



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Derleme Makale

Nanoteknolojinin Gıdalarda Kullanım Alanları: Su Ürünleri Özelinde İncelemeler

Tuğde Nur TAN¹, Cansel KALEMCI¹, Adem Barış YILMAZ¹, Bengünur ÇORAPCI^{*2}

¹Sinop Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İşleme Teknolojisi Bölümü, 57000, Sinop, Türkiye

²Sinop Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, İşleme Teknolojisi Bölümü, 57000, Sinop, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta: bengucorapci@hotmail.com

Öz: Nanoteknoloji son yıllarda hemen hemen bilimin her alanına büyük bir hızla dahil olmaktadır. Bu alanlardan bir tanesi de gıda bilimi olup, su ürünleri alanında yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Balık ve diğer su ürünleri sağlıklı beslenmede en önde gelen değerli gıda kaynaklarımızdan biridir. Su ürünlerinin yetiştirilmesinden işlenmesine ve ambalajlanmasından tüketimine kadar olan tüm süreçlerde nanoteknolojik yöntemler kullanılabilmektedir. Su ürünleri yetiştiriciliğinde balık besleme, büyüme ve balık hastalıklarında çeşitli nanopartiküllerin kullanımının olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Benzer şekilde su ürünlerinin işlenmesi ve ambalajlanması süreçlerinde nanopartikül ilavelerinin su ürünlerinin duyuusal, kimyasal ve mikrobiyolojik kalitesini artırdığı ve raf ömrünü uzatmada katkı sağladığı söylenebilir. Bu makale özellikle su ürünleri alanında nanoteknolojik gelişmelere dikkat çekmek, son yıllarda yapılan çalışmaların hangi konular üzerinde yoğunlaştığını belirlemek ve bu konularda bir kaynak oluşturmak amacıyla derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İşleme teknolojisi, Nanoteknoloji, Su ürünleri, Yetiştiricilik

The Use of Nanotechnology in Foods: Investigations on Aquaculture Products

Abstract: In recent years, nanotechnology has been rapidly incorporated into almost every field of science. One of these fields is food science, and studies in the field of aquaculture attract attention. Fish and other aquaculture products are one of the most valuable food sources for a healthy diet. Nanotechnological methods can be used in all processes from aquaculture to processing and packaging to consumption. The use of various nanoparticles in fish nutrition, growth and fish diseases in aquaculture has shown positive results. Similarly, it can be said that the addition of nanoparticles in the processing and packaging processes of seafood products improves the sensory, chemical and microbiological quality of seafood products and contributes to the extension of shelf life. This article has been compiled in order to draw attention to nanotechnological developments especially in the field of aquaculture, to determine on which topics the studies carried out in recent years have focused and to create a resource on these issues.

Keywords: Aquaculture, Nanotechnology, Processing technology, Seafoods

1. Giriş

Nanoteknoloji; küçük şeylerin, özellikle de boyutları 100 nanometreden daha küçük olan şeylerin bilimi ve mühendisliği olarak tanımlanmaktadır. ‘Nano’ Yunanca ‘cüce’ anlamına gelen ‘nanos’ kelimesinden gelmektedir. Bir nanometre 10^{-9} metre veya yaklaşık 3 atom uzunluğuna eşittir (NNCI, 2025). Nanoteknoloji, fizik, kimya, biyoloji, materyal bilimi, bilgisayar bilimi ve mühendislik alanları da dahil olmak üzere hemen hemen bilimin her alanına katkı sağlamaktadır (Bayda ve ark., 2020). Bu alanlardan bir tanesi de gıda sektörüdür.

Geleneksel mikro ölçekli malzemelerin aksine, yeni özelliklere sahip nanomalzemelerin gıda ürünlerinde duyuusal kaliteyi artırabileceği, yeni bir doku, renk, görünüm, işlenebilirlik kazandırarak, raf ömrünü artırabileceği bildirilmektedir (Bratovcic, 2020). Nanoyapılı malzemeler, besin değerini ve

Gönderilme Tarihi: 03.02.2025

Kabul Tarihi: 17.06.2025

Nasıl atıf yapılır: Tan, T. N., Kalemci, C., Yılmaz, A. B., & Çorapçı, B. (2025). Nanoteknolojinin gıdalarda kullanım alanları: Su ürünleri özelinde incelemeler. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(2), 860-877. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1632251>

lezzetini artırmaktan gıda güvenliğini ve paketlemeyi iyileştirmeye kadar gıda endüstrisinin bir dizi alanını değiştirme potansiyeline sahip oldukları için gıda bilimi alanında büyük ilgi görmektedir (Ranjha ve ark., 2022). Ayrıca çölyak hastalığı ve laktoz intoleransı gibi gıda kaynaklı sağlık sorunları olan bireyler için özel çözümler sunmaktadır. Araştırmacılar, laktoz intoleransı olanlar veya vegan diyeti uygulayanlar için süt içermeyen, nanoyapılı emülsiyonlarla üretilen dondurma geliştirmişlerdir (Abdel-Maqsooud ve ark., 2021; Nema ve ark., 2022). Gluten alerjisi veya çölyak hastalığı olan kişiler tarafından tüketilebilecek, modifiye nişasta nanopartikülleri gibi nanoyapılı bileşenlerle üretilen glutensiz pişirme ürünleri geliştirilmiştir (Melini & Melini., 2018; Yousif ve ark., 2019; Haghighat-Kharazi ve ark., 2020).

Çiğ balık ve balık ürünlerinin soğuk depolama ya da dondurucu koşullarında uzun süreli depolanması sırasında mikrobiyal ve kimyasal bozulmaya oldukça hassas olduğu bilinmektedir. Su ürünlerinin diğer et ürünlerine göre daha kolay ve çabuk bozulmasının nedenleri; yüksek su aktivitesine, azot bileşiklerine, doymamış yağ asitlerine, fermente edilebilir karbonhidratlar ve mineraller gibi bol miktarda besin ögesine ve bozulmayı kolaylaştıran yüksek kas pH'sına sahip olması olarak sayılabilir (Kakaie & Shabbazi, 2016; Ojagh ve ark., 2010; Karami ve ark., 2019).

Hem sağlıklı beslenme hem de su ürünleri sektörü açısından oldukça önemli olan su ürünleri ile ilgili nanoteknolojiyi konu alan çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir. Yapılan araştırmalar, değerli ancak bir o kadar da kolay bozulabilen su ürünlerinin kalitesinin artırılması ve raf ömrünün uzatılmasına yönelik çalışmalardır (Abdollahi ve ark., 2014; Kazemzadeh ve ark., 2022; Jitpasutham ve ark., 2024). Ayrıca su ürünleri yetiştiriciliğinde çeşitli nanopartiküller kullanılarak balık sağlığı, beslenme, büyüme gibi alanlarda çok sayıda araştırma mevcuttur (Rajeshkumar ve ark., 2009; Rajan & Rohini, 2021; Elabd ve ark., 2022).

Beslenmemiz açısından uzmanların haftada en az iki gün tüketilmesini tavsiye ettikleri balık, en değerli besin öğelerimizdendir. Teknolojinin ilerlemesiyle tuzlama, kurutma, tütsüleme vb. geleneksel muhafaza metotlarının yerini nanoteknolojik metotlar almaya başlamıştır. Su ürünlerinin yetiştirilmesinden işlenmesi ve paketlenmesine kadar olan süreçte nanoteknolojik faaliyetlerin hızla geliştiğini görmekteyiz. Bu çalışmada gıda işleme, ambalajlama ve depolama alanında nanoteknolojiye genel olarak değinilmiş, su ürünleri yetiştiriciliği ve su ürünlerinin işlenmesi alanında yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu makale özellikle su ürünleri alanında nanoteknolojik gelişmelere dikkat çekmek, son yıllarda yapılan çalışmaların hangi konular üzerinde yoğunlaştığını belirlemek ve bu konularda bir kaynak oluşturmak amacıyla derlenmiştir.

2. Gıda İşleme, Ambalajlama ve Depolama Alanında Nanoteknoloji

Gıda endüstrisinde nanoteknoloji, ürün geliştirme, gıda güvenliği, kalite kontrol, ambalajlama ve depolama gibi birçok alanda geleceğe yönelik sürdürülebilir yenilikler sunmaktadır. Nanoteknoloji, nanoemülsiyonlar, katı lipid nanopartikülleri, nanoyapılı lipid taşıyıcıları, nanolipozomlar, nanojeller ve stabilize nanopartikül pickering emülsiyonları gibi farklı nano ölçekli dağıtım sistemlerini kullanarak gıdalardaki biyoaktif bileşikler kapsüllemek, korumak için güçlü bir strateji olarak ortaya çıkmıştır (McClements & Öztürk, 2021). Nanoyapılı malzemeler, bileşiklerin, vitaminlerin, minerallerin çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını artırarak beslenme eksikliğini hafifletebilir, genel sağlığı iyileştirebilir böylece daha iyi dokulara, tatlara ve estetiğe sahip gıda ürünleri yaratmayı mümkün kılmaktadır (Aguilar-Perez ve ark., 2023). Nanomalzemeler, besinsel, duyuşal ve dokusal özelliklerini geliştirmek ve gıdaların raf ömrünü uzatmak için gıdaya doğrudan eklenebilir veya ambalaj malzemeleriyle birleştirilebilir. Uluslararası gıda düzenleyici kurumları tarafından, partikül boyutu dağılımına göre sınıflandırılan onaylanmış katkı maddesi nanomalzemelerinin bir listesi oluşturulmuştur (Jafarizadeh-Malmiri ve ark., 2019; Torres-Giner ve ark., 2022). Son zamanlarda çeşitli yağlar kullanılarak elde edilen nanoemülsiyonların yağı azaltılmış kek ve bisküvi gibi ürünler elde etmek amacıyla kullanıldığı görülmektedir. Yağ oranı %50 azaltılarak yerine nano boyutlu yağ kullanılmasıyla elde edilen kek ve bisküvilerin duyuşal kalitesinin tam yağlı ürünler ile kıyaslandığında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık göstermediği, nanoemülsiyon içeren keklerde oksidatif stabilitenin ve fonksiyonel özelliklerin iyileştirildiği bildirilmiştir (Ekin ve ark., 2021; Meral ve ark., 2022). Bir başka çalışmada, salep glukomannan ve peynir altı suyu proteini izolatu bazlı *Lactobacillus bulgaricus* ve *Streptococcus thermophilus* nanotüpler üretilmiş ve yoğurt örneklerine farklı oranlarda (%0.5, %1, %2, kontrol) ilave edilmiştir. Soğuk depolama süresi boyunca, üretilen nanotüplerle muamele edilen yoğurt örneklerinin kontrol yoğurt örneklerine kıyasla 2 log CFU/g *Lactobacillus*

bulgaricus ve *Streptococcus thermophilus*'a kadar daha fazla bakteri canlılığına sahip olduğu, yoğurt örneklerinin duyuşsal puanlarının kontrol yoğurt örneklerine kıyasla daha yüksek bulunduğı bildirilmiştir (Demirci ve ark., 2024).

