

GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA AKADEMİK TARTIŞMALAR

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Eda Elgin KILIÇ

yaz
yayınları

Gıda Bilimleri ve Mühendisliği Alanında Akademik Tartışmalar

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Eda Elgin KILIÇ

yaz
yayınları

2026

Gıda Bilimleri ve Mühendisliği Alanında Akademik Tartışmalar

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Eda Elgin KILIÇ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8996-68-5

Haziran 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Deniz Kaynaklı Fonksiyonel Gıdalar: Bileşenlerin Fonksiyonel Özellikleri, İşleme Teknolojileri ve Stabilit� Sorunları.....	1
<i>Gülistan OKUTAN</i>	
Focusing on Innovation: Exploring Digitalization in the Food Industry and SMEs.....	22
<i>Aslıhan T���EN, Louiza BELKACEMI, Hidayat LIAZID</i>	
Spirulina ve Matcha İlaveli Fonksiyonel Koyun Yo�urdu �retimi	52
<i>Engin MEYDAN, Fatma YOLDA�</i>	
Mikrofilizler: �retimden Tüketime Besinsel ve Fonksiyonel Bir Yaklaşım.....	70
<i>Evren NAS, Turan AKDA�, Süleyman DOĞU</i>	
Food Safety and Sustainability in Modern Raisin Production: AI, Smart Drying, and Traceability Perspectives	87
<i>Nilgün Başak TECER, Ay�en BABACAN</i>	
Moleküler Gastronomide S�erifikasyon: Bilimsel Temeller ve Güncel Uygulamalar	108
<i>Hatice KARABULUT MOLHEM, Serena KELER KENT, Betül KARSLIO�LU</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

DENİZ KAYNAKLI FONKSİYONEL GIDALAR: BİLEŞENLERİN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ, İŞLEME TEKNOLOJİLERİ VE STABİLİTE SORUNLARI

Gülistan OKUTAN¹

1. GİRİŞ

Bir gıda, yeterli beslenme etkilerinin ötesinde, vücuttaki bir veya daha fazla hedef fonksiyona yararlı bir etkiye sahip olduğu tatmin edici bir şekilde gösterilirse, fonksiyonel olarak kabul edilebilir; bu etki, sağlık ve esenlik durumunun iyileştirilmesi ve/veya hastalık riskinin azaltılmasıyla ilgili olabilir (Batista vd., 2013; Paliwal vd., 2016).

Gıdalarda bulunan biyolojik olarak aktif moleküller, hem besin maddelerine hem de ilaçlara benzer özelliklere sahip oldukları için sıklıkla nutrasötikler olarak bilinir. Nutrasötikler, besleyici bir role sahip olmanın yanı sıra, sağlığı destekleyici, hastalıkları iyileştirici veya önleyici özellikler sağlayan doğal biyolojik olarak aktif veya kimyasal bileşiklerdir. Nutrasötikler lipidler, vitaminler, karbonhidratlar, proteinler, mineraller veya diğer gerekli besin maddelerini içerir. Araştırmalar, nutrasötiklerin kardiyovasküler hastalıklar, diyabet, ateroskleroz, kanser ve nörolojik bozukluklar gibi çeşitli rahatsızlıkların tedavisinde umut vadeden ajanlar olduğunu ortaya koymuştur (Sachdeva vd., 2020).

¹ Dr. Öğr. Üyesi Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Siirt, Türkiye, ORCID: 0000-0002-1936-7633.

