolojinin potansiyel sağlık riskleri konusundaki belirsizlikler nedeniyle bu tür ürünlere mesafeli yaklaşmaktadır (McCarron, 2016). Yapılan çalışmalar, tüketicilerin nanoteknolojiyle ilgili riskleri algılamakta gıdalarda kullanılan nanomalzemelerin kimyasal bileşimlerini ve işlevlerini göz önünde bulundurdıklarını göstermektedir.

Bu noktada, güven inşa etmek amacıyla etkili iletişim stratejilerinin geliştirilmesi önemlidir. Bilimsel verilerin şeffaf bir şekilde sunulması ve nanopartiküllerin gıda güvenliğine katkı sağlayan avantajlarının vurgulanması, tüketici kabulünü artırabilir (Siegrist vd., 2009). Ayrıca, kamuoyunun bilinçlendirilmesine yönelik eğitim programları ve medya kampanyaları, nanoteknolojinin yanlış anlaşılmasını önlemede kritik bir rol oynayabilir.

5. Risk Değerlendirme ve Güvenlik Standartları

Nanoteknolojinin gıda bilimindeki ilerlemesi, bu teknolojinin güvenli kullanımını sağlamak amacıyla etkili risk değerlendirme protokollerine ve güvenlik standartlarına ihtiyaç duymaktadır. Nanopartiküller, biyolojik sistemlerde geleneksel materyallere göre farklı davranışlar sergileyebildiğinden, bu materyallerin risklerinin değerlendirilmesi, düzenleyici çerçeveler ve gelişmiş izleme teknikleriyle bütünleşmiş bir şekilde ele alınmalıdır (Bouwmeester vd., 2014; Grobe vd., 2008).

5.1. Nanogıda Güvenliğinde Mevcut Yönetmelikler

Dünyada nanogıda güvenliğini düzenleyen yönetmelikler, farklı bölgelerde değişiklik göstermektedir. Avrupa Birliği (AB) bu konuda en katı yönetmeliklere sahip olup, 2011 yılından itibaren nanomalzemelerin etiketlenmesini zorunlu hale getirmiştir (Chau vd., 2007). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), gıda ürünlerinde kullanılan nanomalzemelerin ayrıntılı risk değerlendirmelerinden geçirilmesini şart koşar. EFSA'nın belirlediği kurallar, nanopartiküllerin toksisite, biyoyararlanım, biyobirikim ve çevresel etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesini içerir (Committee, 2011; Committee vd., 2018).

Amerika Birleşik Devletleri'nde ise gıda ürünleri üzerindeki düzenleyici denetim Food and Drug Administration (FDA) tarafından yürütülmektedir. Ancak ABD'de nanoteknolojinin düzenlenmesi, AB'ye göre daha esnektir ve nanomalzemelerin ayrı bir kategori olarak değerlendirilmesine gerek

duyulmayabilir (Amenta vd., 2015). Diğer yandan, Japonya ve Avustralya gibi ülkelerde de benzer düzenleyici protokoller oluşturulmuş olup, bu düzenlemeler genellikle nanomalzemelerin potansiyel toksik etkilerini değerlendirir.

5.2. Risk Analizi ve Metodolojiler

Nanoteknolojik ürünlerin risk analizinde kullanılan metodolojiler, kimyasal ve biyolojik etkilerin çok yönlü olarak incelenmesini kapsar. EFSA ve FDA gibi kuruluşlar, risk analizinde üç temel aşamayı benimsemektedir: tehlike tanımlama, maruziyet değerlendirmesi ve risk karakterizasyonu (Committee, 2011; Committee vd., 2018). Bu aşamalar, nanomalzemelerin gıdalardaki davranışlarını, biyoyararlanımlarını ve vücutta birikim potansiyellerini dikkate alır.

