




Gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonuna yönelik güncel çalışmalar

Rukiye GÜNDOĞAN , Gizem Şevval TOMAR , Aslı CAN KARAÇA 

İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye

Özet: Nanoenkapsülasyon, aktif bileşenlerin nano ölçekte çeşitli malzemeler içinde tutulması olarak tanımlanır. Nanoenkapsülasyon, mikroenkapsülasyonla kıyaslandığında daha yüksek çözünürlük, biyoyararlılık ve salım özellikleri gibi çeşitli avantajlar sunar. Nanoenkapsülasyon işlemi, biyoaktif bileşiklerin ısı, ışık ve oksijen gibi dış faktörlere karşı hassasiyeti ve düşük çözünürlük özelliği gibi bu bileşiklerin kullanımındaki engelleri ortadan kaldırabilir ve onları dış etkenlerden koruyabilir, bileşiklerin çözünürlüğünü ve stabilitesini geliştirebilir ve vücuttaki hücrelere emilimini artırabilir. Hassas bileşenleri taşıyabilen, koruyabilen ve iletebilen nanoenkapsülasyon sistemlerinin geliştirilmesi için aktif bileşene ve uygulama alanına bağlı olarak çeşitli nanoenkapsülasyon yöntemleri ve taşıyıcılar kullanılabilir. Biyoaktif maddenin nanoenkapsülasyonu için nanoyapılı lipid taşıyıcılar, katı-lipid nanopartiküller, nanoemülsiyonlar, nano ölçekli lipozomlar, nanopartiküller ve nanolifler dahil olmak üzere farklı nanoenkapsülasyon teknikleri kullanılabilir. Yağ asitleri, esansiyel yağlar ve yağda çözünen vitaminler gibi lipofilik yapıdaki bileşenlerin, lipid bazlı nano ölçekli taşıyıcılarda enkapsülasyonu gerçekleştirilebilirken; nanoemülsiyonlar, nanopartiküller ve nanolifler hem hidrofobik hem de hidrofilik bileşenlerin enkapsülasyonu için kullanılabilir. Enkapsülasyon tekniğine ve kullanılan taşıyıcı malzemelere bağlı olarak, enkapsüle edilen bileşiğin enkapsülasyon etkinliği, tutulum oranı, fizikokimyasal özellikleri, salım özellikleri ve biyoyararlılığı değiştirilebilir. Bu derleme, antioksidanlar, çoklu doymamış yağ asitleri açısından zengin yağlar, uçucu yağlar, vitaminler, doğal renklendiriciler ve biyoaktif peptitler dahil olmak üzere çeşitli gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonu hakkında güncel bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nanoenkapsülasyon, gıda bileşenleri, biyoaktifler, nanotaşınım, biyoyararlılık

Recent studies on nanoencapsulation of food ingredients

Abstract: Nanoencapsulation is defined as the entrapment of active ingredients within various materials at the nanoscale range. Nanoencapsulation presents several advantages over microencapsulation such as improved solubility, bioavailability, and release characteristics. The nanoencapsulation process can eliminate the barriers related to the use of bioactive compounds, such as their sensitivity to external factors such as heat, light, and oxygen, and their low solubility, and protect them from external factors, improving the solubility and stability of the compounds, and increasing the absorption of the compounds into the cells in the body. Depending on the active ingredient and application area, various nanoencapsulation methods and carriers can be utilized for the development of nanoencapsulation systems capable of carrying, protecting, and delivering sensitive ingredients. Several different nanoencapsulation techniques including nanostructured lipid carriers, solid-lipid nanoparticles, nanoemulsions, nanoscale liposomes, nanoparticles, and nanofibers can be used for nanoencapsulation of bioactive. Ingredients of lipophilic nature such as fatty acids, essential oils, and fat-soluble vitamins can be encapsulated into lipid-based nano-delivery vehicles whereas nanoemulsions, nanoparticles, and nanofibers can be used for encapsulation of both hydrophobic and hydrophilic ingredients. Depending on the encapsulation technique and carrier materials used, encapsulation efficiency, retention rate, physicochemical properties, release characteristics, and bioavailability of the encapsulated ingredient can be changed. This review presents current information on the nanoencapsulation of various food ingredients including antioxidants, oils rich in polyunsaturated fatty acids, essential oils, vitamins, natural colorants, and bioactive peptides.

Keywords: Nanoencapsulation, food ingredients, bioactives, nano-delivery, bioavailability

Derleme

Yazışma yazarı: Aslı CAN KARAÇA E-mail: cankaraca@itu.edu.tr

Referans: Gündoğan, R., Tomar, G. Ş. & Can Karaça, A. (2023). Gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonuna yönelik güncel çalışmalar. *ITU Journal of Food Science and Technology*, 1(1) 1-14.

Makale Gönderimi: 1 Mart 2023

Online Kabul: 28 Nisan 2023

Online Basım: 30 Eylül 2023

Enkapsülasyon, çekirdek materyali olarak biyoaktif bileşiklerin, ilaçların, enzim ya da mikroorganizmaların doğal ya da sentetik yapılı bir duvar materyali ile kaplanmasıyla oluşan bir teknolojidir. Enkapsülasyon işlemi nano boyutta gerçekleştirildiğinde mikroenkapsülasyona göre çözünürlüğü ve biyoyararlılığı daha yüksek olan nanomateryaller elde edilmektedir (Koç ve diğ., 2010; Tabarestani ve Jafari, 2019). Nanoenkapsülasyon işleminde taşıyıcı sistemlerin başlıcaları, lipit temelli sistemler (nanoemülsiyon, nanoboyuttaki lipit taşıyıcılar vs), biyopolimer temelli sistemler (karbonhidrat ya da protein bazlı taşıyıcılar) ve doğadan esinlenen sistemlerdir (kazein, siklodoktrin gibi) (Jafari, 2017). Günümüzde tüketiciler tarafından doğal, güvenli ve minimum işlenmiş gıdaya yönelim artmıştır. Bu nedenle, gıda endüstrisi doğal ve/veya biyoaktif maddeleri gıdalara ekleyerek tüketicinin isteklerini karşılamaya çalışmaktadır. Biyoaktif bileşikler, bir ya da daha fazla metabolik prosesi düzenleyen moleküllerdir. Günlük ihtiyacı karşılayacak kadar tüketilmeleri durumunda bazı hastalıkları önlemeleriyle daha sağlıklı bir yaşama katkıda bulunurlar (Guaadaoui ve diğ., 2014). Biyoaktif bileşiklerin antioksidan, antiinflamatuvar, antimikrobiyal gibi çok çeşitli biyolojik fonksiyonları mevcuttur (Faridi Estefjani ve diğ., 2018). Biyoaktif bileşikler için, gıda sistemlerinde düşük orandaki çözünürlük ve biyoyararlılıkları, kolaylıkla okside olmaları, sindirim süresince devreye giren enzimlerden ve pH değişimlerinden etkilenecek şekilde degrade olmaları gibi kısıtlamalar söz konusudur. Nanoenkapsülasyon işlemi, biyoaktif bileşiklerin dış etmenlerden korunması, bileşiklerin gıdadaki çözünürlüğünü ve stabilitesini artırması, bileşiklerin vücutta hücrelere absorpsiyonunu artırması sayesinde biyoaktif bileşiklerin kullanımı ile ilgili olan engelleri kaldırabilmektedir (Pateiro ve diğ., 2021). Bu derlemede, antioksidan bileşikler, çoklu doymamış yağ asitlerince zengin yağlar, esansiyel yağlar, vitaminler, doğal renklendiriciler ve biyoaktif peptitler gibi çeşitli gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonu üzerine son yıllarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ele alınacaktır. Çeşitli gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonuna yönelik güncel çalışmalarda elde edilen bulgular Tablo 1'de özetlenmiştir.

2. Antioksidanların Nanoenkapsülasyonu

Antioksidanlar, atmosferik oksijen veya reaktif oksijen türlerinin etkisi altında meydana gelen oksidasyon reaksiyonlarını inhibe edebilen veya geciktirebilen özel bileşiklerdir. Bu biyoaktif bileşiklerin metal radikal üretimini bloke etmek, gen ekspresyonunu ve endojen antioksidan üretimini uyarmak, hasarlı molekülleri onarmak ayrıca çeşitli hastalıkları önlemek gibi birçok işlevi vardır. Bu gibi yararlı özelliklerinden dolayı antioksidan özellik gösteren bileşenlere ilgi giderek artmaktadır. Sentetik antioksidanların sağlık üzerindeki bilinen olumsuz etkileri nedeniyle kullanımları azalırken, doğal antioksidanların kullanımı yaygınlaşmaktadır (Maqsoudlou ve diğ., 2020). Doğal antioksidanlardan olan fenolik bileşikler, bitkiler tarafından üretilen ikincil metabolitlerdir. Bitki tohumlarında, ağaç kabuğunda, yapraklarda ve çiçeklerde bulunurlar. Halihazırda 8000'den fazla fenolik bileşik tanımlanmıştır. Geniş yapısal çeşitlilikleri nedeniyle farklı tiplere ayrılmaktadır. Hepsinin ortak noktası, bir veya daha fazla hidroksil grubuna bağlı en az bir aromatik halkanın varlığıdır. Fenol halkalarının sayısına ve halkaları birbirine bağlayan yapısal elementlere bağlı olarak çeşitlilik meydana gelmektedir. Fenolik bileşiklerin en belirgin özelliği olan antioksidan aktivite ise, özellikle hidroksil gruplarının sayısı ve konumu ile ilişkilidir (Nishimoto-Sauceda ve diğ.,

Antioksidan maddelerin elde edildiği bitki ekstraktları oldukça aktif bileşikler olduklarından oksijen, ışık, yüksek sıcaklık, pH ve çeşitli çevre koşullarına maruz kalmaları nedeniyle fonksiyonel etkilerini kaybedebilirler. Bu yüzden, en yüksek antioksidan aktiviteyi elde etmek için onları korumaya yönelik yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Enkapsülasyon, bu sınırlamaların üstesinden gelmek için uygun bir tekniktir. Nanoenkapsülasyonun etkinliği; kullanılan tekniğe, taşıyıcı maddenin seçimine ve antioksidan maddenin özelliklerine bağlıdır (Maqsoudlou ve diğ., 2020). Son yıllarda antioksidan özelliği yüksek çeşitli bitki ekstraktları, özellikle kurkumin ve kateşin gibi maddelerin nanoenkapsülasyonu üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır (Tablo 1).

Feridoni ve Shurmasti (2020) yaptıkları çalışmada, 9 günlük soğuk depolama süresi boyunca tavuk kanadının kalitesini ve raf ömrünü artırmak için hibiskus ekstraktının (*Hibiscus sabdariffa L.*) hem serbest hem de nanoenkapsüle formda antioksidan özelliklerini araştırmıştır. Çalışmanın sonuçları, karboksimetil selüloz kaplamanın ve hibiskus ekstraktının antioksidan özelliklere sahip olduğunu böylece karboksimetil selüloz ile kaplanan ekstraktın, tavuk kanadının oksidatif bozulma sürecini azalttığını göstermiştir. Jafari ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, ultrasonikasyon yöntemi kullanılarak elde edilen nano ve mikroenkapsüle formda biberiye ekstraktının (*Rosmarinus officinalis L.*) antioksidan potansiyelini ölçmüştür. Biberiye ekstraktı, ayçiçek yağının oksidasyon sürecini yavaşlatmıştır, ancak nano hem de mikroenkapsül formlarında yüksek antioksidan özelliklere sahip olmuştur. Nanoenkapsül üretiminin daha yüksek homojenizasyon süresi ve hızı gerektirdiğinden mikroenkapsüle biberiye ekstraktının kullanımı önerilmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada, kırmızı soğan ekstraktının enkapsülasyonu için 1:0, 1:1 ve 0:1 oranlarında *Alyssum homolocarpum* (AH) ve *Lepidium sativum* tohum gamı (LS) kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; AH:LS kaplaması kullanılarak nanoenkapsüle edilen kırmızı soğan ekstraktının raf ömrü boyunca sığır etinin fizikokimyasal, mikrobiyal ve duyu özelliklerini korumak ve geliştirmek için kullanılabileceği bildirilmiştir (Sarvinehbaghi ve diğ., 2021). Ruengdech ve Siripatrawan (2021) tarafından ultrason ile hazırlanmış kateşin nanoemülsiyonları, 28 gün boyunca 4 ± 1 °C'de depolama sırasında farklı çevresel stres koşullarına maruz bırakılmış, ardından kateşinin fiziksel stabilitesi ve antioksidan aktivitesi incelenmiştir. Farklı iyonik güç (200–600 mmol/L NaCl) ve pH (2–8) koşullarında nanoemülsiyonların fiziksel stabilitesi korunmuştur. Pastörizasyon ve sterilizasyon işlemleri antioksidan aktivitede azalmaya yol açmışken, yüksek basınç uygulamasının herhangi bir etkisi izlenmemiştir. Yüksek basınç uygulanmış, kateşinle zenginleştirilmiş hindistan cevizi sütündeki kateşinlerin stabilitesine nanoemülsiyonun etkisi incelenmiştir. Nanoemülsiyon yapısındaki kateşinin antioksidan aktivitesinin serbest formdaki kateşinden daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Araya-Sibaja ve diğ. (2022) tarafından sığır serum albümini ile hazırlanan lipit hibrit nanopartiküllerde kurkumin, desmetoksikurkumin ve bisdemetoksikurkuminin enkapsülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bileşiklerin serbest formlarının enkapsüle olanlara göre daha düşük antioksidan özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışma, biyoaktif bileşiklerin enkapsülasyonunda taşıyıcı olarak hibrit nanopartiküllerin kullanılabileceğini göstermiştir.

Denatüre peynir altı suyu proteini izolatu bazı nanoparçacıkların kurkuminin enkapsülasyonunda kullanılması Solghi ve diğ (2020) tarafından yapılan bir

çalışmada incelenmiştir. Kurkuminin enkapsülasyon verimliliği %93,1 olarak bulunmuş ve bu kullanılan enkapsülasyon sisteminin kurkumin moleküllerini hapsedmede etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, kurkuminin nanopartiküller içine enkapsüle edilmesi, kurkuminin oksidasyona karşı stabilitesinin %10'dan %70'e çıkmasını sağlamış ve geliştirilen nanopartiküller, simüle edilmiş gastrointestinal sistemde kurkumin salımını iyileştirmiştir (Solghi ve diğ., 2020).

3. Çoklu Doymamış Yağ Asitlerince Zengin Yağların Nanoenkapsülasyonu

Yağ asitleri yağların en temel yapı taşıdır ve genellikle çift bağ sayısına göre doymuş, tekli veya çoklu doymamış yağ asitleri (ÇDYA) olarak ayrılmaktadırlar. Yağ asitleri, zincirlerindeki karbon sayısı ve çift bağların varlığına göre farklılaşmaktadırlar. Metil ucu ve çift bağ arasındaki mesafeye göre omega-9 (oleik asit), omega-6 (linoleik asit ve araşidonik asit gibi) ve omega-3 (linolenik asit, eikozapentaenoik (EPA) asit ve dokozaheksaenoik asit (DHA)) yağ asitleri olarak adlandırılırlar. Bu yağ asitlerinden omega-3 ve omega-6 yağ asitleri insan vücudu için elzem yağ asitleridir ve insan vücudunda üretilemediklerinden beslenme yoluyla dışarıdan alınmak zorundadırlar. Gıdalarda çoklu doymamış yağ asidince zengin yağlar genellikle bu tür yağ asitlerini barındırırlar (Kaur ve diğ., 2014; Tontul ve diğ., 2017). Hayvansal kaynaklı gıdalardan balık, ÇDYA bakımından en zengin gıda olup; yüksek oranda omega-3 çeşidi olan EPA ve DHA'yı içermektedir. Bitkisel kaynaklı gıdalardan ise sıvı bitkisel yağlar (keten tohumu yağı, ceviz yağı, çiya tohumu yağı gibi) ÇDYA'yı büyük oranda içerirler ve omega-3 yağ asitlerince zengindirler (Çakmakçı ve Kahyaoğlu, 2012).

ÇDYA bakımından zengin yağlar, içeriğindeki yüksek oranda doymamış yağ asitlerinden dolayı oksidasyona açıktırlar. Bu durum, depolama boyunca gıdanın besin değerinde kayıplara ve istenmeyen tat-koku değişimlerine neden olmaktadır. Yağın oksidasyona karşı korunması ile yağ asitlerinin degradasyonunu engellemek mümkündür (Kuznetcova ve diğ., 2020). Ayrıca; lipofilik bileşiklerin bağırsak sıvısındaki düşük çözünürlükleri ve kimyasal olarak degradasyonundan dolayı, ÇDYA bakımından zengin yağların gastrointestinal sistemde biyoyararlılığı düşüktür. Güncel çalışmalarda ÇDYA'ca zengin yağların kompleks gıda matrislerine dahil edilebilmesi amacıyla nanopartikül, nanofiber, nanoemülsiyon gibi taşıyıcı sistemlerin kullanımı incelenmiştir. Bu yöntemlerle, hem yağın oksidasyondan korunması hem de gastrointestinal sistemde kontrollü salımı ve biyoyararlılığının iyileşmesi beklenmektedir (McClements ve diğ., 2021; Rahmani-Manglano ve diğ., 2022). Örneğin, Atay ve Altan (2021)'nin çalışmasında çörek otu yağının zein nanopartikülüne yüklenmesi koaksiyal elektrospreyleme işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül ile enkapsüle edilen yağın 60 °C'de 55 gün depolama süresince peroksit sayısının, enkapsüle edilmeyen formuna göre üç kat daha düşük olduğu belirlenmiştir. Enkapsüle çörek otu yağından antioksidan, antienflamatuvar, antikanserojen gibi biyolojik aktiviteye sahip olan timokinon fenolik bileşiğinin bağırsaktaki biyoyararlılığı serbest formdaki yağa göre artmıştır. Kutlu ve diğ. (2021) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada elektroçirme yöntemiyle nar çekirdeği yağının nanoenkapsülasyonu amacıyla nanomatlar geliştirilmiştir. Nanomat, elektroçirme yöntemiyle elde edilen tabaka şeklindeki nanomalzemelerdir. Nanomat ile kaplanan kaşar peynirinde 20 günlük depolama süresince kontrole kıyasla küf ve maya sayısı artışının daha az olduğu belirlenmiştir. Nanomatla kaplı kaşar peynirinde tiyobarbiturik asit değerleri kontrole göre daha az bulunduğu için nanomatların gıdada

oksidatif stabiliteyi arttırdığı söylenmiştir. Bir diğer çalışmada, keten tohumu yağının doğrudan gıdalla tüketimi ile keten tohumundaki α -linolenik asit (ALA)'in gastrointestinal sistemdeki (GI) bağırsak sindirimi sırasında geri kazanımının düşük olduğu tespit edilmiştir. ALA'nın GI'da kontrollü salımı için, peynir altı suyu tozu/sodyum aljinat varlığında keten tohumu yağıyla su içinde yağ nanoemülsiyonu hazırlanmıştır. Keten tohumu yağından ALA'nın *in-vitro* mide sindirimindeki salımı, oldukça düşük miktarda iken; bağırsakta yüksek hızda gerçekleşmiştir (Abbasi ve diğ., 2018). Öte yandan, Ordoñez Lozada ve diğ. (2021) tarafından üç çeşit kabak çekirdeği yağından elde edilen nanoemülsiyonların ısıtma-soğutma döngüsü sonrasında 4 ve 25 °C'de gerçekleştirilen depolamalarında antioksidan aktivitelerinde farklılıklar izlenmiştir. Kabak çekirdeği yağının çeşidine bakılmaksızın nanoemülsiyonlar, belirlenen depolama sıcaklıklarında fiziksel olarak stabil bulunmuştur.

Yüksek oranda doymuş yağ asidi içeren gıdalar yerine çoklu doymamış yağ asitlerince zengin gıdaların tüketiminin kolesterolde azalma, insülin direncinde iyileşme ve kalp-damar hastalıklarının önlenmesi gibi sağlığa faydalı etkiler oluşturabileceği bildirilmektedir (Mozaffarian ve diğ., 2010). Bu amaçla gıdalara ÇDYA'ca zengin yağların eklenmesiyle gıdayı doymamış yağ asitlerince zenginleştirerek sağlığa faydalı ürünler elde edilebilmektedir. Moghadam ve diğ. (2019), balık yağı ve akasya gamı içeren yağ içinde su emülsiyonunun sonikasyonu sonrasında dondurarak kurutma işlemiyle nanokapsüller elde etmiştir. Nanokapsüller probiyotik özellikli fermente süte eklendiğinde EPA ve DHA içeriğini artırmanın yanı sıra, *Lactobacillus plantarum*'un canlılığını artırdığı da bildirilmiştir. Yapılan zenginleştirme işlemi ile sütün genel beğeni özelliklerinde bir değişim izlenmemiştir. Ayrıca; nanoenkapsülasyon işlemi su içeriği yüksek olan yağsız gıdalara ÇDYA'ca zengin yağların eklenebilmesi için iyi bir yaklaşım olarak önerilmiştir. Keten tohumu yağı, linolenik asit bakımından zengin bir kaynaktır (Berto ve diğ., 2020) ve Stefani ve diğ. (2018) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, çiya tohumu müsajının taşıyıcı malzeme olarak kullanıldığı bir sistemde keten tohumu yağının nanopartikül oluşturulmuş ve elde edilen nanopartiküller portakal suyuna ilave edilmiştir. Keten tohumu yağı içeren nanopartikül eklenmemiş portakal suyu ile nanopartikül eklenmiş olan örnek arasında tüketici kabulü açısından önemli bir fark izlenmemiştir. Bu yöntemle, hidrofobik özellikteki bileşiklerin yüksek su içerikli gıdalarda çözünmesi sağlanmıştır.

4. Esansiyel Yağların Nanoenkapsülasyonu

Esansiyel yağlar, kendilerine has kokularıyla bilinen uçucu, doğal ve kompleks bileşiklerdir ve bitkilerin birçok bölümünden elde edilebilirler (Bakkali ve diğ., 2008). Esansiyel yağın bitkilerden elde edilmesinde su ya da buhar distilasyonu, solvent ekstraksiyonu, süper kritik ekstraksiyon gibi çeşitli yöntemler uygulanabilmektedir (Bassolé ve diğ., 2012). Esansiyel yağların sudaki çözünürlüklerinin düşük olması, ısı, ışık, oksijen varlığı gibi bazı çevresel koşullarda kolaylıkla bozunabilmeleri, bazı ürünlerde istenmeyen tat-koku karakteristiği, yüksek oranda uçuculuğu, sindirim sisteminde hızlıca metabolize olmalarından dolayı düşük biyoyararlılık göstermeleri gibi nedenlerle kullanım alanları kısıtlıdır. Nanoteknolojik yöntemlerden nanoemülsiyon, lipozom ya da polimerik nanotaşıyıcılar (kitosan, pektin nanopartikül), ya da elektroçirme yöntemleri esansiyel yağın enkapsülasyonu için en sık kullanılan yöntemlerdir ve esansiyel yağların sahip olduğu dezavantajların giderilmesinde etkindirler. Kullanılan yöntemin çeşidinin yanında karakteristiği de, esansiyel yağların biyolojik

aktivitesinin taşınım sırasında korunabilmesi açısından önemlidir (Shetta ve diğ., 2018; Almeida ve diğ., 2019; Baptista-Silva ve diğ., 2020). Esansiyel yağlar, bitkilerin korunmasında antibakteriyel özellik göstermesinin yanında antiparazitik, insektisidal, antiviral, antifungal ve antioksidan olarak da tanımlanmaktadır (Ravi Kumar, 2000; Hyldgaard ve diğ., 2012).

Esansiyel yağların vücuda alınımından yaklaşık beş saat sonrasında kanda hiç tespit edilemediği belirlenmiştir. Bu nedenle, esansiyel yağların vücut içinde taşınımı, salımı ve hücrelerdeki biyoyararlılığının en üst düzeyde tutulabilmesi için nanoenkapsülasyon işlemleri gerçekleştirilmektedir (Horky ve diğ., 2019; Baptista-Silva ve diğ., 2020). Esansiyel yağların nanoenkapsülasyonu ile oluşturulan sistemler sayesinde, esansiyel yağların hedefe afinitesi ve penetrasyonu artmaktadır. Bu durum, esansiyel yağların kan dolaşımında daha uzun süre bozunmadan kalmasında etkili olmaktadır (Ghodratı ve diğ., 2019). Matshetshe ve diğ., (2018) tarafından yapılan çalışmada, iyonik jelasyon tekniği ile tarçın esansiyel yağının kitosan varlığında nanoenkapsülasyonu gerçekleştirilmiştir. Oluşan nanopartiküller ile 120 saat civarında *in-vitro* koşullarda sürekli ve kontrollü salım gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Bu sistem, tarçın esansiyel yağının biyoaktivitesinin korunmasını sağlamıştır.

Gıda ürünlerinin raf ömrü süresince mikrobiyal kalitesinin korunması için gıdayı mikroorganizmalardan korumak ve gelişimlerine engel olmak gerekmektedir. Bu amaçla, endüstride genelde kimyasal koruyucular kullanılmaktadır; ancak bu tür antimikrobiallerin uzun vadede kullanımı sonucu insan sağlığında oluşturabilecekleri olumsuz etkileri nedeniyle doğal antimikrobiyal maddelere olan eğilim son yıllarda artmıştır. Esansiyel yağların doğal ve güçlü antioksidan ve antimikrobiyal ajan özelliğine sahip olduğu, çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Nanoenkapsülasyon yoluyla esansiyel yağların biyolojik aktivitesinin gıdanın raf ömrü boyunca korunması sağlanabilmektedir (Hyldgaard ve diğ., 2012; Noori ve diğ., 2018; Sarabandi ve diğ., 2019). Homayonpour ve diğ. (2022) tarafından gerçekleştirilen güncel bir çalışmada serbest ya da nano-boyuta indirgenmiş kitosanla kaplanan nanoenkapsüle formda kimyon esansiyel yağının içeren yenilebilir ambalajla kaplanan sardalya filetosunun mikrobiyal, kimyasal ve duyuşsal özellikleri incelenmiştir. Enkapsüle formdaki kimyon esansiyel yağının içeren filetolar, serbest formdaki kimyon esansiyel yağına göre duyuşsal özellikler ve mikroorganizma gelişimi açısından daha kabul edilebilir bulunmuştur. Kimyon esansiyel yağının nanoenkapsülasyonu, esansiyel yağın difüzyon hızını azaltmış ve bu durum serbest esansiyel yağa göre enkapsüle formun antioksidan ve antimikrobiyal aktivitesinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Böylece, balık filetosunun raf ömrünün bu kaplamayla birlikte uzadığı bildirilmiştir. Shi ve diğ. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, jelatin ve akasya gamının taşıyıcı malzeme olarak kullanıldığı bir sistemde, kekik yağının kompleks koaservasyon yoluyla nanopartikül elde edilmiştir ve kayıslara uygulanarak depolama süresince fungustatik etkisi değerlendirilmiştir. Nanopartiküllerin varlığında kayısıda fungustatik etkide artma ve çürüme hızında azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca; nanopartikül varlığında, kayısıda polifenol oksidaz enzim aktivitesinde azalma olduğu bildirilmiştir. Başka bir çalışmada ise, kekik yağının elektrodeğirme yöntemiyle jelatin/kitosan varlığında nanolife dönüştürülerek enkapsülasyonu gerçekleştirilmiştir. Kekik yağı içeren nanoliflerde *Clostridium perfringens*'e karşı antimikrobiyal etki gözlemlenmiştir. Nanolifin uygulandığı sosis örnekleri ile nitritli örnekler arasında duyuşsal açıdan önemli bir fark izlenmediği için,

kekik yağı içeren nanoliflerin et ürünlerindeki nitrite alternatif olabileceği öne sürülmüştür (Vafania ve diğ., 2019). Mikotoksinler, küfler tarafından gıdanın (tahıl ürünleri, kurutulmuş baharat ve meyveler gibi) üretimi ve depolaması süresince üretilen bileşiklerdir. Aflatoksin, okratoksin, fumonisin gibi birçok çeşidi bulunan mikotoksinlerin, genotoksik, karsinojenik, teratojenik, hepatotoksik ve mutajenik karakteristikleri ile akut ya da kronik toksisiteye neden olabirler (Carballo ve diğ., 2019). Esansiyel yağlar, FDA tarafından "genellikle güvenilir olarak kabul edilen (GRAS)" maddeler grubunda sınıflandırılmış olup, mikotoksin üretimine karşı önemli bir doğal koruyucu madde olduğuna dair çalışmalar mevcuttur. Tarım sektöründe depolanan gıdaların küf ve mikotoksinlerin insan sağlığına son derece zararlı etkilerinin yanında; oksidatif bozunma, tane zararı ve lipit peroksidasyonuna da neden olarak gıdada büyük oranda tahribe neden olmaktadır (Das ve diğ., 2019). Nanoemülsiyonlar, esansiyel yağların enkapsülasyonunda sık kullanılan yöntemlerden bir tanesidir ve ultrason ya da yüksek basınçlı homojenizatör yardımıyla emülsiyonların yağ damlacıklarının boyutunda yapılan azaltma sonrasında elde edilmektedirler. Damlacık boyutunun düşürülmesi, esansiyel yağların çözünürlük ve biyoyararlılık özelliklerini artırmaktadır (McClements ve Rao, 2011). Güncel bir çalışmada yenibahar esansiyel yağı, kitosan nanoemülsiyonu ile enkapsüle edilmiştir (Chaudhari ve diğ., 2022). Nanoenkapsüle formdaki esansiyel yağın düşük dozlarda (1,0 µL/mL) bile *Aspergillus flavus*'un aflatoksin üretme aktivitesine karşı, serbest haldeki esansiyel yağdan daha etkili bulunduğu belirtilmiştir. Mısırın depolanması süresince duyuşsal özelliklerde değişiklik olmadan, enkapsüle esansiyel yağın mısır lipit peroksidasyonu ve Aflatoksin B₁'den koruduğu belirtilmiştir (Chaudhari ve diğ., 2022). Bir diğer çalışmada karanfil esansiyel yağının nanoemülsiyon formunun maltlama süresince arpada *Fusarium* gelişimi ve *Fusarium* toksinleri üretimi üzerindeki etkisi incelenmiş ve deoksinivalenol toksininin ve *Fusarium* gelişiminin azaldığı rapor edilmiştir. Elde edilen son üründe esansiyel yağın ürünün tat-koku özelliklerine etkisi olmadığı bildirilmiştir (Wan ve diğ., 2020).

5. Vitaminlerin Nanoenkapsülasyonu

Vitaminler, insan vücudu tarafından sentezlenemeyen bir grup mikro besin olarak tanımlanır. Bu besinler, biyoaktif bileşiklerdir ve beslenme rollerinin ötesinde sağlık yararları sağlayan fizyolojik olarak aktif bileşenlerdir. Toplam on üç bileşik yağda çözünen (A, D, E ve K) ve suda çözünen vitaminler (B₁, B₂, B₃, B₅, B₆, B₇, B₉, B₁₂ ve C) olarak sınıflandırılmaktadır. Vitaminler, metabolik ve hücrel işlevleri düzenlemek, sağlığı, üremeyi ve büyümeyi teşvik etmek aynı zamanda hastalıkları önlemek için özel işlevleriyle insan yaşamında hayati rol oynamaktadır. Vitaminlerin tüketimi sırasındaki biyoyararlılığı, yapısal değişimler veya düşük absorpsiyon nedeniyle sınırlı olabilmektedir. Ayrıca, sıcaklık, pH, tuz, oksijen ve ışık gibi çevresel stres koşulları nedeniyle gıda işleme ve depolama sırasında vitaminlerin büyük bir kısmı kaybolur. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için nanoenkapsülasyon, umut verici bir yöntemdir. Nanoenkapsüle formdaki mikro besinlerle ilişkili avantajlar, daha yüksek biyoyararlılık, stabilite ve hedef bölgede aktif bileşiklerin kontrollü salımıdır (Melo ve diğ., 2021).

Yararlı özelliklerinin korunması ve kontrollü salımı amacıyla en çok nanoenkapsülasyon uygulanan vitaminlere C, D ve E vitaminleri örnek olarak verilebilir. C vitamini olarak bilinen askorbik asit, önemli bir antioksidan ve gıda bileşenidir. Çevresel koşullara karşı oldukça hassastır. Bu da kozmetik ve farmasötik ürünlere dahil edilmesini zorlaştırır.

Tablo 1. Gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonuna yönelik güncel çalışmalar.

Table 1. Recent studies on nanoencapsulation of food ingredients.