Sığır eti kıymasının kalitesinin geliştirilmesinde tarçın ve zerdeçal uçucu yağlarının nanoemülsifikasyonu (Dghais ve ark., 2023), sığır eti ambalajı için doğal bazlı yenilebilir nanokompozit kaplamalar (Ghasemi ve ark., 2024), süt ve süt ürünlerinde antibiyotik kalıntılarının tespiti için son teknoloji nanosensörler ve kitler (Abedi-Firoozjah ve ark., 2024) son yılların ilgi çekici konularından bazılarıdır.

2.1. Yaygın olarak kullanılan gıda katkı maddeleri, nanomalzemelerin fonksiyonları ve uygulanabilir gıdalar

Titanyum dioksit (TiO₂, E171), gümüş (Ag, E 174), altın (Au, E 175), silisyum dioksit (SiO₂, E 551), demir oksit (Fe₂O₃, E 172), magnezyum oksit (MgO, E 530) ve çinko oksit (ZnO) yaygın olarak kullanılan ve onaylanan bazı gıda katkı maddesi nanomalzemeleridir (Jafarizadeh-Malmiri ve ark., 2019). TiO₂'nin 2022 yılında Avrupa Komisyonu tarafından gıda katkı maddesi olarak kullanımı yasaklanmıştır. Türkiye'de ise Avrupa ve diğer ülkelerin tespitleri sonucu Türk Gıda Kodeksi Katkı Maddeleri Yönetmeliğine göre 01 Nisan 2024 tarihinden itibaren yasak olduğu resmî gazetede yayınlanmıştır (T.C. Resmî Gazete, 2023). Oksijen tutucu, renklendirici ajan, gıda ambalajlarında antimikrobiyal ajan olarak; şekerlemeler, süt ürünleri, yenilebilir buzlar, surimi ve somon ikameleri, baharatlar ve çeşniler, hardal, çorbalar ve et suları ve soslar içerisinde kullanılmaktaydı (Ropers ve ark. 2017; Blaznik ve ark., 2021). MgO, aroma taşıyıcı, topaklanmayı önleyici ajan, akış artırıcı, katalizör madde olarak; süt tozu, krema tozu, çikolata ve kakao ürünlerinde kullanılabilir (Chaudhry ve ark., 2008). ZnO, biyoyumlu, toksik olmayan, çevre dostu, kimyasal olarak kararlı ve insanlara neredeyse zararsız, yüksek sıcaklık ve basınçta kararlı, antimikrobiyal ajan, FDA onaylı genel olarak güvenli malzeme olarak kabul edilir ve gıda endüstrisinde besin takviyesi, gıda ambalajında antimikrobiyal ajan olarak yaygın kullanım alanına sahiptir (Sheteiwy ve ark., 2021). Fe₂O₃, demir içeren bileşikler yaygın bir gıda katkı maddesi olarak kabul edilir ve renklendirici olarak katkıda bulunan demir oksit ve hidroksitler gibi farklı formlarda mevcuttur. Bunların; balık ezmesi, çeşni, sakız, aromalı fermente süt ürünleri, tatlılar, süslemeler ve kaplamalar, yenilebilir buzlar, unlu mamuller, et ürünleri gibi çeşitli gıda uygulamalarında kullanımları onaylanmıştır (Aguilar ve ark., 2015; Hetzer ve ark., 2022). Ag ve Au gibi elementel formların da renklendirici ajan gıda katkı maddesi olarak, hamur işleri, kekler, dondurulmuş tatlılar, çikolatalar ve diğer birçok şekerlemede dekoratif bir madde olarak kullanılması onaylanmıştır (Medina- Reyes ve ark., 2020; Silva ve ark., 2022).

2.2. Gıda ambalajlamada kullanılan nanomalzemeler

Gıda ambalajlarında fonksiyonel ve performans iyileştiren nanomalzemeler kullanarak daha etkili, çevre dostu ve güvenilir ambalaj özellikleri sağlanmaktadır. Nanoyapılar gıda ambalajlarında dayanıklılığı, sıcaklık direncini ve alev direncini artırmak, gıdanın raf ömrünü uzatmak ve özellikle nakliye sırasında gıda israfını azaltmak için kullanılabilir (Thiruvengadam ve ark., 2018). Nanoteknolojinin gıda ambalajlamasında önemli bir uygulaması, nanokompozit malzemelerin geliştirilmesidir (Jayaweera ve ark., 2023). Bu malzemeler, nano parçacıklar veya nanolifler gibi nano ölçekli katkı maddeleri ile gömülü bir polimer matristen oluşur. Gümüş veya titanyum dioksit gibi nanopartiküllerin dahil edilmesi, ambalaj malzemesine antimikrobiyal özellikler kazandırır (Jadhav ve ark., 2023). Bu, ambalajın yüzeyinde bakteri ve diğer mikroorganizmaların büyümesini engellemeye yardımcı olur, böylece paketlenmiş gıdanın güvenliğini ve raf ömrünü artırır. Gıda ambalajı daha önce pasif veya geleneksel olan, şimdi uyarlanabilir, dinamik ve gelişmiş işlevselliğe sahip akıllı gıda ambalajları oluşturmak için nanoteknolojiyi kullanan aktif veya akıllı ambalajlara doğru ilerlemektedir (Ashfaq ve ark., 2022; De Sousa ve ark., 2023). Nanopartikül teknolojisi ile birleştirilmiş gıda ambalaj malzemeleri alanındaki çeşitli teknolojiler ve metodolojiler incelendiğinde; gaz bariyeri özellikleri, UV koruması, kolay ayrışabilirlik ve mekanik özellikleri ile biyobozunur ambalajlar öne çıkmaktadır. Sıcaklık kontrolü, oksijen atma, etilen emici, lezzet ve aroma tutma, gaz bariyeri geliştirme, UV koruması sayesinde aktif paketlenme tercih konusu olurken, indikatör / sensör sistemleri, zaman-sıcaklık izleme, gaz algılama, RFID ve izleme, interaktif ambalajlama, açıldığını belli eden, raf ömrü tahmini ile

akıllı paketleme sistemleri dikkat çekmektedir. Yenilebilir ambalajlar, gaz ve koku bariyerleri, uzatılmış raf ömrü, lezzet ve aroma koruma ile antimikrobiyal özellikleri sayesinde tercih konusu olurken, antimikrobiyal ambalajlar, mikroorganizmaların büyümesini ve kontaminasyonu engellemesi, gıda kalitesini koruyarak raf ömrünü uzatması nedeniyle ilgi görmektedirler (Kumar Gupta ve ark., 2024).

Ambalajlamada kullanılan nanomalzemeler kaynaklarına göre organik ve inorganik olarak sınıflandırılabilir.

2.2.1. Organik nanopartiküller

Nişasta, selüloz, kitosan ve protein nanopartikülleri organik nanopartiküllere örnek olarak gösterilebilir. Polisakkarit bazlı nanopartiküller, P-NP'ler, kitin, selüloz, aljinat, gum/kitosan nişastası, pektin kolay modifikasyona sahip doğal biyomalzemelerden yapılmıştır ve düşük maliyetli biyomalzemelerdir. Polisakkaritler, gıda ambalajlarında kullanım için toksik olmama ve biyouyumluluk gibi önemli özelliklere sahiptir (Altaf ve ark., 2022; Ahankari ve ark., 2023). Nişasta nanopartikülleri, genellikle meyvelerde, tahıllarda ve sebzelerde bulunan bir polisakkarit türüdür. Nişasta çeşitli film özelliklerini artıran yapısal takviye maddeleri olarak işlev görür ve ambalaj malzemelerinin üretimi, gıda kalitesini, raf ömrünü, çekme mukavemetini, elastikiyet modülünü ve bariyer özelliklerini önemli ölçüde artırmaktadır (Adeyeye ve ark., 2023). Selüloz nanopartikülleri (SN), satın alma maliyeti düşük ve birçok tarımsal üründen elde edilebilir. Genel olarak, SN'ler selüloz nanofibriller, selüloz nanokristalleri ve bakteriyel SN'ler olmak üzere üçe ayrılır. Araştırmacılar, selüloz nanopartiküllerini kullanarak biyolojik olarak parçalanabilen membran üretmektedirler (Asha ve Sivaranjana, 2023). Kitosan nanopartikülleri, böceklerden, kabuklulardan ve mantar hücre duvarlarından elde edilebilir (Hisham ve ark., 2024). Kitinin ana kaynakları deniz canlıları, özellikle kabuklulardır. İki yöntemle (enzimatik deasetilasyon- kimyasal deasetilasyon) kitosana dönüştürülebilir (Ahankari ve ark., 2023). Kitosan yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyolojik olarak parçalanabilen bir polimer olduğu için ekosisteme uygun malzemelerin geliştirilmesi için sürdürülebilir bir seçenektir. Kitosanın antibakteriyel ve zengin biyouyumluluk özellikleri nedeniyle gıda ambalajı için önemli bir kaynaktır. Bu nedenle, kitosan formülasyonları, özellikle paketlenmiş gıdaların kalitesi hakkında bilgi sağlamak veya gıdaların aktif ambalajlanması ve raf ömrünün uzatılması için akıllı ambalajlar geliştirmek için gıda ambalajlamada kullanılmıştır (Roy ve Rhim, 2021). Protein nanopartikülleri, gıda bilimcileri, proteinin kendi kendine toplanma davranışını indüklemek için çevresel parametreleri manipüle ederek benzersiz ve önceden belirlenebilir nanopartiküller oluşturmuşlardır. Gıda formülasyonlarının ve ambalajlarının görünümünü veya tutarlılığını iyileştirmek için kullanılabilecek işlevsel NP'lerin tasarımı ve geliştirilmesine yönelik artan bir araştırma ilgisi vardır (Wang ve ark., 2023).

2.2.2. İnorganik nanopartiküller

İnorganik NP'ler, ambalajda bakteri üremesini azaltma potansiyeline sahiptir, fizikokimyasal ve fonksiyonel özellikleri geliştirebilir (Dash ve ark., 2022; Adeyemi ve Fawole, 2023). Bu nedenle, gıda ambalajı filmlerindeki inorganik NP'ler, raf ömrünü uzatabilir ve gıda kalitesini koruyabilir. İnorganik nanodolgular dört ana kategoriye ayrılmaktadır: metal/metal oksit nanoyapıları (Ag, Cu, CuO, ZnO, TiO₂, Au, vb.), karbon bazlı nanoyapılar (CNT'ler, fullerener, grafit, grafen ve karbon fiberler), nanokiller (montmorillonit, bentonit, halloysit, vb.) ve diğer metalik olmayan nanoyapılar (kükürt ve silika NP'ler) (Priyadarshi ve ark., 2022). Karbon nanopartikülleri (C-NP'ler), benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri nedeniyle oldukça arzu edilir. Çeşitli alanlarda ve koşullarda potansiyel uygulamalarını geliştirmek için genellikle polimerler veya metallerle entegre edilirler. Elde edilen bileşikler önemli ölçüde geliştirilmiş özellikler sergiler (Slepickova Kasalkova ve ark., 2021). Karbon nanopartikülleri çeşitli alanlarda ve koşullarda potansiyel uygulamalarını artırmak için sıklıkla polimerler veya metallerle birleştirilirler. Elde edilen bileşikler, önemli ölçüde geliştirilmiş özellikler sergiler (Venkatesan ve ark., 2023). Nanokiller, doğada bol miktarda bulunurlar. Plaka benzeri şekillere, yüksek en-boy oranlarına, düşük özgül ağırlığa ve yumuşak yapıya sahiptir. Bunları bir polimer matrisine dahil etmek, bariyer, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirir. Çeşitli nanokil modifikasyon prosedürleri, film paketlemede istenen özellikleri sağlar (Yang ve ark., 2023). Nanokil, hidratlı alümina ve silikattan oluşan katmanlı bir kildir. Gıda ambalajında takviye kabiliyeti, şişme ve

plastikleşme kabiliyeti de dahil olmak üzere özellikleri, gıda ambalajı yaşlanmasını tasarlamak için oldukça arzu edilen bir malzeme haline getirir (Mohammadi Sadati ve ark., 2022).