Tehlike tanımlama sürecinde, nanopartiküllerin olası toksik etkileri belirlenir. Bu aşamada hücre kültürü çalışmaları ve hayvan deneyleri yaygın olarak kullanılır (Chaudhry ve Groves, 2010). Maruziyet değerlendirmesi, nanopartiküllerin tüketim yoluyla vücuda alınan miktarlarını ve bu miktarların biyolojik sistemlerdeki etkilerini analiz eder. Son olarak, risk karakterizasyonu, olası sağlık etkilerinin kapsamını ve ciddiyetini değerlendirerek güvenlik sınırlarını belirler (Takeuchi vd., 2014).

5.3. Nanopartikül Tespiti ve İzleme Teknikleri

Nanopartiküllerin tespit edilmesi ve izlenmesi, güvenlik değerlendirmelerinin doğru ve etkin bir şekilde yürütülebilmesi için kritik öneme sahiptir. Gıdalarda ve biyolojik sistemlerde nanopartiküllerin varlığını tespit etmek için gelişmiş analitik teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler, nanopartiküllerin boyutlarını, yüzey özelliklerini ve kimyasal bileşimlerini doğru bir şekilde belirlemeyi amaçlar (Wasilewska vd., 2023). Başlıca kullanılan teknikler şunlardır: Elektron Mikroskopisi (SEM/TEM), Nanopartiküllerin morfolojisini ve boyut dağılımını belirlemede yaygın olarak kullanılan görüntüleme teknikleridir (Lim vd., 2015). Dinamik Işık Saçılımı (DLS), Nanoemülsiyonlar ve sıvı fazdaki nanopartiküllerin boyutlarını belirlemek için kullanılır. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Nanopartiküllerin yüzey özelliklerini ve topografisini incelemek amacıyla kullanılır. Kütle Spektrometresi (ICP-MS), Gıdalardaki metal bazlı nanopartiküllerin kimyasal bileşimlerini ve konsantrasyonlarını ölçmek için etkilidir (He vd., 2019; Tiede vd., 2008).

Bu tekniklerin yanı sıra, gelişmiş izleme sistemleri, üretim ve dağıtım süreçlerinde nanopartiküllerin güvenli kullanımını sağlamak için

uygulanmaktadır. Bu sayede, olası kontaminasyonların önlenmesi ve belirli güvenlik sınırlarının aşılmasının engellenmesi amaçlanır (Ravichandran, 2010).

6. Endüstriyel Uygulamalar

Nanoteknolojinin gıda sanayisindeki etkisi her geçen gün daha da artmakta ve bu alandaki yenilikler, daha fonksiyonel, güvenli ve sürdürülebilir gıda ürünlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Mevcut ürünlerin iyileştirilmesi ve yeni ürünlerin geliştirilmesinde nanoteknoloji hem kalite hem de verim açısından önemli bir rol oynar. Ayrıca, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği teşvik eden yeşil nanoteknoloji yaklaşımları, bu teknolojinin gelecekteki etkisini artıracaktır (Chellaram vd., 2014; Thiruvengadam vd., 2018).

6.1. Mevcut ve Gelişmekte Olan Ürünler

Nanoteknoloji, halihazırda çeşitli gıda ürünlerinde kullanılmakta olup bu ürünler, biyoaktif bileşenlerin etkili bir şekilde taşınmasını, raf ömrünün uzatılmasını ve gıda güvenliğinin artırılmasını hedeflemektedir (Rathore ve Pandey, 2024; Singh vd., 2024). Öne çıkan mevcut uygulamalardan bazıları şunlardır:

Nanoemülsiyon Bazlı İçecekler: Omega-3 yağ asitleri, vitaminler ve polifenoller gibi biyoaktif bileşenleri içeren içecekler, nanoemülsiyonlar sayesinde daha yüksek biyoyararlanım sunmaktadır. Örneğin, içecek sektöründe kullanılan bu teknoloji, biyoaktif bileşenlerin stabilitesini koruyarak sağlık faydalarını artırmaktadır (Kaur vd., 2024).

Nanoyapılı Ambalaj Malzemeleri: Gıda güvenliğini artıran ve mikrobiyal kontaminasyonu önleyen antimikrobiyal ambalajlar, gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmada kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle gümüş ve çinko oksit nanopartikülleri içeren ambalajlar yaygın olarak kullanılmaktadır (Chudasama ve Goyary, 2024).