Bileşen	Nanoenkapsülasyon Metodu	En Önemli Bulgular	Kaynak
Yaban mersini (<i>Vaccinium myrtillus</i>)	Nanoemülsiyon	Kitosan kullanılarak kaplanan yaban mersinlerinin antioksidan özelliği artmıştır.	Franco ve diğ., 2021
<i>Eryngium campestre</i> L., <i>Froriepia subpinnata</i> , <i>Mentha spicata</i> L.	Nanoemülsiyon	Yapılan araştırma sonucunda %8.5 maltodekstrin, %1.5 kitosan ile enkapsülasyon, ekstraktların antioksidan etkinliğini arttırmak için etkili formülasyon olmuştur.	Azizkhanian ve Sudanloo, 2022
<i>Vaccinium corymbosum</i> L.	Elektrospreyleme	Zein kullanılarak oluşturulan nanoenkapsüller, homojen morfolojiye sahip ve termal olarak stabil bulunmuştur.	González-Cruz ve diğ., 2022
<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.	Nanofilm	Karboksümetil selüloz ile kaplanan bileşenler, tavuk kanatlarının oksidatif bozulma sürecini yavaşlatmış ve raf ömrünü arttırmıştır.	Feridoni ve Shurmasti, 2020
<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Ultrasonikasyon	Ekstrakt konsantrasyonunun artmasıyla antioksidan aktivitenin de arttığı görülmüştür.	Jafari ve diğ., 2022
<i>Lpomoea batatas</i>	Nanoemülsiyon	Hazırlanan nanoenkapsüller, bitkisel atıkların katkı maddesi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.	Guerrero-León ve diğ., 2021
<i>Allium cepa</i> , L.	Nanoemülsiyon	Nanoenkapsüle edilen kırmızı soğan özü, sığır etinde yüksek antioksidan özellik göstermiştir.	Sarvanehbashi ve diğ., 2021
Siyah havuç antosiyanini	İyonotropik jelasyon	Nanoenkapsülasyon işlemi, antosiyaninlerin antioksidan aktivitesini geliştirmiştir.	Chatterjee ve diğ., 2021
Kateşin	Nanoemülsiyon	Nanoenkapsüle formdaki kateşinlerin, gıda ürünlerinde kullanımı için büyük bir potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir.	Ruengdech ve Siripatrawan, 2021
Pirina özütü	Nanoemülsiyon	Pirina ekstresi, roka tohumu ve çiya tohumu gamında enkapsüle edilmiştir.	Akçiçek ve diğ., 2021
<i>Punica granatum</i> L.	Nanoemülsiyon	Kalsiyum aljinat nanoküre içine enkapsüle edilmiş <i>Punica granatum</i> L.'nin özellikle uzun süreli depolama sırasında tavuk etinin raf ömrünü arttırmıştır.	Rahnemoon ve diğ., 2021
<i>Ferula persica</i> ekstraktı	Nanoemülsiyon	Enkapsüle formdaki <i>Ferula persica</i> ekstraktı, serbest formdaki <i>Ferula persica</i> ekstraktı ile karşılaştırıldığında, soya fasulyesi yağının antioksidan etkinliğini arttırmıştır.	Estakhr ve diğ., 2020
<i>Mentha piperita</i>	Nanoemülsiyon	Kaplama maddesi olarak kitosanın kullanımı antioksidan aktivitenin korunmasında etkili olmuştur.	Royshanspour ve diğ., 2020
Üzüm ve elma posasından elde edilen toplam polifenol	Nanoemülsiyon	Kaplama maddesi olarak kitosan ve soya proteini değerlendirilmiştir. Soya proteini yüksek enkapsülasyon verimliliği göstermiştir.	Gaber ve diğ., 2020
Kurkuminoid	Nanoemülsiyon	Üç ana kurkuminoid; kurkumin, desmetoksikurkumin ve bisdesmetoksikurkumin enkapsüle edilerek antioksidan özellikleri değerlendirilmiştir. Serbest kurkuminoidler önemli ölçüde daha düşük antioksidan özellik göstermiştir.	Araya-Sibaja ve diğ., 2022
Kurkumin	Nanoemülsiyon	Kurkuminin nanopartiküller içine enkapsüle edilmesi, kurkuminin oksidasyon kararlılığının %10'dan %70'e çıkarmıştır. Ayrıca geliştirilen nanopartiküller, simüle edilmiş gastrointestinal kanalda kurkumin salımını iyileştirmiştir.	Solghi ve diğ., 2020
B ₉ ve B ₁₂ Vitamini	Nanoemülsiyon	B ₉ ve B ₁₂ vitaminlerinin, nanoenkapsülasyon yoluyla biyoyararlılığı artmıştır. Her iki vitamin için de yüksek enkapsülasyon verimliliği (B ₉ vitamini için %89 ve B ₁₂ vitamini için %71) elde edilmiştir.	Ramallo ve diğ., 2021
E Vitamini	Nano çökeltme	Mikroalg <i>Chlorella homosphaera</i> 'dan ekstrakte edilen yağ ve E vitamini birlikte enkapsüle edilmiştir. Nanoenkapsüller, ortalama partikül çapı, polidispersiyon indeksi, zeta potansiyeli ve pH gibi parametrelerde kabul edilebilir sonuçlar göstermiştir.	Fonseca ve diğ., 2022
D ₃ Vitamini	Nanoemülsiyon	Enkapsülenenmiş D ₃ vitamininin, süt ürünlerinin zenginleştirilmesinde kullanılmasına yönelik yararlı sonuçlar elde edilmiştir.	Sharifan ve diğ., 2021
D ₃ Vitamini	Nano çökeltme	Vitamin D ₃ , zein ile nanoenkapsüle edilmiştir. Zein nanoparçacıkları, gıda işleme ve gastrointestinal koşullara maruz kaldığında Vitamin D ₃ 'ün vücutta kalma süresini uzatmak için umut verici bir yaklaşımdır.	Noronha ve diğ., 2021
A Vitamini	Nanoemülsiyon	Nanoenkapsüle A vitamini, gastrointestinal sindirimi simüle eden <i>in-vitro</i> deneyler sonucunda, nanopartiküllerin midede değişmediğini ve toksisite göstermediğini kanıtlamıştır.	Resende ve diğ., 2020
E Vitamini	Nanofilm	Karboksümetil selüloz filmlerine nanoenkapsüle E vitamini eklenerek filmlerin fiziksel özellikleri iyileştirilmiş ve ortam sıcaklığında depolanan lipidler veya yağlar içeren gıda maddelerinin korunumunda kullanılması önerilmiştir.	Mirzaei-Mohkam ve diğ., 2020
D ₃ Vitamini	Süperkritik karbon dioksit ile	D ₃ vitamini, süperkritik karbon dioksit kullanılarak β-glukan matrisine enkapsüle edilmiştir. Nanoenkapsüle formdaki D ₃ vitamini, β-glukan matrisine yüklenen, konsantrasyona bağlı bir şekilde, artan antioksidan ve antikanserijen özelliklere sahip kontrollü bir salım davranışı göstermiştir.	Gani ve diğ., 2021

Tablo 1. Gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonuna yönelik güncel çalışmalar (devamı).
Table 1. Recent studies on nanoencapsulation of food ingredients (continue).

Bileşen	Nanoenkapsülasyon Metodu	En Önemli Bulgular	Kaynak
C Vitamini	Nanolipozom	Farklı oranlarda süt fosfolipidleri, kolesterol, fitosteroller ve farklı sonikasyon süreleri, C vitamininin enkapsülasyonu için değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kolesterolün kampesterol ile değiştirilmesinin, nanolipozomlarda enkapsülasyon etkinliği, kontrollü salımı ve C vitamini stabilitesi üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermiştir.	Amiri ve diğ., 2019
E Vitamini	Nanoemülsiyon	E vitamini, faz değiştiren malzeme ile enkapsüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, E vitamininin (α - tokoferol) nanoenkapsülasyonu için kullanılan yöntemin yüksek verimliliğini göstermiştir.	Mohammadi ve diğ., 2020
Antosiyanin	Kendi kendine bir araya gelme	Antosiyanin, C ₆ M ₁ adlı on sekiz amino asitten oluşan bir amfilik peptit kullanılarak enkapsüle edilmiştir. Sonuçlar; C ₆ M ₁ 'nin, antosiyaninin pH artışına, metalik iyonlara ve sıcak sıcaklığa karşı toleransını geliştirdiğini göstermiştir.	Yao ve diğ., 2021
Antosiyanin	Desolvasyon	Antosiyanin (AC) yüklü β -Lg nanoparçacıkları üretilmiştir. Bu parçacıklar, yüksek antosiyanin tutma oranı, tercih edilen partikül boyutu ve yüksek enkapsülasyon verimliliği sergilemiştir.	Salah ve diğ., 2020
Antosiyanin	Kendi kendine bir araya gelme	Böğürtlenlerden (<i>Rubus spp.</i>) antosiyaninle zenginleştirilmiş ekstraktların enkapsülasyonu için pektin ve lizozim kullanılmıştır. Bu yöntem, gıda katkı maddelerinin üretilmesi veya gıdaların biyoaktif bileşiklerle zenginleştirilmesi için alternatif bir yol olmuştur.	Rosales ve diğ., 2021
Karatenoid	Nanoemülsiyon ve Dondurarak Kurutma	Kırmızı dolmalık biber özütü dört farklı kaplama malzemesi ile enkapsüle edilmiştir. Tüm formülasyonlar ve seçilen teknik, doğal gıda pigmentleri olarak uygulanma potansiyellerini göstermiştir.	Petito ve diğ., 2022
Antosiyanin ve betalain	Nanofilm	Yoğurt benzeri fermente soya ürününün renklendirilmesi için doğal antosiyanin ve betanin enkapsüle edilmiştir. En iyi sonuç, enkapsüle formdaki kırmızıturp özütünün yoğurda verdiği pembe renk olmuştur.	Dias ve diğ., 2020
Karotenoid	Kristalizasyon	Karotenoidlerin sakaroz ile birlikte kristalleştirilmesi, DPPH serbest radikallerine karşı %77.58'lik enkapsülasyon verimliliği göstermiştir. Kristalizasyon, karotenoidlerin genel stabilitesini önemli ölçüde iyileştirmiştir.	Kaur ve diğ., 2020
β -Karoten	Püskürtmeli Kurutma ve Elektrospreyleme	β -Karoten zein ile mikro ve nano boyutlarda enkapsüle edilmiştir. Nanoenkapsüller, düşük parçacık boyutu ve daha büyük yüzey alanı nedeniyle mikro kapsüllere kıyasla daha iyi çözünme davranışı göstermiştir.	Mahalakshmi ve diğ., 2020
Kazein türevi peptitler	Elektroejirme	Kazein türevi peptitlerin nanoenkapsülasyon verimi 72,95–86,04% olarak bulunmuştur. Gastrointestinal sistemde sindirimden 8 saat sonra 75,3% oranda nanofiberlerden peptit salımı izlenmiştir. Peptit yüklü nanolifler, sütün zenginleştirilmesinde kullanılabileceği ifade edilmiştir.	Devaraju ve diğ., 2021
Kinoadan elde edilen peptitler	Nanolipozom	Enkapsüle kinoa peptit lipozomlarının hamburger köftesine eklenmesi ile kontrole göre buzdolabında depolama süresince toplam bakteri yükü, <i>S. aureus</i> , küf ve maya sayısının daha az arttığı izlenerek, bu lipozomların antimikrobiyal aktivitesi gösterilmiştir.	Yekta ve diğ., 2020
Keten tohumundan elde edilen peptitler	Nanolipozom	Nanolipozomların stabilitesi ve enkapsülasyon etkinliğinin sıcaklık, donma-çözünme stresi, <i>in-vitro</i> koşullar gibi etkenlerden etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca, nanolipozomların, peptitlerin antioksidan özelliğinin yüksek oranda korunmasında etkili olduğu belirlenmiştir.	Sarabandi ve Jafari, 2020
Karidesten elde edilen peptitler	Nanolipozom	Lipozomla enkapsüle edilen karidesten elde edilen peptitlerin 7 gün, 4°C'de depolama süresince yüksek stabilite göstermiştir.	Latorres ve diğ., 2021
<i>Spirulina</i> hidrolizatı	Nanolipozom	Antioksidan aktivite korunmuştur.	Mohammadi ve diğ., 2021
Cevizden elde edilen peptitler	Nanolipozom	<i>Escherichia coli</i> ve <i>Staphylococcus aureus</i> 'a karşı antibakteriyel aktivite göstermiş ve bağırsaktaki sindirimde stabil kalmıştır.	Wang ve diğ., 2022
<i>Spirulina</i> hidrolizatı	Nanoemülsiyon	Antioksidan aktivite korunmuştur.	Costa ve diğ., 2021
Yulaftan elde edilen peptitler	Katı lipit nanopartikülü	Enkapsüle peptitler gastrointestinal sıvıdaki hidroliz reaksiyonundan korunarak, yüksek biyoaktivite göstermişlerdir.	Su ve diğ., 2020
Koyun peynir altı suyundan elde edilen peptitler	Nanolipozom	Peptitlerin antioksidan ve ACE-1 inhibitör aktiviteleri 30 günlük depolama süresince stabil kalmıştır.	Corrêa ve diğ., 2019
Sentetik antimikrobiyal peptit	Nanopartikül	Biyouyumlu polimer olan polilaktik glikolik asit (PLGA)'den solvent difüzyon yöntemiyle elde edilen nanopartikülle peptit enkapsüle edilmiştir. Peptidin <i>E. coli</i> O157:H72'ye karşı gösterdiği antimikrobiyal etki korunmuştur.	Gómez-Sequeda ve diğ., 2020

Tablo 1. Gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonuna yönelik güncel çalışmalar (devamı).
 Table 1. Recent studies on nanoencapsulation of food ingredients (continue).

Bileşen	Nanoenkapsülasyon Metodu	En Önemli Bulgular	Kaynak
Kenevir esansiyel yağı	Yosun proteini nanopartikülü	Esansiyel yağın antioksidan aktivitesinin stabilitesini iyileştirmek için yosun proteini nanopartikülü önemli bir kaynak olarak belirlenmiştir.	Hadidi ve diğ., 2022
Yenibahar esansiyel yağı	İyonik jelleşme tekniğiyle hazırlanan kitosan nanoemülsiyonu	Esansiyel yağın kitosan nanoemülsiyonunda enkapsülasyonu ile <i>Aspergillus flavus</i> 'a karşı yüksek antifungal ve anti-aflatoksijenik etki göstermiştir.	Chaudhari ve diğ., 2022
Karanfil esansiyel yağı	Nanoemülsiyon	Maltlama süresince deoksinivalenol ve Fusarium gelişimi azalmıştır.	Wan ve diğ., 2020
Kekik esansiyel yağı	Kompleks koaservasyon metodu ile nanokapsül oluşturma	Kekik esansiyel yağı nanokapsülü yüksek ısı stabilite, düşük salım özelliği, yüksek fungustatik etkili bulunmuştur.	Shi ve diğ., 2021
Kakule esansiyel yağı	Nanolipozom	Nanoenkapsülasyon işlemi kakule esansiyel yağının antimikrobiyal ve antioksidan aktivitesinin korunmasını sağlamıştır.	Nahr ve diğ., 2019
Kimyon esansiyel yağı	Nanolipozom	Kimyon esansiyel yağının nanolipozomla enkapsülasyonu ile yağın antioksidan ve antimikrobiyal aktivitesi artmış ve duyuşal özellikleri esansiyel yağın serbest formuna göre daha iyi bulunmuştur.	Homayonpour ve diğ., 2021
Biberiye esansiyel yağı	Nanolipozom	Enkapsülasyon ile esansiyel yağların kontrollü salımı gerçekleştirilmiştir.	Chen ve diğ., 2019
Yasemin çiçeği esansiyel yağı	Pektin/kitosan nanopartikülü	Nanoenkapsülasyon ile yasemin çiçeği esansiyel yağının antikanser aktivitesinde artış izlenmiştir.	Attallah ve diğ., 2020
Maydonoz esansiyel yağı	Nanoemülsiyon	Kitosan nanoemülsiyonu ile enkapsüle maydonoz yağı uygulanan depolanmış çiya tohumlarının lipit peroksidasyonu ve aflotoksin B-1 gelişimine karşı etkili bulunduğu belirtilmiştir.	Deepika ve diğ., 2022
Kekik esansiyel yağı	Elektroegirme	Kekik esansiyel yağının enkapsülasyonu ile elde edilen nanofiberlerin <i>Clostridium perfringens</i> 'e karşı bakterisidal etkisi izlenmiştir. Böylece, bu nanofiberin et ürünlerinde nitrit yerine kullanılabilmesi belirtilmiştir.	Vafania ve diğ., 2019
Tarçın esansiyel yağı	Nanopartikül	<i>In-vitro</i> koşullarda 120 saat boyunca kontrollü ve yavaş esansiyel yağ salımı izlenmiştir.	Matshetshe ve diğ., 2018
Nar çekirdeği yağı	Elektroegirme	Elektroegirme yöntemiyle nar çekirdeği yağının enkapsülasyonu sonrası elde edilen nanomatlarla kaplanan gıdada maya ve küf gelişimi azalmış ve oksidatif stabilite artmıştır.	Kutlu ve diğ., 2021
Çörek otu yağı	Koaksiyel elektrospreyleme	Zein nanopartikülü ile enkapsüle edilen çörek otu yağında oksidatif stabilitede artış izlenmiştir.	Atay ve Altan, 2021
Keten tohumu yağı	Nanopartikül	Çiya tohumu müsilağı ile enkapsüle edilen keten tohumu yağının su içeriği yüksek ürünlerde çözünmesi sağlanmıştır. Elde edilen nanopartikül ile yağın <i>in-vitro</i> sindirim sonrası biyoyararlılığı da artmıştır.	Stefani ve diğ., 2018
Badem ve susam yağı	Nanomülsiyon	Badem ve susam yağının nanoemülsiyonları yoğurda zenginleştirme amacıyla eklenmiştir. Susam yağı nanoemülsiyonu eklenen ürün, duyuşal ve tekstürel özellikler açısından daha çok tercih edilmiştir.	Heydari Gharehcheshmeh ve diğ., 2020
Keten tohumu yağı	Nanomülsiyon	Keten tohumu yağı ve peynir altı suyu tozu proteini/sodyum aljinat varlığında ultrason yardımıyla hazırlanan nanoemülsiyonun <i>in-vitro</i> sindirimde α -linolenik asit (ALA)'ın biyoyararlılığının arttığı belirlenmiştir.	Abbasi ve diğ., 2018
Karides yağı	Nanolipozom	Karides yağının nanolipozom yapısında enkapsülasyonu, yağın oksidasyona karşı korunmasında ve istenmeyen balık kokusunun bastırılmasında etkili bulunmuştur.	Gulzar ve Banjakul, 2019
Balık yağı	Nanopartikül	Balık yağı içeren emülsiyonun dondurarak kurutulmasıyla elde edilen nanopartikülün, probiyotik fermente süte eklenmesi ile EPA ve DHA'ca zengin, yüksek oranda canlı probiyotik içeren bir ürün elde edilmiştir.	Moghadam ve diğ., 2019
Palm yağı	Nanopartikül	Palm yağı ve kazein/akasya gamının taşıyıcı malzeme olarak kullanıldığı nanopartiküller sarı renkte olup, yüksek antioksidan aktiviteye sahip bulunmuştur. Bu sebeple, gıda maddelerinde doğal renklendirici ve antioksidan olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir.	Ribeiro ve diğ., 2022
Aspir yağı	Nanopartikül	Nanoenkapsülasyonla aspir yağındaki antioksidan bileşiklerin korunduğu izlenmiştir.	Almeida ve diğ., 2021

D vitamini en çok kas-iskelet sağlığının korunmasındaki önemi ile bilinir. Ayrıca, artan cilt kanseri riskinden dolayı en önemli D vitamini kaynağı olan güneş ışığına uzun süre maruz kalınması önerilmez ve bu da D vitamini takviyesini gerekli kılar. E vitamininin ise, iyi bilinen antioksidan özelliklerinin ötesinde çok çeşitli terapötik etkilere sahiptir. Bununla birlikte, E vitamininin, özellikle tokotrienollerin zayıf biyoyararlılığı, klinik uygulamalar için büyük bir sınırlama olmaya devam etmektedir (Sharifan ve diğ., 2021).

Ramalho ve diğ. (2021) yapmış oldukları araştırmada, B₉ ve B₁₂ vitaminlerinin poli(laktik-ko-glikolik asit) ile nanoenkapsülasyonu üzerine çalışmıştır. Simüle edilmiş sindirim çalışmaları, geliştirilen nanopartiküllerin; enkapsüle edilmiş vitamin içeriğini koruyabildiğini, dolayısıyla gastrointestinal ortama karşı koruma sağladığını göstermiştir. B₉ ve B₁₂ vitamininin nanoenkapsülasyonu, vitaminlerin özelliklerini geliştirmiştir. Fonseca ve diğ. (2022) ise, mikroalg *Chlorella homosphaera*'dan ekstrakte edilen yağı, E vitamini ile birlikte nanoenkapsüle etmeyi amaçlamışlardır. Nanoenkapsüller, üretilen formülasyon için beklenen sınırlar içinde; ortalama partikül çapı, polidispersiyon indeksi, zeta potansiyeli ve pH gibi kabul edilebilir sonuçlar göstermiştir. Ayrıca nanoenkapsüller gerçekleştirilen testlerde sitotoksite göstermemiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada, D₃ vitamini, fizikokimyasal stabilitesini ve kullanılabilirliğini geliştirmek için zein polimerik matrisinde nanoenkapsüle edilmiştir. Nanoenkapsüller, 200 nm'den küçük parçacık boyutu ile yüksek enkapsülasyon verimi göstermiştir. Zein nanoparçacıkları, gıda işleme ve gastrointestinal koşullara maruz kaldığında Vitamin D₃'ün vücutta kalma süresini uzatmak için umut verici bir yaklaşımdır (Noronha ve diğ., 2021). A vitamini içeren lipid nanoparçacıklarını geliştirmeyi amaçlayan bir diğer çalışmada, hazırlanan nanoenkapsüle formdaki A vitamini; oda sıcaklığında, sulu süspansiyonda bir aya kadar saklandığında ilk özelliklerini korumada ve 15 dakikalık süreler boyunca 70 °C'ye kadar ısıtılarda ve çeşitli gıda ürünleri koşullarını simüle eden farklı ortamlarda stabil kalmıştır. Gastrointestinal sindirimi simüle eden *in-vitro* deneyler, nanopartiküllerin midede değişmediğini göstermiştir (Resende ve diğ., 2020). Amiri ve diğ. (2019) yapmış oldukları çalışmada ise süt fosfolipidi, kolesterol ve fitosterol dozlarının farklı oranlarını (sırasıyla % 50-100, % 0-50 ve % 0-50) ve çeşitli sonikasyon sürelerinin (20, 25, 30, 35 ve 40 dk) C vitamini enkapsülasyonu amacıyla oluşturulacak yeni bir nanolipozom formülasyonu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, sonikasyon süresinin uzatılmasının ve fosfolipid/fitosterol oranındaki azalmanın nanolipozomların partikül boyutunu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Vitamin C'nin 20 gün süresince en yüksek stabilitesi fosfolipid/fitosterol 'ün 75-25 oranında elde edilmiştir. Ayrıca, kolesterolün fitosterol yerine kullanılması, nanolipozomlarda enkapsülasyon etkinliği ve C vitamini stabilitesi üzerinde olumlu bir etki göstermiştir.

6. Doğal Renklendiricilerin Nanoenkapsülasyonu

Pigmentler ve boyalar, ürünlerin renk ve görünümünün homojenliğini ve stabilitesini artırıcı olarak gıda endüstrisinde önemli bir rol oynamaktadır. Yiyeceklerin rengi, ürünün tazeliliği ve kalitesiyle ilişkili olduğundan, herhangi bir gıda maddesi satın alınırken en kritik unsurlardan biri olarak kabul edilir. Bir gıda ürününün renk özelliklerini geliştirmek için sentetik ve doğal renklendiriciler kullanılmaktadır. Endüstride en yaygın olarak kullanılan renklendiriciler, sudaki yüksek çözünürlükleri ve çoklu uyarılara karşı kimyasal stabiliteilerinin yüksek olması nedeniyle sentetik

renklendiricilerdir. Ancak, sentetik gıda renklendiricileri, uzun vadeli olumsuz sağlık etkilerine neden olabileceği gerekçesiyle tüketiciler tarafından tercih edilmemektedir. Bu nedenle, doğal renklendiriciler son zamanlarda dikkat çekmektedir (Rushikesh ve diğ., 2022). Doğal pigmentler, hayvan ve bitki dokularından elde edilen renklendirici maddelerdir. Bu pigmentler, bitkilere çeşitli özellikler kazandıran ikincil metabolitlerdir. Doğal pigmentler yenilenebilir kaynaklardır, kolayca bulunur ve toksik değildir. Ancak, düşük konsantrasyonlarda bulunma, yüksek maliyet, düşük biyoyararlılık, kullanım zorluğu gibi dezavantajlara da sahiptir. Ayrıca sıcaklık, ışık, oksijen, pH gibi etkilere karşı oldukça duyarlıdır. Doğal pigmentlerin stabilitesini korumak için gereken en önemli koşullar; ortamda oksijen ve ışığın olmaması ve daha düşük sıcaklık aralığıdır. Son zamanlarda, gıda endüstrisinde stabilizeyi sağlamak ve doğal pigmentlerin kullanımını artırmak için "nanoenkapsülasyon" yöntemi büyük ilgi görmektedir (Bahandari ve diğ., 2022). Meyveler ve sebzelerden ekstrakte edilen doğal pigmentler; sarı-turuncu renkleri gösteren karotenler ve ksantofiller olmak üzere iki alt kategoride sınıflandırılan karotenoidler, yeşil renkli klorofiller, kırmızı-mor renkli antosiyaninler ve kırmızı-sarı renkli betalainler dahil olmak üzere dört gruba ayrılırlar (Bahandari ve diğ., 2022; Rushikesh ve diğ., 2022).

Rosales ve diğ. (2021) yapmış oldukları çalışmada, kimyasal kararsızlık nedeniyle antosiyaninlerin teknolojik kullanımındaki sınırlamaların üstesinden gelmek için nanenkapsülasyon işlemini değerlendirmiştir. Bunun için, böğürtlenlerden (*Rubus spp.*) antosiyaninle zenginleştirilmiş ekstraktları, pektin ve lizozim ile kendiliğinden bir araya gelecek bağ oluşturma ("self-assembly") yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Nanoenkapsülasyon için kullanılan bu yöntem, gıdaların biyoaktif bileşimlerle zenginleştirilmesi ve gıda katkı maddelerinin geliştirilmesi için umut veren bir yöntemdir. Petit ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada ise, karotenoidler açısından zengin kırmızı dolmalık biber özütünün dört farklı kaplama malzemesi ile enkapsüle ederek etkili materyali bulmayı amaçlamışlardır. Çalışmada, kalsiyum kazeinat, sığır jelatini, peynir altı suyu proteinleri izolatu ve konsantresi kullanılmıştır. Nanoenkapsülasyon işlemi, su içinde yağ emülsiyonu oluşturma tekniği ve ardından dondurarak kurutma ile gerçekleştirilmiştir. Karotenoidlerin tüm formülasyonlarda başarılı bir şekilde enkapsüle edildiği bildirilmiştir. Nanoformülasyonlar sırasıyla %54,0, %57,6, %56,6, %64,0 karotenoid enkapsülasyon verimliliği göstermiştir. Hazırlanan tüm formülasyonlar heterojen bir dağılım profili sergilemiştir. Ayrıca 48 saat boyunca yoğun bir renk ve sedimantasyona karşı görece stabilize sunmuştur. Yapılan bir diğer çalışmada, gliserol ile zein matrisinde β -karotenin enkapsülasyonu amaçlanmıştır. β -Karoten, sırasıyla püskürtmeli kurutma ve elektrospreyleme teknikleri ile mikro ve nano boyutlarda farklı çekirdek-duvar oranları (1:10, 1:50 ve 1:100) ile enkapsüle edilmiştir. Sonuçlar, elektrospreyleme tekniği ile %81'e kadar enkapsülasyon verimliliği göstermiştir. Nanoenkapsüller, büyük yüzey alanı nedeniyle mikroenkapsüllere kıyasla daha iyi çözünme davranışı göstermiştir. Test edilen üç oran arasında, 1:50'deki nanoenkapsüller ile en iyi sonuç olan ~%73 enkapsülasyon verimliliği en iyi sonuç elde edilmiştir (Mahalakshmi ve diğ., 2020).

7. Biyoaktif Peptitlerin Nanoenkapsülasyonu

Biyoaktif peptitler, protein hidrolizi sonucunda elde edilen iki veya daha fazla amino asitten oluşan vücut fonksiyonlarına etki ederek sağlığa olumlu etkileri olan spesifik protein parçaları olarak tanımlanmaktadır. Biyoaktif peptitlerin biyolojik aktiviteleri, amino asit dizilimi ve kompozisyonuna dayandırılmaktadır (Korhonen ve Pihlanto, 2006). Biyoaktif

peptitlerin, protein hidrolizi süresince açığa çıkan hidrofobik amino asit kalıntıları nedeniyle oluşan bitter tadını maskelenmek; depolama stabiliteilerinin ve dokusal özelliklerinin iyileştirilmesi için higroskopik özelliğini azaltmak; *in-vitro* koşullarda biyoyararlılığı ve stabilitesini artırmak; sıcaklık, tuz konsantrasyonu, pH gibi proses koşullarına karşı dayanıklılığını artırmak gibi birçok sebeple enkapsülasyonu gerçekleştirilmektedir (Mohan ve diğ., 2015). Peptitlerin antioksidan (İbrahim ve diğ., 2018), antimikrobiyal, immunomodülatör (Bravo ve diğ., 2013), antikanserojen (Çakır ve Tunalı-Akbay, 2021), antihipertansif (Aydemir ve diğ., 2022) gibi çeşitli biyolojik aktiviteleri yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir.

Nanoenkapsülasyonun en önemli amaçlarından biri enkapsülasyon sonrasında ve depolama süresince peptitlerin biyoaktivitesini korumaktır (Akbarbaglu ve diğ., 2019). Mohammadi ve diğ. (2021)'nin yaptıkları çalışmada, kolesterol ve γ -orizanolün stabilizör olarak kullanıldığı bir sistemde, *Spirulina* hidrolizatları kitosanla kaplı nanolipozomla enkapsüle edilmiştir. Peptitle bağlı γ -orizanolün stabilizör olduğu lipozom yapısında, peptidin başlangıçtaki antioksidan kapasitesinin %90 oranında korunduğu belirlenmiştir. Başka bir çalışmada, taşıyıcı olarak sukroz, trehaloz ve mannitol kullanılarak hazırlanmış olan prolipozomlarla cevizden elde edilen peptitler enkapsüle edilmiştir. Peptit yüklü prolipozomlarda antioksidan kapasitesi başlangıca göre değişmemiştir. Bunun dışında, sindirim süresince prolipozomlar, enkapsüle olmayan peptitlere göre daha stabil bulunmuştur (Wang ve diğ., 2022). Biyoaktif peptitlerin depolama süresince çevre koşullarından etkilenmemesi beklenmektedir. Ancak; Sarabandi ve Jafari (2020) keten tohumundan elde edilen peptitlerin nanolipozom ile enkapsülasyonu sonrasında nanolipozomların enkapsülasyon etkinliği, stabilitesi ve fiziksel özelliklerinin donma-erime stresi ve depo sıcaklığından olumsuz biçimde etkilendiğini bildirmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise, koyun peynir altı suyu, proteinaz ile hidrolize edildiğinde antioksidan ve anjiyotensin dönüştürücü enzim I (ACE-I) inhibitörü özelliği göstermiş ve elde edilen peptitler fosfatidilkolin lipozomlarıyla enkapsüle edilmiştir. Elde edilen lipozom yapının 30 gün boyunca fizikokimyasal özelliklerinde değişim izlenmemiştir. Peptitlerin antioksidan ve ACE-1 inhibitör aktiviteleri bu süre boyunca stabil olarak kalmıştır (Corrêa ve diğ., 2019).

Nanolipozomlar antimikrobiyal özellikteki peptitlerin enkapsülasyonunda yaygın olarak kullanılan bir sistem olup, peptitlerin antimikrobiyal potansiyelini artırmaktadır. Yekta ve diğ. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, kinoadan elde edilen peptitler nanolipozomla enkapsüle edildikten sonra hamburgerde eklenmiş ve 12 gün buzdolabı sıcaklığında depolama sonrası hamburgerdeki değişimler incelenmiştir. Depolama süresince enkapsüle peptit içeren lipozomların eklendiği burgerlerde toplam bakteri yükü, *Staphylococcus aureus*, küf ve maya sayısının lipozom içermeyen örneklerle göre daha az arttığı gösterilmiştir. Peptitlerin gastrointestinal sistemdeki enzimlerle degradasyonu nedeniyle, sindirim sistemindeki biyoyararlılığı düşüktür. Katı lipit nanopartikülü; trigliserit, yağ asitleri, steroid ve vaks bileşenlerini içeren koloidal bir sistem olarak tanımlanmaktadır. Peptitlerin biyoyararlılığını artırabilmek için Su ve diğ. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada katı lipit nanopartikülü ile gastrointestinal sistemde peptitlerin taşınması incelenmiştir. Çalışmada yulaf globulininden elde edilen düşük ve yüksek moleküler ağırlıklı peptitler, poloksamer 188 ve gliseril monosterat kullanılarak hazırlanan katı lipit nanopartikülü ile enkapsüle edilmiştir. Enkapsüle edilen peptitlerin gastrointestinal sıvıdaki degradasyonu ve salım hızları farklı olmasına rağmen; her ikisi de ikincil hidroliz reaksiyonundan

korunarak, yüksek biyoaktivite hızı göstermişlerdir. Nanoemülsiyonlar bileşiklerin enkapsülasyonu amacıyla kullanıldıklarında, uzun süre stabiliteilerini koruyabilmeleri ve bileşiklerin biyoyararlılıklarını artırmaları sebebiyle güncel araştırmalara konu olmuştur (Bai ve diğ., 2016). *Spirulina* sp. LEB18'den ekstrakte edilen lipitlerin kullanımı ile hazırlanan nanoemülsiyona, aynı örnekten elde edilen peptitler eklenmiştir. Oluşan nanoemülsiyon yapısında antioksidan aktivitenin depolama süresince korunduğu ve *Spirulina*'dan elde edilen lipitlerin emülsiyona doğal yüzey aktif ajan olarak etki ettiği bildirilmiştir (Costa ve diğ., 2019).

8. Sonuç

Nanoenkapsülasyon işlemi, biyoaktif bileşikleri dış etkenlerden koruma, çözünürlük ve farklı ortam koşullarındaki stabiliteilerini iyileştirme ve biyoyararlılıklarını iyileştirme gibi avantajlar sunmaktadır. Enkapsüle edilecek biyoaktif bileşene ve uygulama alanına bağlı olarak, istenen özelliklerde nanoenkapsülasyon sistemlerinin geliştirilmesi için farklı yöntemler ve taşıyıcı malzemelerin kullanımı mümkündür. Antioksidanlar, çoklu doymamış yağ asitlerince zengin yağlar, esansiyel yağlar, vitaminler, doğal renklendiriciler ve biyoaktif peptitler gibi çeşitli gıda bileşenlerinin nanoenkapsülasyonuna yönelik güncel çalışmalar irdelendiğinde, enkapsülasyonda kullanılan metodun, çalışma parametrelerinin ve taşıyıcı malzemelerin elde edilen ürünün çözünürlük, stabilite, biyoyararlılık ve salım özellikleri gibi karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

9. Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

10. Kaynaklar

- Abbasi, F., Samadi, F., Jafari, S. M., Ramezanzpour, S. & Shargh, M. S. (2018). Ultrasound-assisted preparation of flaxseed oil nanoemulsions coated with alginate-whey protein for targeted delivery of Omega-3 fatty acids into the lower sections of gastrointestinal tract to enrich broiler meat. *Ultrasonics Sonochemistry*, 50, 208-217.
- Akbarbaglu, Z., Mahdi Jafari, S., Sarabandi, K., Mohammadi, M., Khakbaz Heshmati, M. & Pezeshki, A. (2019). Influence of spray drying encapsulation on the retention of antioxidant properties and microstructure of flaxseed protein hydrolysates. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 178, 421-429.
- Akçecek, A., Bozkurt, F., Akgül, C. & Karasu, S. (2021). Encapsulation of olive pomace extract in rocket seed gum and chia seed gum nanoparticles: Characterization, antioxidant activity and oxidative stability. *Foods*, 10, 1735.
- Almeida K. B, Ramos A.S. & Nunes J. B. B. (2019). PLGA nanoparticles optimized by Box-Behnken for efficient encapsulation of therapeutic Cymbopogon citratus essential oil. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 181, 935-42.
- Almeida, O. P., de Freitas Marques, M. B., de Oliveira, J. P., da Costa, J. M. G., Rodrigues, A. P., Yoshida, M. I., Mussel, W.N. & Carneiro, G. (2021). Encapsulation of safflower oil in nanostructured lipid carriers for food application. *Journal of Food Science and Technology*, 59, 805-814.