Deniz ortamından kaynaklanan biyoaktif bileşikler, sağlık gelişimi ve hastalık riskinin azaltılmasıyla ilgili olarak insan sağlığı için faydalı işlevlere sahip fonksiyonel bileşenlerin hayati kaynakları olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, deniz kaynaklı fonksiyonel gıda bileşenleri, nutrasötikler, ilaçlar ve diyet takviyeleri üzerinde araştırma ve geliştirme konusunda artan bir ilgi bulunmaktadır. Son epidemiyolojik çalışmalar, kronik hastalıkları ve kanserleri azaltmada ve insan sağlığını desteklemede doğrudan etkiye sahip yüksek biyoaktif moleküller içeren diyet deniz ürünlerini ortaya koymuştur. Bu nedenle, deniz ürünlerine ve türevlerine olan mevcut talep, bunların fonksiyonel gıdalar olarak potansiyelleriyle ilişkilidir (Senadheera vd., 2023). Olağanüstü biyoçeşitliliği nedeniyle, deniz dünyası birçok biyolojik olarak aktif bileşik için zengin bir doğal kaynaktır. Deniz organizmaları karmaşık habitatlarda yaşar ve aşırı koşullara maruz kalır, bu nedenle başka yerlerde bulunmayan çok çeşitli spesifik ve güçlü aktif maddeler üretirler. Düzenli deniz ürünleri tüketimi faydalı sağlık etkileriyle ilişkilidir. Kanser, mikrobiyal enfeksiyonlar ve iltihaplı süreçler gibi insan hastalıklarının tedavisi için yeni maddelere olan artan ihtiyaç, yeni biyoaktif bileşiklerin araştırılmasını artırmıştır. Deniz organizmaları, bu tür bileşikler için en iyi potansiyel rezervuar olarak görülmektedir (Hamed vd., 2015). Birçok deniz bileşiğinin çeşitli biyolojik aktivitelere sahip olduğu tespit edilmiştir: balıklardan izole edilen peptitlerin yanı sıra alg polisakkaritlerinin de kanser önleyici, antikoagülan ve antihiperkolesterolemik aktivitelere sahip olduğu bildirilmiştir (Lordan vd., 2011). Deniz bakterileri ve balık yağları büyük miktarda omega-3 yağ asidi içerirken, deniz yosunları ve kabuklular gibi deniz ürünleri karotenoidler ve fenolik bileşikler de dahil olmak üzere güçlü antioksidanlar içerir (Rasmussen & Morrissey, 2007).

2. DENİZ KAYNAKLI FONKSİYONEL BİLEŞİKLER

2.1. Omega 3 Yağ Asitleri

Omega-3 (n-3) yağ asitleri, çoklu doymamış yağ asitleri ailesidir. Bunlar, hidrokarbon (açıl) zincirinin metil ucuna en yakın çift bağın, metil karbonu bir numara olarak sayılırsa, üç numaralı karbon üzerinde bulunmasıyla karakterize edilir ve buna göre adlandırılırlar. Fonksiyonel olarak en önemli n-3 yağ asitleri eikosapentaenoik asit (EPA; 20:5n-3) ve dokosaheksaenoik asittir (DHA; 22:6n-3). EPA ve DHA'nın en iyi diyet kaynağı deniz ürünleri, özellikle yağlı balıklardır. Balinalar ve foklar gibi deniz memelilerinin yağ dokusu ve dokuları da önemli miktarlarda EPA ve DHA içerir (Innes ve Calder, 2020). EPA ve DHA kardiyovasküler ve nörolojik sağlık üzerinde olumlu etkilere sahiptir.

2.2. Deniz Kaynaklı Proteinler ve Biyoaktif Peptitler

Proteinler, birincil enerji kaynağı görevi gören ve büyüme, gelişme ve bakım gibi düzenli fizyolojik işlevler için gerekli amino asitleri sağlayan hayati makro besinlerdir. Biyoaktif peptitler (kısa amino asit dizileri), çeşitli fonksiyonel ve fizyolojik özelliklere katkıda bulunduğu düşünülen ve sağlık ve metabolizmada önemli bir rol oynayan protein parçalarıdır (Okeke vd., 2024). Deniz kaynaklı biyoaktif peptitler tipik olarak 3 ila 40 (çoğunlukla 2-20) amino asit kalıntısından oluşur. Bu peptitler, ana protein dizilerinde inaktiftir, ancak gastrointestinal sindirim, enzimatik işleme veya fermentasyon yoluyla salındıklarında biyolojik olarak aktif hale gelirler. Amino asit dizisine, bileşimine ve moleküler ağırlığına bağlı olarak, çeşitli biyolojik işlevlerde rol oynarlar. Fizyolojik süreçleri düzenlemek için hücresel reseptörler, enzimler ve iyon kanallarıyla etkileşime girerler. Deniz kaynaklı peptitler, apoptoz, tübülün mikrotübül dengesinin düzenlenmesi (anti-mikrotübül aktivitesi), vasküler