3. Su Ürünlerinde Nanoteknolojik Uygulamalar

3.1. Nanoteknolojinin su ürünleri yetiştiriciliğinde uygulama alanları

Nanoteknoloji, su ürünleri yetiştiriciliği ve deniz ürünleri endüstrilerinde geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Can ve ark., 2011). Su ürünleri yetiştiriciliğinde nanoteknolojinin başarılı yem yapımı, balıkçılık ve diğer su ürünleri ağlarında antifouling (yosun önleyici) ve su ürünleri tankları için antibakteriyel malzeme geliştirmede olumlu sonuçlar verdiği bildirilmektedir. Ayrıca balık besinlerinin emiliminin iyileştirilmesi ve sistemdeki patojenleri tespit etme yeteneği gibi önemli avantajları da vardır (Ogunkalu, 2019). Su ürünleri yetiştiriciliğinde nanoteknolojinin potansiyel kullanımını artırmak için çok sayıda araştırma geliştirmeye ihtiyaç duyulmasına rağmen, şu anda bu teknolojinin balık sağlığı yönetimi, su ürünleri yetiştiriciliğinde su arıtımı, hasat ve hasat sonrası teknolojide gelecekte uygulanacağına dair çok sayıda işaret bulunmaktadır (Rather ve ark., 2011).

Su ürünleri yetiştiriciliği üzerine yapılan bazı nanoteknolojik araştırmalar Çizelge 1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Su ürünleri yetiştiriciliğinde nanoteknolojik araştırmalar

Su Ürünü/Tür	Nanoteknolojik Uygulama	Araştırma içeriği	Araştırma sonucu	Kaynak
Beyaz sazan (<i>Cirrhinus mrigala</i>)	Çinko oksit nanopartiküller	Büyüme ve hematolojisi üzerine etkisi	Mikro besin olarak kullanımı uygun bulunmuştur	Rajan ve Rohini (2021)
Nil tilapyası (<i>Oreochromis niloticus</i>)	Silika nanopartiküller (SiN)	SiN’nin büyüme performansı, protein sindirilebilirliği, hematoloji, sindirim morfolojisi, kas bileşimine etkisi.	Büyüme performansı, yem kullanımı ve balığın son ürün kalitesi olumlu sonuçlanmıştır.	Bashar ve ark. (2021)
Nil tilapyası (<i>Oreochromis niloticus</i>)	Nano demir oksit (nFe_2O_3)	Büyüme, hemato-biyokimyasal, immün-antioksidan yanıt ve gen ekspresyonu	nFe_2O_3 ilaveli yemler araştırılan özellikleri geliştirmiştir	Elabd ve ark. (2022).
Gökkuşağı alabalığı	Nanoselenyum (NSe)	Farklı diyetlerde NSe’un antioksidan takviyesi olarak kullanılması	Alabalıkların fizyolojik tepkileri gelişmiş ve strese karşı direnci ve dayanıklılığı artmıştır.	Aramli ve ark. (2023)
Rohu balığı (<i>Labeo rohita</i>)	Gümüş nanopartiküller (AgNPs)	AgNP’lerin balıklar üzerindeki immünohistimülasyon özelliklerini anlamak	AgNP’lerin su ürünleri yetiştiriciliğinde patojenik bakterilerin önlenmesinde antibiyotik ve aşılarla etkili bir alternatif olabileceği bildirilmiştir.	Popoola ve ark. (2023)
Rohu balığı (<i>Labeo rohita</i>)	Gümüş nanopartiküller (AgNPs)	AgNP’lerin balıklar üzerindeki immünohistimülasyon özelliklerini anlamak	AgNP’lerin su ürünleri yetiştiriciliğinde patojenik bakterilerin önlenmesinde antibiyotik ve aşılarla etkili bir alternatif olabileceği bildirilmiştir.	Popoola ve ark. (2023)
Sazan (<i>Cyprinus carpio</i>)	Se-NP+ C vitamini	Balık büyümesine ve refahına etkisi	Se-NP+ C vitamininin kombine etkisi büyüme ve refahı artırmıştır	Saremi ve ark. (2024)

Çizelge 1. Su ürünleri yetiştiriciliğinde nanoteknolojik araştırmalar (devam)

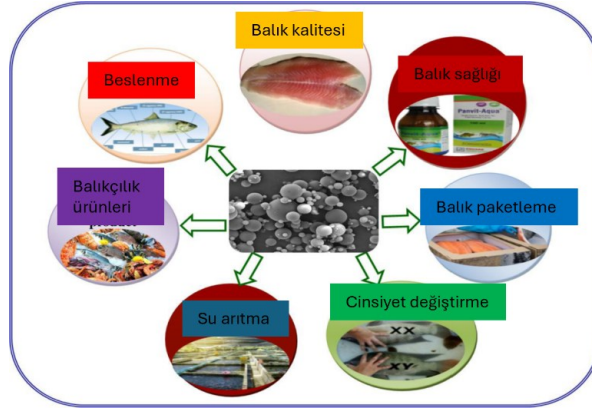
Su Ürünü/Tür	Nanoteknolojik Uygulama	Araştırma içeriği	Araştırma sonucu	Kaynak
Sazan (<i>Cyprinus carpio</i>)	Nanoselenyum (NSe)	Bitki bazlı diyetlere besinsel NSe ilavesinin etkisi	Büyüme, yem verimliliği, antioksidan bağışıklık, stres direnci, artmıştır.	Rezaei ve ark. (2024)
Kahverengi makroalg (<i>Cystoseira myrica</i>)	Selenyum nanopartikülleri (SeNPs) fikosentezi <i>Cystoseira myrica</i> algal ekstraktı (CE) CE/SeNP'lerin kitosan nanopartikülleri (NCT)	Balık yemindeki <i>Aspergillus flavus</i> izolatlarını kontrol etmek için potansiyel antifungal nanokompozitler üretilmesi	Balık yemlerinin mikotoksijenik mantarlardan korunması için etkili, biyogüvenli ve doğal fungisidal konjugat üretilmiştir	Tayel ve ark. (2024)

Nanoteknolojinin su ürünleri yetiştiriciliğindeki en önemli uygulamalarından biri, nano-etkin yem katkı maddeleri ve takviyelerinin geliştirilmesinde yatmaktadır. Bu nano boyutlu partiküller genellikle temel besin maddelerinin, vitaminlerin ve minerallerin suda yaşayan organizmalara iletimini artırabilen ve böylece büyümelerini, bağışıklık tepkilerini ve genel sağlıklarını destekleyen biyoyumlu malzemeler içinde kapsülendir (Kumar ve ark. 2022; Khan ve ark., 2024).

3.1.1. Su ürünlerinin gelişiminin iyileştirilmesinde nanopartiküller

Nanoteknoloji son zamanlarda su ürünleri yetiştiriciliğindeki birçok sorunun üstesinden gelinmesinde kilit bir rol oynamıştır (Elabd ve ark., 2022). Su ürünlerinde nanoparçacıkların başlıca kullanım alanları; balık büyümesinin geliştirilmesi, su filtreleme ve su kalitesinin iyileştirilmesi, balık hasadı, ağır metallerin uzaklaştırılması, fonksiyonel bileşiklerin biyoyararlanımının artırılması, gıda maddelerinin kapsülendirilmesi ve kontrollü salımı, hassas bileşenlerin gelişmiş biyoyararlanımı, stabilitesi ve raf ömrünün artırılması, gıda ürünlerinin mikrobiyal kontaminasyona karşı korunması, besin maddeleri, nutrasötikler, enzimler, gıda katkı maddeleri ve gıda antimikrobiallerinin taşıyıcı araçlar sağlanması, su ürünleri türleri için daha etkili balık yemi üretimi olanaklarının sağlanması, üretimlerinin farklı adımlarında nanoteknolojinin uygulanmasıyla yemin fiziksel, kimyasal ve besinsel kalitesinin ve ilgili bileşenlerinin iyileştirilmesi, balıkçılık ve su ürünleri ağlarında zehirli boya, su ürünleri tankları için antibakteriyel maddeler ve deniz ürünleri için yeni ambalaj malzemeleri olanaklarının sağlanması olarak sıralanabilir (Şekil 1). (Can ve ark., 2011; Rather ve ark., 2011; Nasr-Eldahan ve ark., 2021; Dönmez, 2023).

Saremi ve ark. (2024), selenyum nanopartiküller (Se-NP) ve C vitamininin sinejistik etkisinin sazan balığının (*Cyprinus carpio*) büyümesini ve refahını artırdığını bildirmiştir. Kilogram (kg) başına 500 mg C vitamini ve 0.5-1 mg Se-NP ile desteklenen diyetler büyüme oranlarını önemli ölçüde artırırken, kg başına 1000 mg C vitamini ve 1 mg Se-NP veya kg başına 500 mg C vitamini ve 1 mg Se-NP içeren diyetlerin balığın genel refahını iyileştirdiği görülmüştür. Yapılan başka bir çalışmada sazan ve mersin balıklarının demir nanopartikülleri ile beslendiklerinde daha hızlı bir büyüme oranı (sırasıyla %30 ve %24) sergiledikleri bildirilmiştir (ETC, 2003). Bir diğer çalışmada ise, bazal diyetle eklenen farklı selenyum kaynaklarının (nano-Se ve selenometiyonin), havuz sazanının (*Carassius auratus gibelio*) nihai ağırlığını, nispi kazanç oranını, antioksidan durumunu, Glutasyon Peroksidaz (GSH-Px) aktivitelerini ve kas Se konsantrasyonunu iyileştirebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, nano-Se'nin kas selenyum içeriğini artırmada organik selenometiyoninden daha etkili olduğu ifade edilmiştir (Zhou ve ark., 2009).



Şekil 1. Su ürünleri yetiştiriciliği endüstrisinin çeşitli alanlarında nanopartikül uygulamaları (Ahmed ve ark., 2024).

Kolloidal gümüş nanopartikülleri gökkuşağı alabalığı yumurtalarında mantar enfeksiyonlarının büyümesini engelleyerek mantar enfeksiyonu tedavisinde etkili olabilmektedir (Johari ve ark., 2015). Demir oksit nanopartikülleri ise çeşitli balık türlerinde büyümeyi ve bağışıklığı destekleyerek, sağlık yönetimi ve çevresel iyileştirme için iki yönlü fayda sağlayabilmektedir (Duncan, 2011).