- Amiri, S., Rezazadeh-Bari, M. & Alizadeh-Khaledabad, M. (2019). New formulation of Vitamin C encapsulation by nanoliposomes: Production and evaluation of particle size, stability and control release. *Food Science and Biotechnology*, 28, 423-432.
- Araya-Sibaja, A. M., Wilhelm-Romero, K., Quirós-Fallas, M. I., Huertas, L. F. V., Vega-Baudrit, J. R. & Navarro-Hoyos, M. (2022). Bovine serum albumin-based nanoparticles: Preparation, characterization, and antioxidant activity enhancement of three main curcuminoids from *Curcuma longa*. *Molecules*, 27, 2758.
- Atay, E. & Altan, A. (2021). Nanoencapsulation of black seed oil by coaxial electrospraying: characterisation, oxidative stability and in vitro gastrointestinal digestion. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(9), 4526-4539.
- Attallah, O. A., Shetta, A., Elshishiny, F. & Mamdouh, W. (2020). Essential oil loaded pectin/chitosan nanoparticles preparation and optimization via Box–Behnken design against MCF-7 breast cancer cell lines. *RSC Advances*, 10(15), 8703-8708.
- Aydemir, L.Y., Diblan, S., Aktaş, H. & Cakitli, G. (2022). Changes in bioactive properties of dry bean extracts during enzymatic hydrolysis and in-vitro digestion steps. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5), 3682-3698.
- Azizkhani, M. & Sudanloo, A. (2020). Antioxidant activity of *Eryngium Campestre* L., *Froriepia Subpinnata*, and *Mentha Spicata* L. polyphenolic extracts nanocapsulated in chitosan and maltodextrin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2), e15120.
- Bai, L., Huan, S., Gu, J. & McClements, D. J. (2016). Fabrication of oil-in-water 377 nanoemulsions by dual-channel microfluidization using natural emulsifiers: Saponins, phospholipids, proteins, and polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 61, 703-711.
- Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D. & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils – A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46(2), 446-475.
- Baptista-Silva, S., Borges, S. & Ramos, O. L. (2020). The progress of essential oils as potential therapeutic agents: a review. *Journal of Essential Oil Research*, 32, 279-95.
- Bassolé, I. H. N. & Juliani, H. R. (2012). Essential oils in combination and their antimicrobial properties. *Molecules*, 7, 3989-4006.
- Berto, B. M., Garcia, R. K. A., Fernandes, G. D., Barrera-Arellano, D. & Pereira, G. G. (2020). Linseed oil: Characterization and study of its oxidative degradation, *Grasas y Aceites*, 71(1), 337.
- Bhandari, M., Sharma, R., Sharma, S., Bobade, H. & Singh, B. (2022). Recent advances in nanoencapsulation of natural pigments: Emerging technologies, stability, therapeutic properties and potential food applications. *Pigment & Resin Technology*, ISSN: 0369-9420.
- Bravo, R. K. D., Angelia, M., Uy, L., Garcia, R. & Torio, M. (2013). Isolation, purification and characterization of the antibacterial, antihypertensive and antioxidative properties of the bioactive peptides in the purified and proteolyzed major storage protein of pigeon pea (*Cajanus cajan*) seeds. *Diet, Immunity and Inflammation*, 232, 313-340.
- Carballo, D., Tolosa, J., Ferrer, E. & Berrada, H. (2019). Dietary exposure assessment to mycotoxins through total diet studies. A review. *Food and Chemical Toxicology*, 128, 8-20.
- Chatterjee, N. S., Dara, P. K., Raman, S. P., Vijayan, D. K., Sadasivam, J., Mathew, S., Ravishankara, C. N. & Anandan, R. (2021). Nanoencapsulation in low-molecular-weight chitosan improves in vivo antioxidant potential of black carrot anthocyanin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(12), 5264-5271.
- Chaudhari, A.K., Singh V.K., Das, S., Deepika & Dubey, N. K. (2022). Fabrication, characterization, and bioactivity assessment of chitosan nanoemulsion containing all spice essential oil to mitigate *Aspergillus flavus* contamination and aflatoxin B1 production in maize. *Food Chemistry*, 372, 131221.
- Chen, X., Long, Q., Zhu, L., Lu, L.-X., Sun, L.-N., Pan, L. & Yao, W.-R. (2019). A double-switch temperature-sensitive controlled release antioxidant film embedded with lyophilized nanoliposomes encapsulating rosemary essential oils for solid food. *Materials*, 12(23), 4011.
- Corrêa, A. P. F., Bertolini, D., Lopes, N. A., Veras, F. F., Gregory, G. & Brandelli, A. (2019). Characterization of nanoliposomes containing bioactive peptides obtained from sheep whey hydrolysates. *LWT*, 101, 107-112.
- Costa, A. M., Lütkemeyer Bueno, K. T., Centeno da Rosa, A. P. & Vieira Costa, J. A. (2019). The antioxidant activity of nanoemulsions based on lipids and peptides from *Spirulina* sp. LEB18. *LWT*, 99, 173-178.
- Çakır, B. & Tunalı-Akbay, T. (2021). Potential anticarcinogenic effect of goat milk-derived bioactive peptides on HCT-116 human colorectal carcinoma cell line. *Analytical Biochemistry*, 622, 114166.
- Çakmakçı, S. & Tahmas-Kahyaoğlu, D. (2012). Yağ asitlerinin sağlık ve beslenme üzerine etkilerine genel bir bakış. *Akademik Gıda*, 10(1), 103-113.
- Das, S., Singh, V. K., Dwivedy, A. K., Chaudhari, A. K., Upadhyay, N., Singh, A., Deepika. & Dubey, N. K. (2019). Fabrication, characterization and practical efficacy of *Myristica fragrans* essential oil nanoemulsion delivery system against postharvest biodeterioration. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 110000.
- Deepika, Chaudhari, A. K., Singh, A., Das, S. & Dubey, N. K. (2021). Nanoencapsulated *Petroselinum crispum* essential oil: Characterization and practical efficacy against fungal and aflatoxin contamination of stored chia seeds. *Food Bioscience*, 42, 101117.
- Devaraju, R., Pushpadass, R. D., Emerald, H. A., Padaki, F. M. E. & Nath, B. S. (2021). Nanoencapsulation of casein-derived peptides within electrospun nanofibres. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(4), 1684-1698.

- Dias, S., Castanheira, E. M. S., Fortes, A. S., Pereira, D. M. & Gonçalves, M. S. T. (2020). Natural pigments of anthocyanin and betalain for coloring soy-based yogurt alternative. *Foods*, 9(6), 771.
- Estakhr, P., Tavakoli, J., Beigmohammadi, F., Alaei, S. & Khaneghah, A. M. (2020). Incorporation of the nanoencapsulated polyphenolic extract of *Ferula Persica* into soybean oil: Assessment of oil oxidative stability. *Food Science & Nutrition*, 8(6), 2817-2826.
- Faridi Estanjani, A., Assadpour, E. & Jafari, S. M. (2018). Improving the bioavailability of phenolic compounds by loading them within lipid-based nanocarriers. *Trends in Food Science and Technology*, 76, 56-66.
- Feridoni, S. B. & Shurmasti, D. K. (2020). Effect of the nanoencapsulated sour tea (*Hibiscus Sabdariffa* L.) extract with carboxymethylcellulose on quality and shelf life of chicken nugget. *Food Science & Nutrition*, 8(7), 3704-3715.
- Fonseca, E. S. P., Filho, W. P. S., Vaucher, R. A., Souza, D., Sagrillo, M. R. & Fernandes, L. S. (2022). Microalgae oil and vitamin E: from nanostructuring to safety profile. *Disciplinarum Scientia*, 23(2), 19-38.
- Food and Drug Administration. (2022). CFR – Code of Federal Regulations Title 21. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/cfrsearch.cfm?fr=182.20>
- Franco, J. G., Cefali, L. C., Ataide, J. A., Santini, A., Souto, E. B. & Mazzola, P. G. (2021). Effect of nanoencapsulation of blueberry (*Vaccinium myrtillus*): A green source of flavonoids with antioxidant and photoprotective properties. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 23, 100515.
- Gani, A., Ashraf, Z. U., Shah, A., Noor, N. & Gani, A. (2021). Encapsulation of Vitamin D3 into β -glucan matrix using the supercritical carbon dioxide. *ACS Food Science & Technology*, 1(10), 1880-1887.
- Ghodrati, M., Farahpour, M. R. & Hamishehkar, H. (2019). Encapsulation of peppermint essential oil in nanostructured lipid carriers: in-vitro antibacterial activity and accelerative effect on infected wound healing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 564, 161-69.
- Gómez-Sequeda, N., Ruiz, J., Ortiz, C., Urquiza, M. & Torres, R. (2020). Potent and specific antibacterial activity against *Escherichia coli* O157:H7 and methicillin resistant *Staphylococcus aureus* of G17 and G19 peptides encapsulated into poly-lactic-co-glycolic acid (PLGA) nanoparticles. *Antibiotics*, 9(7), 1-14.
- González Cruz, E. M., Andrade-González, I., Prieto, C., Lagarón, J. M., Calderón-Santoyo, M. & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Nanoencapsulation of polyphenolic-rich extract from biloxi blueberries (*Vaccinium Corymbosum* L.) by electrospraying using zein as encapsulating material. *Bionterface Research in Applied Chemistry*, 13(1), 78.
- Guaadaoui, A., Benaicha, S., Elmajdoub, N., Bellaoui, M. & Hamal, A. (2014). What is a bioactive compound? A combined definition for a preliminary consensus. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 3(3), 174-179.
- Guerrero León, B., Corbino, G., Dufresne, A., Errea, M. I., D'Accorso, N. & Garcia, N. L. (2021). Arapey sweet potato peel waste as renewable source of antioxidant: Extraction, nanoencapsulation and nanoadditive potential in films. *Journal of Polymer Research*, 28, 8.
- Gulzar, S. & Benjakul, S. (2019). Characteristics and storage stability of nanoliposomes loaded with shrimp oil as affected by ultrasonication and microfluidization. *Food Chemistry*, 310, 125916.
- Hadidi, M., Rostamabadi, H., Moreno, A. & Jafari, S. M. (2022). Nanoencapsulation of essential oils from industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) by-products into alfalfa protein nanoparticles. *Food Chemistry*, 386, 132765.
- Hashem, G., Ahmed, G., González, A. F. & García, M. E. D. (2020). Nano-encapsulation of grape and apple pomace phenolic extract in chitosan and soy protein via nanoemulsification. *Food Hydrocolloids*, 108, 105806.
- Heydari Gharehcheshmeh, M., Arianfar, A., Mahdian, E. & Naji-Tabasi, S. (2020). Production and evaluation of sweet almond and sesame oil nanoemulsion and their effects on physico-chemical, rheological and microbial characteristics of enriched yoğurt. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 1270-1280.
- Homayonpour, P., Jalali, H., Shariatifar, N. & Amanlou, M. (2021). Effects of nano-chitosan coatings incorporating with free /nano-encapsulated cumin (*Cuminum cyminum* L.) essential oil on quality characteristics of sardine fillet. *International Journal of Food Microbiology*, 341, 109047.
- Horky, P., Skalickova, S., Smerkova, K. & Skladanka, J. (2019). Essential oils as a feed additives: pharmacokinetics and potential toxicity in monogastric animals. *Animals*, 9(6), 352.
- Hyltdgaard, M., Mygind, T. & Meyer, R. L. (2012). Essential oils in food preservation: Mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Frontiers in Microbiology*, 3(12), 1-24.
- Ibrahim, H. R., Isono, H. & Miyata, T. (2018). Potential antioxidant bioactive peptides from camel milk proteins. *Animal Nutrition*, 4(3), 273-280.
- Jafari, S. M. (2017). An overview of nanoencapsulation techniques and their classification. *Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries*, Edited by Seid Mahdi Jafari, Academic Press, 1-34.
- Jafari, S. Z., Jafarian, S., Hojjati, M. & Najafian, L. (2022). Evaluation of antioxidant activity of nano- and microencapsulated rosemary (*Rosmarinus Officinalis* L.) leaves extract in cress (*Lepidium Sativum*) and basil (*Ocimum Basilicum*) seed gums for enhancing oxidative stability of sunflower oil. *Food Science & Nutrition*, 10(6), 2111-2119.
- Kaur, N., Chugh, V. & Gupta, A. K. (2014). Essential fatty acids as functional components of foods-a review. *Journal of Food Science & Technology*, 51(10), 2289-2303.

- Kaur, P., Elsayed, A., Subramanian, J. & Singh, A. (2020). Encapsulation of carotenoids with sucrose by co-crystallization: physicochemical properties, characterization and thermal stability of pigments. *LWT*, 140(7), 110810.
- Koç, M., Sakin, M. & Kaymak-Ertekin, F. (2010). Mikroenkapsülasyon ve Gıda Teknolojisinde Kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 77-86.
- Korhonen, H. & Pihlanto, A. (2006). Bioactive peptides: Production and functionality. *International Dairy Journal*, 16(9), 945-960.
- Kutlu, N., Meral, R., Ekin, M. M., Kose, Y. E. & Ceylan, Z. (2022). A new application for the valorisation of pomegranate seed oil: nanoencapsulation of pomegranate seed oil into electrospun nanomats for food preservation. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(2), 1074-1082.
- Kuznetcova, D. V., Linder, M., Jeandel, C., Paris, C., Desor, F., Baranenko, D. A. & Yen, F. T. (2020). Nanoliposomes and nanoemulsions based on chia seed lipids: Preparation and characterization. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(23), 9079.
- Latorres, J. M., Aquino, S., Rocha, M., Wasielesky, W., Martins, V. G. & Prentice, C. (2021). Nanoencapsulation of white shrimp peptides in liposomes: Characterization, stability, and influence on bioactive properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(7), 15 7627-7650.
- Mahalakshmi, L., Leena, M. M. & Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2020). Micro- and nano-encapsulation of β -carotene in zein protein: Size-dependent release and absorption behavior. *Food & Function*, 11, 1647-1660.
- Maqsoodlou, A., Assadpour, E., Mohebodini, H. & Jafari, S. M. (2020). The influence of nanodelivery systems on the antioxidant activity of natural bioactive compounds. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(1), 1-24.
- Matshetshe, K. I., Parani, S., Manki, S. M. & Oluwafemi, O. S. (2018). Preparation, characterization and in vitro release study of β -cyclodextrin/chitosan nanoparticles loaded Cinnamomum zeylanicum essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 676-682.
- McClements, D. J. & Rao, J. (2011). Food-grade nanoemulsions: Formulation, fabrication, properties, performance, biological fate, and potential toxicity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(4), 285-330.
- McClements, D. J., Öztürk, B., Rodríguez-Alcalá, M., Pimentel, L. & Vidigal, S. (2021). Utilization of nanotechnology to improve the handling, storage and biocompatibility of bioactive lipids in food applications. *Foods*, 10, 365.
- Melo, A. P. Z., Rosa, C. G., Noronha, C. M., Machado, M. H., Sganzerla, W. G., Cunha Bellinati, N. V., Nunes, M. R., Verruck, S., Prudencio, E. S. & Barreto, P. L. M. (2021). Nanoencapsulation of Vitamin D3 and fortification in an experimental jelly model of *Acca sellowiana*: Bioaccessibility in a simulated gastrointestinal system. *Food Science and Technology*, 145, 111287.
- Mirzaei-Mohkama, A., Garavand, F., Dehnadd, D., Keramata, J. & Nasirpour, A. (2020). Physical, Mechanical, Thermal and Structural Characteristics of nanoencapsulated Vitamin E loaded carboxymethyl cellulose films. *Progress in Organic Coatings*, 138, 105383.
- Moghadam, F. V., Pourahmad, R., Mortazavi, A., Davoodi, D. & Azizinezhad, R. (2019). Use of fish oil nanoencapsulated with gum arabic carrier in low fat probiotic fermented milk. *Food Science of Animal Resources*, 39(2), 309-323.
- Mohammadi, B., Shekaari, H. & Zafarani-Moattar, M. T. (2018). Synthesis of nanoencapsulated Vitamin E in phase change material (PCM) shell as thermo-sensitive drug delivery purpose. *Journal of Molecular Liquids*, 320, 114429.
- Mohammadi, M., Hamishehkar, H., Ghorbani, M., Shahvalizadeh, R., Pateiro, M. & Lorenzo, J. M. (2021). Engineering of liposome structure to enhance physicochemical properties of *Spirulina plantensis* protein hydrolysate: Stability during spray-drying. *Antioxidants*, 10(12), 1953.
- Mohan, A., Rajendran, S. R. C. K., He, Q. S., Bazinet, L. & Udenigwe, C. C. (2015). Encapsulation of food protein hydrolysates and peptides: A review. *RSC Advances*, 5(97), 79270-79278.
- Mozaffarian, D., Micha, R. & Wallace, S. (2010). Effects on coronary heart disease of increasing polyunsaturated fat in place of saturated fat: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *PLOS Medicine*, 7(3), 1000252.
- Nahr, F. K., Ghanbarzadeh, B., Hamishehkar, H., Kafil, H. S., Hoseini, M. & Moghadam, B. E. (2019). Investigation of physicochemical properties of essential oil loaded nanoliposome for enrichment purposes. *LWT*, 105, 282-289.
- Nishimoto-Sauceda, D., Romero-Roblesa, L. E. & Antunes-Ricardob, E. (2021). Biopolymer Nanoparticles: a strategy to enhance stability, bioavailability, and biological effects of phenolic compounds as functional ingredients. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102, 41-52.
- Noori, S., Zeynali, F. & Almasi, H. (2018). Antimicrobial and antioxidant efficiency of nanoemulsion-based edible coating containing ginger (*Zingiber officinale*) essential oil and its effect on safety and quality attributes of chicken breast fillets. *Food Control*, 84, 312-320.
- Ordoñez Lozada, M. I., Rodrigues Maldonado, I., Bobrowski Rodrigues, D., Silva Santos, D., Ortega Sanchez, B. A., Narcizo de Souza, P. E. & de Lacerda de Oliveira, L. (2021). Physicochemical characterization and nano-emulsification of three species of pumpkin seed oils with focus on their physical stability. *Food Chemistry*, 343, 128512.
- Pateiro, M., Gómez, B., Munekata, P. E. S., Barba, F. J., Putnik, P., Kovačević, D. B. & Lorenzo, J. M. (2021). Nanoencapsulation of promising bioactive compounds to improve their absorption, stability, functionality and the appearance of the final food products. *Molecules*, 26(6), 154.
- Petito, N. L., Devens, J. M., Falcao, D. Q., Dantas, F. M. L., Passos, T. S. & Araujo, K. G. L. (2022). Nanoencapsulation of red bell pepper carotenoids: Comparison of encapsulating agents in an emulsion based system. *Colorants*, 1(2), 132-148.

- Prajapati, R. A. & Jadeja, G. C. (2022). Natural food colorants: Extraction and stability study. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2381-2395.
- Rahmani-Manglano, N. E., Tirado-Delgado, M., Garcia-Moreno, P. J., Guadix, A. & Guadix, E. M. (2022). Influence of emulsifier type and encapsulating agent on the in vitro digestion of fish oil-loaded microcapsules produced by spray-drying. *Food Chemistry*, 392, 133257.
- Rahnemoon, P., Sarabi-Jamab, M., Bostan, A. & Mansouri, E. (2021). Nano-encapsulation of pomegranate (*Punica granatum* L.) peel extract and evaluation of its antimicrobial properties on coated chicken meat. *Food Bioscience*, 43, 101331.
- Ramalho, M. J., Loureiro, J. A. & Pereira, M. C. (2021). Poly(lactic-co-glycolic acid) nanoparticles for the encapsulation and gastrointestinal release of Vitamin B9 and Vitamin B12. *ACS Applied Nano Materials*, 4(7), 6881-6892.
- Ravi Kumar, M. N. (2000). Nano and microparticles as controlled drug delivery devices. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, 3, 234-258.
- Resende, D., Lima, S. A. C. & Reis, S. (2020). Nanoencapsulation approaches for oral delivery of Vitamin A. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 193, 111121.
- Ribeiro, C. D. F., Schappo, F. B., Sales, I. D., Assuncao, L. S., Otero, D. M., Magalhaes-Guedes, K. T., Machado, B. A. S., Block, J. M., Druzian, J. I. & Nunes, I. L. (2022). Novel bioactive nanoparticles from crude palm oil and its fractions as foodstuff ingredients. *Food Chemistry*, 373, 131252.
- Rosales, T. K. O., Silva, M. P., Lourenço, F. R., Hassimotto, N. M. A. & Fabi, J. P. (2021). Nanoencapsulation of anthocyanins from blackberry (*Rubus* Spp.) through pectin and lysozyme self-assembling. *Food Hydrocolloids*, 114, 106563.
- Royshampur, F., Tavakoli, J., Beigmohammadi, F. & Alaei, S. (2020). Improving antioxidant effect of phenolic extract of *Mentha piperita* using nanoencapsulation process. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 23-32.
- Ruengdech, A. & Siripatrawan, U. (2021). Application of catechin nanoencapsulation with enhanced antioxidant activity in high pressure processed catechin-fortified coconut milk. *Food Science and Technology*, 140, 110594.
- Salaha, M., Mansoura, M., Zogonaa, D. & Xu, X. (2020). Nanoencapsulation of anthocyanins-loaded β -lactoglobulin nanoparticles: Characterization, stability, and bioavailability in vitro. *Food Research International*, 137, 109635.
- Sarabandi, K. & Jafari, S. M. (2020). Fractionation of flaxseed-derived bioactive peptides and their influence on nanoliposomal carriers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (51), 15097-15106.
- Sarabandi, K., Rafiee, Z., Khodaei, D. & Jafari, S. M. (2019). Encapsulation of food ingredients by nanoliposomes. *Lipid-Based Nanostructures for Food Encapsulation Purposes*, Edited by Seid Mahdi Jafari, Academic Press, 2, 347-404.
- Sarvinehbaghi, M. B., Ahmadi, M., Shiran, M. & Azizkhani, M. (2021). Antioxidant and antimicrobial activity of red onion (*Allium Cepa*, L.) extract nanoencapsulated in native seed gums coating and its effect on shelf-life extension of beef fillet. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(2), 4771-4780.
- Sharifan, M. B., Ahmadi, M., Shiran, M. & Azizkhani, M. (2021). The efficacy of dairy products fortified with nano-encapsulated Vitamin D3 on physical and mental aspects of the health in obese subjects; the protocol of The SUVINA trial. *Translational Metabolic Syndrome Research*, 4, 1-9.
- Shetta, A., Kegere, J. & Mamdouh, W. (2018). Comparative study of encapsulated peppermint and green tea essential oils in chitosan nanoparticles: Encapsulation, thermal stability, in-vitro release, antioxidant and antibacterial activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 731-742.
- Shi, Z., Jiang, Y., Sun, Y., Min, D., Li, F., Li, X. & Zhang, X. (2021). Nanocapsules of oregano essential oil preparation and characterization and its fungistasis on apricot fruit during shelf life. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(7), e15649.
- Solghi, S., Emam-Djomeh, Z., Fathi, M. & Farahani, F. (2020). The encapsulation of curcumin by whey protein: Assessment of the stability and bioactivity. *Journal of Food Process Engineering*, e13403.
- Stefani, F. S., de Campo, C., Paese, K., Guterres, S. S., Costa, T. M. H. & Flores, S. H. (2018). Nanoencapsulation of linseed oil with chia mucilage as structuring material: Characterization, stability and enrichment of orange juice. *Food Research International*, 120, 872-879.
- Su, L., Zhou, F., Yu, M., Ge, R., He, J., Zhang, B., Zhang, Y. & Fan, J. (2020). Solid lipid nanoparticles enhance the resistance of oat-derived peptides that inhibit dipeptidyl peptidase IV in simulated gastrointestinal fluids. *Journal of Functional Foods*, 65, 103773.
- Tabarestani, H. S. & Jafari, S. M. (2019). Production of food bioactive-loaded nanofibers by electrospinning. *Nanoencapsulation of Food Ingredients by Specialized Equipment*. Edited by Seid Mahdi Jafari, Elsevier Academic Press, 3, 31-105.
- Tontul, I., Eroglu, E. & Topuz, A. (2017). Nanoencapsulation of fish oil and essential fatty acids. *Nanoencapsulation of food bioactive ingredients*, Edited by Seid Mahdi Jafari, Academic Press, 103-144.
- Vafania, B., Fathi, M. & Soleimanian-Zad, S. (2019). Nanoencapsulation of thyme essential oil in chitosan-gelatin nanofibers by nozzle-less electrospinning and their application to reduce nitrite in sausages. *Food and Bioproducts Processing*, 116, 240-248.
- Wan, J., Jin, Z., Zhong, S., Schwarz, P., Chen, B. & Rao, J. (2020). Clove oil-in-water nanoemulsion: Mitigates growth of *Fusarium graminearum* and trichothecene mycotoxin production during the malting of *Fusarium* infected barley. *Food Chemistry*, 312, 126120.

- Wang, F., Pu, C., Liu, M., Li, R., Sun, Y., Tang, W., Quingjin, S. ve Tian, Q. (2022). Fabrication and characterization of walnut peptides-loaded proliposomes with three lyoprotectants: Environmental stabilities and antioxidant/antibacterial activities. *Food Chemistry*, 366, 130643.
- Yao, L., Xu, J., Zhang, L., Liu, L. & Zhang, L. (2021). Nanoencapsulation of anthocyanin by an amphiphilic peptide for stability enhancement. *Food Hydrocolloids*, 118, 106741.
- Yekta, M. M., Rezaei, M., Nouri, L., Azizi, M. H., Jabbari, M. E. & Khaneghah, A. M. (2020). Antimicrobial and antioxidant properties of burgers with quinoa peptide-loaded nanoliposomes. *Journal of Food Safety*, 40, 12753.

Spirulina platensis ve *Phaeodactylum tricornutum*'un Biyoaktif Bileşikleri, Sağlık Üzerine Etkileri ve Gıda Endüstrisinde Kullanım Alanları

Türkan UZLAŞIR¹, Serkan SELLİ², Haşim KELEBEK¹

¹ Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, 01250 Adana/Türkiye

² Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, 01330 Adana/Türkiye

Özet: Nüfus artışı, yetersiz ve dengesiz beslenme, sağlık problemlerinin artması insanları mevcut kaynakları kullanmaya ve alışılmadık yeni ve alternatif gıda kaynaklarından yararlanmaya sevk etmiştir. Mikroalgler, okyanuslarda, göllerde ve tatlı sularda doğal olarak büyümeleri ve beslenme için gerekli olan proteinleri, esansiyel amino asitleri, karbonhidratları, lipidleri, vitaminleri ve mineral maddeleri içermesi nedeniyle uzun yıllardır dünyanın birçok yerinde insanlar için geçim kaynaklarından ve temel besinlerden biri olmuştur. Tek hücreli, filamentli, prokaryotik bir mikroalg olan *Spirulina platensis*, eski zamanlardan beri kullanılan önemli bir doğal besin kaynağıdır. *Phaeodactylum tricornutum* ise, tatlı su türü olmasına rağmen denizel ortamda da yaşayan Pennateae grubuna ait tek hücreli ökaryotik bir diatom türüdür. *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum* zengin biyoaktif bileşikler (karotenoidler ve fenolik asitler) içermesinden dolayı son zamanlarda dikkat çekmektedir. İçerdiği biyoaktif bileşikler nedeniyle antikanser, antioksidan, antiinflamatuvar, nöroprotektif, hepatoprotektif, hipokolesterolemik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bu derlemede, *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum* tarafından üretilen biyoaktif bileşikler, sağlık üzerine etkileri ve bunların gıda endüstrisinde kullanım potansiyelleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Spirulina platensis*, *Phaeodactylum tricornutum*, biyoaktif bileşikler, sağlık, gıda.

Bioactive Compounds of *Spirulina platensis* and *Phaeodactylum tricornutum*, Effects on Health and Uses in the Food Industry

Abstract: Population growth, inadequate and unbalanced nutrition, and increased health problems have led people to use existing resources and to benefit from unusual new and alternative food sources. Microalgae have been one of the main sources of food and livelihood for humans in many parts of the world for many years since they contain proteins, essential amino acids, carbohydrates, lipids, vitamins, and minerals necessary for their nutrition and growing naturally in oceans, lakes, and fresh waters. *Spirulina platensis*, a single-celled, filamentous, prokaryotic microalgae, is an incredible natural food source that has been used since ancient times. *Phaeodactylum tricornutum* is a single-celled eukaryotic diatom species belonging to the Pennateae group, which also lives in the marine environment although it is a freshwater species. *Spirulina platensis* and *Phaeodactylum tricornutum* have recently attracted attention due to their rich bioactive compounds (carotenoids and phenolic acids). It is known to have anticancer, antioxidant, anti-inflammatory, neuroprotective, hepatoprotective, and hypocholesterolemic properties due to its bioactive compounds. In this review, the bioactive compounds produced by *Spirulina platensis* and *Phaeodactylum tricornutum*, their effects on health, and their potential for use in the food industry were investigated.

Keywords: *Spirulina platensis*, *Phaeodactylum tricornutum*, bioactive compounds, health, food.

Derleme

Yazışma yazarı: Haşim KELEBEK E-mail: hkelebek@atu.edu.tr

Referans: Uzlaşır, T., Selli, S. & Kelebek, H. (2023). *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum*'un Biyoaktif Bileşikleri, Sağlık Üzerine Etkileri ve Gıda Endüstrisinde Kullanım Alanları. *ITU Journal of Food Science and Technology*, 1(1) 15-26.

Makale Gönderimi: 28 Mart 2023

Online Kabul: 15 Mayıs 2023

Online Basım: 30 Eylül 2023

1. Giriş

İnsanlığın başlangıcından günümüze kadar yetersiz beslenme ve açlık sorunu önemini korumaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki insanların çoğu, obezite, kalp hastalığı ve diyabet gibi sağlık sorunlarına neden olan yüksek kalorili yiyecekler tüketmektedir. Alternatif gıda kaynağı olarak tüketilebilen algler, değişik morfolojilerde gözlenebilen (ipliksi mikroskobik formlar veya birkaç metre boyunda bitkiler), genellikle tatlı su gölleri, okyanuslar, nehirler, dereler, çaylar, kutup gölleri, su birikintileri gibi habitatlarda yaşayan, basit yapılı, fotosentetik, selülozik hücre çeperine sahip, ototrof ve çoğunlukla ökaryotik canlılardır (Pereira ve Magalhaes, 2014). Mikroalglerin, Çad gölü etrafında yaşayan yerliler ve Meksikalılar tarafından bin yılı aşkın süredir halk hekimliğinde birçok hastalığın tedavisinde kullanıldığı ve yiyecek olarak tüketildiği belgelenmiştir (Fox, 1996). Günümüzde, Kaliforniya, ABD, Tayland, Tayvan, İsrail, Meksika ve Çin'de hücreli mikroalglerin, polisakkaritler, lipitler, pigmentler, proteinler, vitaminler, biyoaktif bileşikler ve antioksidanlar da dahil olmak üzere çok çeşitli biyoürünler üretebilmesi nedeniyle gıda sektöründe değerlendirilmesi ve ticari üretimi yapılmaktadır (Richmond, 2004).

Siyanobakteriler, (mavi-yeşil algler), basit yapılı fotosentetik organizmalardır ve tatlı, tuzlu ve atık sularda geniş yayılım gösterebilmektedir. Mikroalgler, doğada biyolojik aktivitesi en yüksek kaynaklardan biri olarak görülmekte ve yapılarında çok sayıda biyoaktif bileşik bulunmaktadır (Beheshtipour ve diğ., 2012, Alajil Alslibi 2019). Sıcak bölgelerdeki göllerin alkali sularında doğal olarak yetişen, yaklaşık 0.1 mm çapında tek hücreli, filamentli, prokaryotik bir mikroalg olan *Spirulina platensis*, eski zamanlardan beri kullanılan inanılmaz bir doğal besin kaynağıdır. Son yıllarda ise yüksek mikro ve makro besin içeriği nedeniyle araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Çekirdek, mitokondri, endoplazmik retikulum, golgi cisimciği ve kofullarının olmaması nedeniyle prokaryotik olarak tanımlanmakta ve hücre çeperinde peptidoglikan bulundurması nedeniyle bakterilere benzetilmektedir (Richmond, 1986).

Phaeodactylum tricornutum ise, tatlı su türü olmasına rağmen denizel ortamda da yaşayan Pennateae grubuna ait tek hücreli ökaryotik bir diatom türüdür. Genomunun dizilenmiş olması ve kültürleme kolaylığı nedeniyle genellikle model organizma olarak kullanılmaktadır (De Martino ve diğ., 2011). Mikroalgler sağlıklı bir diyet için yeterince araştırılmamış doğal bir kaynaktır ve beslenme için gerekli olan proteinleri, karbonhidratları, lipidleri, esansiyel amino asitleri, vitamin ve mineral maddeleri içermektedirler. Mikroalgler bol miktarda Na, K, Ca, P, Mg, S, Fe gibi mineral maddeleri içermekte (Mazo ve diğ., 2004) ve β -karoten, klorofil a, b ve c, fikosiyenin, astaksantin, fikoeritrosin, ksantofil ve fukoksantin gibi önemli pigmentler üretmektedirler (Begum ve diğ., 2016). Bu derlemede, *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum*'un karbonhidrat, protein, lipit, mineral, vitamin ve pigmentler gibi biyokimyasal kompozisyonu, biyoaktif bileşikleri, sağlık üzerine etkileri ve gıda sanayinde kullanım potansiyelleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2. *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum*'un biyokimyasal kompozisyonu

Spirulina platensis ve *Phaeodactylum tricornutum* yüksek mikro ve makro besin içeriği (karbonhidrat, protein, lipid, mineral ve vitamin) nedeniyle araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Proteinler, biyosentez ve hücre bölünmesi ile

ilişkilendirilirken, karbonhidratlar ve lipidler esas olarak hücre içi karbon ve enerji rezervuarları olarak göre almaktadır (Dean ve diğ., 2008). Tablo 1'de *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum*'un biyokimyasal kompozisyonu verilmiştir.