Fonksiyonel Süt Ürünleri: Probiyotik içeren yoğurtlar ve süt ürünleri, nanopartiküller sayesinde probiyotiklerin mide asidine karşı korunmasını ve bağırsaklarda etkili olmasını sağlamaktadır (Salama vd., 2022).

Gelişmekte olan ürünler arasında, belirli hastalıklara yönelik besin maddeleri taşıyan akıllı gıdalar ve sindirim sistemine hedeflenmiş besin taşıyıcı sistemler yer almaktadır.

6.2. Nanoteknolojinin Fonksiyonel Gıda Ar-Ge'sine Etkisi

Nanoteknoloji, fonksiyonel gıda araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) çalışmalarına entegre edilerek besinlerin etkinliğini artıran birçok yeniliğe kapı açmıştır. Nanoteknolojinin sağladığı mikro düzeyde kontrol, biyoaktif bileşenlerin hassas bir şekilde işlenmesine olanak tanımakta ve yeni ürünlerin daha hızlı geliştirilmesini sağlamaktadır (Weiss vd., 2006).

Nanotaşıyıcı sistemler, besin bileşenlerinin hedefe yönelik taşınmasını ve kontrollü salınımını mümkün kılarak gıda Ar-Ge çalışmalarında büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu durum, özellikle sporcu gıdaları, yaşlı bireyler için yönelik besin takviyeleri ve kronik hastalıklara yönelik besin destek ürünlerinin geliştirilmesinde etkili olmuştur (Momin vd., 2013).

Ayrıca, nanoteknoloji sayesinde sürdürülebilir üretim metodlarının geliştirilmesi, gıda israfının azaltılmasına ve üretim süreçlerinin optimize edilmesine de katkı sunmaktadır.

6.3. Sürdürülebilir ve Yeşil Nanoteknoloji Yaklaşımları

Endüstriyel uygulamalarda sürdürülebilirlik ve çevre dostu çözümler, nanoteknoloji tabanlı üretim süreçlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Yeşil nanoteknoloji yaklaşımları, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur nanomalzemelerin kullanımıyla çevresel etkileri azaltmayı hedefler (Ravichandran, 2010). Bu yaklaşımlardan bazıları şunlardır:

Biyobozunur Nanomalzemeler: Kitosan, alginat ve nişasta gibi doğal polimerlerden elde edilen biyobozunur nanotaşıyıcı sistemler, geleneksel sentetik malzemelere kıyasla daha az çevresel etkiye sahiptir (Khan, 2020). Bu tür malzemeler, özellikle çevre dostu ambalaj sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Enerji Verimli Üretim: Nanoteknoloji sayesinde enerji tüketimini azaltan ve daha az atık oluşturan üretim süreçleri geliştirilmektedir. Bu uygulamalar, özellikle nanoemülsiyonların düşük enerji kullanılarak hazırlanması ve üretim süreçlerinde su tüketiminin minimize edilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır (Pandey, 2018).

Atık Yönetimi ve Dönüşüm: Gıda üretimi sırasında ortaya çıkan atıkların, nanoteknoloji aracılığıyla geri dönüştürülmesi ve biyoaktif bileşenlerin geri kazanılması üzerine yapılan çalışmalar da sürdürülebilirliği teşvik etmektedir (Rathod vd., 2024).

Bu yaklaşımlar, yalnızca çevre dostu üretimi desteklemekle kalmaz, aynı zamanda maliyet etkin çözümler sunarak uzun vadede endüstriyel kârlılığı da artırır.