inhibisyon, anti-proliferatif etkiler ve sitotoksosite dahil olmak üzere çeşitli mekanizmalar yoluyla hücre ölümüne neden olur (Rafieezadeh vd., 2024; Cunha vd., 2022; Anekthanakul vd., 2019). Deniz organizmalarından elde edilen bu proteinler ve peptitler, antioksidan, antihipertansif, antidiyabetik, antikoagulan, antimikrobiyal, antiinflamatuvar, antikanser ve immün düzenleyici etkiler gibi çeşitli biyoaktif potansiyelleri nedeniyle önemli ilgi görmüştür. Çok fonksiyonlu özellikleri, gıda, ilaç ve kozmetik endüstrilerinde muazzam bir uygulama potansiyeli taşımaktadır (Okeke vd., 2024; Du vd., 2024; Leong vd., 2024; Venkatesan vd., 2017).

2.3. Polisakkaritler

Doğada polisakkaritlerin oynadığı başlıca işlevler ya depolama ya da yapısal işlevlerdir. Bitkilerde en yaygın depolama polisakkariti, α -amiloza ve amilopektin olmak üzere iki formda bulunan nişastadır. Yapısal polisakkaritler, bileşimleri benzer olsa da, depolama polisakkaritlerinden önemli ölçüde farklı özellikler sergiler. Yapısal polisakkarit olan selüloz, dünyadaki en bol doğal polimerdir. Deniz yosunları da dahil olmak üzere neredeyse tüm bitkilerin hücre duvarlarında bulunan selüloz, fiziksel yapı ve dayanıklılık sağlayan başlıca bileşenlerden biridir. Deniz kaynaklı hayvansal selüloz olan tunisin, omurgasız deniz hayvanları olan tunikatlardan elde edilir ve yüksek oranda kristal yapıda olduğu için tercih edilen bir malzemedir. Agar ve karragenan deniz yosunlarından elde edilen önemli jel oluşturu polisakkaritlerdir (Gomez D'Ayala vd., 2008).

Ekzopolisakkaritler (EPS'ler), deniz ortamındaki çoğu mikrobiyal hücreyi çevreleyen hücre dışı polimerlerin önemli bir bileşenini oluşturan yüksek moleküler ağırlıklı karbonhidrat polimerleridir. Son yıllarda, özellikle çeşitli aşırı deniz ortamlarından yeni EPS üreten bakterilerin izole edilmesine yönelik artan bir ilgi olmuştur (Nichols vd., 2005). Yeni kimyasal

bileşimlere, özelliklere ve yapılara sahip birçok yeni mikrobiyal EPS'nin, yapıştırıcılar, tekstiller, ilaçlar ve kanser önleyici ilaçlar, gıda katkı maddeleri vb. alanlarda potansiyel uygulamalara sahip olduğu bulunmuştur.

Kitin, selülozdan sonra doğada en bol bulunan ikinci organik bileşiktir (Ehrlich, 2007). Kitin, deniz omurgasızlarında, böceklerde, mantarlarda ve mayada yaygın olarak bulunur (Ehrlich, 2007). Ancak kitin, yüksek bitkilerde ve yüksek hayvanlarda bulunmaz.

2.4. Doğal Pigmentler ve Antioksidanlar

Balıklar, omurgasızlar, algler ve mikroorganizmalar dahil olmak üzere çeşitli deniz organizmalarını içeren deniz türleri, karotenoidler, klorofiller, PBP'ler (Fikobiliproteinler), prodigiosin, melaninler vb. gibi doğal olarak oluşan pigmentlerin bol bir kaynağını oluşturmaktadır (Stachowiak & Szulc, 2021). Bu pigmentler geçmişte deniz türlerinden elde edilmiştir; örneğin, astaksantin ilk olarak 1930'da karides kabuklarından izole edilmiş olup, bağışıklığı artırma, retinayı radyasyondan koruma, antioksidasyonu teşvik etme, iltihabı azaltma ve kandaki LDL kolesterolünü oksidasyondan koruma gibi belirgin biyolojik faydaları nedeniyle birçok araştırmanın odak noktası olmuştur. (Hatta, 2020; Sun vd., 2023). Ayrıca, mikroalg doğal pigmentlerinin çok sayıda sağlık yararı sağladığı kanıtlanmıştır ve nutrasötikler ve diyet takviyeleri gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, deniz doğal pigmentleri, üstün biyo-uyumlulukları, artırılmış biyoyararlanımları, güvenlikleri ve stabiliteyi nedeniyle gıda, kozmetik ve ilaç endüstrilerinde cazip bir alternatif olarak ilgi görmüştür. Ayrıca, deniz doğal pigmentleri çok sayıda sağlık yararları özelliğine sahiptir ve insan sağlığında ve gıdada renklendirici olarak potansiyel kullanım göstermektedir. Bu nedenle, antioksidan, anti-anjiyojenik, antikanser, anti-