2.1 Karbonhidratlar

Spirulina platensis'in yaklaşık %15-20'si karbonhidrat olup, glikoz, fruktoz, sükröz, gliserol, mannitol ve sorbitol içermektedir. Yapılan son çalışmalarda, *Spirulina platensis*'te yeni bir sülfatlanmış polisakkarit olan kalsiyum spirulanın (Ca-SP) bulunduğu da belirtilmektedir (Pyne ve diğ., 2017). Ca-SP'nin, riboz, rhamnoz, fruktoz, mannoz, ksiloz, galaktoz, glukuronik asit, glukoz, galakturonik asit ve kalsiyum sülfattan oluştuğu ve herpes simpleks virüsü, human sitomegalovirüsü, HIV, kabakulak virüsü, grip A virüsü ve kızamık virüsüne karşı etkili olduğu bildirilmiştir (Saranraj ve Sivasakthi, 2014). *Spirulina platensis*, sert ve selüloz içermeyen, %86'sı sindirilebilir polisakkaritlerden meydana gelen hücre duvarına sahip olduğundan insanlar tarafından sindirimi kolaydır (Li ve Qin, 2009).

Phaeodactylum tricornutum'un yapısında bulunan karbonhidratların ana bileşenlerinin (yaklaşık %30-40) ise, iyonik, ozmotik ve mekanik işlevlerde yer alan polisakkaritler olduğu belirtilmiştir (Guil-Guerrero ve diğ., 2004). Hücre duvarı organik moleküllerden, özellikle de sülfatlanmış glukuronomannandan oluşur ve silika miktarı oldukça düşüktür. Polisakarit omurgası, sülfat ester grubu ile donatılmış bir mannan zincirinden oluşmaktadır. Tüm glikozidik bağlantıların konfigürasyonu açıklığa kavuşturulamamıştır, ancak optik rotasyon ölçümü polisakaridin esas olarak α -bağlı kalıntılar içerdiğini düşündürmektedir (Ford ve Percival, 1965a; Ford ve Percival, 1965b; Le Costauoc ve diğ., 2017). Mikroalglerden izole edilen agar, karagenanlar ve aljinatlar gibi polisakkaritlerin kolay ekstrakte edilebilir ve fonksiyonel gıdalarda potansiyel biyoaktif bileşenler olmasının yanı sıra ve gıda, ilaç, kozmetik, kağıt ve tekstil endüstrilerinde stabilizatör, emülsifiye edici ve jelleştirici ajan olarak kullanılmaktadır (Laurienzo 2010).

2.2 Proteinler

Spirulina platensis diğer bitki kaynaklı proteinlerin aksine, esansiyel (lösin, valin, izölösin, triptofan, metiyonin, fenilalanin, teanin ve lizin) ve esansiyel olmayan amino asitlerin (glisin, prolin, arjinin, sistein, tirozin, glutamin, alanin, serin, glutamat, aspartat) tamamını içeren dengeli bir protein yapısına sahip olup yaklaşık olarak %55-70 oranında protein içermektedir (Saranraj ve Sivasakthi 2014; Colla ve diğ., 2007; FAO, 2008).

Phaeodactylum tricornutum 'un en ilginç özelliklerinden biri, farklı hücre duvarı yapılarına ve düşük silika içeriğine sahip, fusiform, oval, triradiat ve haç biçiminde olmak üzere en az dört farklı morfolojik formda meydana gelme kabiliyetine sahiptir (Borowitzka ve Volcani, 1978; Borowitzka ve diğ., 1977; He ve diğ., 2014). Fusiform, oval, triradiat form yaygındır, haç biçimli hücreler nadirdir ve düzensiz olarak kabul edilir (He ve diğ., 2014). Oval hücrelerin en dışta bir hücre dışı polimer ve pürüzlü yüzey tabakasına sahip olduğu gözlemlenmiş ve silikon içeren tek morfolojik olduğu tespit

edilmiştir. Fusiform morflar ise uzatılmış iğ şekline ve hücre içi vakuollere sahiptirler (Chen ve diğ., 2014). Bir morfotipten diğerine dönüşüm, kültür koşullarındaki sıcaklık, tuzluluk ve ortam durumu gibi faktörlerden etkilenmektedir (Bartual ve diğ., 2011; De Martino ve diğ., 2011). Fusiform ve triradiate formlar yalnızca doğal ortamdan izole edilirken, oval form ise hücre kültüründe bulunmuştur (Borowitzka ve Volcani 1978). *Phaeodactylum tricornutum* yaklaşık %37 protein içermektedir. Protein içeriği morfotiplere göre değişiklik göstermekte ve en yüksek protein içeriği oval formda gözlenmektedir (Butler ve diğ., 2020; Chuberre ve diğ., 2022).

Tablo 1. *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum*'un biyokimyasal kompozisyonu

Table 1. Biochemical compositions of *Spirulina platensis* and *Phaeodactylum tricornutum*

Biyokimyasal kompozisyonu	<i>Spirulina platensis</i>	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>
Protein (%) ¹⁻⁴	50-70	29-36
Karbonhidrat(%) ¹⁻⁴	7-20	30-47
Lipidler(%) ¹⁻⁴	2-8	1-20
Amino asitler (g/100g)^{5,6}		
Fenilalanin	2,50-3,30	2,20-4,80
Metiyonin	0,89-1,71	0,98-2,70
Treonin	2,65-3,31	1,18-4,80
Valin	1,36-4,21	2,46-5,10
İzolosin	2,15-3,64	2,53-4,60
Lösin	3,50-6,17	3,57-7,0
Lizin	1,86-3,40	2,85-6,40
Histidin	0,75-1,13	0,45-1,50
Triptofan	0,20-0,85	0,93-2,60
Alanin	2,48-5,02	2,47-7,30
Arginin	1,36-4,47	-
Aspartik asit	4,0-6,31	2,57-11,60
Glutamik asit	4,52-8,47	5,75-18,80
Glisin	1,12-3,43	1,36-5,50
Prolin	1,02-2,53	-
Sistein	0,15-0,64	0,24-1,50
Tirozin	1,05-3,07	0,98-3,40

¹(Aouir ve diğ., 2017), ²(German-Báez ve diğ., 2017), ³(Ogbonda ve diğ., 2007), ⁴(Rodríguez De Marco ve diğ., 2014), ⁵(Bashir ve diğ., 2016), ⁶(Becker, 2007)

2.3 Lipidler

Spirulina platensis'in hacminin %7'si lipitlerden meydana gelmektedir ve yüksek miktarda çoklu doymamış yağ asitlerine (PUFA) sahiptir (Mathur, 2018). *Spirulina platensis*'in önemli miktarda omega-6 yağ asitlerinden özellikle γ -linoleik asit ve linoleik asitin yanı sıra (Reboleira ve diğ., 2019) palmitik asit ve γ -linolenik asit bakımından zengin olduğu belirtilmiştir. *Spirulina platensis*'in toplam çoklu doymamış yağ asitlerinin %30-35'ini γ -linoleik asit oluşturmaktadır. γ -linoleik asitin güçlü bir bağışıklık sistemi koruyucu (immunoprotektör) etkiye sahip olduğu ve vücutta önemli anti-inflamatuar etkisi olan prostaglandine dönüştüğü bilinmektedir (Reboleira ve diğ., 2019). Mathur (2018) tarafından yapılan bir çalışmada ise *Spirulina platensis*'in ayrıca eikosapentaenoik asit (EPA), dokosaheksaenoik asit (DHA), araşidonik asit (AA) ve stearidonik asit (SDA) içerdiği ifade edilmiştir.

Phaeodactylum tricornutum, omega-3, özellikle eikosapentaenoik asit (EPA) dahil olmak üzere önemli miktarlarda çoklu doymamış yağ asitlerini (PUFA) içeren lipit profiline sahiptir. Uzun zincirli doymamış yağ asitlerinin oranı %30-45 arasında iken bu oranın %20-40'ı eikosapentaenoik

asitten (EPA) meydana gelmekte ve yüksek kolesterol tedavisinde, kalp hastalıklarında, romatizma riskinin azaltılmasında ve kandaki kolesterolün düşürülmesinde etkili olduğu bilinmektedir (Fajardo ve diğ., 2007; Reboleira ve diğ., 2019). Hızlı büyüme, kolay kültürleme, yüksek lipit içeriği ve mükemmel yağ asidi bileşimi gibi özellikleri nedeniyle *Phaeodactylum tricornutum* potansiyel biyoyakıt hammaddeleri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4 Mineraller ve vitaminler

Mineraller, vücudun sağlıklı yaşam için çeşitli işlev ve süreçleri yerine getiren önemli inorganik besinlerdir. *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum* demir (Fe), çinko (Zn), potasyum (K), sodyum (Na), fosfor (P), magnezyum (Mg), bakır (Cu), manganez (Mn) ve kalsiyum (Ca) gibi birçok minerali içerdiği buna ek olarak *Spirulina platensis*'in Fe ve Zn, *Phaeodactylum tricornutum*'un ise Ca bakımından zengin olduğu bildirilmiştir (Pyne ve diğ., 2017; Reboloso-Fuentes ve diğ., 2001).

Canlı organizmalarda vitaminler, örneğin önemli metabolik yollarda öncüler veya koenzimler olarak gerekli olan, doku büyümesini ve hücre işleyişini kontrol eden ve düzenleyen veya antioksidanlar olarak işlev gören çok sayıda işlem ve işlevde yer almaktadır. *Spirulina platensis*'te özellikle B1 (tiyamin), B2 (riboflavin), B3 (nikotinamid), B6 (pidoksin), B9 (folik asit), B12 (siyanokobalamin), D vitamini, C vitamini, E vitamini (tokoferol), provitamin A (β -karotene) bulunduğu, havuçtan daha fazla miktarda A vitamininin öncüsü olan β -karoten içerdiği ve aynı zamanda buğday tohumu gibi güçlü bir E vitamini kaynağı olarak görüldüğü belirtilmiştir (Mathur, 2018). *Phaeodactylum tricornutum*'un ise vitamin içeriği ile ilgili literatürde yeterli çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bir çalışmada, B1 (tiyamin), C ve E vitamini içerdiği belirtilmiştir (Del Mondo ve diğ., 2020). Antioksidan özelliğe sahip olduğu bilinen bu vitaminlerin ve minerallerin bağışıklık sistemi üzerinde, özellikle de yaşlanmayı geciktirdikleri ve kansere karşı korumada etkili oldukları belirtilmiştir (Henrikson, 1993).

2.5 Pigmentler

Spirulina platensis, içeriğinde kuru ağırlığın yaklaşık %20' ini oluşturan ve yüksek ekonomik değere sahip olan fikobiliproteinlerden C-fikosiyenin (mavi pigment) ve allokofikosiyanine ek olarak, zeaksantin (sarı pigment), klorofil (yeşil pigment), karotenler (α -karoten, β -karoten, euglenanon, lutein), zantofiller (miksozantofil, zeazantin, kriptozantin, ekinenon) gibi önemli fitokimyasalları yüksek oranda bulundurmaktadır (El-Baz ve diğ., 2013; Wu ve diğ., 2016). Hücre içerisinde fikosiyenin ile klorofil a pigmentinin baskınlığı nedeni ile karakteristik mavi-yeşil renkte görülmektedir. Yapısında klorofil olarak sadece klorofil a pigmentini bulundurmaktadır (Park ve diğ., 2018). Fikosiyenin, bir protein ve kromofor fikosiyanobilin içeren, mavi yeşil alglerde bulunan hidrofilik ve yoğun mavi renkli bir biliproteindir. Proteinin prostetik grubu olarak kabul edilen fikosiyanobilin (FSB) kromoforu dört pirol halkasının oluşturduğu doğrusal tetrapirrol yapısı sergilemekte ve farklı bölgelerden sistein aminoasitine bağlanarak fikosiyenin yapısını oluşturmaktadır. Protein kısmı, sırasıyla 18.000 ve 20.000 Da'ya yakın moleküler ağırlıklara sahip α ve β alt birimlerinden oluşur ve 5-8 pH aralığında oldukça kararludur (Chethana ve diğ., 2015). Fikosiyenin gıda

renklendirici olarak kullanılmasının yanı sıra ayrıca antikanser, antioksidan, anti enflamatuar, nöroprotektif, hepatoprotektif, hipokolesterolemik ve radikal süpürücü özellikler gibi çeşitli farmakolojik aktiviteler sergilediği bildirilmiştir (Piñero Estrada ve diğ., 2001; Kuddus ve diğ., 2015). Fikosiyanın kullanım alanını belirleyen safılık derecesi, 620 nm'de elde edilen aborbans değerinin, 280 nm'de elde edilen toplam proteine ait aborbans değerine oranı olarak ifade edilen önemli bir parametredir (Moraes ve diğ., 2011).

Diatomların pigment profilleri kara bitkileri ve yeşil alglerde bulunanlardan oldukça farklıdır. *Phaeodactylum tricorutum*'un yapısında klorofil a, klorofil c ve molekülünde allenik, konjuge karbonil, epoksit ve asetil gruplarına sahip bir ksantofil ve provitamin olmayan bir karotenoid olan fukoksantin bulunmaktadır (Xia ve diğ., 2013). Fukoksantin, kahverengi deniz algleri ve diatomlarda bulunan turuncu renkte bir pigmenttir. Klorofil- α , klorofil c ve bir apoprotein ile oluşturdukları fukoksantin-klorofil α/c kompleksi sayesinde fotosentezde ışığı toplayan merkez olarak önemli bir role sahiptir (Xia ve diğ., 2013). Fukoksantin yapısında bulunan allenik bağ ilk olarak kahverengi deniz yosunlarında bulunmuştur (Dembitsky ve Maoka, 2007). Bu bağ yapısı fukoksantin daha yüksek antioksidan üretiminden sorumludur (Dembitsky ve Maoka, 2007). Fukoksantin etkili yağ yakma potansiyeli sayesinde anti-obezite etkilerinin yanı sıra güçlü bir antioksidan, anti-diyabetik, anti-enflamatuar, anti-kanser ve kardiyovasküler sistemi koruyucu etkilerinin bulunduğu da bilinmektedir (Peng ve diğ., 2011; Xia ve diğ., 2013). Klorofil a, klorofil c ve fukoksantin gibi hafif hasat pigmentlerinin yanı sıra diatomlarda, ksantofil döngüsüne giren ksantofiller, diatoksantin, diadinoksantin, violaksantin, antiheksantin ve zeaksantin ve β -karoten içeren bir grup foto koruyucu karotenoid bulunmaktadır (Gelzinis ve diğ., 2015). Klorofilden sonra doğada yaygın olarak bulunan karotenoidler ise, yüksek bitkiler, algler ve fotosentetik bakteriler tarafından sentezlenen, genel olarak yağda çözünen, bitkisel ve hayvansal ürünlere sarıdan kırmızıya kadar renk veren pigmentlerdir (Hernández-Ledesma ve diğ., 2013). Serbest radikalleri, özellikle tekli oksijen söndürmeyi devre dışı bırakma ve hapsedme özellikleri nedeniyle antioksidanlar olarak kabul edilirler (Goiris ve diğ., 2014).

3. *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricorutum*'un yapısında bulunan biyoaktif bileşikler

Biyoaktif bileşikler, fizyolojik ve hücresele aktiviteyi etkileyerek sağlık üzerinde faydalı etkiler gösteren ikincil metabolitlerdir. Genellikle gıdalarda az miktarda bulunsalar da önemli sağlık etkileri mevcuttur (Albright, 2008; Kadenbach ve diğ., 2009). Biyoaktif bileşiklerin kanser, kardiyovasküler hastalık, inflamasyon, diyabet, obezite, osteoporoz, nörolojik hastalık ve bağışıklık sistemini düzenlemede yararlı etkileri olduğu bilinmektedir (Shibata & Kobayashi, 2008).

Mikroalgler, özellikle antioksidan aktivitelerden sorumlu olan karotenoidler ve fenolik asitler üzere biyoaktif bileşikler içerir. Genellikle bitkiler, algler ve bazı mikro organizmalar tarafından sentezlenen doğada 700'den fazla karotenoid türü tanımlanmıştır (Britton ve diğ., 2004). Klorofil a, klorofil c ve fukoksantin gibi hafif hasat pigmentlerinin yanı sıra diatomlarda, ksantofil döngüsüne giren ksantofiller,

diatoksantin, diadinoksantin, violaksantin, antiheksantin ve zeaksantin ve β -karoten içeren bir grup foto koruyucu karotenoid bulunmaktadır (Gelzinis ve diğ., 2015). Her ne kadar izomerler ve degradasyon ürünleri dahil olmak üzere bahsedilen tüm pigmentlerin türevleri hücrede meydana gelebilse de, all-trans izomerleri en bol ve fonksiyonel olarak aktif formlardır (Kuczynska ve diğ., 2015).

Fonksiyonel özellikleri olan bir diğer bileşik grubu ise aromatik halkaya doğrudan bağlı bir veya daha fazla hidroksil grubu içeren fenolik bileşiklerdir ve en önemli doğal antioksidanlardan biri olarak kabul edilen bu bileşikler meyveler, sebzeler, tahıllar, baklagiller, baharatlar, kahve ve çay gibi bitkilerle ilişkilendirilmiş olsa da algler de zengin bir polifenol kaynağıdır (Klejdus ve diğ., 2009; Ferreres ve diğ., 2012; Heffernan ve diğ., 2015). Fenolik bileşikler serbest, ekstrakte edilebilir ve bağlı olmak üzere hücre içerisinde 3 farklı formda bulunmaktadır (Nayak ve diğ., 2015). Serbest formdaki fenolikler hücredeki vakuollerde bulunmaktadır. Ekstrakte edilebilir formdaki fenolikler yapısındaki hidroksil grupları (-OH) ve aromatik halkaların varlığı nedeniyle düşük molekül ağırlıklı bileşenlere veya glikozitlere esterleşebilmektedirler (Saura-Calixto, 2012). Bağlı formdaki fenolikler ise hücre duvarındaki protein, pektin ve selüloz gibi yapılara kovalent olarak bağlanabilmektedirler. Bağlı fenolik bileşikler, hücre duvarı materyallerinin sindiriminin zor olması nedeniyle mide-bağırsak sisteminde değişime uğramadan kolona ulaşabilmektedir. Bu nedenle yapısındaki kovalent bağlarını hidrolize ederek bağlı fenoliklerin salınmasının sağlanması veya hücre duvarı matriksinin parçalanması gerekmektedir (Shahidi ve Yeo, 2016; Arranz ve diğ., 2010). Polifenoller, tek elektron transferi ve hidrojen atom transferi ile antioksidan görevi görerek önemli biyoaktif özellikler göstermektedir (Goiris ve diğ., 2012; Foo ve diğ., 2017; Neumann ve diğ., 2019; Haoujar ve diğ., 2019).

Fenolik asitler olarak *Spirulina platensis*'te benzoik asit türevleri (protokateşik asit, vanilik asit, *p*-hidroksibenzoik asit, siringik asit, gallik asit), hidroksibenzaldehitler (4-hidroksibenzaldehit, 3, 4-dihidroksibenzaldehit) ve sinamik asit türevleri (kafeik asit, *o*- ve *p*-kumarik asit, sinapik asit, klorojenik asit ve ferulik asit) bulunmaktadır (Klejdus ve diğ., 2009; Scaglioni ve diğ., 2018; Goiris ve diğ., 2014; Haoujar ve diğ., 2019; Seghiri ve diğ., 2019). Scaglioni ve diğ. (2018) yaptığı çalışmada *Spirulina platensis*'te fenolik bileşikler olarak gallik, salisilik, trans-sinamik ve klorojenik asit bulunduğunu, Arnhold Pagnussatt ve diğ. (2014) ve Souza ve diğ. (2011)'nin yaptıkları çalışmalar ile kıyaslandığında benzer sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir. Henrikson, (2000), *Spirulina platensis*'in antioksidan özelliğinin, tokoferoller, fenolik asitler ve β -karotenin varlığından kaynaklandığını bildirmiştir. Fenolik bileşikler, sekonder metabolitler olup abiyotik (UV ışınlanması) ve biyotik (patojen etkileşimi) strese karşı alg hücresi savunmasında önemli bir rol oynamakla birlikte bilinen birçok biyolojik özelliğe ve farmakolojik etkiye sahiptirler (Zhang ve diğ., 2015).

Fenolik asitler olarak *Phaeodactylum tricorutum*'da benzoik asit türevleri (vanilik asit, protokateşik asit, siringik asit, gallik asit), hidroksibenzaldehitler (4-hidroksibenzaldehit, 2,5-dihidroksibenzaldehit) ve sinamik asit türevleri (kafeik asit, ferulik asit, *o*- ve *p*-kumarik asit, sinapik asit ve klorojenik asit) bulunmaktadır (Goiris ve diğ., 2014; Rico ve diğ., 2012). Goiris

ve diğ. (2014), yaptıkları çalışmada, *p*-kumarik asit ve ferulik asit olmak üzere iki sinnamik asit türevi tespit etmişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada ise *Phaeodactylum tricornutum*'un gelişmesi sırasında farklı konsantrasyonlarda metal iyonları (Fe ve Cu) eklenerek fenolik bileşikler (gallik asit, siringik asit, protokateşik asit, kafeik asit, vanilik asit, kumarik asit, ferulik asit, klorojenik asit, kateşin ve epikateşin) üzerine etkisi araştırılmış, ilave edilen metal iyonlarının bazı fenolik bileşiklerin miktarını olumlu yönde etkilerken, bazılarının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir (Rico ve diğ., 2012). Yapılan başka bir çalışmada ise *Phaeodactylum tricornutum*'un fenolik bileşikler olarak 4- hidroksibenzenaldehyd, 2,5- dihidroksibenzenaldehyd, ferulik asit, sinapik asit, kafeik asit, gallik asit, rosmarinik asit ve klorojenik asit içerdiği belirtilmiştir (Foo ve diğ., 2017).

4. *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum*'un sağlık üzerine etkileri

Spirulina platensis, yüzyıllardır Meksika ve Çad gölü etrafında yaşayan yerliler tarafından besin olarak tüketilmekte ve birçok hastalığın tedavisinde kullanılmaktadır. Obezite, diyabet ve hipertansiyon tedavisinde etkili, anti-kanser ve antiviral aktivite gibi sağlık üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır (Martin-Girela ve diğ., 2020). De la Jara ve diğ. (2018), *Spirulina platensis*'in diyabet, inflamasyon, dislipidemi, malnütrisyon ve prekanseröz lezyonlar gibi pek çok durum üzerine etkisi olduğu, buna ek olarak, özellikle *in vivo* çalışmalarda kanser, kardiyovasküler hastalıklar ve bağışıklık sistemi fonksiyon bozukluğu gibi hastalıkların prevalansını arttıran oksidatif stres üzerine olumlu etkilerinin olduğunu belirlemişlerdir. *Spirulina platensis*'in yapısında bulunan β -karoten ve fikosiyanın gibi biyoaktif bileşenlerin anti-inflamatuar ve antioksidan özelliklerle oksidatif stres üzerinde güçlü etkilere sahip olduğu bilinmektedir (Ismail ve Piercey-Normore, 2020). Fikosiyanın nitrit üretiminin baskılanması, serbest radikallerin temizlenmesi, inflamatuvar genlerin ekspresyonunun inhibe edilmesi, reaktif oksijen türlerinin hücre içi birikiminin önlenmesi ve lipit peroksidasyonunun inhibe edilmesinde etkili olduğu belirtilmiştir (Moradi ve diğ., 2019; Yousefi ve diğ., 2019).

Ayrıca *Spirulina platensis*'in yapısında bulunan polifenollerin anti-inflamatuar özellikleri nedeniyle obeziteye bağlı inflamasyonu azalttığı düşünülmektedir (Zhao ve diğ., 2019). Ticari *Spirulina platensis*'in sulu ekstraktı ile yapılan çalışmada kemopreventif özelliklerini güçlü bir şekilde desteklediği ve akciğer kanseri hücrelerine karşı anti-kanser aktivitesi gösterdiği belirtilmiştir (Czerwonka ve diğ., 2018). *Spirulina platensis*'te bulunan birçok biyoaktif bileşiğin olası sinerjik etkisinden dolayı viral hastalıklara karşı alternatif potansiyel bir tedavi olabileceği düşünülmektedir (Zhou ve diğ., 2020). *Spirulina platensis*'in yapısında bulunan fenoller, sülfatlanmış polisakkaritler, kalsiyum spirulan ve fibroproteinler gibi biyoaktif bileşikler, virüslerin çoğalmasına, özellikle Hepatit C virüsü (HCV), influenza A (H1N1) ve İnsan İmmün Yetmezlik Virüsü (HIV) gibi viral enfeksiyonlarda etkili olduğu belirtilmektedir (El-Sheekh ve Abomohra, 2020).

Phaeodactylum tricornutum, kültür koşullarına bağlı olarak değişebilen, özellikle yüksek protein, lif, mineral, fukoksantin, eikosapentaenoik asit (EPA) ve krizolaminarin (Chrl) gibi antioksidan, antiinflamatuvar ve anti kanser özelliklere sahip

biyoaktif bileşikler içermektedir. Fukoksantin, fotosentetik organizmalar tarafından sentezlenen, kahverengi mikroalglerde ve deniz yosunlarında bulunan önemli bir karotenoiddir (Bertrand, 2010; Mikami ve Hosokawa, 2013). Antioksidan ve antiinflamatuvar özellikleri ve ayrıca antiobezite etkileri nedeniyle, fukoksantin sağlık üzerine etkileri araştırılmaktadır (Bae ve diğ., 2020; Kim ve diğ., 2016; Peng ve diğ., 2011). *Phaeodactylum tricornutum*'un yağ asitlerinden eikosapentaenoik asit (EPA)'i yüksek miktarda içerdiği bilinmektedir (Gao ve diğ., 2017). Yapılan çalışmada, EPA'nin kalp sağlığı, damar hastalıkları ve kolesterol gibi hastalıklara karşı vücudu korumaya ve kan şekerini dengelemeye yardımcı olduğu belirtilmiştir (Bresson ve diğ., 2010). *Phaeodactylum tricornutum*'un diğer önemli bir bileşeni olan ve besin değeri azaltılmış yetiştirme koşulları altında biyokütlede biriken, suda çözünür bir β -(1,3)/ β -(1,6 β -glukan (11:1) olan krizolaminarin (Chrl) birincil enerji ve karbon kaynağıdır ve sitozolde çözünmektedir (Caballero ve diğ., 2016). Antitümör, antiinflamatuvar, antioksidan, antiokagulan ve immüno-uyarıcı etkiler gibi nutrasötik işlevler nedeniyle gıdalarda, tıpta ve kozmetikte kullanılmaktadır (Ciecierska ve diğ., 2019; Jayachandran ve diğ., 2016; Zhu ve diğ., 2016).

Tablo 2. *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum*'un sağlık üzerine olası etkileri ve sorumlu bileşikler

Table 2. Possible health effects of *Spirulina platensis* and *Phaeodactylum tricornutum* and responsible compounds

	Bileşikler	Sağlık üzerine olası etkiler
<i>Spirulina platensis</i>	Protein ^{1,2}	Kas ve doku onarımı, immünomodülatör etki
	Karotenoidler ^{1,2}	Antioksidan ve anti-inflamatuar etki
	Fikosiyanın ²	Antioksidan, anti kanser, anti-inflamatuar ve kardiyoprotektif etki
	Polisakkaritler ⁴	İmmünomodülatör ve anti-viral etki
	Gama-linolenik asit (GLA) ^{2,3}	Anti-inflamatuar etki ve hormon dengesinin korunması
	Vitaminler ve mineraller ^{1,5}	İmmünomodülatör etki ve kemik sağlığının desteklenmesi
	Ca-Spirulan ⁶	Anti viral etki
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Fenolik bileşikler ^{3,5}	Anti kanser, anti-inflamatuar, diyabet, obezite, immünomodülatör ve kardiyoprotektif etki
	Protein ^{7,11}	Enerji metabolizmasını destekleme ve immünomodülatör etki
	Karotenoidler ^{7,8}	Antioksidan ve anti-inflamatuar etki
	Fukoksantin ¹⁰	Antioksidan, anti kanser, anti-inflamatuar ve kardiyoprotektif etki
	Fosfolipidler ^{7,9}	Hücre membranlarının yapısını ve beyin fonksiyonlarının gelişimini destekleme
	Omega-3 yağ asitleri ^{7,10}	Kardiyovasküler sağlık, beyin fonksiyonlarının gelişimini destekleme ve anti-inflamatuar etki
Vitaminler ve mineraller ¹¹	İmmünomodülatör etki ve kemik sağlığının desteklenmesi	

¹(Rodríguez-Hernández ve diğ., 2022), ²(Fazilati ve diğ., 2021), ³(Chen ve diğ., 2021), ⁴(García-Villalobos ve diğ., 2020), ⁵(Kato ve diğ., 2020), ⁶(Gargouri ve diğ., 2020), ⁷(Chen ve diğ., 2022), ⁸(Sun ve diğ., 2020), ⁹(Sun ve diğ., 2021), ¹⁰(Zhang ve diğ., 2020), ¹¹(Han ve diğ., 2020)

5. *Spirulina platensis* ve *Phaeodactylum tricornutum*'un gıda endüstrisinde kullanım alanları

Mikroalgler besin olarak ilk kez, İkinci Dünya Savaşı'ndan kullanılmaya başlanmıştır (Becker, 2004). Ticari büyük ölçekli ilk kültür üretimi, 1960'ların başında Japonya'da *Chlorella* kültürüyle (Borowitzka ve Volcani 1978; Muller-Feuga, 1996; Iwamoto, 2004) daha sonra ise 1970'lerin başında, Texcoco Gölü'nde bir *Spirulina platensis* hasat ve kültür tesisi kurulması ile devam etmiştir (Borowitzka ve Volcani 1978; Muller-Feuga,

1996). 1980'de Asya'da çoğunlukla *Chlorella* üreten (ayda 1000 kg'dan fazla) 46 büyük ölçekli fabrika bulunmaktadır. Bunları kısa süre sonra İsrail ve ABD'deki diğer ticari tesisler izlemiş ve büyük miktarda mavi-yeşil alg üretimi Hindistan'da yaklaşık olarak aynı zamanda başlamıştır (Iwamoto, 2004). Dünyadaki toplam kuru alg biyokütle üretim miktarının yılda ~ 10.000 ton olduğu tahmin edilmektedir. Bu miktarın yaklaşık olarak yarısı Çin, geri kalan ise Japonya, Tayvan, ABD, Avustralya ve Hindistan ve diğer bazı ülkelerde birkaç küçük ölçekli üretim yerleri tarafından sağlanmaktadır (FAO, 2010). Avrupa Birliği'nde (AB), gıda bileşenleri olarak yaygın şekilde ticarileştirilen en popüler mikroalgler *Chlorella* ve *Spirulina platensis*'tir. *Phaeodactylum tricornutum* ise su ürünleri yetiştiriciliğinde gıda olarak kullanılmasına rağmen henüz Avrupa Birliği'nin Yeni Gıda Tüzüğü tarafından bir gıda bileşeni olarak kabul edilmemektedir (García ve diğ., 2017).

Spirulina platensis, yüksek kaliteli protein, vitaminler, mineraller ve birçok biyolojik olarak aktif madde içerdiğinden gıda, yem, ilaç ve kozmetik sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. (De la Jara ve diğ., 2018). Hücre duvarı ise, sindirilebilirliği %86 olan ve insan vücudu tarafından kolaylıkla emilebilen polisakkaritten oluşmaktadır (FAO, 2008; Pugh ve diğ., 2001). *Spirulina platensis* kapsülünün, radyoterapi ve kemoterapiden sonra beyaz kan hücrelerini azaltmada ve kan lipid seviyesini düşürmede etkili olduğu kanıtlanmıştır (Martin-Girela ve diğ., 2020).

6. Sonuç

Spirulina platensis ve *Phaeodactylum tricornutum* yüksek miktarda protein, karbonhidrat, önemli yağ asitleri (γ -linoleik asit ve eikosapentaenoik asit (EPA)), mineral (sodyum, potasyum, fosfor, manganez, magnezyum, bakır ve kalsiyum), vitamin (C ve E vitamini) içeriği nedeniyle araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Ayrıca yapısında antiinflamatuar, antidiyabetik, antikanser, antioksidan özelliğe sahip karotenoidler ve fenolik bileşikler gibi biyoaktif özelliğe sahip bileşikler içermektedir. *Spirulina platensis*, alternatif bir tıp kaynağı ve potansiyel bir besin takviyesi olarak kullanılmaktadır. *Phaeodactylum tricornutum* ise yüksek değerlikte makro ve mikro besin içeriğine sahip olmasına rağmen gıda sektöründe kullanılabilirliği daha kapsamlı araştırmalarla aydınlatılmalıdır.

7. Teşekkür ve Bilgi

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, Proje no: 120O858) tarafından finansal olarak desteklenmiştir.

8. Çıkar Çatışması

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyebilecek hiçbir rekabet halindeki finansal çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan etmişlerdir.