7. Sonuçlar ve Öneriler

Fonksiyonel gıdalarda nanoteknoloji kullanımı, besinlerin biyoyararlanımını artırmaktan gıda güvenliğini iyileştirmeye kadar geniş bir uygulama alanı sunarak gıda bilimi ve endüstrisinde devrim niteliğinde değişiklikler yaratmıştır. Ancak, bu teknolojinin uzun vadeli sağlık etkileri, yasal düzenlemeler ve tüketici kabulü gibi zorluklar, dikkatle ele alınması gereken kritik konular arasında yer almaktadır. Bu nedenle, gelecekteki çalışmalar ve politika yapıcılarının desteği, güvenli ve sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesi açısından önemli olacaktır. Nanoteknoloji, gıda biliminde inovatif çözümler sunarak biyoaktif bileşenlerin hedefe yönelik taşınması, stabilitenin korunması ve kontrollü salınım gibi avantajlarla gıdaların besin değerini artırmıştır. Bu teknolojinin, omega-3 yağ asitleri, polifenoller, probiyotikler ve vitaminler gibi biyoaktif bileşenlerin etkin kullanımını kolaylaştırması, fonksiyonel gıda pazarında hızlı bir büyümeye neden olmuştur.

Bununla birlikte, metal ve metal oksit nanopartiküllerinin uzun vadeli toksik etkileri gibi önemli konular henüz tam anlamıyla aydınlatılamamıştır. Düzenleyici çerçevelerin uluslararası düzeyde uyumlaştırılması ve gıda ürünlerinde nanomalzemelerin etiketlenmesinin şeffaf bir şekilde yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda, sürdürülebilir ve çevre dostu nanoteknolojik çözümlerle gıda üretiminde enerji verimliliğinin artırılması, çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından büyük önem taşır.

Nanoteknolojinin fonksiyonel gıdalardaki potansiyelini tam anlamıyla ortaya çıkarabilmek ve güvenli kullanımını sağlamak için çeşitli araştırma alanlarına odaklanılması gerekmektedir. Bu bağlamda gelecekteki araştırmalarda aşağıdaki konulara öncelik verilmesi önerilmektedir:

Toksikolojik Çalışmalar: Nanopartiküllerin uzun vadeli sağlık etkilerini değerlendiren *in vivo* ve *in vitro* çalışmaların artırılması önemlidir. Özellikle nanopartiküllerin bağışıklık sistemi, bağırsak mikrobiyotası ve hücresel DNA üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

Daha Güvenli Nanomalzemeler: Toksik etkileri minimum düzeye indiren ve biyobozunur özelliklere sahip yeni nesil nanomalzemelerin geliştirilmesi sürdürülebilir üretim açısından önemli bir adım olacaktır.

Yeşil Nanoteknoloji Yaklaşımları: Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur nanotaşıyıcı sistemler, çevresel sürdürülebilirliği destekleyerek çevre dostu çözümlerin benimsenmesini teşvik edebilir.

Düzenleyici Çerçevelerin Geliştirilmesi: Ulusal ve uluslararası düzeyde nanomalzemelerin kullanımına yönelik standartların belirlenmesi ve bu standartların bilimsel bulgulara dayalı olarak güncellenmesi gerekmektedir.

Tüketici Eğitimi ve Sosyal Algı: Tüketicilerin nanoteknolojiye yönelik güvenini artırmak için şeffaf bilgilendirme ve farkındalık kampanyaları düzenlenmelidir. Bilimsel verilerin kamuoyuna açık şekilde sunulması, toplumda yanlış anlaşılımları ve olumsuz algıyı azaltabilir.

Sonuç olarak, fonksiyonel gıdalarda nanoteknolojinin güvenli ve sürdürülebilir gelişimi için disiplinler arası iş birliği ve kapsamlı bilimsel araştırmalar hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda, akademi, endüstri ve düzenleyici kuruluşların ortak hareket etmesi, inovasyon ve güvenlik dengesinin sağlanmasına yardımcı olacaktır.