enflamatuar ve anti-obezite aktiviteleri de dahil olmak üzere potansiyel sağlık kullanımları vardır.

Son zamanlarda, gıda endüstrisinin yanı sıra ilaç endüstrisinde de deniz florası ve faunası gibi doğal kaynaklardan antioksidan geliştirilmesine yönelik önemli bir ilgi bulunmaktadır. Deniz alglerinin belirli antioksidan sistemler tarafından oksidatif bozulmaya karşı korunduğuna inanılmaktadır. Ayrıca, deniz gıda işleme yan ürünleri, antioksidatif özelliğe sahip besin takviyeleri ve fonksiyonel gıda bileşenleri üretmek için kolayca kullanılabilir (Kim & Mendis, 2006). Kelp, wakame ve laminaria dahil olmak üzere kahverengi algler okyanusta yaygın olarak bulunur. İçerdikleri antioksidanlar fukoksantin ve fukoidandır. Fukoksantin, esas olarak kahverengi alglerde bulunan bir karotenoiddir ve özellikle güçlü bir antioksidan kapasitesi olmak üzere çeşitli biyolojik aktivitelere sahiptir. Serbest radikalleri etkili bir şekilde ortadan kaldırabilir ve oksidatif stresi azaltarak hücreleri hasardan koruyabilir. Fukoksantin ise güçlü antioksidan ve antiinflamatuar özellik göstermektedir (Zhang vd., 2025).

Hayvansal polisakkaritler esas olarak kitosan ve glikozaminoglikan içerir. Kitosan, karides ve yengeç gibi kabukluların dış iskeletlerinde bulunan kabuklardan elde edilen bir biyopolimerdir. Biyoyumluluğu, biyolojik olarak parçalanabilirliği ve toksik olmaması nedeniyle çeşitli alanlarda geniş ilgi görmüştür. Kitosan, serbest radikalleri temizleyerek ve oksidatif stresi azaltarak nörodejeneratif hastalıkların yönetimi ve tedavisinde potansiyel rolü açısından araştırılmıştır. Kitosan oligosakkaritleri, Cu^{2+} kaynaklı oksidatif hasarı ve Nrf2 aktivasyonunda yer alan apoptozu azaltabilir. Ayrıca kitosan, oksidatif hasarı azaltmaya yardımcı olabilir ve Alzheimer hastalığı tedavisi için besleyici bir ajan olarak kullanılabilir. Kitosanın yanı sıra, kitin, selülozdan sonra dünyadaki en bol bulunan ikinci doğal polimerdir ve çok sayıda organizma

tarafından dış iskelet oluşturmak için sentezlenir. Üç farklı gruba ayrılabilir: tipik olarak kabukluların dış iskeletlerinden elde edilen alfa-kitin; kalamar kalemelerinden elde edilen beta-kitin; ve mantar ve mayalardan elde edilen gama-kitin. Kitin esnek olmayan ve güçlü bir maddedir ve kalsiyum karbonat (CaCO_3) ile reaksiyona girdiğinde, yumuşakçaların ve kabukluların dış iskeletleri gibi daha sağlam bir yapı oluşturur. Bununla birlikte, asetil grubu nedeniyle hidrofobiktir ve çoğu çözücünde çözünmez, bu nedenle kitosana dönüştürüldüğünde uygulama alanı genişler. Kitin, asetil grubunun hidroksil (-OH) ve amino ($-\text{NH}_2$) gruplarına dönüştürüldüğü alkali veya enzimatik deasetilasyon işlemiyle kitosana dönüştürülebilir (Zhang vd., 2025).