9. Kaynaklar

- Alajil Alslibi, Z. (2019). Influence of *Spirulina* and whey protein hydrolysate on growth rate and activity of some probiotic bacteria in ayran. Master of Science Thesis, Gaziantep University, Graduate School of Natural Sciences, Department of Biochemistry Science and Technology, Turkey.
- Albright, A. (2008). Biological and social exposures in youth set the stage for premature chronic diseases. *Journal of the American Dietetic Association*, 108, 1843-1845. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2008.09.017>
- Aouir, A., Amiali, M., Bitam, A., Benchabane, A., & Raghavan, V. G. (2017). Comparison of the biochemical composition of different *Arthrospira platensis* strains from Algeria, Chad and the USA. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, 913-23. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9463-4>
- Arnhold Pagnussatt, F., Medeiros Del Ponte, E., Garda-Buffon, J., & Badiale-Furlong, E. (2014). Inhibition of *Fusarium graminearum* growth and mycotoxin production by phenolic extract from *Spirulina* sp. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 108, 21-26. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2013.11.002>
- Arranz, S., Silván, J. M., & Saura-Calixto, F. (2010). Nonextractable polyphenols, usually ignored, are the major part of dietary polyphenols: a study on the Spanish diet. *Molecular Nutrition & Food Research*, 54(11), 1646-1658. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200900580>
- Bae, M., Kim, M. B., Park, Y. K., & Lee, J. Y. (2020). Health benefits of fucoxanthin in the prevention of chronic diseases. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipid*, 1865(11), 158618. <https://doi.org/10.1016/j.bbali.2020.158618>
- Bartual, A., Villazan, B., & Brun, F. G. (2011). Monitoring the long-term stability of pelagic morphotypes in the model diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Diatom Research*, 26, 243-253. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2011.619365>
- Bashir, S., Sharif, M.K., Butt, M.S. & Shahid, M. (2016). Functional properties and amino acid profile of *Spirulina platensis* protein isolates. *Biological Sciences - PJSIR* 59, 12-19.
- Becker, W. (2004). Microalgae for aquaculture: the nutritional value of microalgae for aquaculture. In: Richmond, A. (eds.): *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Oxford, 380-391.
- Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25, 207-210. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002>
- Begum, H., Yusoff, F. M., Banerjee, S., Khatoon, H., & Shariff, M. (2016). Availability and utilization of pigments from microalgae. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(13), 2209-2222. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.764841>

- Beheshtipour, H., Mortazavian, A. M., Haratian, P., & Darani, K. K. (2012). Effect of *Chlorella vulgaris* and *Arthrospira platensis* addition on viability of probiotic bacteria in yogurt and its biochemical properties. *European Food Research and Technology*, 235(4), 719-728. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1798-4>
- Bertrand, M. (2010). Carotenoid Biosynthesis in Diatoms. *Photosynthesis Research*, 106, 89-102. <https://doi.org/10.1007/s11220-010-9589-x>
- Borowitzka, M. A., Chiappino, M. L., & Volcani, B. E. (1977). Ultrastructure of a chain-forming diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of Phycology*, 13(2), 162-170. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1977.tb02906.x>
- Borowitzka, M. A., & Volcani, B. E. (1978). The polymorphic diatom *Phaeodactylum tricornutum*: ultrastructure of its morphotypes. *Journal of Phycology*, 14(1), 10-21.
- Bresson, J. L., Fairweather-Tait, S., Flynn, A., Golly, I., Korhonen H., Lagiou, P., Løvik, M., Marchelli, R., Martin, A., & Moseley, B. (2010). Scientific opinion on dietary reference values for fats, including saturated fatty acids, polyunsaturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, trans fatty acids, and cholesterol. *EFSA Journal*, 8, 1461. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1461>
- Britton, G., Liaaen-Jensen, S., & Pfander, H. (Eds.). (2004). *Carotenoids*.
- Butler, T., Kapoore, R. V., & Vaidyanathan, S. (2020). *Phaeodactylum tricornutum*: A diatom cell factory. *Trends in Biotechnology*, 38, 606-622. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.12.023>
- Caballero, M. A., Jallet, D., Shi L., Rithner, C., Zhang, Y., & Peers, G. (2016). Quantification of chrysolaminarin from the model diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Algal Research*, 20, 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.008>
- Chen, Z., Yang, M., Li, C., Wang, Y., Zhang, J., Wang, D., & Ge, F. (2014). Phosphoproteomic analysis provides novel insights into stress responses in *Phaeodactylum tricornutum*, a model diatom. *Journal of Proteome Research*, 13(5), 2511-2523. <https://doi.org/10.1021/pr401290u>
- Chen, Y., Li, F., Li, J., Li, Y., Yang, S., Zhang, X., & Liu, G. (2021). Beneficial effects of *Spirulina platensis* on glycemic control and lipid profiles in patients with type 2 diabetes: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Nutrition Journal*, 20(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40200-021-00760-z>
- Chen, X., Yang, Y., Wei, D., Liu, J., Liu, X., Huang, F., & Sun, J. (2022). Lipidomic profiling of *Phaeodactylum tricornutum* under different light intensities and its potential health benefits. *Food Chemistry*, 372, 131388.
- Chethana, S., Nayak, C. A., Madhusudhan, M. C., & Raghavarao, K. S. M. C. (2015). Single step aqueous two-phase extraction for downstream processing of C-phycocyanin from *Spirulina platensis*. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 2415-2421. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1287-9>
- Chuberre, C., Chan, P., Walet-Balieu, M. L., Thiébert, F., Burel, C., Hardouin, J., Gügi, B., & Bardor, M. (2022). Comparative proteomic analysis of the Diatom *Phaeodactylum tricornutum* reveals new insights into intra- and extra-cellular protein contents of its oval, fusiform, and triradiate morphotypes. *Frontiers in Plant Science*, 13, 385. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.673113>
- Ciecierska, A., Drywień, M. E., Hamulka, J., & Sadkowski T. (2019). Nutraceutical functions of beta-glucans in human nutrition. *Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny*, 70, 315-324. <https://doi.org/10.32394/rpzh.2019.0082>
- Colla, L. M., Reinehr, O. C., Reichert, C., & Costa, J. A. (2007). Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource Technology*, 98, 1489-1493. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.030>
- Czerwonka, A., Kaławaj, K., Sławińska-Brych, A., Lemieszek, M.K., Bartnik, M., Wojtanowski, K. K., Zdzisińska, B., & Rzeski, W. (2018). Anticancer effect of the water extract of a commercial *Spirulina (Arthrospira platensis)* product on the human lung cancer A549 cell line. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 106, 292-302.
- De la Jara, A., Ruano-Rodriguez, C., Polifrone, M., Assunção, P., Brito-Casillas, Y., Wägner, A. M., & Majem, L. S. (2018). Impact of dietary *Arthrospira (Spirulina)* biomass consumption on human health: main health targets and systematic review. *Journal of Applied Phycology*, 30(4), 2403-2423. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1468-4>
- De Martino, A., Bartual, A., Willis, A., Meichenin, A., & Villazan, B. (2011). Physiological and molecular evidence that environmental changes elicit morphological interconversion in the model diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Protist*, 162, 462-481. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2011.02.002>
- Dean, A. P., Estrada, B., Nicholson, J. M., & Sigee, D. C. (2008). Molecular response of *Anabaena flos-aquae* to differing concentrations of phosphorus: A combined Fourier transform infrared and X-ray microanalytical study. *Phycological Research*, 56(3), 193-201. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1835.2008.00501.x>
- Del Mondo, A., Smerilli, A., Sané, E., Sansone, C., & Brunet, C. (2020). Challenging microalgal vitamins for human health. *Microbial Cell Factories*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01459-1>
- Dembitsky, V. M., & Maoka, T. (2007). Allenic and cumulenilic lipids. *Progress in Lipid Research*, 46, 328-375. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2007.07.001>
- El-Sheekh, M., & Abomohra, A. E. F. (2020). The therapeutic potential of *Spirulina* to combat COVID-19 infection. *Egyptian Journal of Botany*, 60(3), 605-609. <https://doi.org/10.21608/EJBO.2020.49345.1581>
- F. A. O. (2008). A review on culture, production and use of *Spirulina* as food for humans and feeds for domestic animals and fish. ed. M. A. B Habib, M. Parvin, T. C. Huntington and M. R. Hasan, FAO Fisheries and Aquaculture Circular. no. 1034. Rome, FAO, 33.

- F. A. O. (2010). Algae-based biofuels: applications and co-products. Ed. Sjors van Iersel & Alessandro Flammini. FAO Environmental and Natural Resources Service Series, No. 44, Rome 2010.
- Fajardo, A. R., Cerdan, L. E., Medina, A. R., Fernández, F. G. A., Moreno, P. A. G., & Grima E. M. (2007). Lipid extraction from the microalga *Phaeodactylum tricorutum*. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109, 120-126. <https://doi.org/10.1002/EJLT.200600216>
- Fazilati, M., Mohammadi, N., Sedighi, M., & Asemi, Z. (2021). The effect of *Spirulina* supplementation on metabolic status, liver enzymes, inflammation, and antioxidant capacity in patients with non-alcoholic fatty liver disease: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical Nutrition ESPEN*, 44, 46-52.
- Ferreres, F., Lopes, G., Gil-Izquierdo, A., Andrade, P. B., Sousa, C., Mouga, T., & Valentão, P. (2012). Phlorotannin extracts from fucales characterized by HPLC-DAD-ESI-MSn: approaches to hyaluronidase inhibitory capacity and antioxidant properties. *Marine Drugs*, 10, 2766-2781. <https://doi.org/10.3390/md10122766>
- Foo, S. C., Yusoff, F. M., Ismail, M., Basri, M., Yau, S. K., Khong, N. M. H., & Ebrahimi, M. (2017). Antioxidant capacities of fucoxanthin-producing algae as influenced by their carotenoid and phenolic contents. *Journal of Biotechnology*, 241, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.11.026>
- Ford, C. W., & Percival, E. (1965a). Carbohydrates of *Phaeodactylum tricorutum*. Part I. A sulphated glucuronomannan. *Journal of the Chemical Society Home*, 7035-7041.
- Ford, C. W., & Percival, E. (1965b). Carbohydrates of *Phaeodactylum tricorutum*. Part II. A sulphated glucuronomannan. *Journal of the Chemical Society Home*, 7042-7046.
- Fox, D. (1996). *Spirulina*: Production and Potential. Pub. By Editions Edisud, La Calade, R.N.7, 13090 Aix-en-Provence, FRANCE, 232.
- Gao, B., Chen, A., Zhang, W., Li, A., & Zhang C. (2017). Co-Production of lipids, eicosapentaenoic acid, fucoxanthin, and chrysolaminarin by *Phaeodactylum tricorutum* cultured in a flat-plate photobioreactor under varying nitrogen conditions. *Journal of Ocean University of China*, 16, 916-924. <https://doi.org/10.1007/s11802-017-3174-2>
- García, J. L., de Vicente, M., & Galán B. (2017). Microalgae, old sustainable food and fashion 500 nutraceuticals. *Microbial Biotechnology*, 10, 1017-1024. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12800>
- García-Villalobos, H., Santos-López, J. A., & López-Martínez, L. X. (2020). *Spirulina platensis* extracts inhibit the production of pro-inflammatory cytokines and oxidative stress induced by lipopolysaccharide in RAW 264.7 macrophages. *Journal of Functional Foods*, 66, 103797.
- Gargouri, M., Ben, Ahmed, M., Ali, M. B., & Akrouf, F. M. (2020). *Spirulina platensis* ameliorates oxidative stress, inflammation and lipid profile in rats fed with high-fat and high-fructose diet. *Journal of Food Biochemistry*, 44(8), e13328.
- Gelzinis, A., Butkus, V., Songaila, E., Augulis, R., Gall, A., Büchel, C., Robert, B., Abramavicius, D., Zigmantas, D., & Valkunas, L. (2015). Mapping energy transfer channels in fucoxanthin-chlorophyll protein complex. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1847, 241-247. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2014.11.004>
- German-Báez, L., Valdez-Flores, M., Félix-Medina, J., Norzagaray-Valenzuela, C., Santos-Ballardo, D., Reyes-Moreno, C., & Valdez-Ortiz, A. (2017). Chemical composition and physicochemical properties of *Phaeodactylum tricorutum* microalgal residual biomass. *Food Science and Technology International*, 23(8), 681-689. <https://doi.org/10.1177/1082013217717611>
- Goiris, K., Muylaert, K., Voorspoels, S., Noten, B., De Paepe, D., E Baart, G. J., & De Cooman, L. (2014). Detection of flavonoids in microalgae from different evolutionary lineages. *Journal of Phycology*, 50(3), 483-492. <https://doi.org/10.1111/jpy.12180>
- Guil-Guerrero, J. L., Navarro-Juárez, R., López-Martínez, J. C., Campra-Madrid, P., & Reboloso-Fuentes, M. (2004). Functional properties of the biomass of three microalgal species. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 511-517. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.014>
- Han, J., Shi, Y., Liu, J., & Guo, Y. (2020). A comparison of the nutrient compositions and antioxidant activities of three microalgae: *Phaeodactylum tricorutum*, *Nannochloropsis oceanica*, and *Isochrysis galbana*. *Journal of Applied Phycology*, 32(3), 1697-1707
- Haoujar, I., Cacciola, F., Abrini, J., Mangraviti, D., Giuffrida, D., Oulad El Majdoub, Y., & Skali Senhaji, N. (2019). The contribution of carotenoids, phenolic compounds, and flavonoids to the antioxidative properties of marine microalgae isolated from Mediterranean Morocco. *Molecules*, 24(22), 4037. <https://doi.org/10.3390/molecules24224037>
- He, L., Han, X., & Yu, Z. (2014). A rare *Phaeodactylum tricorutum* cruciform morphotype: Culture conditions, transformation and unique fatty acid characteristics. *PLoS One*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093922>
- Heffernan, N., Brunton, N. P., FitzGerald, R. J., & Smyth, T. J. (2015). Profiling of the molecular weight and structural isomer abundance of macroalgae-derived phlorotannins. *Marine Drugs*, 13, 509-528. <https://doi.org/10.3390/md13010509>
- Henrikson, R. (2000). Earth food *Spirulina*: essential fatty acids and phytonutrients. Ronore enterprises. Inc., Laguna Beach.
- Hernández-Ledesma, B., & Herrero, M. (2013). Bioactive compounds from marine foods: plant and animal sources. John Wiley & Sons: Madrid, Spain, ISBN 1-118-41287-7.

- Ismail, M. M. S., & Piercey-Normore, M. D. (2020). Gene transcription and antioxidants production in *Arthrospira (Spirulina) platensis* grown under temperature variation. *Journal of Applied Microbiology*. <https://doi.org/10.1111/jam.14821>
- Iwamoto, H. (2004). Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products-major industrial species-*Chlorella*. In Richmond, A. (ed.), *Handbook of microalgal culture*. Blackwell, Oxford, 255-263.
- Jayachandran, M., Chen, J., Chung, S. S. M., & Xu B. (2018). A critical review on the Impacts of β -Glucans on gut microbiota and human health. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 61, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2018.06.010>
- Kadenbach, B., Ramzan, R., & Vogt, S. (2009). Degenerative diseases, oxidative stress and cytochrome c oxidase function. *Trends in Molecular Medicine*, 15, 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2009.02.004>
- Kato, T., Arakawa, M., Saito, M., & Ishihara, K. (2020). Effect of oral intake of *Spirulina platensis* on atopic dermatitis and other allergic diseases in humans: a retrospective study. *Journal of Medicinal Food*, 23(2), 128-135.
- Kim, J. H., Kim, S. M., Cha, K. H., Mok, I. K., Koo, S. Y., Pan, C. H., & Lee, J. K. (2016). Evaluation of the anti-obesity effect of the microalga *Phaeodactylum tricorutum*. *Applied Biological Chemistry*, 59, 283-290. <https://doi.org/10.1007/s13765-016-0151-1>
- Klejduš, B., Kopecký, J., Benešová, L., & Vacek, J. (2009). Solid-phase/supercritical-fluid extraction for liquid chromatography of phenolic compounds in freshwater microalgae and selected cyanobacterial species. *Journal of Chromatography A*, 1216(5), 763-771. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.11.096>
- Kuczynska, P., Jemiola-Rzeminska, M., & Strzalka, K. (2015). Photosynthetic pigments in diatoms. *Marine Drugs*, 13(9), 5847-5881. <https://doi.org/10.3390/md13095847>
- Kuddus, M., Singh, P., Thomas, G., & Ali, A. (2015). Production of C-phycoyanin and its potential applications. *Biotechnology of Bioactive Compounds*, 283-299. <https://doi.org/10.1002/9781118733103.CH12>
- Laurienzo, P. (2010). Marine polysaccharides in pharmaceutical applications: An overview. *Marine Drugs* 8, 2435-2465. <https://doi.org/10.3390/md8092435>
- Le Costaouec, T., Unamunzaga, C., Mantecon, L., & Helbert, W. (2017). New structural insights into the cell-wall polysaccharide of the diatom *Phaeodactylum tricorutum*. *Algal Research-Biomass Biofuels Bioproducts*, 26, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.07.021>
- Li, Y., Qin, J. G., Moore R. B., & Ball, A. S. (2009). Perspectives of marine phytoplankton as a source of nutrition and bioenergy, in *Marine phytoplankton, Nova Science Pub Inc.*, 187-202.
- Martin-Girela, I., Albero, B., Tiwari, B. K., Miguel, E., & Aznar, R. (2020). Screening of Contaminants of Emerging Concern in Microalgae Food Supplements. *Separations*, 7(2), 28. <https://doi.org/10.3390/separations7020028>
- Mathur, M. (2018). Bioactive Molecules of *Spirulina*: A Food Supplement. *Bioactive Molecules in Food*, 1-22. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54528-8_97-1
- Mazo, V. K., Gmshinskiĭ, I. V., & Zilova, I. S. (2004). Microalgae *Spirulina* in human nutrition. *Voprosy Pitaniia*, 73(1) 45-53.
- Mikami, K., & Hosokawa, M. (2013). Biosynthetic pathway and health benefits of fucoxanthin, an algae-specific xanthophyll in brown seaweeds. *International Journal of Molecular Sciences*, 14, 13763-13781. <https://doi.org/10.3390/ijms140713763>
- Moradi, S., Ziaei, R., Foshati, S., Mohammadi, H., Nachvak, S. M., & Rouhani, M. H. (2019). Effects of *Spirulina* supplementation on obesity: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Complementary Therapies in Medicine*, 47, 102211. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2019.102211>
- Moraes, P. C., Noce, C. W., Thomaz, L. A., Cintra M. L., & Correa, M. E. (2011). Pigmented lichenoid drug eruption secondary to chloroquine therapy: an unusual presentation in lower lip. *Minerva Stomatologica*, 60, 32-327.
- Muller-Feuga, A. (1996). Microalgues marines. Les enjeux de la recherche. Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Plouzané.
- Nayak, B., Liu, R. H., & Tang, J. (2015). Effect of processing on phenolic antioxidants of fruits, vegetables, and grains-a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(7), 887-918. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.654142>
- Neumann, U., Derwenskus, F., Flaiz Flister, V., Schmid-Staiger, U., Hirth, T., & Bischoff, S. (2019). Fucoxanthin, a carotenoid derived from *Phaeodactylum tricorutum* exerts antiproliferative and antioxidant activities *in vitro*. *Antioxidants*, 8(6), 183. <https://doi.org/10.3390/antiox8060183>
- Ogbonda, K. H., Aminigo, R. E., & Abu, G. O. (2007). Influence of temperature and pH on biomass production and protein biosynthesis in a putative *Spirulina* sp. *Bioresource Technology*, 98, 2207-11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.028>
- Park, W. S., Kim, H. J., Li, M., Lim, D. H., Kim, J., Kwak, S. S., Kang, C. M., Ferruzzi, M. G., & Ahn, M. J. (2018). Two Classes of pigments, carotenoids and C-Phycocyanin, in *Spirulina* powder and their antioxidant activities. *Molecules*, 23(8), 2065. <https://doi.org/10.3390/molecules23082065>
- Peng, J., Yuan, J. P., Wu, C. F., & Wang, J. H. (2011). Fucoxanthin, a marine carotenoid present in brown seaweeds and diatoms: Metabolism and bioactivities relevant to human health. *Marine Drugs*, 9, 1806-1828. <https://doi.org/10.3390/md9101806>
- Pereira, L., & Magalhaes, J. (2014). *Neto, Marine Algae, Biodiversity, Taxonomy, Environmental Assessment, and Biotechnology*, CRC Press.

- Piñero Estrada, J., Bermejo Besco's, P., & Villar del Fresno, A. M. (2001). Antioxidant activity of different fractions of *Spirulina platensis* protean extract. *II Farmaco*, 56(5-7), 497-500. [https://doi.org/10.1016/s0014-827x\(01\)01084-9](https://doi.org/10.1016/s0014-827x(01)01084-9)
- Pugh, N., Ross, S. A., Elsohly, H. N., Elsohly, M. A., & Pasco, D. S. (2001). Isolation of three weight polysaccharide preparations with potent immunostimulatory activity from *Spirulina platensis*, *Aphanizomenon flos-agueae* and *Chlorella pyrenoidosa*. *Planta Medica*, 67, 737-742. <https://doi.org/10.1055/s-2001-18358>
- Pyne, P. K., Bhattacharjee, P., & Srivastav, P. P. (2017). Microalgae (*Spirulina platensis*) and its bioactive molecules: review. *Indian Journal of Nutrition*, 4(2), 160.
- Reboleira, J., Freitas, R., Pinteus, S., Silva, J., Alves, C., Pedrosa, R., & Bernardino, S. (2019). *Spirulina* in nonvitamin and nonmineral nutritional supplements. *Academic Press*, 409-413.
- Reboloso-Fuentes, M. M., Navarro-Pérez, A., Ramos-Miras, J. J., & Guil-Guerrero, J. L. (2001). Biomass nutrient profiles of the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of Food Biochemistry*, 25, 57-76. <https://doi.org/10.1021/jf0010376>.
- Richmond, A. (1986). Outdoor mass cultures of microalgae. (A. Richmond Editör). *Handbook of Microalgal Mass Cultures of Microalgae*. CRC Press, INC. Boca Raton, Florida. 285-329.
- Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture, Biotechnology and Applied Phycology*, 444. <https://doi.org/10.1002/9781118567166>
- Rico, M., López, A., Santana-Casiano, J. M., González, A. G., & González-Dávila, M. (2012). Variability of the phenolic profile in the diatom *Phaeodactylum tricornutum* growing under copper and iron stress. *Limnology and Oceanography*, 58(1), 144-152. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.1.0144>
- Rodríguez De Marco, E., Steffolani, M. E., Martínez, C. S., & Leon, A. E. (2014). Effects of *Spirulina* biomass on the technological and nutritional quality of bread wheat pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 58, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.054>
- Rodríguez-Hernández, A., Ble-Castillo, J. L., Juárez-Oropeza, M. A., & Díaz-Zagoya, J. C. (2022). Effect of *Spirulina platensis* on lipid profile, glucose metabolism, and antioxidant capacity in overweight and obese subjects: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Medicinal Food*, 25(1), 3-13.
- Saranraj, P., & Sivasakthi, S. (2014). *Spirulina platensis* – food for future: a review. *Asian Journal of Pharmaceutical Science & Technology*, 4(1), 26-33.
- Saura-Calixto, F. (2012). Concept and healthrelated properties of nonextractable polyphenols: the missing dietary polyphenols. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(45), 11195-11200. <https://doi.org/10.1021/jf303758j>
- Scaglioni, P. T., Quadros, L., de Paula, M., Furlong, V. B., Abreu, P. C., & Badiale-Furlong, E. (2018). Inhibition of enzymatic and oxidative processes by phenolic extracts from *Spirulina* sp. and *Nannochloropsis* sp. *Food Technology and Biotechnology*, 56(3), 344-353. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5495>
- Shahidi, F., & Yeo, J. (2016). Insoluble-bound phenolics in food. *Molecules*, 21(9), 1216. <https://doi.org/10.3390/molecules21091216>
- Shibata, N., & Kobayashi, M. (2008). The role for oxidative stress in neurodegenerative diseases. *Brain Nerve*, 60, 157-170.
- Souza, M. M., Prieto, L., Ribeiro, A. C., Souza, T. D., & Badiale-Furlong E. (2011). Assesment of the antifungal activity of *Spirulina platensis* phenolic extract against *Aspergillus flavus*. *Ciencia E Agrotecnologia*, 35(6), 1050-8. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600003>
- Sun, L., Zou, T., Chen, W., & Chen, H. (2020). Extraction optimization, characterization, and antioxidant activity of polysaccharides from *Phaeodactylum tricornutum*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 670-677.
- Sun, P., & Zhu, L. (2021). Evaluation of the antibacterial activity and mechanisms of *Phaeodactylum tricornutum* extracts. *Marine Drugs*, 19(9), 489.
- Wu, Q., Liu, L., Miron, A., Klímová, B., Wan, D., & Kuča, K. (2016). The antioxidant, immunomodulatory, and anti-inflammatory activities of *Spirulina*: an overview. *Archives of Toxicology*, 90(8), 1817-1840. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1744-5>
- Xia, S., Wang, K., Wan, L., Li, A., Hu, Q., & Zhang, C. (2013). Production, characterization, and antioxidant activity of fucoxanthin from the marine diatom *Odontella aurita*. *Marine Drugs*, 11, 2667-2881. <https://doi.org/10.3390/md11072667>
- Yousefi, R., Saidpour, A., & Mottaghi, A. (2019). The effects of *Spirulina* supplementation on metabolic syndrome components, its liver manifestation and related inflammatory markers: A systematic review. *Complementary therapies in medicine*, 42, 137- 144. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2018.11.013>
- Zhang, H., Tang, Y., Zhang, Y., Zhang, S., Qu, J., Wang, X., & Liu, Z. (2015). Fucoxanthin: A Promising medicinal and nutritional ingredient. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2015/723515>
- Zhang, Y., Ma, X., Zhao, X., & Hao, Y. (2020). Extraction optimization, structural characterization and in vitro antioxidant activity of polysaccharides from *Phaeodactylum tricornutum*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 427-435.
- Zhao, B., Cui, Y., Fan, X., Qi, P., Liu, C., Zhou, X., & Zhang, X. (2019). Antiobesity effects of *Spirulina platensis* protein hydrolysate by modulating brainliver axis in high-fat diet fed mice. *PLoS One*, 14(6), e0218543. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218543>

- Zhou, P., Yang, X. L., Wang, X. G., Hu, B., Zhang L., Zhang, W., Si, H., Zhu, Y., Li, B., Huang, C., Chen, H., Luo, Y., Gou, H., Jiang, R., Liu, M., Chen, Y., Shen, X., Wang, X., Zheng, X., Zhao, K., Chen, Q., Deng, F., Liu, L., Yan, B., Zhan, F., Wang, Y., Xiao, G., & Shi, Z. (2020). A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin. *Nature*, 579, 270-273. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2012-7>.
- Zhu, F., Du, B., & Xu, B. (2016). A Critical review on production and industrial applications of Beta-Glucans. *Food Hydrocolloids*, 52, 275-288. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.07.003>

Mayalardan Pigment Eldesi

Feyza CÜRE , Funda KARBANCIOĞLU-GÜLER 

İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye

Özet: Pigmentler dahil edildiği ortamda tamamen çözünmeyen renklendirici maddelerdir. Genellikle kaynaklarına göre doğal ve sentetik olarak sınıflandırılırlar. Sentetik pigmentler düşük maliyet ve yüksek verimle üretilebilmeleri gibi avantajların yanı sıra sağlığa ve çevreye zararlı etkilere sahip olması gibi dezavantajlara sahiptir. Maya pigmentleri güvenli, toksik olmama ve biyolojik olarak parçalanabilme özellikleriyle sentetik pigmentlere, mayaların yüksek gelişme hızı, çeşitli ucuz substrat kaynaklarına kolay uyumu ve toksin oluşturmama özellikleriyle de diğer mikrobiyal pigmentlere alternatif olarak kullanılmaktadır. Fermantasyon ortamında karbon, azot ve mineral madde miktarı, pH, sıcaklık, inkübasyon süresi, çalkalama hızı gibi çeşitli parametrelerin optimizasyonu mayalardan çevreye zarar vermeyen, daha verimli ve daha yüksek ekonomik değere sahip pigment üretimi sağlanabilir. Mayalardan elde edilen pigmentler antioksidan, antimikrobiyal, antikanser ve antitümör gibi sağlık üzerine olumlu etkilere ve çeşitli endüstrilerde (gıda, ilaç, kozmetik, tekstil gb.) kullanıma potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Mikrobiyal pigmentler, maya, karotenoidler.

Production of Pigment From Yeast

Abstract: Pigments are coloring substances that do not dissolve completely in the medium in which they are included. They are generally classified as natural and synthetic based on their source. In addition to advantages such as low cost and high efficiency, synthetic pigments have disadvantages such as harmful effects on health and the environment (non-biodegradability). Yeast pigments are used as an alternative to synthetic pigments with their safe, non-toxic and biodegradable properties. It is used as an alternative to other microbial pigments with a high growth rate of yeasts, easy adaptation to various cheap substrate sources and non-toxicity. By optimizing various parameters such as the amount of carbon, nitrogen and mineral substances, pH, temperature, incubation time, and agitation speed in the fermentation medium, environmentally friendly, more efficient and higher economic value pigment production can be achieved from yeast. Pigments obtained from yeast have positive effects on health such as antioxidant, antimicrobial, anticancer and antitumor, and have the potential to be used in various industries (food, medicine, cosmetics, textiles, etc.).

Keywords: Microbial pigments, yeast, carotenoids.

Derleme

Yazışma yazarı: Funda KARBANCIOĞLU-GÜLER, **E-mail:** karbanci@itu.edu.tr

Referans: Cure, F., & Karbancioglu-Guler, F. (2023). Mayalardan pigment eldesi. *ITU Journal of Food Science and Technology*, 1(1) 27-38.

Makale Gönderimi: 13 Nisan 2023

Online Kabul: 13 Haziran 2023

Online Basım: 30 Eylül 2023

1. Giriş

Renk, ürünlerin çekiciliğini artıran bir bileşen olarak yüzyıllardır insan yaşamının bir parçası olmuştur (Grewal ve diğ., 2022). Renk, gıda üretimi ve işleme sektöründe de gıdanın duyu niteliğine katkıda bulunur. Gıdanın besin değerini, tazeliğini, güvenliğini ve estetik değerini ifade eder ve gıda ürününün piyasadaki değerini doğrudan etkiler (Sen ve diğ., 2019). Bu bağlamda, ürünlere (özellikle gıda ürünlerine) renk verebilen moleküller, teknolojik açıdan ilgi çekmektedir. Bu moleküller pigment olarak adlandırılır. Pigmentler görünür dalga boyundaki (400-700 nm) ışığı soğurma yeteneğine sahip kimyasal yapıdaki maddelerdir (Lopes & Ligabue-Braun, 2021). Pigmentler genel olarak kaynaklarına göre doğal ve sentetik olarak sınıflandırılmaktadır.

Sentetik pigmentler kimyasal sentez yoluyla elde edilen bileşiklerdir. Sentetik petro-türevli pigmentler, düşük maliyet ve yüksek verim nedeniyle gıda sanayi, kâğıt ve tarım sanayi, bilim ve teknoloji gibi farklı alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu renklendiricilerin alerjenite, toksisite, kanserojenlik ve biyolojik olarak parçalanmama gibi insan sağlığı ve çevreye olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu sebepler araştırmacıları doğal kaynaklardan elde edilen ekolojik, biyolojik ve çevre dostu olan doğal pigmentlere yönelmiştir (Grewal ve diğ., 2022; Lopes & Ligabue-Braun, 2021; Mumtaz ve diğ., 2019).

Doğal pigmentler bitkisel, hayvansal ve mikrobiyal kaynaklardan elde edilen organik bileşiklerdir. Sentetik pigmentlerle kıyaslandığında sahip oldukları avantajlara rağmen, daha yüksek maliyet ve daha düşük stabilite gibi bazı dezavantajları da vardır. Doğal pigmentler kendi içinde karşılaştırıldığında mikrobiyal pigmentler, hava koşullarından bağımsız olmaları, renk çeşitliliği, hızlı büyüme, substrata bağlı maliyet etkinliği, yıl boyunca büyük ölçekli üretim ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi birçok avantaja sahiptir. Bununla birlikte mikroorganizmalar, hayvanlara ve bitkilere kıyasla daha yüksek fermentasyon verimine sahip pigmentler üretirler. Ayrıca mikrobiyal pigmentlerin antioksidan, antimikrobiyal, sitotoksik, antikanser, antitümör ve sıtma önleyici aktiviteler de sergilediği bildirilmektedir (Behera ve diğ., 2021).

Mikrobiyal pigment kaynakları olarak bakteri, maya, küf ve algler kullanılmaktadır. Mayalar yüksek büyüme oranlarına sahiptir ve toksin üretmezler. Bu sebeple biyopigmentlerin üretiminde ön plana çıkmaktadırlar (Grewal ve diğ., 2022; Lopes & Ligabue-Braun, 2021; Mumtaz ve diğ., 2019; Sen ve diğ., 2019). Fermentasyon ortamı kompozisyonu ve çeşitli fiziksel faktörler maya gelişimini ve pigment üretimini önemli derecede etkilemektedir. Fermentasyon ortam koşullarının optimizasyonu, ucuz substrat kaynaklarının kullanımıyla mayalardan verimli ve ekonomik pigmentler üretilebilir. Bu çalışmada mayalardan verimli, ekonomik, çevreci ve çeşitli faydalı sağlık etkileri olan pigmentlerin üretimi ve fermentasyon koşullarının optimizasyonu incelenmiştir.

2. Mayalardan Pigment Eldesi

Mayalar iyi bir doğal pigment kaynağıdır. Aynı zamanda iyi verimle karotenoid ürettiği de birçok çalışmada bildirilmektedir (Chreptowicz ve diğ., 2019; Kostovová ve diğ., 2021; Kot ve diğ., 2018; Rather ve diğ., 2023). *Rhodotorula*, *Sporidiobolus*, *Rhodospiridium*, *Sporobolomyces*, *Bulleromyces*,

Cystobasidium, *Cystofilobasidium*, *Mixia* ve *Occultifur* cinsinin üyeleri karotenoid üreten mayalardır (Mapelli-Brahm ve diğ., 2020; Rather ve diğ., 2023). β -karoten, torulen, astaksantin ve kantaksantin mayalar tarafından en yaygın olarak üretilen karotenoidlerdir (Grewal ve diğ., 2022). Mayalar ekonomik değeri yüksek farklı pigmentleri aynı anda üretebilmektedir (örneğin *Rhodotorula glutinis* ve *Blakeslea trispora* tarafından β -karoten, torulen ve torularhodin üretimi). Bu sebeple son zamanlarda biyoteknoloji şirketleri ve endüstrileri maya pigmentleriyle yakından ilgilenmektedir (Rather ve diğ., 2023). Karotenoidlere ek olarak, bazı mayalar (*Saccharomyces neoformans* var. *nigricans*, *H. werneckii*) melanin de biyosentezleyebilir (Elsayis ve diğ., 2022; Rather ve diğ., 2023).

2.1 Mayalardan pigment üretimini etkileyen faktörler

Mayalardan belirli bir pigmentin veya pigment karışımlarının üretilmesi sadece türe bağlı değildir. Pigment üretimini etkileyen çeşitli parametreler vardır. Fermentasyon türü, ortam bileşenleri (karbon, nitrojen kaynakları ve mineraller), pH, sıcaklık, inkübasyon süresi, nem içeriği ve havalandırma hızı olmak üzere çeşitli faktörler, mayalardan fermentasyon yoluyla pigmentlerin üretilmesini ve verimini etkilemektedir. Fermentasyon koşullarının optimizasyonu ve sonraki işlemin geliştirilmesi, mayalardan pigmentlerin uygun maliyetli üretimini sağlayabilir (Mussagy ve diğ., 2019; Rana ve diğ., 2021).