Kaynakça

- Ailincăi, D., Mititelu, L. T., ve Marin, L. (2018). Drug delivery systems based on biocompatible imino-chitosan hydrogels for local anticancer therapy. *Drug Delivery*, 25(1), 1080-1090.
- Amenta, V., Aschberger, K., Arena, M., Bouwmeester, H., Moniz, F. B., Brandhoff, P., Gottardo, S., Marvin, H. J., Mech, A., ve Pseudo, L. Q. (2015). Regulatory aspects of nanotechnology in the agri/feed/food sector in EU and non-EU countries. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 463-476.
- Barra, A., Santos, J. D., Silva, M. R., Nunes, C., Ruiz-Hitzky, E., Gonçalves, I., Yildirim, S., Ferreira, P., ve Marques, P. A. (2020). Graphene derivatives in biopolymer-based composites for food packaging applications. *Nanomaterials*, 10(10), 2077.
- Bouwmeester, H., Brandhoff, P., Marvin, H. J., Weigel, S., ve Peters, R. J. (2014). State of the safety assessment and current use of nanomaterials in food and food production. *Trends in Food Science ve Technology*, 40(2), 200-210.
- Bouwmeester, H., Dekkers, S., Noordam, M. Y., Hagens, W. I., Bulder, A. S., de Heer, C., ten Voorde, S. E. C. G., Wijnhoven, S. W. P., Marvin, H. J. P., ve Sips, A. J. A. M. (2009). Review of health safety aspects of nanotechnologies in food production. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 53(1), 52-62.
- Cetin, K., ve Denizli, A. (2015). 5-Fluorouracil delivery from metal-ion mediated molecularly imprinted cryogel discs. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 126, 401-406.
- Chau, C.-F., Wu, S.-H., ve Yen, G.-C. (2007). The development of regulations for food nanotechnology. *Trends in Food Science ve Technology*, 18(5), 269-280.
- Chaudhry, Q., ve Castle, L. (2011). Food applications of nanotechnologies: an overview of opportunities and challenges for developing countries. *Trends in Food Science ve Technology*, 22(11), 595-603.
- Chaudhry, Q., ve Groves, K. (2010). Nanotechnology applications for food ingredients, additives and supplements.
- Chellaram, C., Murugaboopathi, G., John, A., Sivakumar, R., Ganesan, S., Krithika, S., ve Priya, G. (2014). Significance of nanotechnology in food industry. *APCBEE procedia*, 8, 109-113.
- Chudasama, M., ve Goyary, J. (2024). Nanostructured materials in food science: Current progress and future prospects. *Next Materials*, 100206.
- Coles, D., ve Frewer, L. J. (2013). Nanotechnology applied to European food production—A review of ethical and regulatory issues. *Trends in Food Science ve Technology*, 34(1), 32-43.

- Committee, E. S. (2011). Guidance on the risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain. *EFSA journal*, 9(5), 2140.
- Committee, E. S., Hardy, A., Benford, D., Halldorsson, T., Jeger, M. J., Knutsen, H. K., More, S., Naegeli, H., Noteborn, H., ve Ockleford, C. (2018). Guidance on risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain: Part 1, human and animal health. *EFSA journal*, 16(7), e05327.
- Çetin, K., Alkan, H., Bereli, N., ve Denizli, A. (2017). Molecularly imprinted cryogel as a pH-responsive delivery system for doxorubicin. *Journal of Macromolecular Science Part a-Pure and Applied Chemistry*, 54(8), 502-508.
- Çetin, K., Denizli, F., Yavuz, H., Türkmen, D., Qureshi, T., ve Denizli, A. (2019). Magnetic nanoparticles and their biomedical applications. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 47(2), 143-152.
- Danhier, F., Ansorena, E., Silva, J. M., Coco, R., Le Breton, A., ve Préat, V. (2012). PLGA-based nanoparticles: an overview of biomedical applications. *Journal of controlled release*, 161(2), 505-522.
- Das, M., Saxena, N., ve Dwivedi, P. D. (2009). Emerging trends of nanoparticles application in food technology: Safety paradigms. *Nanotoxicology*, 3(1), 10-18.
- DeFrates, K., Markiewicz, T., Gallo, P., Rack, A., Weyhmiller, A., Jarmusik, B., ve Hu, X. (2018). Protein polymer-based nanoparticles: fabrication and medical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(6), 1717.
- García-Pinel, B., Porras-Alcalá, C., Ortega-Rodríguez, A., Sarabia, F., Prados, J., Melguizo, C., ve López-Romero, J. M. (2019). Lipid-based nanoparticles: application and recent advances in cancer treatment. *Nanomaterials*, 9(4), 638.
- Gold, K., Slay, B., Knackstedt, M., ve Gaharwar, A. K. (2018). Antimicrobial activity of metal and metal-oxide based nanoparticles. *Advanced Therapeutics*, 1(3), 1700033.
- Grobe, A., Renn, O., ve Jaeger, A. (2008). *Risk governance of nanotechnology applications in food and cosmetics*.
- Handy, R. D., ve Shaw, B. J. (2007). Toxic effects of nanoparticles and nanomaterials: implications for public health, risk assessment and the public perception of nanotechnology. *Health, Risk ve Society*, 9(2), 125-144.
- Haque, S., ve Patra, C. R. (2023). Casein-based nanosystems for therapeutic applications. In *Polymeric Nanosystems* (pp. 621-655). Elsevier.
- Hardy, A., Benford, D., Halldorsson, T., Jeger, M. J., Knutsen, H. K., More, S., Naegeli, H., Noteborn, H., ve Ockleford, C. (2018). Guidance on risk

- assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain: Part 1, human and animal health. *EFSA journal*, 16(7), e05327.
- He, X., Deng, H., ve Hwang, H.-m. (2019). The current application of nanotechnology in food and agriculture. *Journal of Food and Drug Analysis*, 27(1), 1-21.
- He, X., ve Hwang, H.-M. (2016). Nanotechnology in food science: Functionality, applicability, and safety assessment. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(4), 671-681.
- Kaur, G., Panigrahi, C., Agarwal, S., Khuntia, A., ve Sahoo, M. (2024). Recent trends and advancements in nanoemulsions: Production methods, functional properties, applications in food sector, safety and toxicological effects. *Food Physics*, 100024.
- Khan, S. H. (2020). Green nanotechnology for the environment and sustainable development. *Green materials for wastewater treatment*, 13-46.
- Lim, J.-H., Sisco, P., Mudalige, T. K., Sanchez-Pomales, G., Howard, P. C., ve Linder, S. W. (2015). Detection and characterization of SiO₂ and TiO₂ nanostructures in dietary supplements. *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(12), 3144-3152.
- McCarron, E. (2016). *Nanotechnology and food: investigating consumers' acceptance of foods produced using nanotechnology* [Dublin Business School].
- Mohd Yusof, H., Mohamad, R., Zaidan, U. H., ve Abdul Rahman, N. A. (2019). Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *Journal of animal science and biotechnology*, 10, 1-22.
- Momin, J. K., Jayakumar, C., ve Prajapati, J. B. (2013). Potential of nanotechnology in functional foods. *Emirates journal of food and agriculture*, 25(1), 10-19.
- Pandey, G. (2018). Nanotechnology for achieving green-economy through sustainable energy. *Rasayan J Chem*, 11(3), 942-950.
- Puri, A., Loomis, K., Smith, B., Lee, J.-H., Yavlovich, A., Heldman, E., ve Blumenthal, R. (2009). Lipid-based nanoparticles as pharmaceutical drug carriers: from concepts to clinic. *Critical Reviews in Therapeutic Drug Carrier Systems*, 26(6).
- Rathod, S., Preetam, S., Pandey, C., ve Bera, S. P. (2024). Exploring synthesis and applications of green nanoparticles and the role of nanotechnology in wastewater treatment. *Biotechnology Reports*, e00830.
- Rathore, S., ve Pandey, A. K. (2024). Applications of Nanotechnology in Food Processing. In *Advanced Research Methods in Food Processing Technologies* (pp. 401-417). Apple Academic Press.