Süperoksit dismutaz (SOD), hücreleri oksidatif hasardan koruyan önemli bir antioksidan enzimdir. Anahtar bir antioksidan enzim olarak SOD, vücutta ROS'u (reaktif oksijen türleri) etkili bir şekilde temizleyebilir ve hücreleri oksidatif hasardan koruyabilir (Song vd., 2025). Deniz organizmaları nispeten kirlilikten arındırılmış bir ortamda büyür, bu da deniz SOD'sini daha saf ve doğal hale getirir, karasal kirliliği ve pestisit kalıntılarını önler. Aktivitesi genellikle bitki ve hayvanlardan elde edilen SOD'den daha yüksektir. Vücuttaki süperoksit radikallerini daha etkili bir şekilde temizleyebilir ve daha güçlü bir antioksidan rolü oynayabilir (Ferraz vd., 2022).

Deniz yosunu ve mikroalgler gibi deniz kaynaklarında bulunan C vitamini, vücuttaki serbest radikalleri doğrudan temizleyebilen ve hücrelere verilen oksidatif stres hasarını azaltabilen güçlü bir antioksidandır. C vitamini, kırmızı alglerde (*Porphyra spp.*) ve mikroalglerde (*Chlorella vulgaris*) bol miktarda bulunur. Ayrıca hücre zarlarını ve Deoksiribonükleik Asidi (DNA) oksidatif hasardan korumaya yardımcı olarak çeşitli oksidatif stresle ilişkili hastalıkların riskini azaltır (Yu vd., 2024).

E vitamini, deniz yosunu gibi alglerden ve somon, uskumru gibi balıklardan elde edilebilen yağda çözünen bir antioksidandır ve hücre zarı lipitlerini oksidatif hasardan koruyabilir. Lipit peroksidasyonunu inhibe ederek ve hücre zarlarının bütünlüğünü ve işlevini koruyarak kardiyovasküler hastalık, nörodejeneratif hastalık ve diğer oksidatif stresle ilişkili hastalıkların önlenmesinde önemli bir rol oynar (Rohym vd., 2025; Zeng vd., 2025).

3. DENİZ KAYNAKLI FONKSİYONEL BİLEŞENLERİN İŞLEME TEKNOLOJİLERİ

Deniz kaynaklı fonksiyonel bileşenlerin gıda, nutrasötik ve farmasötik uygulamalarda etkin şekilde kullanılabilmesi; uygun ekstraksiyon, koruma ve taşıyıcı sistem teknolojilerinin geliştirilmesine bağlıdır. Denizel kaynaklı biyoaktif bileşenler, özellikle çoklu doymamış yağ asitleri, pigmentler, proteinler ve polisakkaritler gibi hassas yapılar içermekte olup; sıcaklık, oksijen, ışık ve pH değişimlerine karşı duyarlılık gösterebilmektedir. Bu nedenle son yıllarda geleneksel yöntemlerin yanında biyoaktif bileşenlerin verimini artıran ve stabilitesini koruyan yenilikçi işleme teknolojileri ön plana çıkmıştır (Chhabra vd., 2024).

3.1. Ekstraksiyon Teknolojileri

Deniz kaynaklı fonksiyonel bileşenlerin üretiminde ilk aşama, hedef bileşiğin uygun yöntemlerle ekstrakte edilmesidir. Geleneksel ekstraksiyon yöntemleri arasında solvent ekstraksiyonu, rendering ve mekanik presleme yöntemleri yer almaktadır. Özellikle balık yağlarının üretiminde uzun yıllardır kullanılan solvent bazlı yöntemler yüksek ekstraksiyon verimi sağlasa da organik solvent kalıntısı, çevresel etkiler ve oksidatif bozulma gibi dezavantajlara sahiptir.

Son yıllarda çevre dostu ve yüksek verimli teknolojilere yönelik ilginin artmasıyla birlikte süperkritik akışkan ekstraksiyonu, ultrases destekli ekstraksiyon ve enzimatik ekstraksiyon yöntemleri yaygınlaşmıştır. Süperkritik CO₂ ekstraksiyonu, düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi sayesinde özellikle omega-3 yağ asitleri, karotenoidler ve diğer ısıya duyarlı bileşenlerin korunmasında önemli avantaj sağlamaktadır. Ayrıca organik solvent kullanımını azaltması nedeniyle “yeşil teknoloji” olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte ekipman maliyetlerinin yüksek olması ve proses optimizasyonunun karmaşık olması yöntemin temel sınırlılıkları arasında yer almaktadır (Khaw vd., 2017).