2.1.1 Karbon kaynağı

Mayalardan pigment üretiminde seçilen karbon kaynaklarının pigment üretimi üzerinde etkili olduğu ve kullanılan türe bağlı olarak monosakkarit veya polimerlerinin pigment üretimi için uygun karbon kaynağı seçimi olabileceği bildirilmektedir (Rana ve diğ., 2021). *Rhodospiridium toruloides* mutant suşu RM18 ile tek karbon kaynağı olarak çay atığı hidrolizatının kullanıldığı bir çalışmada karotenoid üretimi incelenmiştir. Kontrol olarak *R. toruloides*'in kullanıldığı çalışmada her iki suşta inkübasyon sonrası glikoz ve ksilozun hızlı bir şekilde kullanıldığı arobinozun ise hiç kullanılmadığı ve RM18'in kontrolden daha fazla ksiloz kullandığı bu sebeple daha yüksek nihai biyokütle birikimine (11,85 g/L) sahip olduğu bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca çay atığı hidrolizati ve maya özü-pepton-dekstroza kültürlenen izolatların torularhodin verimi karşılaştırılmış ve çay atığı hidrolizatında torularhodin veriminin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Her iki kültürasyon ortamında da mutant suşun torulen (501 $\mu\text{g/g}$ kuru hücre) ve torularhodin (481,92 $\mu\text{g/g}$ kuru hücre) veriminin kontrolden daha fazla olduğu çay atığı hidrolizatındaki β -karoten veriminin (10,08 mg/g kuru hücre) ise kontrolden (11,96 mg/g kuru hücre) daha düşük olduğu saptanmıştır (Qi ve diğ., 2020). *R. toruloides* tarafından karotenoid biyosentezinin incelendiği başka bir çalışmada karbon kaynağı olarak gliserol, fruktoz ve glikoz kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda en yüksek biyokütle, karbon kaynağı olarak glikozun kullanıldığı kültürden elde edilmiştir. Karbon kaynağı olarak gliserol, fruktoz ve glikoz kullanıldığında toplam karotenoid üretiminin sırasıyla 5,8, 14,9 ve 17,5 mg/L olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonuçları karotenoid üretimi için glikozun iyi bir karbon kaynağı olduğunu göstermektedir (Bao ve diğ., 2019).

2.1.2 Azot kaynağı

Pigment üretimi için ortamdaki önemli bir diğer bileşenin de azot kaynağı olduğu bildirilmiştir. Araştırmalarda düşük C/N oranlarının ve artan azot miktarının daha verimli karotenoid üretimi için faydalı olduğu belirtilmiştir. En yüksek karotenoid verimi için C/N oranı *R. glutinis*'de 20, *Rhodotorula gracilis* 'de ise 10 olarak bildirilmiştir (Kostovová ve diğ., 2021). Bununla birlikte bazı çalışmalar azot yetersizliğinin hücreyi strese sokan veya hücre gelişimini inhibe eden bir koşul olmasına karşın pigment üretimini olumlu etkilediğini bildirmiştir (Mıdık, 2021). Sharma & Ghoshal, (2020) karbon kaynakları olarak soğan kabukları ve patates kabukları, nitrojen kaynakları olarak maş fasulyesi kabukları ve bezelye kabuklarını kullanarak biyoreaktörde *R. mucilaginosa* MTCC-1403'ten pigment üretimini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda β -karoten, fitoen, torulen ve torularhodin üretmişlerdir. Ayrıca çalışmada soğan kabuklarının ve maş fasulyesi kabuklarının karotenoid üretimi için potansiyel ucuz substratlar olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde Mıdık, (2021) *Rhodotorula* cinsine ait farklı suşların β -karoten üretimlerini incelediği çalışmada inorganik azot kaynakları olarak; amonyum sülfat, sodyum nitrat ve amonyum klorür, organik azot kaynakları olarak; et, kazein, soya kaynaklı pepton ve maya özütünün çeşitli kombinasyonlarını kullanmıştır. Deney sonucunda çalışılan suş ile en yüksek β -karoten üretimi (6,84 mg/L), kazein kaynaklı pepton ile amonyum sülfat karışımı kullanıldığında elde edilmiştir. *R. glutinis* ile karotenoid üretimini arttırmayı amaçlayan başka bir çalışmada inorganik azot kaynağı olarak amonyum nitrat (NH_4NO_3), organik azot kaynağı kaynağı olarak asparajın kullanılmıştır. Her iki kaynağında karotenoid üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte inorganik azot kaynağı amonyum nitrate kıyasla organik azot kaynağı asparajın kullanıldığında daha yüksek oranlarda karoten oluşumu gözlenmiştir (Mussagy, Guimarães, ve diğ., 2021).

2.1.3 Tarımsal-endüstriyel atıkların kullanımı

Mikrobiyal pigmentlerin yüksek üretim maliyeti, endüstriyel ölçekte sentetik pigmentlerle rekabette ciddi bir sorundur. Pigment üretimi için mikroorganizmaların kültürlenmesinde kullanılan pahalı besiyeri, biyoteknolojik sentez maliyetini etkileyen kritik faktörlerden biridir. Bu bağlamda bol miktarda bulunan tarımsal-endüstriyel atıklar, üretim maliyetini düşürmek için düşük maliyetli substratlar olarak muazzam bir potansiyele sahiptir. Tarımsal mahsullerin işlenmesi, hasat sonrası işlemler ve endüstriyel işlemlerin yan ürünleri, işlenmediği takdirde çevreyi kirleten çok büyük miktarda kalıntı üretir. Bu atıklar, kaynağına göre son derece besleyici olmasına rağmen çoğunlukla yetersiz kullanılmakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu atıkların pigment üretimi için ham madde olarak kullanılması, çevresel ve sağlıkla ilgili tehlikeleri ortadan kaldırmaya yardımcı olurken aynı zamanda pigmentlerin sürdürülebilir ve uygun maliyetli üretimini yolunu açar (Grewal ve diğ., 2022; Mussagy, Khan, ve diğ., 2021; Vishnupriya ve diğ., 2021). Tarımsal-endüstriyel atıkların mayalardan pigment üretiminde ekonomik ve ekolojik substrat olarak kullanımına dair birçok çalışma yapılmıştır. Bu bağlamda zeytinyağı endüstrisinde bir atık olan "alperujo" kullanılarak bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada

Rhodotorula mucilaginosa tarafından karotenoid üretimi için substrat olarak farklı konsantrasyonlarda alperujo'nun sıvı fraksiyonu veya sulu "alperujo" özütü kullanılmıştır. Sonuçta torularhodin ve torulen üretmek için alperujo bazlı ortamların ucuz substratlar olarak kullanılabilmesi ifade edilmektedir (Ghilardi ve diğ., 2020). Benzer şekilde *Rhodotorula mucilaginosa*'dan karotenoid üretimi için substrat olarak tarımsal-endüstriyel atıkların (soğan kabukları, patates kabuğu, maş fasulyesi kabuğu ve bezelye kabukları) kullanılabilmesi potansiyelini araştıran çalışmanın sonucunda soğan kabuklarının ve maş fasulyesi kabuğunun potansiyel ucuz substratlar olduğu ve β -karoten, fitoen, torulen ve torularhodin sentezlendiği bildirilmiştir (Sharma & Ghoshal, 2020). *R. mucilaginosa* CCMA 0156 suşundan karotenoid üretiminin amaçlandığı bir diğer çalışmada substrat olarak tarımsal atıklar kahve kabuğu ve kahve posası kullanılmıştır. En yüksek karotenoid verimi kahve kabuğu substrat olarak kullanıldığında elde edilmiştir (Moreira ve diğ., 2018). Başka bir çalışmada ise doğrudan fermantasyonda *Phaffia rhodozyma*'nın astaksantin üretimi için substrat olarak gıda atıklarının kullanılabilmesi bildirilmiştir (Lai ve diğ., 2022). Kot ve diğ., (2020) *R. gracilis* ATCC 10788 mayası ile karotenoid biyosentezi için substrat olarak patates atık suyu ve gliserol fraksiyonu kullanmışlardır. Çalışmada karotenoid (6,24 mg/L) üretildiği ve üretilen karotenoidlerin β -karoten, torulen ve torularhodin içerdiği belirtilmiştir.

2.1.4 Sıcaklık, pH, havalandırma hızı ve çalkalama hızı

Sıcaklık ve pH, mikrobiyal gelişmeyi, bunun sonucunda da pigment sentezini ve oluşan ürünü etkileyen önemli parametrelerdir. *Monascus* sp. pigmentleri için optimum pH 5.5-6.5 aralığında *Rhodotorula* pigmentleri için optimum pH 4.0-4.5 aralığındadır. Likopen oluşumu nötr ila hafif alkali pH'ta meydana gelirken, β -karoten oluşumu asidik pH'ta meydana gelmektedir (Rana ve diğ., 2021). Bununla birlikte *Rhodotorula mucilaginosa*'dan maksimum karotenoid elde etmek için yapılan çalışmada optimum koşulların, 84 saat boyunca 119,6 rpm çalkalama ile pH 6,1 de, 25,8 °C'lik inkübasyon sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. Bu koşullarda 717,35 $\mu\text{g/g}$ β -karoten ve 7,33 g/L hücre üretilmiştir. Ayrıca, çalışmada havalandırmanın pigment üretimine etkisi de incelenmiş ve havalandırmanın *R. mucilaginosa*'nın gelişmesi için çok önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir (Sharma & Ghoshal, 2020). *R. mucilaginosa* ile yapılan başka bir çalışmada çalkalama hızının (130-230 rpm), pH (5,5-7,5) ve sıcaklığın (25-35 °C) karotenoid üretimine etkisi incelenmiştir. Sonuçta daha düşük çalkalama hızının (130 rpm) ve sıcaklığın (25 °C) bu mikroorganizma tarafından karotenoid üretimini desteklediği (sırasıyla 91,78 $\mu\text{g/g}$ ve 679,15 $\mu\text{g/L}$) gözlemlenmiştir. Bununla birlikte karotenoid üretimi için optimum başlangıç pH'ının 6 olduğu belirtilmiştir (Machado ve diğ., 2019). Bao ve diğ., (2019) *R. toruloides* tarafından karotenoid biyosentezini incelendikleri çalışmada sıcaklık 20 °C'den 35 °C'ye çıktıkça torularhodin üretiminin önce arttığını daha sonra azaldığını ve en yüksek toplam karotenoid üretimi (17,5 mg/L) ile en yüksek torularhodin üretiminin (16,4 mg/L) 28 °C'de gözlemlediklerini bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada *R. glutinis*'in 30 °C (1,2 mg/L)'de 24 °C (0,9 mg/L)'ye göre daha fazla karotenoid ürettiği gözlemlenmiştir (Zhang ve diğ., 2014).

Çalışmaların çoğu, kültür ortamının sıcaklık, pH ve besin içeriğinin optimizasyonuna odaklanmış olsa da çalkalama hızı da mayalardan pigment üretimini etkileyen önemli bir faktördür. *R. glutinis* tarafından karotenoid üretmek amacıyla çalkalayıcı şişeler kullanılarak çalkalama hızının etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada düşük çalkalama hızlarında (100-150 rpm), hücre yüzeyindeki besinlerin yetersizliği nedeniyle hücre büyümesi azalırken yüksek çalkalama oranlarında, hücrelerde bir miktar bozulma meydana gelmesi sebebiyle canlılıklarının azaldığı bildirilmiştir. Çalışmada karıştırma hızının son derece önemli olduğu belirlenmiştir (Mussagy ve diğ., 2019).

2.1.5 Mineral madde

Çeşitli minerallerin de pigment üretimini etkilediği bildirilmiştir. Tarımsal-endüstriyel yan ürünler (şeker kamışı melası ve manyok atıksuyu) kullanılarak *Rhodotorula mucilaginosa* tarafından lipitlerin ve karotenoidlerin eş zamanlı üretiminin incelendiği çalışmada farklı konsantrasyonlardaki (1.0, 2.0 ve 3.0 g/L) dokuz mineral madde (amonyum sülfat, amonyum fosfat, amonyum klorür, monopotasyum fosfat, potasyum sülfat, potasyum klorür, dibazik sodyum fosfat, sodyum sülfat ve sodyum klorür) aktivatör olarak kullanılmıştır. Çalışmada amonyum sülfat (3 g/L) aktivatör olarak kullanıldığında spesifik ve hacimsel karotenoid üretiminde sırasıyla %94,46 ve %81,16 artış olduğu gözlemlenmiştir (Machado ve diğ., 2022). Başka bir çalışmada manyok atık suyunda *Rhodotorula glutinis* için karotenoid üretimini incelemişlerdir. Çalışmada hücrelerde en yüksek karotenoid birikimi (167,23 µg/g), mineraller [KH₂PO₄ (1 g/L), MgSO₄·7H₂O (0.25 g/L), Na₂HPO₄·12H₂O (1 g/L), 6 mL/L FeSO₄ solüsyonu (4 g/L) ve iz mineral solüsyonu (10 mL/L). İz mineral çözeltisinde L başına bulunan: 0.36 g CaCl₂·2H₂O, 0.075 g ZnSO₄·7H₂O, 0.013 g CuSO₄·5H₂O, 0.05 g MnSO₄·H₂O, 0.013 g CoCl₂·6H₂O ve 0.035 g (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O] ve amonyum sülfat (5 g/L) ile takviye edilmiş ortamda elde edilmiştir. Bununla birlikte mineral ve amonyum sülfat takviye edilmeyen aynı ortamda da yaklaşık bir değer (139,18 µg/g) elde edildiği bildirilmiştir (Ribeiro ve diğ., 2019). Bonadio ve diğ., (2018) nitrojen, fosfor, çinko ve magnezyum takviyesinin, substrat olarak karmaşık bir ortam (şeker kamışı suyu) ve sentetik ortam (sükroz ve maltoz) kullanılarak *Rhodotorula rubra* L02 mayasının biyokütle ve karotenoid hacimsel üretimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. En yüksek hücre içi karotenoid üretimi, şeker kamışı suyunda ve Mg ile takviye edilmiş sentetik ortamda olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada magnezyum takviyesinin L02 suşunun kuru ağırlığını ve karotenoid hacimsel üretimini arttırdığı çinko takviyesinin ise karotenoid üretimini azalttığı bildirilmiştir.

2.1.6 Fermantasyon çeşidi

Mikrobiyal pigmentlerin üretimi için katı hal ve batık fermantasyon yaklaşımları kullanılır. Uygulanacak olan yöntem seçilen suşa, substratın türüne ve ekstrakte edilecek pigment tipine bağlı olarak seçilir (Lopes & Ligabue-Braun, 2021; Martí-Quijal ve diğ., 2021). Batık fermantasyonda sıvı bir substrat kullanılır veya katı bir substrata su eklenir. Fermantasyon sırasında mikroorganizmalar tarafından üretilen biyoaktif bileşikler, sıvı ortama salgılanır. Bu sebeple, batık fermantasyon sıvı haldeki ikincil metabolitlerin üretimi için yaygın olarak kullanılır (Martí-Quijal ve diğ., 2021). Katı hal

fermantasyonunda ise serbest bir sıvı faz olmaksızın katı bir substrat kullanılır ve istenen biyoürünü üretmek için ilgili suşla aşılınır (Martí-Quijal ve diğ., 2021; Oiza ve diğ., 2022). Katı hal fermantasyonunda tarımsal yan ürünler doğal substrat olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Bu sebeple biyolojik açıdan önemli bileşiklerin geri kazanılmasını ve üretilen atığın azaltılmasını sağlayabilir. Ayrıca atıkta asgari düzeyde ön arıtmanın gerekli olduğu (bazen hiç gerekmediği) ve daha az atık su ürettiği için kolay ve daha çevreci bir süreç olarak kabul edilir. Katı hal fermantasyonunda, substrattaki besinler maksimum düzeyde kullanılır. Batık fermantasyonla kıyaslandığında daha az su kullanılır ve kontaminasyona karşı daha dirençlidir (Cerde ve diğ., 2019; Lopes & Ligabue-Braun, 2021; Martí-Quijal ve diğ., 2021; Oiza ve diğ., 2022). Katı hal fermantasyonu, daha yüksek verim ve üretkenlik avantajlarının yanı sıra fermente edilmiş ürünün, ürünü izole etmeden bir renklendirici olarak doğrudan uygulanabilirliğini de sağlar (Rana ve diğ., 2021). Katı hal fermantasyonu batık fermantasyonla karşılaştırıldığında birçok avantaja sahip olmasına rağmen son yıllarda mayalardan pigment üretimi için yapılan çalışmaların çoğunda batık fermantasyon kullanılmıştır (Bonadio ve diğ., 2018; Libkind ve diğ., 2018; Moreira ve diğ., 2018; Rekha ve diğ., 2022; Ribeiro ve diğ., 2019; Sharma & Ghoshal, 2020; Villegas-Méndez ve diğ., 2019) ayrıca ticari olarak da pigment üretiminin batık fermantasyonla gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Sánchez-Muñoz ve diğ., 2020). Batık fermantasyonun tercih edilmesinin öncelikli sebebi daha büyük hacimli işleme potansiyeline sahip olmasıdır. Bununla birlikte basit parametre kontrolü, fermantasyon süresinin daha kısa olması ve düşük emek yoğunluğu gibi avantajları da tercih edilmesinde etkili olmuştur (Gong ve diğ., 2023; Lopes & Ligabue-Braun, 2021). Ayrıca batık fermantasyonun, tarımsal atık kalıntıları eklendiğinde daha fazla sayıda pigment oluşturduğu belirtilmiştir (Ramesh ve diğ., 2022). Bunların aksine katı hal fermantasyonunda süreç düzenlemeye daha az yatkındır ve büyük ölçekli işlemeye uygun değildir (Lopes & Ligabue-Braun, 2021). Tarımsal-endüstriyel atıklar kullanılarak (sulu soğan kabukları ve sulu maş fasulyesi kabukları) batık fermantasyonla *Rhodotorula mucilaginosa*'dan pigment üretiminin incelendiği çalışmada torularhodin, β-karoten ve torulen üretildiği bildirilmiştir (Sharma & Ghoshal, 2020). Başka bir çalışmada; manyok atık suyu kullanılarak *Rhodotorula glutinis*' te karotenoid üretimi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda karotenoid (0,98 mg/L) üretildiği belirtilmiştir (Ribeiro ve diğ., 2019). Eryılmaz ve diğ., (2016) *Xanthophyllomyces dendrorhous* ve *Sporidiobolus salmonicolor* mayaları için zeytin ezmesi kullanarak katı hal fermantasyonunda astaksantin (sırasıyla 220,24±17,47 µg/g kurutulmuş prina ve 191,33±2,81 µg/g kurutulmuş prina) elde ettiklerini bildirmişlerdir.

3. Mayalardan Elde Edilen Pigmentler

Mayalardan karotenoidler, flavinler ve melanin grubu pigmentler elde edilmektedir. Mayalar tarafından üretilen pigmentler, özellikleri ve potansiyel uygulamaları Tablo 1'de özetlenmiştir.

3.1 Karotenoidler

Karotenoidler, lipofilik, organik, 40 karbon atomlu terpenoid

pigmentlerdir. Merkezi iskeleti 8 izopren biriminin yan yana dizilmesiyle oluşmuştur. Karotenoidlerin en önemli yapısal özelliğinin, fizikokimyasal özelliklerinden büyük ölçüde sorumlu olan konjuge çift bağları olduğu düşünülmektedir. Örneğin, çoğu karotenoidin renginden konjuge çift bağlar sorumludur. Karotenoidler, moleküllerinde oksijen atomlarının ve konjuge bağların varlığına bağlı olarak sarıdan turuncuya veya kırmızıya (410-510 nm) kadar değişen renkler sergileyebilirler (Maoka, 2020; Rapoport ve diğ., 2021; Vargas-Sinisterra & Ramírez-Castrillón, 2020). Karotenoidler temel olarak oksijen içeren ksantofiller (lutein, zeaksantin, violaksantin ve neoksantin) ve oksijen içermeyen ve tamamen hidrokarbon olan karotenler (α -karoten, β -karoten, torulen, likopen) olmak üzere iki gruba ayrılır (Behera ve diğ., 2021).

İnsanlar ve hayvanlar karotenoidleri sentezleyemezler bu nedenle gıdalardan almalıdırlar (Maoka, 2020; Rapoport ve diğ., 2021). Karotenoidlerin ana biyoaktif işlevi, provitamin A aktivitesine sahip olmalarıdır. Bununla birlikte literatürde antikanser, antioksidan, antimikrobiyal aktivitelere sahip olduğu ve çeşitli hastalıkların riskini azaltmada etkili olabileceği bildirilmiştir (Behera ve diğ., 2021; Paul ve diğ., 2023; Rapoport ve diğ., 2021; Vargas-Sinisterra & Ramírez-Castrillón, 2020). Karotenoidler tıp, gıda, kozmetik ve tekstil endüstrisinde geniş uygulama alanına sahiptir. Bazı karotenoidler, fonksiyonel gıdalar, farmasötikler, kozmetik katkı maddeleri ve gıdalar veya yemler için renklendirici maddeler olarak kullanılır (Kanamoto ve diğ., 2021). Endüstrinin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaları ve insan sağlığına olan etkileri sebebiyle karotenoidlerin piyasadaki değeri her geçen gün artmaktadır ve 2025 yılına kadar 1,7 milyar ABD dolarına ulaşacağı tahmin edilmektedir (Watcharawipas & Runguphan, 2023). Dünya pazarında karotenoidlerin kullanımına olan talepteki artış karotenoidlerin daha uygun maliyetli üretimini gerekli hale getirmektedir.

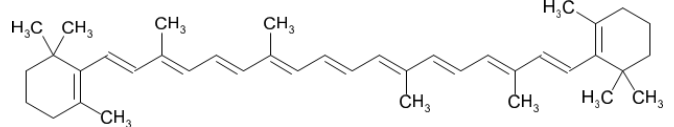
Endüstriyel olarak üretilen karotenoidler kimyasal olarak sentezlenir veya bitkilerden, alglerden, mayalardan ve bakterilerden ekstrakte edilir. Kimyasal olarak sentezlenen karotenoidlerin sağlık üzerine olumsuz etkileri sebebiyle doğal karotenoid kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Bununla birlikte bitki kaynaklı karotenoidlerin üretiminde bitkilerin yavaş büyümesi, geniş tarım alanlarına ihtiyaç duyulması, iklim değişimleri ve coğrafi yapıdan etkilenmeleri yüksek üretim maliyetine sebep olmaktadır. Mikrobiyal yollarla elde edilen karotenoidler yılın herhangi bir zamanında ve hızlı bir şekilde elde edilebilir olması, düşük çevre kirliliği, bitkilerden ekstraksiyona göre düşük üretim maliyetleri ve yüksek verim gibi avantajlara sahiptirler (Kanamoto ve diğ., 2021; Paul ve diğ., 2023). Çeşitli mikroorganizmalar karotenoidleri biyosentezleyebilir; ancak birçoğunu ticari olarak üretmek mümkün değildir. Mayalar doğal karotenoid üreticileridir (Watcharawipas & Runguphan, 2023) ve tarımsal-endüstriyel atıklar gibi düşük maliyetli substrat üzerinde gelişebilmeleri sebebiyle karotenoid üretiminde ideal kaynaklardır (*Phaffia rhodozyma*, *Sporobolomyces*, *Rhodospodium* ve *Rhodotorula*) (Igreja ve diğ., 2021; Paul ve diğ., 2023).

3.1.1 β -Karoten

$C_{40}H_{56}$ kimyasal formülüne sahip bir izoprenoid bileşiktir. Dokuz konjuge çift bağ içeren bir polien zinciri ile bağlanan iki β -iyon halkasından oluşur (Şekil 1). β -karoten sarıdan

turuncuya bir renk ile karakterize edilir (Rapoport ve diğ., 2021). β -karoten, hem fizyolojik hem de gıda sistemlerinde oksidatif hasarı önleyerek veya geciktirerek dikkate değer antioksidan özelliklere sahiptir (Igreja ve diğ., 2021). Ayrıca antikanser etkiye sahip olduğu, tümör oluşumunu ve yaşlanmayı önlediği bildirilmiştir. Provitamin A aktivitesi göstermesi sebebiyle gece körlüğünün tedavisinde de etkili olabileceği belirtilmiştir (Wang ve diğ., 2021). Bununla birlikte yapılan bir çalışmada *R. glutinis*'ten elde edilen β -karotenin sıtma hastalığına sebep olan *P. falciparum* parazitiye karşı etkili olduğu bildirilmiştir (Sinha ve diğ., 2021).

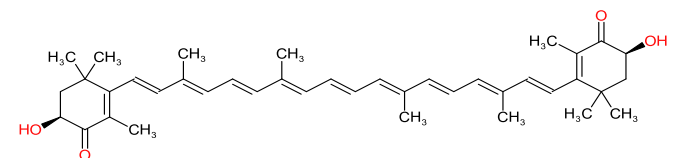
Yemeklik yağlarda farklı konsantrasyonlarda çözünebilir ve kırmızıdan sarıya çok çeşitli renk sağlayabilir. Bu nedenle gıda endüstrisi tarafından oldukça değerli bir gıda renklendirici olarak kullanılabilir. Aynı zamanda multivitaminler, A vitamini ve antioksidan formülasyonlar dahil olmak üzere çeşitli diyet takviyelerinde de kullanılmaktadır (Behera ve diğ., 2021). *Rhodotorula glutinis*, *Rhodotorula mucilaginosa*, *Sporidiobolus pararoseus*, *Phaffia rhodozyma*, *Rhodospodium toruloides*, *Sporidiobolus salmonicolor* β -karoten üreten mayalardır (Igreja ve diğ., 2021; Rapoport ve diğ., 2021).



Şekil 1. β -karotenin yapısal formülü.
Figure 1. The chemical formula of β -carotene.

3.1.2 Astaksantin

40 karbon, 13 konjuge çift bağ ile uzun bir polien zincirine ve hem hidroksil hem de keton fonksiyonel gruplara sahip iki β -halkasına sahiptir (Şekil 2). Bu nedenle provitamin A aktivitesine sahip değildir. Bileşiğin merkezindeki uzun konjuge çift bağ zincirlerinin bir sonucu olarak kırmızı-turuncu bir pigmenttir. Merkezdeki çift bağlar sebebiyle antioksidan özelliği sahiptir (Igreja ve diğ., 2021). Ayrıca güneş yanığına karşı koruma, kırışıklıkların azaltılması, diyabetin ve kanserin önlenmesinde etkili olduğu bildirilmektedir (Behera ve diğ., 2021; Mussagy ve diğ., 2022; Vargas-Sinisterra & Ramírez-Castrillón, 2020). Antioksidan özelliği sebebiyle insanlar, hayvanlar ve su ürünleri yetiştiriciliği için besin takviyesi olarak kullanılmaktadır (Rao ve diğ., 2021). Su ürünleri yetiştiriciliğinde, ete pembe renk özelliğini sağlamak için alabalık ve kabuklu su ürünleri üretiminde kullanılmasının yanı sıra balıkların üreme süreçlerinde yumurta ve sperm kalitesinin artmasında önemli bir rol oynamaktadır (Dikel, 2021). *Xanthophyllomyces dendrorhous* (*Phaffia rhodozyma*) mayası astaksantin ana üreticisidir.

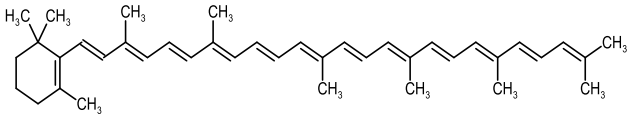


Şekil 2. Astaksantin yapısal formülü.
Figure 2. The chemical formula of astaxanthin.

3.1.3 Torulen

Torulen ($C_{40}H_{54}$), 12 konjuge çift bağ içeren polien zincirine

sahip bir β -iyonon halkasından oluşmaktadır (Şekil 3) (Rapoport ve diğ., 2021). Sahip olduğu çift bağlar sayesinde güçlü antioksidan özellik göstermektedir (Kot ve diğ., 2018). Yoo ve diğ. (2016) *Rhodotorula mucilaginosa* AY-01 suşundan elde ettikleri torulenin önemli derecede antioksidan ve antimikrobiyal etki gösterdiğini bildirmişlerdir. Mayalardan elde edilen torulenin antikanser özellik gösterdiği de bildirilmiştir. *Sporidiobolus pararoseus*'tan izole edilen torulenin prostat kanserine karşı etkili olduğu belirtilmiştir (Du ve diğ., 2017). Benzer şekilde Sinha ve diğ. (2023) substrat olarak bitki atıklarını kullandıkları çalışmada çeşitli karotenoidler (β -karoten, torulen ve torularhodin) elde etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda izole edilen karotenoidlerin önemli derecede antioksidan, antimikrobiyal aktivite sergiledikleri ve meme kanserine karşı etkili olduğu bildirilmiştir. Torulen ayrıca provitamin A aktivitesi gösterir ve biyolojik olarak kullanımı güvenlidir (Wei ve diğ., 2020). Torulen yoğunluğa bağlı olarak turuncu veya turuncu-kırmızı renkte olabilir. Biyogüvenli olması ve sahip olduğu renk sebebiyle gıda boyası olarak kullanılabilir. Bununla birlikte sahip olduğu özellikler çeşitli endüstrilerde kullanılabilme potansiyelini gösterir. Gıda ve yem endüstrisi bu endüstrilere öncelikli olarak örnek verilebilir (Kot ve diğ., 2018). *Rhodotorula sp.* ve *Sporidiobolus sp.* torulen üreten mayalardır (Kot ve diğ., 2018; Rapoport ve diğ., 2021).



Şekil 3. Torulenin yapısal formülü.

Figure 3. The chemical formula of torulene.

3.1.4 Torularhodin

Torularhodin ($C_{40}H_{52}O_2$) birçok özelliğinde olduğu gibi yapısal formül olarak da torulene benzemektedir. Torularhodin yapısal formülünde torulenden farklı olarak polien zincirinin sonunda bir karboksil grubuna sahiptir. Karboksil grubunun varlığı sulu formülasyonlardaki çözünürlüğünü arttırmaktadır bu yönü torularhodinin gıda formülasyonlarında kullanımını daha da avantajlı hale getirmektedir (Igreja ve diğ., 2021; Rapoport ve diğ., 2021).

Torularhodin aynı zamanda antimikrobiyal, antioksidan ve antikanser etkiye sahiptir. Ungureanu ve diğ., (2016) yapmış oldukları çalışmada torularhodinin *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Bacillus subtilis*, ve *Pseudomonas aeruginosa*'nın çoğalmasını önleyerek antimikrobiyal etki gösterdiğini bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada araştırmacılar *S. pararoseus*'tan elde ettikleri torularhodinin *in vivo* çalışmada fare karaciğerinde oksidatif hasarı iyileştirdiğini ve *in vitro* çalışmada oksidasyona karşı koruduğunu belirlemişlerdir (Liu ve diğ., 2019). Ayrıca *S. pararoseus* JD-2 suşundan izole edilen torularhodinin antioksidan ve nöroprotektif kapasitesi nedeniyle Alzheimer hastalığının tedavisinde kullanılabileceği de bildirilmiştir (W. Zhang ve diğ., 2020). *Rhodotorula mucilaginosa* ve *Sporobolomyces ruberrimus* mayaları torularhodinin en önemli üreticileridir.

Torulen ve torularhodin gelecek vaat eden özelliklerine ve önemli sağlık etkilerine rağmen henüz endüstriyel olarak üretilmemektedir. Bunun öncelikli sebebinin üretim maliyeti

olduğu söylenebilir. Fermantasyon ortamının optimizasyonu sağlanarak daha ekonomik pigment üretimi sağlanabilir ancak bunun için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Endüstriyel üretimin yapılamamış olmasındaki bir diğer sebep ise torulen ve torularhodinin gıdalarda bulunmaması sebebiyle insan sağlığı üzerine etkilerinin henüz yeterince araştırılmamış olmasıdır. Ancak kimyasal yapıları ve sağlık etkileri göz önünde bulundurulduğunda torulen ve torularhodin gıda, yem, kozmetik ve ilaç endüstrisinde katkı maddesi olarak kullanılma potansiyeline sahiptir (Igreja ve diğ., 2021; Kot ve diğ., 2018; Mussagy, Gonzalez-Miquel, ve diğ., 2022; Mussagy, Khan, ve diğ., 2022).

3.2 Flavinler

Flavinler, izoalloksazin halkasından türetilen bir dizi pteridin bazlı sarı organik bileşiklerdir. Riboflavin biyolojik olarak önemli tüm flavinlerin merkezi kaynağıdır ve genellikle B2 vitamini olarak bilinir (S. Liu ve diğ., 2020). Çoğunlukla oksidatif metabolizma reaksiyonlarında olmak üzere çok sayıda enzimatik reaksiyonda koenzim görevi gören flavin mononükleotidi (FMN) ve flavin adenin dinükleotidinin (FAD) metabolik öncüsü olarak görev alır (Andreieva, Yana Petrovska, ve diğ., 2020; Petrovska ve diğ., 2020). Hayvanlar bitkiler, mantarlar ve çoğu prokaryottan farklı olarak riboflavin sentezleyemezler (Andreieva, Lyzak, ve diğ., 2020). Bu nedenle endüstriyel ölçekte riboflavin üretiminin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Riboflavin hem kimyasal hem de mikrobiyal sentezle üretilebilir (Andreieva, Yana Petrovska, ve diğ., 2020; Petrovska ve diğ., 2020). Bununla birlikte mikrobiyal sentez yönteminin atıkların ve enerji tüketiminin azaltılması, şeker veya bitkisel yağ gibi yenilenebilir kaynakların kullanılması gibi avantajları vardır (Andreieva, Lyzak, ve diğ., 2020). Son yıllarda, riboflavinin fermantasyon yoluyla mikrobiyal üretimi kimyasal sentezin yerini tamamen almıştır (Petrovska ve diğ., 2022). Flavinojenik maya *Candida famata* bilinen en aktif riboflavin üreticisidir ve ABD'de uzun süre endüstriyel riboflavin üretimi için kullanılmıştır (Andreieva, Yana Petrovska, ve diğ., 2020; Petrovska ve diğ., 2022). Ancak, *C. famata*'nın mutant suşları tarafından riboflavinin endüstriyel üretimi, düşük genetik stabilitesi nedeniyle durdurulmuştur. Günümüzde endüstriyel riboflavin üretimi, gram-pozitif bakteri *Bacillus subtilis* ve ipliksi mantar *Ashbya gossypii*'nin rekombinant suşları kullanılarak elde edilmektedir (Andreieva, Yana Petrovska, ve diğ., 2020; Petrovska ve diğ., 2020). Bununla birlikte, diğer flavinojenik organizmalara göre maya kullanımı, büyük biyokütle biriktirme yeteneği, faj enfeksiyonuna karşı direnç, ucuz kültür ortamının kullanımı, ve büyüme aşamasında riboflavin üretimi gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca riboflavinin ayrılması ve saflaştırılması teknolojik olarak daha kolaydır (Andreieva, Lyzak, ve diğ., 2020; Andreieva, Yana Petrovska, ve diğ., 2020; Petrovska ve diğ., 2020, 2022).