- Ravichandran, R. (2010). Nanotechnology applications in food and food processing: innovative green approaches, opportunities and uncertainties for global market. *International Journal of Green Nanotechnology: Physics and Chemistry*, 1(2), P72-P96.
- Richards, D. A., Maruani, A., ve Chudasama, V. (2017). Antibody fragments as nanoparticle targeting ligands: a step in the right direction. *Chemical Science*, 8(1), 63-77.
- Sadhukha, T., Layek, B., ve Prabha, S. (2018). Incorporation of lipolysis in monolayer permeability studies of lipid-based oral drug delivery systems. *Drug Delivery and Translational Research*, 8(2), 375-386.
- Salama, H. H., Trif, M., Rusu, A. V., ve Bhattacharya, S. (2022). Application of functional and edible coatings and films as promising strategies for developing dairy functional products—A review on yoghurt case. *Coatings*, 12(6), 838.
- Samimi, S., Maghsoudnia, N., Eftekhari, R. B., ve Dorkoosh, F. (2019). Lipid-based nanoparticles for drug delivery systems. *Characterization and biology of nanomaterials for drug delivery*, 47-76.
- Sandoval, B. (2009). Perspectives on FDA's regulation of nanotechnology: emerging challenges and potential solutions. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8(4), 375-393.
- Sekhon, B. S. (2010). Food nanotechnology - an overview. *Nanotechnology Science and Applications*, 3, 1-15.
- Shah, M. A., Shahnaz, T., Zehab-ud-Din, Masoodi, J. H., Nazir, S., Qurashi, A., ve Ahmed, G. H. (2024). Application of nanotechnology in the agricultural and food processing industries: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 39.
- Siegrist, M., Stampfli, N., ve Kastenholz, H. (2009). Acceptance of nanotechnology foods: a conjoint study examining consumers' willingness to buy. *British Food Journal*, 111(7), 660-668.
- Silvestre, C., Duraccio, D., ve Cimmino, S. (2011). Food packaging based on polymer nanomaterials. *Progress in Polymer Science*, 36(12), 1766-1782.
- Singh, A., Figueiredo, R., Avagyan, A. A., Movsesyan, H. S., Rajput, V. D., Minkina, T. M., Singh, R. K., Sousa, J. R., ve Ghazaryan, K. (2024). Market Value of Nanotechnology-Based Products in Agriculture: Current Status and Future Sustainability Goals in the Era of Climate Change.
- Singh, H. (2016). Nanotechnology Applications in Functional Foods; Opportunities and Challenges. *Prev Nutr Food Sci*, 21(1), 1-8.
- Sozer, N., ve Kokini, J. L. (2009). Nanotechnology and its applications in the food sector. *Trends in Biotechnology*, 27(2), 82-89.
- Takeuchi, M. T., Kojima, M., ve Luetzow, M. (2014). State of the art on the initiatives and activities relevant to risk assessment and risk management

- of nanotechnologies in the food and agriculture sectors. *Food Research International*, 64, 976-981.
- Thiruvengadam, M., Rajakumar, G., ve Chung, I.-M. (2018). Nanotechnology: current uses and future applications in the food industry. *3 Biotech*, 8, 1-13.
- Tiede, K., Boxall, A. B., Tear, S. P., Lewis, J., David, H., ve Hassellöv, M. (2008). Detection and characterization of engineered nanoparticles in food and the environment. *Food Additives and Contaminants*, 25(7), 795-821.
- Wasilewska, A., Bielicka, M., Klekotka, U., ve Kalska-Szostko, B. (2023). Nanoparticle applications in food—a review. *Food ve Function*, 14(6), 2544-2567.
- Weiss, J., Takhistov, P., ve McClements, D. J. (2006). Functional materials in food nanotechnology. *Journal of Food Science*, 71(9), R107-R116.
- Yavuz, H., Çetin, K., Akgönüllü, S., Battal, D., ve Denizli, A. (2018). Therapeutic protein and drug imprinted nanostructures as controlled delivery tools. In *Design and Development of New Nanocarriers* (pp. 439-473). Elsevier.
- Zhang, Y., Petibone, D., Xu, Y., Mahmood, M., Karmakar, A., Casciano, D., Ali, S., ve Biris, A. S. (2014). Toxicity and efficacy of carbon nanotubes and graphene: the utility of carbon-based nanoparticles in nanomedicine. *Drug metabolism reviews*, 46(2), 232-246.