Ultrases destekli ekstraksiyon yönteminde ise akustik kavitasyon etkisiyle hücre duvarlarının parçalanması sağlanmakta ve biyoaktif bileşiklerin çözünürlüğü artırılmaktadır. Bu yöntem daha kısa işlem süresi ve daha düşük solvent tüketimi sağlamaktadır. Enzimatik ekstraksiyon teknikleri ise özellikle denizel protein hidrolizatlarının ve biyoaktif peptitlerin üretiminde tercih edilmekte olup, hedef bileşenlerin biyoyararlanımını artırabilmektedir.

3.2. Enkapsülasyon Teknolojileri

Deniz kaynaklı biyoaktif bileşenlerin büyük bir kısmı oksidasyon, ışık, sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlere karşı oldukça hassastır. Özellikle omega-3 yağ asitleri ve doğal pigmentler depolama sırasında hızlı kalite kaybına uğrayabilmektedir. Bu nedenle enkapsülasyon teknolojileri, söz konusu bileşenlerin korunması ve kontrollü salımının sağlanması amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Sprey kurutma, gıda endüstrisinde en yaygın kullanılan mikroenkapsülasyon yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde emülsifiye edilen aktif bileşenler sıcak hava yardımıyla kısa sürede kurutularak toz forma dönüştürülmektedir. Sprey kurutma;

düşük maliyet, sürekli üretime uygunluk ve yüksek üretim kapasitesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Ancak yüksek işlem sıcaklığı nedeniyle bazı ısıya duyarlı bileşenlerde kayıplar oluşabilmektedir (Mudalip vd., 2021).

Dondurarak kurutma (liyofilizasyon) yöntemi ise düşük sıcaklık ve vakum altında gerçekleştirildiğinden, hassas biyoaktif bileşiklerin korunmasında daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu yöntemde ürün önce dondurulmakta, ardından buz kristallerinin süblimasyonu ile kurutma gerçekleştirilmektedir. Özellikle balık yağı ve denizel peptitlerin oksidatif stabilitesinin korunmasında etkili olduğu bildirilmektedir. Bununla birlikte yüksek enerji tüketimi ve uzun işlem süresi yöntemin temel dezavantajlarıdır (Chhabra vd., 2024).

Son yıllarda nanoenkapsülasyon, liposomal taşıyıcı sistemler ve nanoemülsiyon teknolojileri de deniz kaynaklı fonksiyonel bileşenlerin taşınmasında yaygınlaşmıştır. Nano boyuttaki sistemler, aktif bileşenlerin biyoyararlanımını artırırken oksidatif bozulmayı azaltabilmektedir. Ayrıca kontrollü salım mekanizmaları sayesinde fonksiyonel bileşenlerin hedeflenen bölgede etkili şekilde salınması mümkün olabilmektedir.

3.3. Fonksiyonel Gıdalara Entegrasyon Teknolojileri

Deniz kaynaklı fonksiyonel bileşenlerin doğrudan gıda sistemlerine ilavesi; oksidatif stabilite kayıpları, istenmeyen aroma oluşumu ve düşük tüketici kabulü gibi çeşitli teknolojik problemlere neden olabilmektedir. Özellikle balık yağı içeren ürünlerde oluşan uçucu oksidasyon ürünleri balıksı tat ve koku gelişimine yol açarak ürünün duyusal kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Shahidi ve Ambigaipalan, 2018; Jacobsen vd., 2013).

Mikroenkapsülasyon teknolojileri, omega-3 yağ asitlerinin farklı gıda sistemlerine entegrasyonunda oksidatif stabilitenin artırılması ve duyusal problemlerin azaltılması

amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır (Augustin & Sanguansri, 2008; Shaw vd., 2007). Benzer şekilde omega-3 yağ asitlerinin fırıncılık ürünlerinde kullanımında enkapsülasyon uygulamalarının oksidasyonu önemli ölçüde azalttığı ifade edilmektedir (Jafari vd., 2008).