Aramli ve ark. (2023) dört farklı diyetle üç farklı oran kullanarak antioksidan takviyesini gökkuşağı alabalıklarına uygulamışlardır. Takviyeler farklı (A) selenyum (Se) formları (inorganik, organik ve nanopartikül), (B) Se içeriği (0, 0.3 ve 0.5 mg/kg yem), (C) E vitamini (VE) içeriği (0, 100 ve 150 mg/kg yem) ve (D) koenzim Q10 (CoQ10) içeriği (0, 10 ve 20 mg/kg yem) olarak uygulanmıştır. Yapılan araştırma sonucunda, dört antioksidan takviyesinin daha etkili kombinasyonu 0.5 mg/kg organik/nano-Se, 150 mg/kg VE ve 20 mg/kg CoQ10 olup, gökkuşağı alabalığının fizyolojik tepkilerini geliştirdiği ayrıca CoQ10 ve VE ile birlikte nano-Se ile desteklenen diyetlerin strese karşı balık direnci ve dayanıklılığını geliştirdiği bildirilmiştir.

Sazan balıklarında (*Cyprinus carpio*) balık unu içermeyen bitki bazlı diyetlere besinsel nano selenyum ilavesinin stres direnci ve stres sonrası etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda 3 mg/kg besinsel nano selenyum diyeti ile beslenen yavru sazan balıklarında büyüme, yem verimliliği, antioksidan bağışıklığı, stres direnci ve stres sonrası iyileşmenin arttığı bildirilmiştir (Rezaei ve ark., 2024). Bir başka çalışmada ise nano demir oksit ($n\text{Fe}_2\text{O}_3$) katkılı diyet uygulanan Nil tilapyası (*Oreochromis niloticus*)'nda büyüme, hemato-biyokimyasal, immün-antioksidan yanıt ve gen ekspresyonu araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda diyetle 1g $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ eklenmesi nil tilapyasının büyüme, hemato-biyokimyasal, immün-antioksidan yanıt ve gen ekspresyonu özelliklerini geliştirmiştir (Elabd ve ark., 2022).

Tayel ve ark. (2024) selenyum nanopartiküllerinin (SeNPs) fikosentezi *Cystoseira myrica* algal ekstraktı (CE) kullanılarak ve CE/SeNP'lerin kitosan nanopartikülleri (NCT) ile konjugasyonu ile balık yemindeki *Aspergillus flavus* izolatlarını kontrol etmek için potansiyel antifungal nanokompozitler üretilmesini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda CE/SeNP'lerin öncü fikosentezi ve NCT ile nanokonjugasyonu, *A. flavus* suşlarını kontrol etmek için biyoaktif antifungal ajanlar üretmiştir. Yenilikçi bir şekilde inşa edilen NCT/CE/SeNPs nanokompozitinin, *A. flavus* suşlarını kontrol etmek için balık yemlerinin mikotoksijenik mantarlardan korunması için etkili, biyogüvenli ve doğal fungisidal konjugat olduğu bildirilmiştir. Bir diğer çalışmada Rajan & Rohini (2021), farklı miktarlarda çinko oksit nanopartiküllerinin beyaz sazanın (*Cirrhinus mrigala*) büyümesi ve hematolojisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Buna göre; 15 mg/100 g çinko oksit nanopartiküllerinin beyaz sazanın büyümesi için uygun olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca çinko oksit nanopartiküllerinin artmasıyla hematolojik parametrelerin çoğu artmıştır. Sonuç olarak balık beslenmesinde çinko oksit nanopartiküllerinin mikrobese olarak kullanımı uygun bulunmuştur. Ayrıca bir başka çalışmada silika nanopartiküllerin Nil tilapyasında büyüme performansını, yem kullanımını ve balığın son ürün kalitesini olumlu etkilediği görülmüştür (Bashar ve ark., 2021).

Su ürünleri yetiştiriciliğinde balık yemine ilave edilen çok çeşitli nanopartiküller mevcuttur. Bunlardan bazıları; çinko oksit (ZnO), gümüş (Ag), krom (Cr), altın (Au), bakır (Cu), silika (Si), demir (Fe), selenyum (Se) olarak sayılabilir (Farkas ve ark., 2010; Akter ve ark., 2018; Dobrochna ve ark.,

2018; Hussain ve ark., 2019; Bashar ve ark., 2021; Rajan & Rohini, 2021; Ahmad ve ark., 2022; Popoola ve ark., 2023).

3.1.2. Su ürünlerinde nano aşılar

Su ürünleri yetiştiriciliğinin en hayati yönlerinden biri de sık sık meydana gelen hastalıklardır. Yeni ortaya çıkan hastalıklar, herhangi bir su ürünleri yetiştiriciliği işletmesi için büyük ölümlere yol açabilir. Nanopartiküller, aşı dağıtımı olarak ilaç yönetiminde kapsamlı bir etkiye sahiptir ve bu nedenle çiftlik balıklarının patojenlerden kaynaklanan hastalıklara karşı güçlendirilmesini garanti altına alır (Dar ve ark., 2020). Nanobiyoteknolojinin, geleneksel aşılama uygulamaları sonrasında organizmada oluşabilecek biyolojik, biyofiziksel ve biyomedikal sorunların üstesinden gelebilecek yeni nesil ve daha etkili aşılarda geliştirilmesine olanak sağladığı bildirilmektedir (Dönmez, 2023). Uygun bir nanoparçacık içeren bir veya bir grup antijen ile tasarlanmış aşılarda nanoaşılarda tanımlanmaktadır. Nanoaşılarda, bağışıklık sistemi aracılığıyla vücudun enfekte olan bölgesi üzerinde etki yaparak bu bölgede enfeksiyon yayılımını engelleme stratejisi ile çalışmaktadırlar (Vinay ve ark., 2018). Aşılama, hastalıklarla mücadele edecek tekniklerden biridir. Aşılarda, kitosan ve polilaktidoglikolik asit (PLGA) gibi nano partikül taşıyıcıları, hafif inflamatuvar indükleyicilerle birlikte balıklara ve kabuklulara bakteri ve virüslere karşı daha yüksek düzeyde koruma sağlayabilir (Rajeshkumar ve ark., 2009). Aljinat mikropartiküller, kitosan ve polilaktidoglikolik asit gibi nanoparçacıkların su ürünleri yetiştiriciliğinde aşılarda yaygın olarak kullanıldığı bildirilmiştir (Dadar ve ark., 2017, Dönmez, 2023). Ayrıca sindirime ve bozulmaya dayanıklı, sudaki balıkların hücrelerinde emilen kısa DNA şeritleri içeren nanokapsüller kullanılarak balıkların toplu aşılama da yapılabilir. Çiftlik balıklarının aşılama nanoaşılarda nanopartiküllerin kullanılması benzersiz bir işleme tekniği olarak kabul edilmektedir. Son on yılda nanopartiküllerin kullanımı balık aşılama için çok önemli hale gelmiştir. Bu partiküller, aşı dağıtımında kullanıldıkları için ilaç uygulamasında birçok avantaja sahiptir ve bu nedenle çiftlik balıklarının patojenik hastalıklara karşı korunmasını sağlar (Dar ve ark., 2020).

Kırmızı tilapia (*Oreochromis sp.*) balığında *Aeromonas veronii*'ye karşı umut verici daldırma aşısı olarak kitosan polimer temelli nanoaşılarda araştırılmıştır. Araştırma sonucunda kitosan polimer bazlı partikülün nanoaşılarda hedef mukozal membrana yönelik etkinliğini artırabildiği ve kırmızı tilapia balığında *A. veronii* enfeksiyonuna karşı korumayı geliştirebileceği bildirilmiştir (Sukkarun ve ark., 2022). Bir başka çalışmada, Asya levreğinin (*Lates calcarifer*) iki bileşenli nanoaşı emdirilmiş fingerlinglerinin streptokokkoz ve columnaris hastalıklarını önlemek için oral güçlendirici etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, nanoaşı ile aşılanan balıkların ön böbreği ve dalağındaki toplam IgM konsantrasyonunu kontrol grubuna göre önemli ölçüde artırdığını göstermiştir (Vanichavetin ve ark., 2024).

3.2. Su ürünleri işleme teknolojisi alanında nanoteknoloji

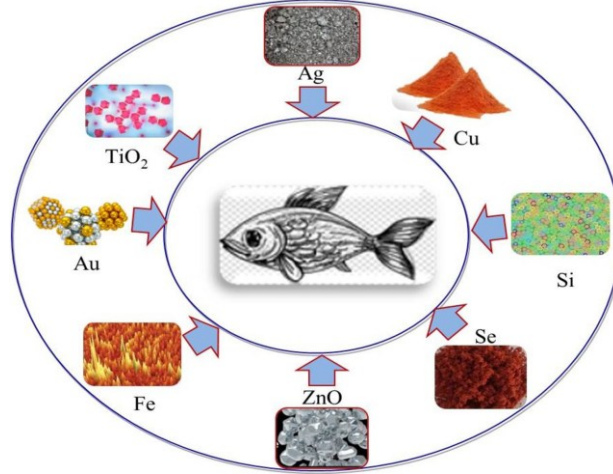
Nanoteknoloji, steril paketlenme, kusursuz tatlandırma ve yüksek kaliteli ürünler sağlamak için balık işleme endüstrisinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca, balıkçılık atıklarının optimum kullanımı için biyo-nano-mühendislik teknikleri ve yeşil nanopartiküllerin uygulanması, hasat sonrası uygulamalarda umut verici bir döneme işaret etmektedir (Narsale ve ark., 2024). Su ürünleri işleme alanında nanoteknoloji, korunma etkinliğini ve verimliliğini artırma, patojenleri tespit etme, ürün kalitesini kontrol etme ve raf ömrünü uzatma yolları sunmaktadır. Yerleşik düzenleyici çerçeveler ve standartlarla uyumlu olarak yeni, yenilikçi ve çevresel açıdan sürdürülebilir koruma tekniklerini benimsemek, sağlıklı ve bozulmamış su ürünlerinin üretimini, işlenmesini teşvik etmek ve böylece tüketici sağlığını ve refahını korumak için önemli bir teknolojidir (Rabiepour ve ark., 2024). Nanoteknoloji, balık paketlenme tekniklerinin iyileştirilmesi, kalitenin, tadın, dokunun ve lezzetin artırılmasına katkı sağlar (Ogunkalu, 2019).