Ticari riboflavin gıda, yem ve ilaç endüstrilerinde kullanılmaktadır. Gıda endüstrisinde bebek mamalarında, soslarda, işlenmiş peynirlerde, meyveli içeceklerde, vitamin yönünden zengin süt ürünlerinde ve bazı enerji içeceklerinde gıda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Tıpta ise multivitamin karışımlarının bileşeni olarak ve bazı hastalıkların tedavisinde ilaç olarak kullanılmaktadır (Ruchala ve diğ., 2022; You ve diğ., 2021).

Tablo 1. Mayalardan elde edilen pigmentler, özellikleri ve potansiyel uygulamaları.

Table 1. Pigments obtained from yeasts, their properties and potential applications.

Pigment	Maya türü	Renk	Özellikler	Uygulamalar	Referans
β-karoten	<i>Rhodotorula glutinis</i> , <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> , <i>Sporidiobolus pararoseus</i> , <i>Phaffia rhodozyma</i> , <i>Rhodospiridium torulooides</i> , <i>Sporidiobolus salmonicolor</i>	Sarı Kırmızı Turuncu	Antioksidan, antikanser etki Provitamin A aktivitesi	Gıda ve ilaç endüstrisi	Behera ve diğ., 2021; Igreja ve diğ., 2021; Wang ve diğ., 2021
Astaksantin	<i>Xanthophyllomyces dendrorhous</i>	Kırmızı	Antidiyabet, antioksidan, antikanser etki, güneş ışınlarından koruma	Besin takviyesi ilaç endüstrisi, Su ürünleri yetiştiriciliği	Behera ve diğ., 2021; Libkind ve diğ., 2018; Mussagy, Khan, ve diğ., 2022; Vargas- Sinisterra & Ramírez- Castrillón, 2020
Torulen	<i>Sporidiobolu sp.</i> <i>Rhodotorula sp.</i>	Turuncu Turuncu- kırmızı	Antimikrobiyal, antikanser, antioksidatif etki Provitamin A aktivitesi	Gıda ve yem endüstrisi	Du ve diğ., 2017; Kot ve diğ., 2018; Sinha ve diğ., 2023; Wei ve diğ., 2020
Torularhodin	<i>Rhodotorula mucilaginosa</i> <i>Sporobolomyces ruberrimus</i>	Koyu pembe Turuncu- kırmızı	Antioksidan, antikanser ve antimikrobiyal etki	Gıda, yem, kozmetik, ilaç endüstrisi	Bao ve diğ., 2019; Liu ve diğ., 2019; Mussagy, Gonzalez- Miquel, ve diğ., 2022; Ungureanu ve diğ., 2016; W. Zhang ve diğ., 2020
Kantaksantin	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Kırmızı- turuncu	Antioksidan etki	Gıda ve yem endüstrisi	Chen ve diğ., 2022; Rebelo ve diğ., 2020
Riboflavin	<i>Candida famata</i>	Sarı	Antitümör aktivitesini artırır, cilt hastalıkları büyüme geriliği ve sinir sistemindeki dejeneratif değişikliklere karşı etki gösterir	Gıda boyası ilaç ve yem endüstrisi	Ruchala ve diğ., 2022; You ve diğ., 2021
γ-karoten	<i>Rhodotorula glutinis</i>	Turuncu- kırmızı	Provitamin A aktivitesi	Gıda, nutrikozmetik, nutrasötik ve yem endüstrisi	Mata-Gómez ve diğ., 2023
Melanin	<i>Hortaea werneckii</i> <i>Cryptococcus neoformans</i> , <i>Yarrowia lipolytica</i>	Kahverengi Siyah	Antimikrobiyal, antiviral, antitümör, antioksidan etki UV radyasyonlarından koruma	Kozmetik ve ilaç endüstrisi	Q. Chen ve diğ., 2023; El-Naggar & Saber, 2022; Elsayis ve diğ., 2022

3.3 Melanin

Melanin, fenolik veya indolik bileşiklerin oksidasyonundan ve ara fenollerin ve bunlardan elde edilen kinonların polimerizasyonundan türetilen heterojen bir polimerdir. Genellikle proteinler veya karbonhidratlarla kompleksler halinde bulunur. Kahverengiden siyaha değişen koyu renklerde karakterize edilebilir (Avilla Barretto ve diğ., 2020; Elsayis ve diğ., 2022; Tran-Ly ve diğ., 2020). Kimyasal yapısına göre eumelanin, pyomelanin, feomelanin, nöromelanin ve allomelanin olarak sınıflandırılabilir (Choi, 2021). Hayvanlarda, bitkilerde ve mikroorganizmalarda yaygın olarak bulunur (R. Liu ve diğ., 2022). Bununla birlikte mevsimsel büyüme kısıtlamalarının olmaması ve çevre dostu olması sebebiyle mikrobiyal melanin değerli bir doğal pigment kaynağıdır (Tran-Ly ve diğ., 2020).

Melanin antimikrobiyal, antiviral, antitümör, antioksidan ve antikanser etkiye sahiptir. Yararlı biyolojik aktiviteleri nedeniyle gıda endüstrisinde gıda boyası ve besin takviyesi olarak kullanılmaktadır. (Behera ve diğ., 2021; El-Naggar & Saber, 2022). Ayrıca, görünür ışık ve ultraviyole radyasyondan X-ışınlarına kadar uzanan geniş spektrumlu elektromanyetik radyasyonu absorbe etme kapasitesine sahiptir. Bu sebeple kozmetik ve farmasötik endüstrilerinde büyük ilgi uyandırmıştır (Elsayis ve diğ., 2022; Saleh ve diğ., 2018). Ticari olarak yaşlanma karşıtı ve güneş kremi gibi fotokoruyucu bazı kremlerde ve göz koruyucu olarak optik lenslerde kullanılmaktadır (El-Naggar & Saber, 2022; Rao ve diğ., 2021). Ek olarak melaninler nanoparçacıkların üretimi, enerji depolama cihazları ve çevresel sensörlerin tasarlanmasında da kullanılmaktadır (Oh ve diğ., 2020). *Cryptococcus neoformans*, *Yarrowia lipolytica*, *Hortaea werneckii* melanin üreten mayalardır (El-Naggar & Saber, 2022).

4. Pigment Stabilitesi

Mikrobiyal pigmentler ışık, pH, UV, sıcaklık, gıda matrisi, oksijen ve ısı gibi çevresel faktörlere karşı hassastırlar. Pigmentlerin endüstriyel uygulanabilirliği açısından ortam koşullarına karşı stabil olmaları oldukça önemlidir (Rana ve diğ., 2021; Rather ve diğ., 2023). Mayalardan elde edilen pigmentlerin ışık, sıcaklık, pH ve gıda matrisi gibi faktörlere karşı stabilitesini inceleyen az sayıda çalışma mevcuttur. Jeevaratnam & Latha, (2010) *Rhodotorula glutinis* DFR PDY suşundan β -karoten, torulen ve torularhodin elde etmişlerdir. Çalışmanın bir sonraki adımında elde ettikleri bu pigmentlerin 30 günlük depolama boyunca farklı sıcaklıklarda (4, 27-34, 60 °C), aydınlık ve karanlık ortamlarda ve farklı bitkisel yağlarda (yer fıstığı yağı, ayçiçek yağı, susam yağında, hurma yağı ve hindistancevizi yağı) stabilitesini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda stabilitenin 60 °C'de 4 °C ve oda sıcaklığına (27-34 °C) kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Pigmentlerin depolama sırasında ışığa maruz kaldıklarında daha az kararlı iken, karanlıkta depolandıklarında daha kararlı oldukları saptanmıştır. Ayrıca susam yağında daha kararlı oldukları belirlenmiş, bunu yer fıstığı yağı, ayçiçek yağı, hurma yağı ve hindistan cevizi yağı izlemiştir. Mayalardan elde edilen pigmentlerin stabilitesini inceleyen başka bir çalışmada *Rhodospiridium sp.* tarafından üretilen β -karotenin farklı sıcaklıklardaki (20-80 °C) ısı stabilitesi incelenmiştir. 40 °C'de bir miktar renk değişimi gözlenirken 60 °C'de renk değişiminin önemli derecede arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte 80 °C'de

β -karotenin %80'inin kaldığı bildirilmiştir (Kim ve diğ., 2010). Başka bir çalışmada B. Kaur & D. Chakraborty, (2009) *Rhodotorula rubra* MTCC 1446 suşundan ekstrakte ettikleri pigmentin pH (5-7) ve ısıya (70-100 °C) karşı stabilitesini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda sıcaklık arttıkça pigmentin optik yoğunluğunun azaldığı saptanmıştır. Bu ekstrakte edilen pigmentin ısıya karşı hassas olduğunu göstermektedir. Ayrıca, pigmentin nötr durumda asidik duruma göre daha kararlı olduğu belirlenmiştir. Manimala & Murugesan, (2018) çalışmalarında *Sporobolomyces sp.*'den elde ettikleri pigmentlerin (β -karoten, torulen ve torularhodin) çeşitli gıda ürünlerindeki (dondurma, Hint sütlü dondurma, patlamış mısır, badem sütü ve yoğurt) stabilitesini incelemişlerdir. Sonuçta maya pigmentlerinin gıda ürünlerine uygulanabilir olduğu bildirilmiştir.

Doğal pigmentleri stabilize etmek ve çözünürlüğünü iyileştirmek için mikrokapsülasyon, nanoemülsiyon ve nanoformülasyonlar gibi stratejiler önerilmektedir. Bu sayede daha uzun raf ömrüne ve daha yüksek pazar değerine sahip doğal pigmentlerin elde edilebileceği bildirilmiştir (Jurić ve diğ., 2022; Rana ve diğ., 2021; Rather ve diğ., 2023). Bu yöntemler maya pigmentlerinin stabilitesini arttırmak içinde kullanılabilir ancak, bunun için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

5. Sonuç

Pigmentler, içine konduğu maddeyi yapısını değiştirmeden renklendiren boyar maddelerdir. Sentetik olarak ya da doğal kaynaklardan elde edilebilirler. Endüstride tekstil, gıda ve kozmetik gibi birçok alanda kullanılırlar. Doğal pigmentlerin antibiyotik, antikanser, antidiyabetik ve antioksidan etkileri sebebiyle eczacılık ve tıp alanlarında da kullanımları mevcuttur.

Sentetik pigmentler laboratuvar koşullarında dış etkilere uzak bir şekilde üretilmelerini ve doğada kolayca bulunamayan bazı renklerin eldesini sağlamaları sebebiyle yıllardır endüstriyel üretimde kullanılmaktadır. Ancak, son zamanlarda yapılan çalışmalar sentetik pigmentlerin insanlar üzerinde ciddi sağlık sorunlarına sebep olabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, biyoçözünür olmamaları sebebiyle çevre üzerinde de çeşitli zararlara sebep olmaktadır. Bu sebeple güvenli, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen doğal pigmentlere olan talep her geçen gün artmaktadır.

Hızlı ve kolay çoğalması, toksin oluşturmaması, çeşitli ucuz substrat kaynaklarına kolay uyumu nedeniyle mayalardan elde edilen pigmentler umut verici bir gelecek vaat etmektedir. Karbon, azot ve mineral madde miktarı, pH, sıcaklık, inkübasyon süresi, çalkalama hızı gibi fermentasyonu, dolayısıyla pigment üretimini, verimini ve kalitesini etkileyen faktörler için optimum koşulların belirlenmesi ve tarımsal-endüstriyel atıklar gibi ucuz substrat kaynaklarının kullanımıyla düşük maliyetli, yüksek verimli kaliteli ve ekolojik pigmentler üretilir.

Maya pigmentleriyle ilgili yapılan çalışmalar doğal pigment kaynağı olarak maya pigmentlerine olan ilgiyi arttırmış olsa da zararlı etkileriyle sentetik pigmentler endüstriyel kullanımda yerini korumaktadır. Endüstriyel kullanımın artırılması için büyük ölçekte, verimli, daha stabil ve daha çeşitli renk üretebilen maya kaynaklarının keşfedilmesi, suşların

iyileştirilmesi ve ticarileştirilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

6. Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

7. Kaynaklar

Andreieva, Y., Lyzak, O., Liu, W., Kang, Y., Dmytruk, K., & Sibirny, A. (2020). SEF1 and VMA1 Genes Regulate Riboflavin Biosynthesis in the Flavinogenic Yeast *Candida famata*. *Cytology and Genetics*, 54(5), 379-385. <https://doi.org/10.3103/S0095452720050023>

Andreieva, Y., Yana Petrovska, Lyzak, Oleksii, Liu, Wen, Kang, Y., Dmytruk, K., & Andriy Sibirny, I. (2020). Role of the regulatory genes SEF1, VMA1 and SFU1 in riboflavin synthesis in the flavinogenic yeast *Candida famata* (*Candida flareri*). <https://doi.org/10.1002/yea.3503>

Avilla Barretto, D., Shyam, & Vootla, K. (2020). Biological activities of melanin pigment extracted from *Bombyx mori* gut-associated yeast *Cryptococcus rajasthanensis* KY627764. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(3), 159. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02924-0>

B Kaur, D. C. H. K., & D Chakraborty, H. K. (2009). Production and stability analysis of yellowish pink pigments from *Rhodotorula rubra* MTCC 1446. *The Internet Journal of Microbiology*, 7(1). <https://doi.org/10.5580/245b>

Bao, R., Gao, N., Lv, J., Ji, C., Liang, H., Li, S., Yu, C., Wang, Z., & Lin, X. (2019). Enhancement of Torularhodin Production in *Rhodospiridium toruloides* by *Agrobacterium tumefaciens*-Mediated Transformation and Culture Condition Optimization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(4), 1156-1164. https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.8B04667/ASSET/IMAGES/LARGE/JF-2018-04667H_0004.JPEG

Behera, H. T., Mojumdar, A., Nivedita, S., & Ray, L. (2021). Microbial Pigments: Secondary Metabolites with Multifaceted Roles. In *Microbial Polymers* (ss. 631-654). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0045-6_25

Bonadio, M. de P., Freita, L. A. de, & Mutton, M. J. R. (2018). Carotenoid production in sugarcane juice and synthetic media supplemented with nutrients by *Rhodotorula rubra* I02. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(4), 872-878. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.02.010>

Cerda, A., Artola, A., Barrena, R., Font, X., Gea, T., & Sánchez, A. (2019). Innovative Production of Bioproducts From Organic Waste Through Solid-State Fermentation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 63. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2019.00063/BIBTEX>

Chen, M., Li, M., Ye, L., & Yu, H. (2022). Construction of Canthaxanthin-Producing Yeast by Combining Spatiotemporal Regulation and Pleiotropic Drug Resistance Engineering. *ACS Synthetic Biology*, 11(1), 325-333. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00437>

Chen, Q., Liu, F., Wu, Y., He, Y., Kong, Q., & Sang, H. (2023). Fungal melanin-induced metabolic reprogramming in macrophages is crucial for inflammation. *Journal of Medical Mycology*, 33(2), 101359. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2023.101359>

Choi, K. Y. (2021). Bioprocess of Microbial Melanin Production and Isolation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.765110>

Chreptowicz, K., Mierzejewska, J., Tkáčová, J., Mlynek, M., & Čertík, M. (2019). Carotenoid-Producing Yeasts: Identification and Characteristics of Environmental Isolates with a Valuable Extracellular Enzymatic Activity. *Microorganisms*, 7(12), 653. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7120653>

Dikel, Ç. (2021). Astaksantin'in kimyası ve uygulamaları üzerine bir inceleme A review of astaxantine's chemistry and its applications. *Journal of Advances in VetBio Science and Techniques*, 6(3), 318-330. <https://doi.org/10.31797/vetbio>

Du, C., Guo, Y., Cheng, Y., Han, M., Zhang, W., & Qian, H. (2017). Anti-cancer effects of torulene, isolated from *Sporidiobolus pararoseus*, on human prostate cancer LNCaP and PC-3 cells via a mitochondrial signal pathway and the down-regulation of AR expression. *RSC Advances*, 7(5), 2466-2474. <https://doi.org/10.1039/C6RA24721K>

El-Naggar, N. E. A., & Saber, W. I. A. (2022). Natural Melanin: Current Trends, and Future Approaches, with Especial Reference to Microbial Source. *Polymers*, 14(7), 1339. <https://doi.org/10.3390/polym14071339>

Elsayis, A., Hassan, S. W. M., Ghanem, K. M., & Khairy, H. (2022). Optimization of melanin pigment production from the halotolerant black yeast *Hortaea werneckii* AS1 isolated from solar salter in Alexandria. *BMC Microbiology*, 22(1), 92. <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02505-1>

Eryilmaz, E. B., Dursun, D., & Dalgiç, A. C. (2016). Multiple optimization and statistical evaluation of astaxanthin production utilizing olive pomace. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 7, 224-227. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2016.06.012>

Ghilardi, C., Sanmartin Negrete, P., Carelli, A. A., & Borroni, V. (2020). Evaluation of olive mill waste as substrate for carotenoid production by *Rhodotorula mucilaginosa*. *Bioresources and Bioprocessing*, 7(1), 52. <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00341-7>

Gong, Z., Zhang, S., & Liu, J. (2023). Recent Advances in Chitin Biosynthesis Associated with the Morphology and Secondary Metabolite Synthesis of Filamentous Fungi in Submerged Fermentation. *Journal of Fungi*, 9(2), 205. <https://doi.org/10.3390/JOF9020205/S1>

Grewal, J., Wołęciewicz, M., Pyter, W., Joshi, N., Drewniak, L., & Pranaw, K. (2022). Colorful Treasure From Agro-Industrial Wastes: A Sustainable Chassis for Microbial Pigment Production. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.832918>

- Igreja, W. S., Maia, F. de A., Lopes, A. S., & Chisté, R. C. (2021). Biotechnological Production of Carotenoids Using Low Cost-Substrates Is Influenced by Cultivation Parameters: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 8819. <https://doi.org/10.3390/ijms22168819>
- Jeevaratnam, K., & Latha, B. V. (2010). Purification and Characterization of the Pigments from *Rhodotorula glutinis* DFR-PDY Isolated from Natural Source. İçinde *Global Journal of Biotechnology & Biochemistry* (C. 5, Sayı 3).
- Jurić, S., Jurić, M., Król-Kilińska, Ž., Vlahoviček-Kahlina, K., Vinceković, M., Dragović-Uzelac, V., & Donsì, F. (2022). Sources, stability, encapsulation and application of natural pigments in foods. *Food Reviews International*, 38(8), 1735-1790. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1837862>
- Kanamoto, H., Nakamura, K., & Misawa, N. (2021). *Carotenoid Production in Oleaginous Yeasts* (ss. 153-163). https://doi.org/10.1007/978-981-15-7360-6_12
- Kim, J. K., Kim, J. I., Lee, N. K., Hahm, Y. T., Baik, M. Y., & Kim, B. Y. (2010). Extraction of β -carotene produced from yeast *Rhodospiridium* sp. and its heat stability. *Food Science and Biotechnology*, 19(1), 263-266. <https://doi.org/10.1007/s10068-010-0038-6>
- Kostovová, I., Dana Byrtusová, Raptá, M., Babák, Vladimír, & Márová, I. (2021). The variability of carotenoid pigments and fatty acids produced by some yeasts within Sporidiobolales and Cystofilobasidiales. *Chemical Papers*, 75, 3353-3362. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01567-1>
- Kot, A. M., Błażej, S., Gientka, I., Kieliszek, M., & Bryś, J. (2018). Torulene and torularhodin: "new" fungal carotenoids for industry? *Microbial Cell Factories*, 17(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0893-z>
- Kot, A. M., Błażej, S., Kieliszek, M., Gientka, I., Piwowarek, K., & Brzezińska, R. (2020). Production of lipids and carotenoids by *Rhodotorula gracilis* ATCC 10788 yeast in a bioreactor using low-cost wastes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 26, 101634. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2020.101634>
- Lai, J. X., Chen, X., Bu, J., Hu, B. B., & Zhu, M. J. (2022). Direct production of astaxanthin from food waste by *Phaffia rhodozyma*. *Process Biochemistry*, 113, 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.01.003>
- Libkind, D., Moliné, M., & Colabella, F. (2018). *Isolation and Selection of New Astaxanthin-Producing Strains of Phaffia rhodozyma* (ss. 297-310). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8742-9_18
- Liu, C., Cui, Y., Pi, F., Guo, Y., Cheng, Y., & Qian, H. (2019). Torularhodin Ameliorates Oxidative Activity in Vitro and d-Galactose-Induced Liver Injury via the Nrf2/HO-1 Signaling Pathway in Vivo. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(36), 10059-10068. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b03847>
- Liu, R., Meng, X., Mo, C., Wei, X., & Ma, A. (2022). Melanin of fungi: from classification to application. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(12), 228. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03415-0>
- Liu, S., Hu, W., Wang, Z., & Chen, T. (2020). Production of riboflavin and related cofactors by biotechnological processes. *Microbial Cell Factories*, 19(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01302-7>
- Lopes, F. C., & Ligabue-Braun, R. (2021). Agro-Industrial Residues: Eco-Friendly and Inexpensive Substrates for Microbial Pigments Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 589414. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.589414>
- Machado, W. R. C., Murari, C. S., Duarte, A. L. F., & del Bianchi, V. L. (2022). Optimization of agro-industrial coproducts (molasses and cassava wastewater) for the simultaneous production of lipids and carotenoids by *Rhodotorula mucilaginosa*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 42, 102342. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102342>
- Machado, W. R. C., Silva, L. G. da, Vanzela, E. S. L., & del Bianchi, V. L. (2019). Evaluation of the process conditions for the production of microbial carotenoids by the recently isolated *Rhodotorula mucilaginosa* URM 7409. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.26718>
- Manimala, M., & Murugesan, R. (2018). Characterization of carotenoid pigment production from yeast *Sporobolomyces* sp. and their application in food products. ~ 2818 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 1, 2818-2821.
- Maoka, T. (2020). Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of Natural Medicines*, 74(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x>
- Mapelli-Brahm, P., Barba, F. J., Remize, F., Garcia, C., Fessard, A., Mousavi Khaneghah, A., Sant'Ana, A. S., Lorenzo, J. M., Montesano, D., & Meléndez-Martínez, A. J. (2020). The impact of fermentation processes on the production, retention and bioavailability of carotenoids: An overview. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 389-401. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.013>
- Martí-Quijal, F. J., Khubber, S., Remize, F., Tomasevic, I., Roselló-Soto, E., & Barba, F. J. (2021). Obtaining Antioxidants and Natural Preservatives from Food By-Products through Fermentation: A Review. *Fermentation* 2021, Vol. 7, Page 106, 7(3), 106. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION7030106>
- Mata-Gómez, L. C., Mapelli-Brahm, P., Meléndez-Martínez, A. J., Méndez-Zavala, A., Morales-Oyervides, L., & Montañez, J. (2023). Microbial Carotenoid Synthesis Optimization in Goat Cheese Whey Using the Robust Taguchi Method: A Sustainable Approach to Help Tackle Vitamin A Deficiency. *Foods*, 12(3), 658. <https://doi.org/10.3390/foods12030658>
- Mıdık, F. (2021). *Rhodotorula Cinsine Ait Bazı Maya Türlerinin Beta-Karoten Üretimlerinin İncelenmesi. (Doktora Tezi). YÖK Tez Merkezi (695063).*

- Moreira, M. D., Melo, M. M., Coimbra, J. M., Reis, K. C. dos, Schwan, R. F., & Silva, C. F. (2018). Solid coffee waste as alternative to produce carotenoids with antioxidant and antimicrobial activities. *Waste Management*, *82*, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.017>
- Mumtaz, R., Bashir, S., Numan, M., Shinwari, Z. K., & Ali, M. (2019). Pigments from Soil Bacteria and Their Therapeutic Properties: A Mini Review. *Current Microbiology*, *76*(6), 783-790. <https://doi.org/10.1007/s00284-018-1557-2>
- Mussagy, C. U., Gonzalez-Miquel, M., Santos-Ebinuma, V. C., & Pereira, J. F. B. (2022). Microbial torularhodin – a comprehensive review. *Critical Reviews in Biotechnology*, *1*-19. <https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2041540>
- Mussagy, C. U., Guimarães, A. A. C., Rocha, L. V. F., Winterburn, J., Santos-Ebinuma, V. de C., & Pereira, J. F. B. (2021). Improvement of carotenoids production from *Rhodotorula glutinis* CCT-2186. *Biochemical Engineering Journal*, *165*, 107827. <https://doi.org/10.1016/j.BEJ.2020.107827>
- Mussagy, C. U., Khan, S., & Kot, A. M. (2022). Current developments on the application of microbial carotenoids as an alternative to synthetic pigments. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(25), 6932-6946. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1908222>
- Mussagy, C. U., Winterburn, J., Santos-Ebinuma, V. C., & Pereira, J. F. B. (2019). Production and extraction of carotenoids produced by microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *103*(3), 1095-1114. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9557-5>
- Oh, J. J., Kim, J. Y., Kwon, S. L., Hwang, D. H., Choi, Y. E., & Kim, G. H. (2020). Production and characterization of melanin pigments derived from *Amorphotheca resinae*. *Journal of Microbiology*, *58*(8), 648-656. <https://doi.org/10.1007/s12275-020-0054-z>
- Oiza, N., Moral-Vico, J., Sánchez, A., Oviedo, E. R., & Gea, T. (2022). Solid-State Fermentation from Organic Wastes: A New Generation of Bioproducts. *Processes* *2022*, Vol. *10*, Page 2675, *10*(12), 2675. <https://doi.org/10.3390/PR10122675>
- Paul, D., Kumari, P. K., & Siddiqui, N. (2023). Yeast Carotenoids: Cost-Effective Fermentation Strategies for Health Care Applications. *Fermentation* *2023*, Vol. *9*, Page 147, *9*(2), 147. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION9020147>
- Petrovska, Y., Lyzak, O., Dmytruk, K., & Sibirny, A. (2020). Effect of Gene SFU1 on Riboflavin Synthesis in Flavinogenic Yeast *Candida famata*. *Cytology and Genetics*, *54*(5), 408-412. <https://doi.org/10.3103/S0095452720050060>
- Petrovska, Y., Lyzak, O., Ruchala, J., Dmytruk, K., & Sibirny, A. (2022). Co-Overexpression of RIB1 and RIB6 Increases Riboflavin Production in the Yeast *Candida famata*. *Fermentation*, *8*(4), 141. <https://doi.org/10.3390/fermentation8040141>
- Qi, F., Shen, P., Hu, R., Xue, T., Jiang, X., Qin, L., Chen, Y., & Huang, J. (2020). Carotenoids and lipid production from *Rhodospiridium toruloides* cultured in tea waste hydrolysate. *Biotechnology for Biofuels*, *13*(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01712-0>
- Ramesh, C., Prasastha, V. R., Venkatachalam, M., & Dufossé, L. (2022). Natural Substrates and Culture Conditions to Produce Pigments from Potential Microbes in Submerged Fermentation. *Fermentation*, *8*(9), 460. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090460>
- Rana, B., Bhattacharyya, M., Patni, B., Arya, M., & Joshi, G. K. (2021). The Realm of Microbial Pigments in the Food Color Market. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*, 603892. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.603892>
- Rao, A. S., Deka, S. P., More, S. S., Nair, A., More, V. S., & Ananthjaraju, K. S. (2021). A Comprehensive Review on Different Microbial-Derived Pigments and Their Multipurpose Activities. In *Microbial Polymers* (ss. 479-519). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0045-6_20
- Rapoport, A., Guzhova, I., Bernetti, L., Buzzini, P., Kieliszek, M., & Kot, A. M. (2021). Carotenoids and Some Other Pigments from Fungi and Yeasts. *Metabolites* *2021*, Vol. *11*, Page 92, *11*(2), 92. <https://doi.org/10.3390/METABO11020092>
- Rather, L. J., Mir, S. S., Ganie, S. A., Shahid-ul-Islam, & Li, Q. (2023). Research progress, challenges, and perspectives in microbial pigment production for industrial applications - A review. *Dyes and Pigments*, *210*, 110989. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110989>
- Rekha, R., Nimsi, K. A., Manjusha, K., & Sirajudheen, T. K. (2022). Marine yeast *Rhodotorula paludigena* VA 242 a pigment enhancing feed additive for the Ornamental Fish Koi Carp. *Aquaculture and Fisheries*. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.05.008>
- Ribeiro, J. E. S., Sant'Ana, A. M. da S., Martini, M., Sorce, C., Andreucci, A., Melo, D. J. N. de, & Silva, F. L. H. da. (2019). *Rhodotorula glutinis* cultivation on cassava wastewater for carotenoids and fatty acids generation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *22*, 101419. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101419>
- Ruchala, J., Andreieva, Y. A., Tsyulnyk, A. O., Sobchuk, S. M., Najdecka, A., Wen, L., Kang, Y., Dmytruk, O. V., Dmytruk, K. V., Fedorovych, D. V., & Sibirny, A. A. (2022). Cheese whey supports high riboflavin synthesis by the engineered strains of the flavinogenic yeast *Candida famata*. *Microbial Cell Factories*, *21*(1), 161. <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01888-0>
- Saleh, H., Abdelrazak, A., Elsayed, A., El-Shishtawy, H., & Osman, Y. (2018). Optimizing production of a biopesticide protectant by black yeast. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, *28*(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0078-4>

- Sánchez-Muñoz, S., Mariano-Silva, G., Leite, M. O., Mura, F. B., Verma, M. L., Da Silva, S. S., & Chandel, A. K. (2020). Production of fungal and bacterial pigments and their applications. *Biotechnological Production of Bioactive Compounds*, 327-361. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64323-0.00011-4>
- Sen, T., Barrow, C. J., & Deshmukh, S. K. (2019). Microbial Pigments in the Food Industry—Challenges and the Way Forward. *Frontiers in Nutrition*, 6. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00007>
- Sharma, R., & Ghoshal, G. (2020). Optimization of carotenoids production by *Rhodotorula mucilaginosa* (MTCC-1403) using agro-industrial waste in bioreactor: A statistical approach. *Biotechnology Reports*, 25, e00407. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00407>
- Sinha, S., Chakrabarti, A., Singh, G., Kumar, K. K., Gaur, N. A., Arora, A., Singh, K. N., Singh, S., & Paul, D. (2021). Isolation and identification of carotenoid-producing yeast and evaluation of antimalarial activity of the extracted carotenoid(s) against *P. falciparum*. *Biologia Futura*, 72(3), 325-337. <https://doi.org/10.1007/s42977-021-00081-5>
- Sinha, S., Das, S., Saha, B., Paul, D., & Basu, B. (2023). Anti-microbial, anti-oxidant, and anti-breast cancer properties unraveled in yeast carotenoids produced via cost-effective fermentation technique utilizing waste hydrolysate. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1088477. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.1088477/FULL>
- Tran-Ly, A. N., Reyes, C., Schwarze, F. W. M. R., & Ribera, J. (2020). Microbial production of melanin and its various applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(11), 170. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02941-z>
- Ungureanu, C., Dumitriu, C., Popescu, S., Enculescu, M., Tofan, V., Popescu, M., & Pirvu, C. (2016). Enhancing antimicrobial activity of TiO₂/Ti by torularhodin bioinspired surface modification. *Bioelectrochemistry*, 107, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2015.09.001>
- Vargas-Sinisterra, A. F., & Ramírez-Castrillón, M. (2020). Yeast carotenoids: production and activity as antimicrobial biomolecule. *Archives of Microbiology* 2020 203:3, 203(3), 873-888. <https://doi.org/10.1007/S00203-020-02111-7>
- Villegas-Méndez, M. Á., Aguilar-Machado, D. E., Balagurusamy, N., Montañez, J., & Morales-Oyervides, L. (2019). Agro-industrial wastes for the synthesis of carotenoids by *Xanthophyllomyces dendrorhous*: Mesquite pods-based medium design and optimization. *Biochemical Engineering Journal*, 150, 107260. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107260>
- Vishnupriya, S., Bhavaniramy, S., Baskaran, D., & Karthiayani, A. (2021). Microbial Pigments and Their Application. *Microbial Polymers* (ss. 193-214). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0045-6_9
- Wang, L., Liu, Z., Jiang, H., & Mao, X. (2021). Biotechnology advances in β -carotene production by microorganisms. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 322-332. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.077>
- Watcharawipas, A., & Runguphan, W. (2023). Red yeasts and their carotenogenic enzymes for microbial carotenoid production. *FEMS Yeast Research*, 23. <https://doi.org/10.1093/femsyr/foac063>
- Wei, C., Wu, T., Ao, H., Qian, X., Wang, Z., & Sun, J. (2020). Increased torulene production by the red yeast, *Sporidiobolus pararoseus*, using citrus juice. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 50(1), 66-73. <https://doi.org/10.1080/10826068.2019.1663533>
- Yoo, A. Y., Alnaeeli, M., & Park, J. K. (2016). Production control and characterization of antibacterial carotenoids from the yeast *Rhodotorula mucilaginosa* AY-01. *Process Biochemistry*, 51(4), 463-473. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.01.008>
- You, J., Pan, X., Yang, C., Du, Y., Osire, T., Yang, T., Zhang, X., Xu, M., Xu, G., & Rao, Z. (2021). Microbial production of riboflavin: Biotechnological advances and perspectives. *Metabolic Engineering*, 68, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.08.009>
- Zhang, W., Hua, H., Guo, Y., Cheng, Y., Pi, F., Yao, W., Xie, Y., & Qian, H. (2020). Torularhodin from *Sporidiobolus pararoseus* Attenuates d-galactose/AICl₃-Induced Cognitive Impairment, Oxidative Stress, and Neuroinflammation via the Nrf2/NF- κ B Pathway. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(24), 6604-6614. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01892>
- Zhang, Z., Zhang, X., & Tan, T. (2014). Lipid and carotenoid production by *Rhodotorula glutinis* under irradiation/high-temperature and dark/low-temperature cultivation. *Bioresource Technology*, 157, 149-153. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.01.039>

Meyve-sebze işleme atıklarından biyobozunur ambalaj materyali üretimi

Beyzanur YAZICI , Gulay OZKAN , Esra CAPANOGLU 

İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye

Özet: Gıda israfı ve plastik ambalaj kullanımı günümüzün en önemli endişe kaynaklarından. Biyobozunur polimerlerden ambalaj üretimi petrol bazlı geleneksel plastiklerin sebep olduğu çevresel sorunlara potansiyel bir çözüm olarak görülmektedir. Son yıllarda plastik ambalajların kullanımının azaltılmasına yönelik duyarlılığın artmasıyla beraber, meyve ve sebze işleme atıklarının potansiyel ambalaj materyali olarak kullanılıp kullanılmayacağı konusundaki çalışmalar hızla artmıştır. Meyve ve sebze bazlı biyobozunur ambalaj malzemesi üretimi; ambalajların toksik olmaması, doğada kendiliğinden bozunabilmesi, petrol bazlı plastik ambalajların yerini alabilme potansiyeli sayesinde bilimsel araştırmalara konu olmuştur. Meyve ve sebze işleme atıklarından elde edilen filmlerin özelliklerinin plastik ambalajlar yerine kullanılabilir şekilde geliştirilmesiyle hem plastik tüketiminin getirdiği çevresel olumsuzluklar azaltılabilecek hem de meyve-sebze işleme yan ürünleri değerlendirilmiş olacaktır. Bu derleme makalede gıdaların ambalajlanmasında petrol bazlı plastiklerin kullanımı, geleneksel plastiklerin yerini alabileceği araştırılan biyoplastiklerin kaynakları, meyve-sebze işleme endüstrisinde ortaya çıkan yan ürünlerin biyobozunur filmler olarak değerlendirilmesi, elde edilen ambalajların özellikleri ve ambalaj olarak kullanıldığı gıdalar üzerindeki etkileri hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gıda atıkları, gıda ambalajlama, biyobozunur ambalaj, plastik.