Su ürünleri işleme teknolojisi ile ilgili bazı nanoteknolojik araştırmalar Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Su ürünlerinde işleme teknolojisinde nanoteknolojik araştırmalar

Su Ürünü/Tür	Nanoteknolojik Uygulama	Araştırma içeriği	Araştırma sonucu	Kaynak
Karides (<i>Penaeus semisulcatus</i>)	Nanogümüş ve nanokil kompozitler	Nanokil ve nanogümüşün karidese aşıl原因an gıda patojenleri üzerindeki etkisi	Nanogümüş ve nanokil kompozitlerinin antibakteriyel etkisi kanıtlanmıştır	Paidari & Ahari (2021)
Gökkuşığı alabalığı (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Yeşil kimyon ekstraktı (YKE) ile kitosan nano kaplama	Alabalık filetosunun raf ömrü ve kalitesi üzerine etkisi	YKE ve kitosan kaplamalar alabalıkların kimyasal, antimikrobiyal ve duysal özelliklerini geliştirmiştir	Zamani ve ark. (2022)
Somon	Zencefil yağı nanoemülsiyonu, bane sakızı, kitosan, propolis ekstratı	Taze somon filetolarının raf ömrü üzerine etkisi	TBA ve TVBN değerlerini azaltmada çok az etkili olmasına rağmen, belirli bakteriler ve ph, peroksit değeri ve duysal özellikler üzerinde olumlu etkiler göstermiştir.	Jahangiri ve ark. (2022)
Tilapya balık sosisi	Kitosan/nisin nanokapsülasyonu	Tilapia balık sosisinde kalite korumada sinerjik etkiler	Balık sosisleri kitosan/nisin nanokapsülasyonu ile etkili şekilde korunmuştur.	Kazemzadeh ve ark. (2022)
Levrek (<i>Dicentrarchus labrax</i>)	Kuşburnu yağı nanoemülsiyonu	Levrek filetoları üzerine kuşburnu yağı nanoemülsiyonunun fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik etkileri	Kuşburnu nanoemülsiyonu fiziksel ve kimyasal olarak filetoları önemli derecede etkilememiş ancak renk ve bazı mikrobiyolojik değerler üzerine etkili olmuştur	Çorapçı (2022)
Mercan (<i>Pagrus major</i>)	Kitosan nanopartikül, Pickering nanoemülsiyon, antosiyanidin	Kitosan nanopartikül esaslı yenilebilir kompozit film geliştirilmesi ve mercan filetolarının paketlenmesinde uygulanması	Raf ömrü uzamış, antosiyanidin içeren grup daha etkili sonuçlar vermiştir	Zhao ve ark. (2022)
Pasifik beyaz karidesi (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	Kitosan kaplı <i>Ulva intestinalis</i> sülfatlanmış polisakkarit nanolipozomu	Karidesin buz içinde depolanmasında melanozise etkisi	Kalite ve raf ömrünü artırmıştır.	Kamali ve ark. (2023)
Gökkuşığı alabalığı (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Zein nanofiber	Defne içeren zein nanofiber kaplama ve yağsız fritözde pişirmenin alabalığın kalitesi üzerine etkisi	Duysal ve mikrobiyolojik açıdan defne, zein nanofiber kaplama ve yağsız fritözün kombine etkisi olumlu sonuçlar vermiştir.	Ceylan ve ark. (2024)
Karides (<i>Macrobrachium equidens</i>)	Kitosan, yeşil aktif kaplama, tarçın yağı nanoemülsiyonu	Kurutulmuş karidesin raf ömrü ve kalitesine kitosan, yeşil aktif kaplama, tarçın yağı nanoemülsiyonunun etkisi	Kaplamanın su geçirgenliği sınırlandırılmış, karidesin lipid oksidasyonu azalmış, tekstürel özellikler iyileştirilmiştir	Jitpasutham ve ark. (2024)
Gökkuşığı alabalığı	Nane esansiyel yağı yüklü katı lipit nanopartiküller (PEO-SLN) içeren jelatin kaplama	Kimyasal ve duysal kaliteye etkisi	Oksidatif stabilite ve duysal kalite PEO-SLN ile artarak raf ömrü uzamıştır.	Safacian Laein ve ark. (2024)

Su ürünleri endüstrisinde uygulanan çeşitli nanopartiküller Şekil 2’de gösterilmiştir. Yeni nanomateriyaller içeren biyopolimer filmler, su ürünlerinin kalitesini etkili bir şekilde korumak için yenilebilir kaplamalar olarak hizmet edebilir. Nanotüpler, nanojeller, işlevselleştirilmiş nanokristaller yağlı balık örneklerini oksidasyona karşı korumadaki etkinliklerini göstermiş ve spesifik antimikrobiyal aktiviteleri ile pratik faydalarını ortaya koymuşlardır. Nanoetozomlar ile örneklendirilen nanoyapılı lipid taşıyıcılar ve nanofitozomlar, nanoemülsiyonlara uygulanabilir alternatifler olarak kabul edilmektedir. Nanoteknolojik işlemlerin termal çözündürme veya termal olmayan uygulamalarla kombinasyonunun kaliteyi artırdığı deneysel olarak kanıtlanmıştır (Çetinkaya & Wijaya, 2024).



Şekil 2. Su ürünleri endüstrisinde uygulanan çeşitli nanopartiküller (Ahmed ve ark., 2024).

Nano boyutlu kitin ve kitin malzemelerinin, taze yakalanmış karideslerin raf ömrünü iyileştirmek ve kaliteyi korumak için gıda katkı maddesi olarak kullanımı ilk kez Chantararataporn ve ark. (2013) tarafından bildirilmiştir. Çalışmada su ürünleri katkısı olarak su bazlı nano boyutlu kitin ve kitosan Pasifik beyaz karideste (*Litopenaeus vannamei*) araştırılmıştır. Kitin nanokristalleri, kitosan nanokristalleri ve oligokitosan nanokristalleri içeren solüsyonlar karideslere uygulanmıştır. Araştırma sonucunda %0.25 kitosan, %2.5 NaCl ve %1 NaHCO₃ içeren gruptaki karideslerin pişirme veriminin %18, ağırlığının %14 arttığı ve pişirme kaybının ise %16 azaldığı bildirilmiştir. Nano boyutlu kitin ve kitin materyallerinin gıda katkısı olarak taze karideslerde raf ömrünü geliştirdiği ve kaliteyi koruduğu görülmüştür. Bir başka çalışmada Abdollahi ve ark. (2014) fonksiyonel biyonanokompozit olarak kitosan biyopolimeri, nanokil ve biberiye esansiyel yağı kombinasyonunun +4°C’de sazan balığının raf ömrüne etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda kitosan, kil ve biberiye esansiyel yağından oluşan biyonanokompozit sazan filetoalarının kabul edilebilirliği 8 gün artırmıştır. Ayrıca kaplama sayesinde yağ oksidasyonu gecikmiş, bakteriyel bozulma inhibe edilmiştir. Kaplamanın duyuşal özellikleri olumsuz etkilemediği de ayrıca belirtilmiştir.

Mavi yüzgeçli orkinos (*Thunnus thynnus*) filetoalarının +2C°’deki muhafazasında soy protein izolatu, montmorillonit ve karanfil esansiyel yağı bazlı aktif nanokompozit filmler araştırılmıştır. Çalışma sonucunda 10 g montmorillonit/100 g soy protein izolatu ve karanfil esansiyel yağı uygulanan aktif nanokompozit filmlerin soğukta muhafaza sırasında orkinos filetoalarının kalitesini artırdığı bildirilmiştir. Gıda ambalajı olarak aktif nanokompozit filmlerin kullanımı uygun görülmüştür (Echeverría ve ark., 2018). Paidari & Ahari (2021) karidesleri gıda patojenleri (*Vibrio parahaemolyticus*, *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia Coli*) ile aşılamlar ve nanogümüş ve nanokil içeren nanokompozit materyaller ile paketlenmişlerdir. Çalışma sonucunda nanogümüş ve nanokil kompozitlerin bahsi geçen her üç tür üzerinde de antibakteriyel etkisi kanıtlanmıştır. Nanokompozitlerde gümüş ve kil nanopartiküllerinin uygulanmasının mikrobiyal yükü azaltmak ve kolay bozulabilir gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için umut verici bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Bununla beraber, nanokompozitlerin etkinliğinin raf ömrü süresinden sonra azaldığı ve patojenik bakterilerin yeniden üremesine neden olduğu belirtilmiştir.

Kendiliğinden oluşan tarçın yağı nanoemülsiyonu ve kitosan ile yeşil aktif kaplamanın kurutulmuş karides (*Macrobrachium equidens*) kalitesi ve raf ömrü üzerine etkisi araştırılmıştır. Buna

göre kitosan yeşil aktif film ve tarçın yağı nanoemülsiyonunun birlikte kullanımının sadece kitosan yeşil aktif filme göre su geçirgenliğini daha iyi sınırlandırdığı, kurutulmuş karidesin lipid oksidasyonunu azalttığı bildirilmiştir. Ayrıca kendiliğinden oluşan tarçın yağı nanoemülsiyonu kitosanın fonksiyonel özelliklerini geliştirmiştir. Kitosan yeşil aktif film ve tarçın yağı nanoemülsiyonunun kitosana birleştirilmesi tekstürel özelliklerin kalitesini korumuş ve örneklerin sertlik değerlerini azaltmıştır (Jitpasutham ve ark., 2024). Bir başka çalışmada yeşil kimyon ekstraktı ile kitosan nano kaplama gökkuşağı alabalığı filetosunun raf ömrü ve kalitesi üzerinde denenmiştir. Çalışma sonucunda kitosan nanokaplamalara yeşil kimyon özütü eklenmesi kaplamaların kimyasal, antimikrobiyal ve duysal özelliklerini geliştirmiştir. Nanokitosan kaplamalara %1 ve %2 kimyon ekstraktı eklendikten sonra gökkuşağı alabalığı filetolarının kalitesinin daha iyi korunduğu belirlenmiştir (Zamani ve ark., 2022).

Jahangiri ve ark. (2022) kitosan (%0-%2), bane sakızı (%0, %1, %2), propolis ekstraktı (%0, %1, %2), ve zencefil yağı (%0, 0.5, 1) nanoemülsiyonunun taze somon filetolarının raf ömrü üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda kaplamanın depolama süresince toplam bakteri sayısı, psikrofilik bakteriler, koliformlar ve Pseudomonas sayılarını azaltmada önemli derecede etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, kaplanmış örnekler kaplanmamış örneklere göre daha düşük pH ve peroksit değerleri göstermiştir. Bununla beraber, kaplamanın tiyobarbitürik asit (TBA) ve toplam uçucu azotu (TVBN) azaltma üzerinde çok az etkisi olduğu ifade edilmiştir. Bane sakızı ile kitosan kaplamanın duysal özellikleri koruyabileceği veya iyileştirebileceği ve soğutulmuş balığın raf ömrünü uzatabileceği bildirilmiştir. Bir başka çalışmada, Çorapçı (2022) iki farklı oranda kuşburnu yağı içeren, kuşburnu yağı nanoemülsiyonunun levrek balığı filetolarının fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik kalitesi üzerine etkilerini araştırmıştır. Buna göre filetoların fiziksel ve kimyasal özellikleri önemli derecede değişmezken, renk değerleri önemli derecede etkilenmiştir. Bununla birlikte, yüksek miktarda kuşburnu yağı içeren nanoemülsiyonun levrek filetolarının mikrobiyolojik raf ömrü üzerinde kısmi bir olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

Kazemzadeh ve ark. (2022) kitosan/nisin nanokapsülasyonunun fizikokimyasal değerlendirmeleri ve tilapya balık sosisinde kalite korumada sinerjik etkileri üzerine çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, nisin yüklü kitosanın, balık sosisinin raf ömrünü uzatmak için ticari bir katkı maddesi olarak kullanılabileceği, nisin/kitosan nanopartiküllerinin lipid ve proteinlerin korunması üzerinde önemli biyokimyasal etkiler gösterdiği ve kitosanın, gıda matrisine kontrol altında nisin salan güçlü bir kapsül duvarı olabileceği bildirilmiştir. Bir diğer çalışmada Zhao ve ark. (2022) kitosan nanopartikül esaslı yenilebilir kompozit film geliştirilmesi ve taze mercan filetolarının paketlenmesinde uygulanmasını araştırmışlardır. Balıklar üç yenilebilir film F1: kolajen proteini/kitosan nanopartikülleri/antosiyanidin film (CN-A), F2: %1 C-PEO pickering nanoemülsiyon/kitosan nanopartikül filmi (CN-CPN) ve F3: %1 C-PEO Pickering emülsiyonu/kitosan nanopartikülleri/antosiyanidin filmi (CNCPN-A) ile paketlenmişler ve etkileri incelenmiştir. Kontrol grubunda örneklerin 6. gün civarında bozulduğu yenilebilir filme sarılan gruplarda ise filetoların raf ömrünün 6-8 güne uzadığı bildirilmiştir. Antosiyanidin içeren filmin TVBN, TBA mikrobiyolojik analiz indekslerinde diğer gruplardan daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durumun bitki uçucu yağ bileşiği antosiyanidin yenilebilir filminin mikroorganizmaların büyümesini ve çoğalmasını engellemesi ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir.