Production of biodegradable packaging material from fruit and vegetable processing waste

Abstract: Food waste and plastic usage are some of the most important concerns today. Packages that are produced from biodegradable polymers are seen a potential solution for environmental problems that occur from petroleum-based conventional plastics. In recent years, with the increasing sensitivity to reduce the usage of plastic packaging, studies on the potential of fruit and vegetable processing wastes to be used as packaging materials have increased rapidly. The production of fruit and vegetable-based biodegradable packaging materials has been the subject of scientific research thanks to its non-toxicity, self-degradation in nature, and its potential to replace petroleum-based plastic packaging. By improving the properties of films obtained from fruit and vegetable processing wastes, they can be used as alternative to plastic packaging. This would not only reduce the negative effects on environment associated with plastic consumption but also contribute to the utilization of by-products obtained from fruit and vegetable processing. In this review, studies on the use of petroleum-based plastics in the packaging of foods, the sources of bioplastics that are investigated to replace conventional plastics, the evaluation of by-products in the fruit-vegetable processing industry as biodegradable films, the properties of the obtained packaging material and their effects on the foods used as packaging material are mentioned.

Keywords: Food waste, food packaging, biodegradable packaging, plastic.

Derleme

Yazışma yazarı: Esra CAPANOGLU E-mail: capanogl@itu.edu.tr

Referans: Yazıcı B., Ozkan, G., & Capanoglu, E. (2023). Meyve-sebze işleme atıklarından biyobozunur ambalaj materyali üretimi. *ITU Journal of Food Science and Technology*, 1(1), 39-44.

Makale Gönderimi: 18 Temmuz 2023

Online Kabul: 17 Eylül 2023

Online Basım: 30 Eylül 2023

1. Giriş

Gıda endüstrisinde gıdaların korunması ve etiketlenmesi için plastik, kağıt, cam ve metal gibi farklı ambalaj materyalleri kullanılmaktadır. Bir gıda ürünü için ambalaj seçiminde dikkat edilmesi gereken en belirgin unsur gıda güvenliğidir. Gıda güvenliğinin sağlanabilmesi için ambalaj seçiminde gıdanın fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alınmalıdır. Ambalaj malzemesi mekanik olarak dayanıklı ve optimum buhar geçirgenliğine sahip olmalıdır. Gıdanın tedarik zinciri boyunca zarar görmeden ve kalitesinin korunarak markete ve tüketiciye ulaşabilmesi, böylelikle tüketiciye güvenli gıda sağlayarak gıda kaynaklı hastalıkların engellenmesi büyük önem taşımaktadır. Malzemenin maliyeti, sürdürülebilirliği, müşterinin beklentileri ve kolay bulunabilirliği de ambalaj materyali seçiminde dikkat edilmesi gereken diğer hususlardandır. Son yıllarda sürdürülebilir kaynaklardan üretilen çevre dostu ambalajlara duyulan ilginin artmasıyla birlikte biyobozunur ambalaj üretimi konusunda yapılan çalışmalar artmıştır. Petrol bazlı geleneksel plastikler yerine biyolojik olarak parçalanabilen ambalaj malzemelerinin kullanılması, plastik ambalajların kullanımı sonucu oluşan çevre kirliliğinin azaltılması için önemli bir adım olarak görülmektedir. Biyobozunur ambalajlar sayesinde ömrünü tamamlayan ambalajların, çevreye zarar vermeden kendiliğinden doğada çözünerek ortadan kaybolacağı öngörülmektedir. Meyve ve sebze işleme atıkları, yapısında bulundukları polisakkaritler sebebiyle biyobozunur ambalajların üretiminde kullanılabilir potansiyel malzemelerdir (Hanani ve diğ., 2014).

Ambalaj sektöründe en çok kullanılan beş malzeme kağıt, plastik, metal, cam ve ahşaptır. Petrol ya da petrol türevlerinden üretilen plastikler düşük maliyet, dayanıklılık, hafiflik, geri dönüştürülebilirlik, kolay şekil alabilme, gaz ve su bariyeri özellikleri ve yeniden kullanılabilirliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Agarwal ve diğ., 2023).

Plastik çeşitleri arasında gıda ambalaj materyali olarak en yaygın kullanılanları; ucuz, kolay işlenebilir ve nem bariyerinin güçlü olması nedeniyle polietilen (PE) ve polipropilen (PP)'dir. Yüksek ısı direnci ve mekanik mukavemete sahip olan, iyi bir gaz ve nem bariyeri olan polietilen tereftalat (PET) da gıda ambalajlarında sıklıkla kullanılmaktadır (Hong ve diğ., 2021). Tüm bu avantajlarına karşın plastiklerin biyolojik olarak parçalanması çok uzun yıllar sürmekte, birçoğu ise parçalanmamaktadır.

Plastik atıklarının artışı ve son yıllarda insanların plastik atıklar konusunda bilinçlenmesiyle birlikte plastik ambalaj kullanımı azalmıştır. Ayrıca firmaların sürdürülebilirlik kapsamında başlattığı projeler ve biyobozunur ambalaj üretimi konusundaki çalışmalar artmıştır. Son yıllarda artan petrol fiyatları ve aşırı plastik kullanımına bağlı ortaya çıkan plastik atıkların çevresel etkileri sebebiyle biyobazlı plastik üretimi hızla gelişmektedir. Karbondioksit emisyonları ve dünya çapındaki ekonomik sıkıntıları azaltmak adına biyobazlı plastik üretimi teşviki de artmıştır (Moshood ve diğ., 2022).

Biyobozunur terimi, ürünün ömrü son erdiğinde yapılmış olduğu materyalin doğal olarak biyolojik şekilde bozunabileceğini ifade etmektedir. Biyobozunur malzemeler doğal yenilenebilir kaynaklardan ya da fosil bazlı olabilmektedir. Biyobozunur ambalajlar mantar, bakteri ve maya gibi mikroorganizmalar tarafından doğada bulunan birincil elementlere parçalanabilen ve çevreye zararlı bir etkisi bulunmayan, CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunan ambalajlardır (Narancic ve diğ., 2020).

Bu çalışma kapsamında; gıdaların ambalajlanmasında petrol bazlı plastiklerin kullanımı, geleneksel plastiklerin yerini alabileceği araştırılan biyoplastik kaynakları, meyve-sebze

işleme endüstrisinde ortaya çıkan yan ürünlerin biyobozunur filmler olarak değerlendirilmesi, elde edilen ambalajların özellikleri ve ambalaj olarak kullanıldığı gıdalar üzerindeki etkileri hakkında yapılan çalışmaların derlenmesi amaçlanmıştır.

2. Gıda Sektöründe Meyve ve Sebze İşleme Atıkları

Meyve ve sebze işleme sektörü gıda endüstrisinde önemli miktarda kayba sahip ve en çok atık üreten sektörlerden biridir. Avrupa Birliğinde yıllık gıda atığı 100 milyon ton civarındadır ve bunun yaklaşık %30'luk kısmı tarımsal gıda tedarik zincirinden kaynaklanmaktadır. Dünya nüfusunun artmasıyla bağlantılı olarak hızla artan gıda talebi doğrultusunda yıllık gıda atığı miktarının 2050 yılına kadar 200 milyon tonun üzerine çıkabileceği tahmin edilmektedir (Gustavsson ve diğ., 2013; Scialabba, 2013).

Meyve işleme atıkları; turuncgillerin kabuk ve tohum kısımları, elma ve armutta kabuk ve posa, mango ve guavada tohum ve kabuk kısımları, konserve vb. fabrikalarından fazla olgun ve lekeli meyveler olarak örneklendirilebilir. Sebze işleme atıkları ise genellikle sebzelerin konservelenmesi ve dondurularak işlenmesi sırasında ortaya çıkan kabuk kısımlarından oluşmaktadır. Meyve suyunun işlenmesi sırasında oluşan kabuk, çekirdek, sap gibi kısımlardan oluşan katı atıklar prina olarak adlandırılmaktadır. Farklı meyvelerden elde edilen prina miktarı kütlece %20 ile %50 arasında değişmektedir. Son yıllarda sürdürülebilir tarımsal üretime ve tarımsal atıkların yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesine yönelimin artmasıyla gıda işleme atıklarından doğal biyopolimerlerin eldesi ve ambalaj malzemesi olarak kullanılmasıyla ilgili çalışmalar da artmıştır. Öte yandan, biyolojik olarak parçalanabilen filmler, sürdürülebilir ambalajlama ve raf ömrünün artırılması için iyi bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple, meyve ve sebze işleme atıklarının, üretim maliyetini ve çevresel etkiyi azaltmak ve gıda işleme atıklarına değer katmak amacıyla biyobozunur filmlerde kullanımı oldukça önemli bir alternatif sunmaktadır (Ersus ve diğ., 2020).

Yıllık meyve ve sebze atığı oranı yumru kökler, baklagiller ve meyveler için %40-50; tahıllar için %30 ve yağlı meyveler için %20 civarındadır. Bu kayıpların büyük çoğunluğu meyve ve sebzelerin işleme ve hasat sonrası proseslerinden kaynaklanmaktadır. Meyve işleme atıklarının büyük bir kısmını yaklaşık %70 ile meyve suyu işleme ve geri kalan kısmını meyve salataları ve vakumlanmış-dilimlenmiş taze sebzeler oluşturmaktadır. Meyve suyu üretiminde yüksek miktarda meyve kullanılması sebebiyle toplam meyve-sebze atığının %80'inden fazlasını meyve atıkları oluşturmaktadır (de Brito Nogueira ve diğ., 2020). Şarap üretiminde %20-30, meyve suyu üretiminde %30-50, bitkisel yağ üretiminde %40-70 ve şeker pancarından şeker üretiminde %85 atık ve yan ürün oluşmaktadır (Omre ve Shikhanji, 2018).

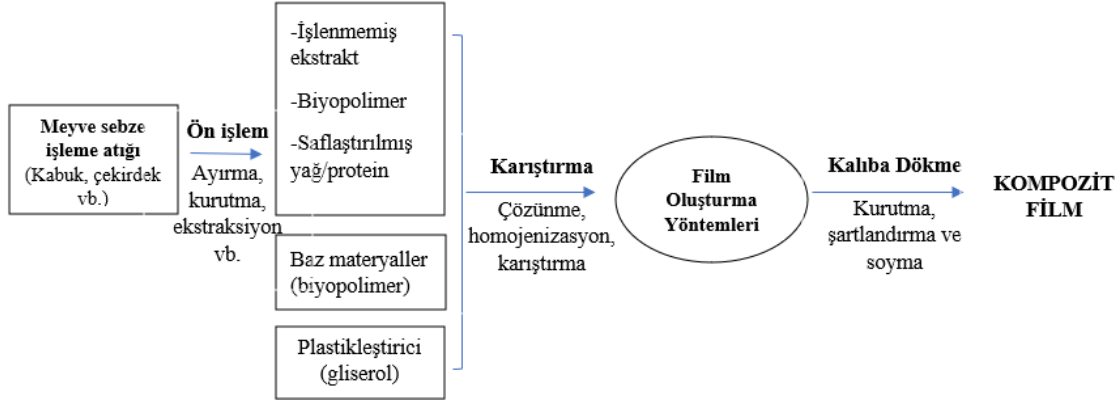
3. Meyve ve Sebze İşleme Atıklarından Biyobozunur Ambalaj Filmi Üretimi

Meyve ve sebze atıklarından biyobozunur ambalaj filmi üretimi konusunda yapılan çalışmalar kabuklarında yüksek miktarda nişasta ve selüloz bulunduran meyve ve sebzeler üzerinde yoğunlaşmıştır. Çalışmaların en yoğun olduğu yan ürünler; portakal, mango, nar, muz ve patates olduğundan bu bölümde bu meyve ve sebzeler ele alınacaktır. Farklı çalışmalarda ambalaj materyali olarak kullanılan atık kaynağı, ambalaj materyalinin kullanıldığı gıda ürünü ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Meyve ve sebze bazlı ambalaj filmi üretimiyle ilgili çalışmalar genelde laboratuvar ölçeğinde yapılmıştır. Meyve ve sebze işleme

atıklarının kullanılmasıyla elde edilen biyobozunur filmin üretim aşamaları Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Meyve-sebze işleme atıklarından elde edilen ambalajların gıda ürünlerinde kullanılması ve elde edilen sonuçlar.
Table 1. The usage of packaging materials obtained from fruit and vegetable processing waste in food products and the results.

Ambalaj materyali olarak kullanılan atık kaynağı	Ambalaj materyalinin uygulandığı gıda ürünü	Elde edilen sonuç	Kaynak
Portakal kabuğu	Kuru üzüm	Ticari streç filmlere göre oksijen bariyeri yüksek, su buharı bariyeri düşüktür. İki hafta sonunda toprakta %78-99,96 bozunma oranına sahiptir.	Günkaya ve diğ., 2016.
Patates kabuğu ve limon kabuğu	Ekmek	Nem kabı ve su buharı geçirgenliği ve ürünün sertliğinde azalma; <i>E. coli</i> ’ye karşı antimikrobiyal etki gözlemlenmiştir.	Borah ve diğ., 2016
Elma posası	Ispanak	Yeşil renk, askorbik asit ve klorofil miktarında azalma gözlemlenmiştir. MAP ile ambalajlanan kontrol grubuna göre duyuasal açıdan kabul edilebilirliği yüksek ve mikrobiyal olarak 17 gün tüketime uygun olduğu belirlenmiştir.	Yalçın Melikoğlu, 2020.
Zencefil posası	Kıyma	Duyusal özelliklerini etkilemediği, <i>E. coli</i> ’ye karşı antibakteriyel etki gösterdiği ve oksijen bariyerinin iyi olduğu sonucuna varılmıştır.	Rahmasari, 2021.
Zeytin posası	Ceviz	31 gün boyunca kuruyemişlerin oksidasyonuna karşı koruyucu etki göstermiştir.	de Moraes Crizel ve diğ., 2018
Mango kabuğu	Tavuk kıyması	Tavuk kıymasının raf ömrünün 10 gün uzadığı gözlemlenmiştir.	Kanatt ve Chawla, 2018
Muz kabuğu	Mango	Hasat sonrası olgunlaşmayı geciktirebildiği ve depolama süresini arttırdığı belirlenmiştir. Dört haftanın sonunda toprakta bıraktığı kalıntı oranının ise %7 olduğu sonucuna varılmıştır.	Ai ve diğ., 2021



Şekil 1. Laboratuvar ölçeğinde meyve-sebze işleme atığı ile biyobozunur film elde etmek için kullanılan geleneksel yöntem (Zhang ve Sablani, 2021).

Figure 1. Conventional method for obtaining biodegradable films from fruit and vegetable processing wastes at laboratory scale (Zhang and Sablani, 2021).

3.1 Portakal Kabuğundan Ambalaj Filmi Eldesi

Portakal kabuklarının bir kısmı son yıllarda çikolata sektöründe kullanılmaya başlansa da içerikçe zengin olan bu atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesi için biyoplastik üretiminde kullanılabilirliği önem kazanmış ve bu konudaki çalışmalar artmıştır. Portakal kabuğu yüksek nişasta ve pektin içeriğine sahip olduğundan biyoplastik üretiminde ve mukavemeti güçlendirmede potansiyel bir kaynak olarak görülmektedir.

Portakal kabuklarından biyobazlı ambalaj malzemesi eldesinin araştırıldığı bir çalışmada 15°C’de depolanan portakal kabukları ezilerek parçalanmış ve nemini düşürmek amacıyla 120°C sıcaklıkta 10 dakika boyunca ısı işlem uygulanmıştır. Daha sonra 25 gram toz numuneye 3 ml 0,1 N

HCl ve 1,8-2 ml gliserol ilavesi yapılmıştır. Hazırlanan homojen karışım kalıplara dökülmüş, bir kısmı ise cam levha üzerine dökülerek 48 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numune cam levhadan ve kalıplardan soyulmuş ve 0,2 mm kalınlığında filmler elde edilmiştir. Portakal kabuğu pektin ve selüloz içeriği yüksek mukavemetli bir film oluşturmuş, ayrıca yağ içeriği ve sonradan eklenen gliserol sayesinde bağlayıcı gücü de artmıştır. Elde edilen filmin sert ve kırılğan bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir (Yaradoddi ve diğ., 2022). Bu nedenle ticari uygulamalarda ve sürdürülebilir ambalajlarda kullanımı için esneklikle ilgili iyileştirme yapılması gerekmektedir. Üretilen filmin ambalaj materyali olarak kullanılması için hidrofobikliği ve ambalajı olduğu ürünü yumuşatmadan sıvı tutma kapasitesi de oldukça önemlidir. Portakal kabuğundan elde edilen filmlerin anaerobik koşullarda yaklaşık 15 günde %90 oranında bozunduğu, bu sayede kısa ömürlü bir ambalaj

malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Batori ve diğ., 2017). Ancak higroskopik özellik gibi ambalaj kalitesini etkileyen diğer özelliklerin istenilen derecede elde edilebilmesi için karakterizasyon ve iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir.

3.2. Mango Kabuğundan Ambalaj Filmi Eldesi

Mango kabuğu %10-12 pektin içeriğine ve güçlü antioksidan özelliğe sahiptir. Mango meyvesinin gelişimi göz önüne alındığında, toplam fenolik içeriğinin kabukta posaya göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Puligundla ve diğ., 2014).

Mango kabuğunun antioksidan ve antimikrobiyal aktivitesi sayesinde mango kabuğu kaynaklı ambalaj filminin tavuk kıymasının raf ömrüne etkisinin incelendiği bir çalışmada; Langra mango kabuğu ekstresi ile kombine edilmiş PVA-siklodekstrin-jelatinden oluşan kompozit filmle ambalajlanan tavuk kıymasının raf ömrünün 10 gün uzadığı sonucuna varılmıştır (Kanatt ve Chawla, 2018). Mango kabuğu ekstresi içermeyen filmlerle ambalajlanan tavuk kıyması üç gün içinde bozulurken, bu teknikte üretilen filmlerin kullanılması tavuk kıymasının raf ömrünü 12 günün üzerine çıkarmıştır.

3.3 Muz Kabuğundan Ambalaj Filmi Eldesi

Muz %60 meyve ve %40 kabuk içermektedir. Muz kabuğu; selüloz (%7,6-9,6), hemiselüloz (%6-9,4), pektin (%10-21) ve lignin (%6-12) gibi organik bileşiklerce zengindir (Alzate ve diğ., 2021). Muz kabuğunun içerdiği nişasta %18,5 ile yüksek bir orandır, bu sebeple film üretiminde potansiyel bir içerik olarak görülebilmektedir.

Yüksek selüloz içeriğine sahip atık muz kabukları ve saplarında bulunan selülozun biyobozunur ambalaj materyali olarak değerlendirilebilmesi için, muz atıklarından selüloz bazlı film üretimi konusunda çalışmalar mevcuttur. Muz sapının liflerinden sentezlenen selüloz filmlerin mangonun muhafaza edilmesinde kullanımının incelendiği bir çalışmada, selüloz filmin geliştirilmiş geçirgenliği sayesinde klimakterik meyvelerde hasat sonrası olgunlaşmayı geciktirebildiği ve depolama süresini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen selüloz filmin dört haftalık sürenin sonunda toprakta bıraktığı kalıntı oranının %7 olduğu, selüloz filmin yüksek biyobozunurluğu sayesinde mango gibi klimakterik meyveleri taze tutabilmek için kullanılabilir potansiyel bir ambalaj filmi olduğu sonucuna varılmıştır (Ai ve diğ., 2021). Bu sayede insanların tüketimine uygun olmayan ve atık oluşturan muz kabukları çevre dostu bir şekilde kullanılmış, ayrıca ürünlerin raf ömrüne katkı sağlamış olacaktır.

3.4 Nar Kabuğundan Ambalaj Filmi Eldesi

Nar kabuğu, zengin bir biyoaktif bileşen kaynağı olan değerli bir yan üründür. Nar kabuğu elajik asit, ellagitanninler, lignin, kateşin, epikateşin ve rutin gibi fenolik bileşikler içermektedir. Fenolik bileşenlerin yanı sıra %16-22 selüloz ve %6,8-10,1 pektin içermektedir (Ali ve diğ., 2019).

Meyve-sebze atıklarının içeriğinde bulunan nişasta ve selüloz gibi maddelerin ekstrakte edilmesi ve film oluşturmada kullanımının yanı sıra, ekstraktın biyobazlı aktif ambalajlara ilavesi ile ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Krem peynirlerin raf ömrünü takip etmek amacıyla yapılan bir çalışmada kitosan, nar kabuğu ekstresi ve *Melissa officinalis* özlerinden oluşan antibakteriyel ve biyobozunur bir film oluşturulmuştur. Narın antimikrobiyal ve antioksidan özelliği; *Melissa officinalis*'in antibakteriyel ve antifungal etkisi; kitosanın antimikrobiyal aktivitesinin birleştirilmesiyle elde

edilen biyobozunur filmin peynir gibi kolayca bozulabilen bir ürünün bozulmasının takibinde kullanımı amaçlanmıştır. Elde edilen filmin antosiyanin pigmenti içerdiği göz önünde bulundurularak, nar kabuğu ekstraktının pH değişikliklerine karşı hassasiyeti sayesinde pH değişikliklerinin kontrol edilebileceği rapor edilmiştir (Pirsa ve diğ., 2020).

Nişasta bazlı filmlerin mekanik özelliklerinin geleneksel plastiklere kıyasla düşük olduğu bilindiğinden, bu özelliklerini iyileştirmek için dolgu maddesi olarak nar kabuğu kullanımına dair çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, geliştirilen nişasta bazlı filmde fonksiyonel dolgu maddesi olarak nar kabuğu kullanılmış ve film üzerindeki mekanik, termal ve antibakteriyel etkileri incelenmiştir. Geliştirilen filmlerin *Staphylococcus aureus* ve *Salmonella*'ya karşı antibakteriyel özellik gösterdiği, nar kabuğu tozunun miktarının artmasıyla hedef mikroorganizmanın inhibisyon bölgesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, filmlere nar kabuğu tozu ilavesinin filmlerin mekanik dayanıklılığını arttırdığı gözlemlenmiştir (Ali ve diğ., 2019). Nar kabuğunun *Salmonella* ve *S. aureus*'a karşı gösterdiği antibakteriyel ve antimikrobiyal etkiden yararlanmak için tavuk ve diğer et ürünlerinin ambalajlanmasında nar kabuğu ekstraktı kullanımıyla, mikrobiyal dayanıklılık artırılarak ürünün raf ömrünün uzaması sağlanabilecektir. Yapılan çalışmalar, biyobozunur filmlerin mekanik ve antimikrobiyal özelliklerini güçlendirmek amacıyla nar kabuklarının kullanımının güçlü bir potansiyel yöntem olduğunu göstermektedir.

3.5 Patates Kabuğundan Ambalaj Filmi Eldesi

Son yıllarda artan sürdürülebilir ambalaj materyali arayışı ve patates kabuğunun yüksek miktarda nişasta (%7,8), diğer polisakaritler (%8,7-12,4), lignin ve fenolik madde (%1,02-2,92) içeriği sayesinde; bu atıkta bulunan antioksidanlar ve biyopolimerlerin ekstraksiyonu ile biyobozunur ambalaj filmlerinin geliştirilmesinde kullanılabilir değerli bir materyal olabileceği fikrini beraberinde getirmiştir (Sepelev ve Galoburda, 2015; Javed ve diğ., 2019). Patates kabuğunda bulunan nişastadan elde edilen filmler konusunda çalışmalar olduğu gibi, içeriğindeki fenolik bileşenlerin özütlenmesi ve başka biyobozunur filmlere ilavesiyle antioksidan etkisinden yararlanılması yönünde çalışmalar da mevcuttur.

Patates kabuğundan elde edilen nişasta bazlı biyobozunur filmin su çekme ve biyobozunurluğunun incelendiği bir çalışmada, patates kabuğundan üretilen filmin mekanik özelliklerinin, hidrostatik basıncının ve elastikiyetinin endüstriyel alanlarda kullanılabilir durumda olduğu belirlenmiştir. Yine aynı çalışmada, patates kabuğu bazlı filmin toprakta 28 gün içerisinde tamamen bozulduğu gözlemlenmiştir (Arıkan ve Bilgen, 2019).

Nişasta bazlı filmlere patates kabuklarından elde edilen fenolik bileşenlerin (%0,5) ilave edilmesiyle filmlerin elastikiyetinin ve hidrofobik özelliğinin arttığı, ayrıca antioksidan aktivitesinin %48'e yükseldiği sonucuna varılmıştır. Geliştirilen nişasta/fenolik bazlı filmlerin tütsülenmiş balık filetoalarının ambalajlanmasında kullanımıyla, filetoaların altın renginde iyileşme ve ticari plastiklerle ambalajlanmış filetoalarla kıyaslandığında daha düşük seviyelerde sulanma ve yumuşama gözlemlenmiştir (Lopes ve diğ., 2021). Bu çalışma, patates kabuğundan özütlenen fenoliklerin nişasta bazlı filmlerle kombine edilmesiyle üretilen nişasta/fenolik bazlı filmlerin gıdaların ambalajlanmasında kullanılabilir bir materyal olduğunu göstermektedir.

4. Sonuç

Petrol bazlı ambalajlar, oluşturduğu atıkların doğada sera etkisine sebep olan gazlar üretmesi ve toprakta çözünmesinin yüz yıldan uzun sürmesi sebebiyle çevre kirliliği açısından büyük bir risk teşkil etmektedir. Petrol bazlı ambalajların geri dönüşümünün yetersizliği ve büyük miktarlardaki meyve-sebze işleme atıklarına çözüm olarak görülen biyobozunur ambalajların; meyve ve sebze işleme atıklarını azaltacağı ve gıda ambalajlarının çevrede biyolojik olarak parçalanmasını sağlayarak ambalaj atıklarının çevreye olan zararını minimuma indireceği düşünülmektedir. Önemli avantajlarının yanında, yüksek maliyeti ve geleneksel olarak kullanılan petrol türevli plastiklere göre geliştirilmesi gereken mekanik, termal ve kimyasal özellikleri sebebiyle meyve ve sebze işleme atıklarından biyobozunur film üretiminde halen pilot ölçekli denemeler ve geliştirmeler devam etmektedir. Yapılan çalışmaların genellikle ürün bazında olması ve henüz standardize edilmiş olmaması, ayrıca geliştirilmesi gereken mekanik ve bariyer özellikleri gibi sebeplerle; meyve ve sebze atıklarından elde edilen ambalaj filmlerinin plastik ambalajların yerini alabilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Plastik kullanımının giderek azalması ve çalışmaların ilerlemesiyle, yakın gelecekte ambalaj endüstrisinde meyve ve sebze atığı bazlı biyobozunur ambalajların kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir.

5. Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

6. Kaynaklar

Ai, B., Zheng, L., Li, W., Zheng, X., Yang, Y., Xiao, D., & Sheng, Z. (2021). Biodegradable cellulose film prepared from banana pseudo-stem using an ionic liquid for mango preservation. *Frontiers in Plant Science*, 12, 234. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.625878>

Agarwal, A., Shaida, B., Rastogi, M., & Singh, N. B. (2023). Food packaging materials with special reference to biopolymers-properties and applications. *Chemistry Africa*, 6(1), 117-144.

Ali, A., Chen, Y., Liu, H., Yu, L., Baloch, Z., Khalid, S., & Chen, L. (2019). Starch-based antimicrobial films functionalized by pomegranate peel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 1120-1126. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.068>

Alzate, A. S., Díaz Carrillo, Á. J., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). Recovery of banana waste-loss from production and processing: a contribution to a circular economy. *Molecules*, 26(17), 5282. <https://doi.org/10.3390/molecules26175282>

Anonim. (2020). Coca-Cola Türkiye BitkiŞişeTM. Erişim adresi: <https://www.coca-colaturkiye.com/surdurulebilirlik/bitkisise/>

Ankan, E. B., & Bilgen, H. D. (2019). Production of bioplastic from potato peel waste and investigation of its biodegradability. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 3(2), 93-97. <https://doi.org/10.35860/iaej.420633>

Batori, V., Jabbari, M., Åkesson, D., Lennartsson, P. R., Taherzadeh, M. J., & Zamani, A. (2017). Production of pectin-cellulose biofilms: a new approach for citrus waste recycling. *International Journal of Polymer Science*. <https://doi.org/10.1155/2017/9732329>

Borah, P. P., Das, P., & Badwaik, L. S. (2017). Ultrasound treated potato peel and sweet lime pomace based biopolymer film development. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.11.010>

de Brito Nogueira, T. B., da Silva, T. P. M., de Araújo Luiz, D., de Andrade, C. J., de Andrade, L. M., Ferreira, M. S. L., & Fai, A. E. C. (2020). Fruits and vegetable-processing waste: a case study in two markets at Rio de Janeiro, RJ, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 18530-18540. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08244-y>

de Moraes Crizel, T., de Oliveira Rios, A., Alves, V. D., Bandarra, N., Moldão-Martins, M., & Flóres, S. H. (2018). Active food packaging prepared with chitosan and olive pomace. *Food Hydrocolloids*, 74, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.007>

Ersus, S., Melikoğlu, A. Y., & Cesur, S. (2020). Production of biocomposite packaging materials from fruit juice processing wastes. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(1), 250-259. <https://doi.org/10.21597/jist.528965>

Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2013). Global food losses and food waste: extent, causes and prevention. In: Interpack 2011 Düsseldorf: FAO.

Günkaya, Z., Demirel, R., & Banar, M. (2016). Portakal kabuğu atıklarından üretilen biyokompozit ambalaj filminin aflatoksinlere karşı etkisinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 513-519. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.92653>

Hanani, Z. N., Roos, Y. H., & Kerry, J. P. (2014). Use and application of gelatin as potential biodegradable packaging materials for food products. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.04.027>

Hong, L. G., Yuhana, N. Y., & Zawawi, E. Z. E. (2021). Review of bioplastics as food packaging materials. *AIMS Materials Science*, 8(2), 166-184. <https://doi.org/10.3934/matserci.2021012>

Javed, A., Ahmad, A., Tahir, A., Shabbir, U., Nouman, M., & Hameed, A. (2019). Potato peel waste-its nutraceutical, industrial and biotechnological applications. *AIMS Agriculture and Food*, 4(3), 807-823. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2019.3.807>

Kanatt, S. R., & Chawla, S. P. (2018). Shelf life extension of chicken packed in active film developed with mango peel extract. *Journal of Food Safety*, 38(1), e12385. <https://doi.org/10.1111/jfs.12385>

Lopes, J., Gonçalves, I., Nunes, C., Teixeira, B., Mendes, R., Ferreira, P., & Coimbra, M. A. (2021). Potato peel phenolics as additives for developing active starch-based films with potential to pack smoked fish fillets. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100644. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100644>

Moshood, T. D., Nawanir, G., Mahmud, F., Mohamad, F., Ahmad, M. H., & AbdulGhani, A. (2022). Biodegradable plastic applications towards sustainability: A recent innovations in the green product. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100404.

Narancic, T., Cerrone, F., Beagan, N., & O'Connor, K. E. (2020). Recent advances in bioplastics: application and biodegradation. *Polymers*, 12(4), 920. <https://doi.org/10.3390/polym12040920>

Omre, P. K., & Shikhangi Singh, S. (2018). Waste utilization of fruits and vegetables-A review. *South Asian Journal of Food Technology and Environment*, 4(1), 605-615. <https://doi.org/10.46370/sajfte.2018.v04i01.02>

Petersen, K., Nielsen, P. V., Bertelsen, G., Lawther, M., Olsen, M. B., Nilsson, N. H., & Mortensen, G. (1999). Potential of biobased materials for food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 10(2), 52-68. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00019-9)

Pirsa, S., Karimi Sani, I., Pirouzifard, M. K., & Erfani, A. (2020). Smart film based on chitosan/*Melissa officinalis* essences/pomegranate peel extract to detect cream cheeses spoilage. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 37(4), 634-648. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1716079>

Puligundla, P., Obulam, V. S. R., Oh, S. E., & Mok, C. (2014). Biotechnological potentialities and valorization of mango peel waste: A review. *Sains Malaysiana*, 43, 1901-1906. <https://doi.org/10.17576/jsm-2014-4312-12>

Rahmasari, Y. (2021). *Ultrasas işlemi uygulanarak hindistan cevizi kabuğu sıvı tütsüsü içeren zencefil nişastası bazlı yenilebilir filmlerin üretimi ve karakterizasyonu*. [Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi].

Scialabba, N. (2013). Food Wastage Footprint: Impacts on natural resources summary report. FAO; Food and Agricultural organization of the United Nations.

Sepelev, I., & Galoburda, R. (2015). Industrial potato peel waste application in food production: a review. *Research for Rural Development*, 1, 130-136.

Yalçın Melikoğlu, A. (2020). *Elma posasında selüloz ve nanoselüloz takviye ajanlarının üretimi ve alçak yoğunluk polietilen esaslı biyobozunur gıda ambalaj malzemelerinin geliştirilmesinde kullanımı*. [Doktora tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Yaradoddi, J. S., Banapurmath, N. R., Ganachari, S. V., Soudagar, M. E. M., Sajjan, A. M., Kamat, S., & Ali, M. A. (2022). Bio-based material from fruit waste of orange peel for industrial applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 3186-3197. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.016>

Zhang, H., & Sablani, S. (2021). Biodegradable packaging reinforced with plant-based food waste and by-products. *Current Opinion in Food Science*, 42, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.05.003>