Ceylan ve ark. (2024) defne içeren zein nanofiber kaplama ve yağsız fritözde (air fryer) pişirmenin soğukta depolanan gökkuşağı alabalığı filetolarının kalite özellikleri üzerine kombine etkisini araştırmışlardır. Filetoların kalite özellikleri 4°C'de 10 gün boyunca oksidatif ve mikrobiyolojik stabilite, renk ve duysal parametreler açısından izlenmiştir. Çalışmada zein nanofiber kaplama ve yağsız fritözde pişirme (LZn) kombinasyonu kontrol grubuna kıyasla %45.21 oranında mikrobiyal inhibisyon sağlamış, duysal kabul edilebilirlik kriterlerinden koku parametresi özellikle LZn grubunda önemli ölçüde tercih sebebi olmuştur. Bir başka çalışmada Safaeian Laein ve ark. (2024) nane esansiyel yağı yüklü katı lipid nanopartiküller (PEO-SLN) içeren jelatin kaplama kullanarak alabalık filetosunun kalitesinin artırılması üzerine çalışmışlardır. 12 günlük soğuk depolama süresinde kimyasal ve duysal parametreler incelenmiştir. Çalışma sonucunda alabalık filetosunun oksidatif stabilitesi nane yağı içeren jelatin yüklü katı lipid nanopartikülleri ile artırılmış, ayrıca duysal kalite artırılarak raf ömrünün uzadığı bildirilmiştir. *Ulva intestinalis* sülfatlı polisakkarit nanolipozomu içeren kitosan kaplamanın, Pasifik beyaz karidesinin kalitesi ile melanozis üzerindeki etkisi buzda depolama süresince incelenmiştir. Çalışma sonucunda nanolipozom kitosan kaplamanın psikrofilik bakteri sayısı, tiyobarbitürik asit değerleri, serbest yağ asitleri ve peroksit değerlerini azalttığı, duysal puanları ise

yükselttiği bildirilmiştir. Ayrıca *Ulva intestinalis*'in kitosan kaplamada bulunması karidedeki polifenol oksidaz enzimini inhibe ederek karidesin kalitesi ve raf ömrünü artırmıştır (Kamali ve ark., 2023).

4. Sonuç

Son yıllarda su ürünleri yetiştiriciliği ile ilgili çalışma alanlarında balık beslemede kullanılan yemlerde çeşitli nanopartiküllerin kullanımına yönelik büyük bir ilgi söz konusudur. Çinko, demir, selenyum, gümüş vb. nanopartiküllerin su ürünlerinin büyüme performansı, bağışıklık, stres ve genel sağlıkları üzerine olumlu etkileri görülmüştür. Çeşitli bitkisel katkılar ya da esansiyel yağlar ile kitosan, nanokil, nisin, zein içeren nanoenkapsülasyonlar, nanofiberler, nanoemülsiyonlar ya da nanokompozitler su ürünlerinin muhafazasında öne çıkan içeriklerden bazılarıdır. Nanoteknolojik yöntemlerle elde edilen içerikler su ürünlerinin duyu ve kimyasal kalitesini iyileştirmekte aynı zamanda ürünün raf ömrünün uzatılmasına katkı sağlamaktadır.

Gıda ve su ürünleri sektöründe nanoteknolojinin sunduğu yenilikçi çözümleri ve bu çözümlerin hem sektörel hem de çevresel etkilerini araştırmak sağlık alanında ve tüketici güvenliğini kazanmak açısından oldukça önemlidir. Ayrıca ulusal ve uluslararası düzeyde endüstriyel uygulamaların her geçen gün artmasıyla birlikte nanoteknolojinin ticari potansiyeli de artmaktadır.

Gelecekteki çalışmalar, nanoteknolojik ilerlemeleri; sürdürülebilirlik, enerji tasarrufu sağlama, atık yönetimi süreçlerini iyileştirme potansiyeline ve insan sağlığı odaklı yaklaşımları birleştiren konulardaki gelişmelere odaklanabilir. Nanoteknolojinin su ürünleri endüstrisine dahil edilmesiyle daha güvenli tekniklerle, yeniliği, sürdürülebilirliği, güvenliğini sağlama konusunda büyük kolaylıklar sağlayacağı öngörülmektedir. Bununla beraber, nanoteknolojinin sağlıklı gıda üretiminde büyük bir potansiyele sahip olmasına karşın sağlığa etkileri konusunda daha fazla araştırma yapılmasına ve yasal düzenlemeler getirilmesine ihtiyaç vardır. Konu ile ilgili eksikliklerin giderilmesi ile nanoteknoloji gıda ve su ürünleri sektörüne önemli yenilikler ve iyileştirmeler sunabilir.

Kaynakça

- Abdel-Maqsood, N. M., Elshagabee, F. M., Metwally, A. M., & Anis, S. M. (2021). Impact of nano-stabilizers on the technological, texture and rheological properties of ice cream. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(6), 283–291. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.102692.4761>
- Abdollahi, M., Rezaei, M., & Farzi, G. (2014). Influence of chitosan/clay functional bionanocomposite activated with rosemary essential oil on the shelf life of fresh silver carp. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 811–818. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12369>
- Abedi-Firoozjah, R., Alizadeh-Sani, M., Zare, L., Rostami, O., Salim, S. A., Assadpour, E., Azizi-Lalabadi, M., Zhang, F., Lin, X., & Jafari, S. M. (2024). State-of-the-art nanosensors and kits for the detection of antibiotic residues in milk and dairy products. *Advances in Colloid and Interface Science*, 328, 103164. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103164>
- Adeyemi, J. O., & Fawole, O. A. (2023). Metal-based nanoparticles in food packaging and coating technologies: a review. *Biomolecules*, 13(7), 1092. <https://doi.org/10.3390/biom13071092>
- Adeyeye, S. A. O., Babu, A. S., Guruprasath, N., & Ganesh, P. S. (2023). Starch nanocrystal and its food packaging applications. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 11(1), 01–21. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.11.1.1>
- Aguilar, F., Crebelli, R., Di Domenico, A., Dusemund, B., Frutos, M. J., Galtier, P., Gott, D., Gundert-Remy, U., Lambr'e, C., Leblanc, J.-C., Lindtner, O., Moldeus, P., Mortensen, A., Mosesso, P., Oskarsson, A., Parent-Massin, D., Stankovic, I., Waalkens-Berendsen, I., Woutersen, R. A., Wright, M., Maged, Y., Stadler, J., & Tobback, P. (2015). Scientific opinion on the re-evaluation of iron oxides and hydroxides (E 172) as food additives. *EFSA Journal*, 13, 4317. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4317>
- Aguilar-Perez, K. M., Ruiz-Pulido, G., Medina, D. I., Parra-Saldivar, R., & Iqbal, H. M. (2023). Insight of nanotechnological processing for nano-fortified functional foods and nutraceutical—opportunities, challenges, and future scope in food for better health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(20), 4618–4635. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2004994>
- Ahankari, S. S., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2023). *Nanomaterials from Renewable Resources For Emerging Applications*, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003245261>

- Ahmad, N., Hussain, S. M., Azam, S. M., Shahzad, M. M., Noureen, A., Yaqoob, R., Lateef, M., Yawer, A., Riaz, D., Usman, A., Faizan, M., Hassan, S., Ishtiaq, A., Riaz, P., Ali, A., Amin, F., Imran, M., Kausar, R., Ahmed, M., . . . & Ahmad, S. (2022). Effects of Se nanoparticles supplementation on growth performance, hematological parameters and nutrient digestibility of *Labeo rohita* fingerling fed sunflower meal based diet. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e253555. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.253555>
- Ahmed, T., Ali, S., Ahamed, T., Suralya, S., & Haq, M. (2024). Exploring the aspects of the application of nanotechnology system in aquaculture: a systematic review. *Aquaculture International*, 32, 4177–4206. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01370-7>
- Akter, N., Alam, M. J., Jewel, M. A. S., Ayenuddin, M., Haque, S. K., & Akter, S. (2018). Evaluation of dietary metallic iron nanoparticles as feed additive for growth and physiology of Bagridae catfish *Clarias batrachus* (Linnaeus, 1758). *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 6(3), 371–377.
- Altaf, A., Usmani, Z., Dar, A. H., & Dash, K. K. (2022). A comprehensive review of polysaccharide-based bionanocomposites for food packaging applications. *Discover Food*, 2(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00011-x>
- Aramli, M. S., Moghanlou, K. S., & Imani, A. (2023). Effect of dietary antioxidant supplements (selenium forms, alpha-tocopherol, and coenzyme Q10) on growth performance, immunity, and physiological responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) using orthogonal array design. *Fish & Shellfish Immunology*, 134, 108615. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2023.108615>
- Asha, V., & Sivaranjana, P. (2023). Development of biodegradable films using nanocellulose for food packaging application—review. *Azerbaijan Chemical Journal*, 1, 30–54. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2023-1-30-54>
- Ashfaq, A., Khursheed, N., Fatima, S., Anjum, Z., & Younis, K. (2022). Application of nanotechnology in food packaging: pros and Cons. *Journal of Agricultural and Food Research*, 7, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100270>
- Bashar, A., Hasan, N. A., Haque, M. M., Rohani, M. F., & Hossain, M. S. (2021). Effects of dietary silica nanoparticle on growth performance, protein digestibility, hematology, digestive morphology, and muscle composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Frontiers in Marine Science*, 8, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.706179>
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2020). The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25, 112. <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>
- Blaznik, U., Krušič, S., Hribar, M., Kušar, A., Žmitek, K., & Pravst, I. (2021). Use of food additive titanium dioxide (E171) before the introduction of regulatory restrictions due to concern for genotoxicity. *Foods*, 10, 1910. <https://doi.org/10.3390/foods10081910>
- Bratovic, A. (2020). Nanomaterials in food processing and packaging, its toxicity and food labeling. *Acta Scientifica Nutritional Health*, 4(9), 7–13. <https://doi.org/10.31080/asnh.2020.04.0745>
- Can, E., Kizak, V., Kayim, M., Seyhaneyildiz Can, Ş., Kutlu, B., Ateş, M., Kocabaş, M., & Demirtaş, N. (2011). Nanotechnological applications in aquaculture-seafood industries and adverse effects of nanoparticles on environment. *Journal of Materials Science and Engineering*, 5, 605–609.
- Ceylan, Z., Meral, R., Alav, A., Berat Torusdağ, G., Bildik, F., & Altay, F. (2024). Combined effects of zein nanofiber coating containing laurel (*Laurus nobilis*) and air fryer cooking on quality properties of fish fillets during cold storage. *ACS Omega*, 9, 8940–8946. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06318>
- Chantarasataporn, P., Yoksan, R., Visessanguan, W., & Chirachanchai, S. (2013). Water-based nano-sized chitin and chitosan as seafood additive through a case study of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Food Hydrocolloids*, 32(2), 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.01.011>
- Chaudhry, Q., Scotter, M., Blackburn, J., Ross, B., Boxall, A., Castle, L., Aitken, R., & Watkins, R. (2008). Food additives and contaminants applications and implications of nanotechnologies for the food sector. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 25(3), 241–258. <https://doi.org/10.1080/02652030701744538>

- Çetinkaya, T., & Wijaya, W. (2024). Advanced nanomaterials for enhancing the shelf life and quality of seafood products. *Food Bioscience*, 59, 104018. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104018>
- Çorapçı, B. (2022). The effect of rosehip seed oil nanoemulsion on some physical, chemical, and microbiological properties of sea bass fillets stored at 4±1 °C. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 31(7), 672–685. <https://doi.org/10.1080/10498850.2022.2094207>
- Dadar, M., Dhama, K., Vakharia, V. N., Hoseinifar, S. H., Karthik, K., Tiwari, R., Khandia, R., Munjal, A., Salgado-Miranda, C., & Joshi, S. K. (2017). Advances in aquaculture vaccines against fish pathogens: global status and current trends. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 25(3), 184–217. <https://doi.org/10.1080/23308249.2016.1261277>
- Dar, A. H., Rashid, N., Majid, I., Hussain, S., & Dar, M. A. (2020). Nanotechnology interventions in aquaculture and seafood preservation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60, 11, 1912–1921. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1617232>
- Dash, K. K., Deka, P., Bangar, S. P., Chaudhary, V., Trif, M., & Rusu, A. (2022). Applications of inorganic nanoparticles in food packaging: a comprehensive review. *Polymers*, 14, 521. <https://doi.org/10.3390/polym14030521>
- De Sousa, M. S., Schlogl, A. E., Estanislau, F. R., Souza, V. G. L., Dos Reis Coimbra, J. S., & Santos, I. J. B. (2023). Nanotechnology in packaging for food industry: past, present, and future. *Coatings*, 13(8), 1411. <https://doi.org/10.3390/coatings13081411>
- Demirci, A., Ocak, E., & Ceylan, Z. (2024). A new nanobiotechnology material for yogurt samples: Characterized nanotubes-*Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii bulgaricus*. *Food Bioscience*, 59, 104178. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104178>
- Dghais, S., Jemaa, M. B., Chouchen, M., Jallouli, S., Ksouri, R., & Falleh, H. (2023). Nano-emulsification of cinnamon and curcuma essential oils for the quality improvement of minced meat beef. *Foods*, 12, 235. <https://doi.org/10.3390/foods12020235>
- Dobrochna, A., Jerzy, Ś., Teresa, O., Magda, F., Małgorzata, R., Yuichiro, M., & Kacper, M. (2018). Effect of copper and silver nanoparticles on trunk muscles in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 18(6), 781–788. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v18_6_04
- Dönmez, A. E. (2023). Su ürünleri aşılarda nanoparçacıklar. *Etlik Veteriner Mikrobiyoloji Dergisi*, 34(1), 121–128. <https://doi.org/doi:10.35864/evmd.1216431>
- Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors, *Journal of Colloid and Interface Science*, 363(1), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.07.017>
- Echeverría, I., López-Caballero, M. E., Gómez-Guillén, M. C., Mauri, A. N., & Montero, M. P., (2018). Active nanocomposite films based on soy proteins-montmorillonite- clove essential oil for the preservation of refrigerated bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) fillets. *International Journal of Food Microbiology*, 266, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.10.003>
- Ekin, M. M., Kutlu, N., Meral, R., Ceylan, Z., & Cavidoğlu, İ. (2021). A novel nanotechnological strategy for obtaining fat-reduced cookies in bakery industry: Revealing of sensory, physical properties, and fatty acid profile of cookies prepared with oil-based nanoemulsions. *Food Bioscience*, 42, 101184. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101184>
- Elabd, H., Youssuf, H., Mahboub, H. H., Salem, S. M. R., Hussein, W. A., Khalid, A., El Desouky, H. & S., Faggio, C. (2022). Growth, hemato-biochemical, immune-antioxidant response, and gene expression in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) received nano iron oxide incorporated diets. *Fish and Shellfish Immunology*, 128, 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.07.051>
- ETC (Action Group on Erosion, Technology and Concentration). (2003). Down on the Farm: The Impact of Nanoscale Technologies on Food and Agriculture. Erişim Tarihi: 20.12.2024. http://www.etcgroup.org/en/materials/publications.html?pub_id=80
- Farkas, J., Christian, P., Urrea, J. A. G., Roos, N., Hasselov, M., Tollefsen, K. E., & Thomas, K. V. (2010). Effects of silver and gold nanoparticles on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) hepatocytes. *Aquatic Toxicology*, 96(1), 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2009.09.016>
- Ghasemi, M. A. G., Hamishehkar, H., Javadi, A., Homayouni- Rad, A., & Jafarizadeh-Malmiri, H. (2024). Natural-based edible nanocomposite coating for beef meat packaging. *Food Chemistry*, 435, 137582. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137582>

- Haghighat-Kharazi, S., Reza Kasaai, M., Milani, J. M., & Khajeh, K. (2020). Antistaling properties of encapsulated maltogenic amylase in gluten-free bread. *Food Science and Nutrition*, 8(11), 5888–5897. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1865>
- Hetzer, B., Graf, V., Walz, E., & Greiner, R. (2022). Characterisation of iron oxide-containing pearlescent pigments used as food colourants: nano-labelling required in the EU? *Food Additive Contaminants : Part A*, 39, 1933–1941. <https://doi.org/10.1080/19440049.2022.2134592>
- Hisham, F., Akmal, M. M., Ahmad, F., Ahmad, K., & Samat, N. (2024). Biopolymer chitosan: potential sources, extraction methods, and emerging applications, *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102424>
- Hussain, S. M., Ahmad, N., Rasul, A., Shahzad, M. M., Latif, M., Ul Hassan Arsalan, M. Z., Umair, M., & Shafqat, H. H. (2019). Efficacy of nano-Cr particles supplemented sunflower meal based diets on growth performance, digestibility and hematology of *Catla catla* fingerlings. *Pakistan Journal of Zoology*, 51(5), 1942–1952. <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2019.51.5.1943.1952>
- Jadhav, R., Pawar, P., Choudhari, V., Topare, N., Raut-Jadhav, S., Bokil, S., & Khan, A. (2023). An overview of antimicrobial nanoparticles for food preservation. *Materials Today Proceedings*, 72(1), 204–216. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.045>
- Jafarizadeh-Malmiri, H., Sayyar, Z., Anarjan, N., & Berenjian, A. (2019). Nano-additives for Food Industries. In: *Nanobiotechnology in food: Concepts, applications and perspectives*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05846-3_4
- Jahangiri, R., Hamed, H., & Ahari, H. (2022). The effect of edible coating of chitosan and Baneh gum (*Pistacia atlantica*) containing propolis extract and ginger nanoemulsion (*Zingiber officinale*) on fresh salmon quality. *Food & Health*, 5(2), 7-14. <https://doi.org/10.30495/fh.2022.67998.1109>
- Jayaweera, Y., Undugoda, L., Sandaruwan, C., & Priyadarshana, G. (2023). Nanotechnology trends in food processing and food packaging. *Nanoscience and Nanotechnology Asia*, 13(1), 26–40. <https://doi.org/10.2174/2210681213666230227111805>
- Jitpasutham, S., Sinsomsak, W., Chuesiang, P., Ryu, V., & Siripatrawan, U. (2024). Green active coating from chitosan incorporated with spontaneous cinnamon oil nanoemulsion: Effects on dried shrimp quality and shelf life. *International Journal of Biological Macromolecules*, 262, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129711>.
- Johari, S. A., Kalbassi, M. R., Soltani, M., & Yu, I. J. (2015). Study of fungicidal properties of colloidal silver nanoparticles (AgNPs) on trout egg pathogen, *Saprolegnia* sp. *International Journal of Aquatic Biology*, 3, 191–198. <https://doi.org/10.22034/ijab.v3i3.97>
- Kakaei, S., & Shahbazi, Y. (2016). Effect of chitosan-gelatin film incorporated with ethanolic red grape seed extract and *Ziziphora clinopodioides* essential oil on survival of *Listeria monocytogenes* and chemical, microbial and sensory properties of minced trout fillet. *LWT-Food Science and Technology*, 72, 432-438. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.021>
- Kamali, M., Shabanpour, B., Pourashouri, P., & Kordjazi, M. (2023). Effect of chitosan-coated *Ulva intestinalis* sulfated polysaccharide nanoliposome on melanosis and quality of Pacific white shrimp during ice storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 230, <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.123275>
- Karami, N., Kamkar, A., Shahbazi, Y., & Misaghi, A. (2019). Edible films based on chitosan-flaxseed mucilage: In vitro antimicrobial and antioxidant properties and their application on survival of food-borne pathogenic bacteria in raw minced trout fillets. *Pharmaceutical and Biomedical Research*, 5(2), 10–16. <https://doi.org/10.18502/PBR.V5I2.1580>
- Kazemzadeh, S., Abed-Elmdoust, A., Mirvaghefi, A., Hosseini, S. V., & Abdollahikhameneh, H. (2022). Physicochemical evaluations of chitosan/nisin nanocapsulation and its synergistic effects in quality preservation in tilapia fish sausage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16355>
- Khan, S. K., Dutta, J., Ahmad, I., & Rather, M. A. (2024). Nanotechnology in aquaculture: Transforming the future of food security. *Food Chemistry: X*, 24, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101974>
- Kumar, C. V., Karthick, V., Kumar, V. G., Inbakandan, D., Rene, E. R., Uma Suganya, K. U., Embrandiri, A., Stalin Dhas, T., Ravi, M., & Sowmiya, P. (2022). The impact of engineered

- nanomaterials on the environment: Release mechanism, toxicity, transformation, and remediation. *Environmental Research*, 212, 113202. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113202>
- Kumar Gupta, R., Abd El Gawad, F., A. E. Ali, E., Karunanithi, S., Yugiani, P., & Prakash Srivastav, P. (2024). Nanotechnology: Current applications and future scope in food packaging systems, *Measurement: Food*, 13, 100131. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2023.100131>
- McClements, D. J., & Öztürk, B. (2021). Utilization of nanotechnology to improve the handling, storage and biocompatibility of bioactive lipids in food applications. *Foods*, 10(2), 365. <https://doi.org/10.3390/foods10020365>
- Medina-Reyes, E. I., Rodríguez-Ibarra, C., D'eciga-Alcaraz, A., Díaz-Urbina, D., Chirino, Y. I., & Pedraza-Chaverri, J. (2020). Food additives containing nanoparticles induce gastrototoxicity, hepatotoxicity and alterations in animal behavior: the unknown role of oxidative stress. *Food and Chemical Toxicology*, 146, 111814. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111814>
- Melini, V., & Melini, F. (2018). Strategies to extend bread and GF bread shelf-life: From Sourdough to antimicrobial active packaging and nanotechnology. *Fermentation*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/fermentation4010009>
- Meral, R., Ekin, M. M., Kutlu, N., & Erim Köse, Y. (2022). The nanoemulsions: A new design and fat-reducing strategy for the bakery industry. Their effects on some quality attributes of fat-reduced cakes, *Journal of Food Processing Preservation*, 46(12), e17160. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17160>
- Mohammadi Sadati, S. M., Shahgholian-Ghahfarrokhi, N., Shahrousvand, E., Mohammadi-Rovshandeh, J., & Shahrousvand, M. (2022). Edible chitosan/cellulose nanofiber nanocomposite films for potential use as food packaging. *Materials Technology*, 37(10), 1276–1288. <https://doi.org/10.1080/10667857.2021.1934367>
- Narsale, S. A., Debbarma, S., Prakash, P., Sheikh, S., Shinde, S., & Baidya, S. (2024). Exploring the potential of nanotechnology in fisheries and aquaculture: Opportunities and implications. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(3), 1–17. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i3716>
- Nasr-Eldahan, S., Nabil-Adam, A., Shreadah, M. A., Maher, A. M., & Ali, T. E. S. (2021) A review article on nanotechnology in aquaculturesustainability as a novel tool in fish disease control. *Aquaculture International*, 29, 1459-1480. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00677-7>
- Nema, N. K., Rajan, N., Sabu, S., Khamborkar, S. D., Sarojam, S., Sajan, L. C., Babu, M., Peter, A., Chacko, B. K., & Jacob, V. (2022). Use of nanotechnology for the improvement of sensory attributes of foods. In *Application of nanotechnology in food science, processing and packaging*, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98820-3_3
- NNCI (National Nanotechnology Coordinated Infrastructure). (2025). What is Nano? Erişim Tarihi: 06.01.2025. <https://nnci.net/what-nano>
- Ogunkalu, O. A. (2019). Utilization of nanotechnology in aquaculture and seafood sectors. *Eurasian Journal of Food Science and Technology*, 3(1), 26-33.
- Ojagh, S. M., Rezaei, M., Razavi, S. H., & Hosseini, S. M. H. (2010). Effect of chitosan coatings enriched with cinnamon oil on the quality of refrigerated rainbow trout. *Food Chemistry*, 120, 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.10.006>
- Paidari, S., & Ahari, H. (2021). The effects of nanosilver and nanoclay nanocomposites on shrimp (*Penaeus semisulcatus*) samples inoculated to food pathogens. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 3195–3206. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00905-x>
- Popoola, O. M., Behera, B. K., & Kumar, V. (2023). Dietary silver nanoparticles as immunostimulant on rohu (*Labeorohita*): effects on the growth, cellular ultrastructure, immune-gene expression, and survival against *Aeromonas hydrophila*. *Fish Shellfish Immunology Reports*, 4, <https://doi.org/10.1016/j.fsirep.2022.100080>
- Priyadarshi, R., Roy, S., Ghosh, T., Biswas, D., & Rhim, J. W. (2022). Antimicrobial nanofillers reinforced biopolymer composite films for active food packaging applications-a review. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00353. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00353>

- Rabiepour, A., Zahmatkesh, F., & Babakhani, A. (2024). Preservation techniques to increase the shelf life of seafood products: An overview. *Journal of Food Engineering and Technology*, 13(1), 1-24. <https://doi.org/10.32732/jfet.2024.13.1.1>
- Rajan, M. R., & Rohini, R. (2021). Impact of different quantity of zinc oxide nanoparticles on growth and hematology of mrigal *Cirrhinus mrigala*. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 6(1), 62–71. <https://doi.org/10.22090/jwent.2021.01.006>
- Rajeshkumar, S., Venkatesan, C., Sarathi, M., Sarathbabu, V., Thomas, J., Anver Basha, K., & Hameed, A. S. S. (2009). Oral delivery of DNA construct using chitosan nanoparticles to protect the shrimp from white spot syndrome virus (WSSV). *Fish & Shellfish Immunology*, 26, 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2009.01.003>
- Ranjha, M. M. A. N., Shafique, B., Rehman, A., Mehmood, A., Ali, A., Zahra, S. M., Roobab, U., Singh, A., Ibrahim, S. A., & Siddiqui, S. A. (2022). Biocompatible nanomaterials in food science, technology, and nutrient drug delivery: recent developments and applications. *Frontiers in Nutrition*, 8, 778155. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.778155>
- Rather, M. A., Sharma, R., Aklakur, M., Ahmad, S., Kumar, N., Khan, M., & Ramya, V. L. (2011). Nanotechnology: A novel tool for aquaculture and fisheries development. A prospective mini-review. *Fisheries and Aquaculture Journal*, 16(1–5), 3.
- Rezaei, S., Mohammadiarzam, H., Keyvanshokoo, S., Pasha-Zanoosi, H., & Sharif-Kanani, H. (2024). Nutritional nano-selenium inclusion in fishmeal-free plant-based diets enhances stress resistance and post-stress recovery of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture Reports*, 38, 102298. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102298>
- Ropers, M. H., Terrisse, H., Mercier-Bonin, M., & Humbert, B. (2017). *Titanium dioxide as food additive, application of titanium dioxide*. IntechOpen.
- Roy, S., & Rhim, J. W. (2021). Fabrication of chitosan-based functional nanocomposite films: effect of quercetin-loaded chitosan nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 121, 107065. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107065>
- Safaeian Laein, S., Khanzadi, S., Hashemi, M., Gheybi, F., & Azizzadeh, M. (2024). Improving quality of trout fillet using gelatin coating-contain peppermint essential oil loaded solid lipid nanoparticles (PEO-SLN). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02157-3>
- Saremi, N., Keyvanshokoo, S., Mousavi, S. M., & Mohammadiarzam, H. (2024). Synergistic effects of dietary selenium nanoparticles and vitamin C improve growth performance, immune response, and antioxidant status of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*). *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 86, 127530. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2024.127530>
- Sheteiwy, M. S., Shaghaleh, H., Hamoud, Y. A., Holford, P., Shao, H., Qi, W., Hashmi, M. Z., & Wu, T. (2021). Zinc oxide nanoparticles: potential effects on soil properties, crop production, food processing, and food quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 36942–36966. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14542-w>
- Silva, M. M., Reboredo, F. H., & Lidon, F. C. (2022). Food colour additives: a synoptical overview on their chemical properties, applications in food products, and health side effects. *Foods*, 11, 379. <https://doi.org/10.3390/FOODS11030379>
- Slepickova Kasalkova, N., Slepicka, P., & Svorčík, V. (2021). Carbon nanostructures, nanolayers, and their composites. *Nanomaterials*, 11(9), 2368. <https://doi.org/10.3390/nano11092368>
- Sukkarun, P., Kitiyodom, S., Yostawornkul, J., Chaiin, P., Yata, T., Rodkhum, C., Boonrungsiman, S., & Pirarat, N. (2022). Chitosan-polymer based nanovaccine as promising immersion vaccine against *Aeromonas veronii* challenge in red tilapia (*Oreochromis sp.*). *Fish and Shellfish Immunology*, 129, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.08.035>
- T.C. Resmî Gazete (2023). *Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği*. Tarih: 13.10.2023, 32338. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/10/20231013M1-1.htm>
- Tayel, A. A., El-madawy, K. M., Moussa, S. H., & Assas, M. A. (2024). Application of *Cystoseira myrica* phycosynthesized selenium nanoparticles incorporated with nano- chitosan to control aflatoxigenic fungi in fish feed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, <https://doi.org/10.1002/JSFA.13604>

- Thiruvengadam, M., Rajakumar, G., & Chung, I. M. (2018). Nanotechnology: Current uses and future applications in the food industry. *3 Biotech*, 8(1), 74. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1104-7>
- Torres-Giner, S., Chiralt, A., Gonzalez-Martinez, C., Baghi, F., Gharsallaoui, A., Dumas, E., & Ghnimi, S. (2022). Advancements in biodegradable active films for food packaging: effects of nano/microcapsule incorporation. *Foods*, 11(5), 760. <https://doi.org/10.3390/FOODS11050760>
- Vanichavetin, K., Uchuwittayakul, A., Namdee, K., & Srisapoome, P. (2024). Oral booster effects of bivalent nanovaccine-primed fingerlings of Asian seabass (*Lates calcarifer*, Bloch 1790) to prevent streptococcosis and columnaris diseases. *Aquaculture*, 592, 741165. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741165>
- Venkatesan, R., Sivaprakash, P., Kim, I., Eldesoky, G. E., & Kim, S. C. (2023). Tannic acid as a crosslinking agent in poly (butylene adipate-co-terephthalate) composite films enhanced with carbon nanoparticles: processing, characterization, and antimicrobial activities for food packaging. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(4), <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110194>
- Vinay, T. N., Bhat, S., Gon Choudhury, T., Paria, A., Jung, M. H., Shivani Kallappa, G., & Jung, S. J. (2018). Recent advances in application of nanoparticles in fish vaccine delivery. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 26(1), 29-41. <https://doi.org/10.1080/23308249.2017.1334625>
- Wang, Y., & Luo, Y. (2023). Colloidal nanoparticles prepared from zein and casein: interactions, characterizations and emerging food applications, *Food Science and Human Wellness*, 12(2), 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.036>
- Yang, H., Li, G., Jiang, G., Zhang, Z., & Hao, Z. (2023). Heterogeneous selective oxidation over supported metal catalysts: from nanoparticles to single atoms. *Applied Catalysis B: Environmental*, 325, 122384. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122384>
- Yousif, E. S. I., Yaseen, A. A., Abdel Fatah, A. F. A., Shouk, A. H. A., Gadlla, M. G., & Mohammad, A. (2019). Egyptian balady bread quality as affected by functional nano powders of some food industry by-products. *Egyptian Journal of Food Science*, 47(2), 213–226, <https://doi.org/10.21608/ejfs.2019.17570.1022>
- Zamani, F., Khoshkhoo, Z., Hosseini, S. E., Basti, A. A. Z., & Azizi, M. H. (2022). Chitosan nano-coating incorporated with green cumin (*Cuminum cyminum*) extracts: an active packaging for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) preservation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16, 1228–1240. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01278-x>
- Zhao, R., Guan, W., Zheng, P., Tian, F., Zhang, Z., Sun, Z., & Cai, L. (2022). Development of edible composite film based on chitosan nanoparticles and their application in packaging of fresh red sea bream fillets. *Food Control*, 132, 108545. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108545>
- Zhou, X., Wang, Y., Gu, Q., & Li, W. (2009). Effects of different dietary selenium sources (selenium nanoparticle and selenomethionine) on growth performance, muscle composition and glutathione peroxidase enzyme activity of crucian carp (*Carassius auratus gibelio*). *Aquaculture*, 291(1-2), 78-81. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.03.007>