Alg kaynaklı pigmentler ve polisakkaritler de fonksiyonel gıda uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle fikobiliproteinler ve karotenoidler doğal renklendirici ve antioksidan özellik göstermekte olup çeşitli içecek ve süt ürünlerinde kullanılabilir (Holdt & Kraan, 2011). Denizel polisakkaritler arasında yer alan aljinat, kitosan ve karagenan ise emülsiyon stabilizasyonu, jel oluşturma ve film üretimi gibi fonksiyonel özelliklerinden dolayı önemli uygulama alanlarına sahiptir (Ngo & Kim, 2013).

Kitosan ve aljinat bazlı yenilebilir filmler aktif ambalajlama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olup oksijen geçirgenliğini azaltarak lipid oksidasyonunu yavaşlatabilmektedir (Ojagh vd., 2010). Ayrıca bu biyopolimerler kontrollü salım sistemlerinde taşıyıcı materyal olarak değerlendirilmekte ve biyoaktif bileşenlerin depolama stabilitesini artırabilmektedir (Younes & Rinaudo, 2015).

4. STABİLİTE SORUNLARI, STABİLİZASYON STRATEJİLERİ

Deniz kaynaklı fonksiyonel bileşenlerin gıda sistemlerinde kullanımını sınırlayan en önemli faktörlerden biri stabilite problemleridir. Özellikle omega-3 yağ asitleri, denizel pigmentler, proteinler ve biyoaktif peptitler; oksijen, ışık, sıcaklık, metal iyonları ve nem gibi çevresel faktörlere karşı oldukça hassas yapıdadır. Çoklu doymamış yağ asitlerinin yüksek derecede doymamış yapısı, lipid oksidasyonunu hızlandırmakta ve buna bağlı olarak besinsel kalite kaybı, istenmeyen aroma

oluşumu ve raf ömrünün kısalması gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Özellikle DHA ve EPA gibi uzun zincirli omega-3 yağ asitlerinin yapısında bulunan çok sayıdaki çift bağ, bu bileşiklerin oksidatif degradasyona karşı duyarlılığını artırmaktadır (Wang vd., 2021).

Lipid oksidasyonu genellikle serbest radikal mekanizmasıyla ilerlemekte ve başlangıç, propagasyon ve terminasyon aşamalarından oluşmaktadır. Oksidasyon sonucunda hidroperoksitler, aldehitler ve ketonlar gibi ikincil oksidasyon ürünleri oluşmakta; bu durum hem duyu kaliteyi hem de biyolojik aktiviteyi olumsuz etkilemektedir. Özellikle balıksı tat ve koku oluşumu, deniz kaynaklı fonksiyonel bileşenlerin tüketici kabulünü azaltan temel problemlerdendir. Ayrıca oksidasyon sonucunda oluşan bazı bileşiklerin potansiyel toksik etkiler gösterebildiği bildirilmektedir (Wang vd., 2021).

Omega-3 bakımından zengin ürünlerde depolama koşulları da stabilite üzerinde önemli rol oynamaktadır. Ambalaj materyalinin oksijen geçirgenliği, ışık geçirgenliği, depolama sıcaklığı ve ürün formu oksidasyon hızını doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda sıvı formdaki omega-3 ürünlerinin kapsül formuna kıyasla daha yüksek peroksit ve TOTOX değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle kapsül formundaki ürünlerin oksidatif ve duyu stabilite açısından daha iyi korunduğu bildirilmektedir (Yenipazar & Yeşilçubuk, 2022).

Protein ve peptit bazlı denizel bileşenlerde ise sıcaklık, pH değişimleri ve enzimatik reaksiyonlar protein denatürasyonuna neden olabilmektedir. Bunun sonucunda çözünürlük, emülsifikasyon kapasitesi ve biyolojik aktivite gibi fonksiyonel özelliklerde azalma meydana gelmektedir. Benzer şekilde denizel pigmentler, özellikle ışık ve oksijen varlığında degradasyona uğrayarak renk kaybına neden olabilmektedir. Bu nedenle deniz

kaynaklı biyoaktiflerin stabilizasyonu, fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarının temel araştırma alanlarından biri haline gelmiştir.

Son yıllarda stabilite problemlerinin azaltılması amacıyla enkapsülasyon teknolojileri ön plana çıkmıştır. Mikroenkapsülasyon ve nanoenkapsülasyon teknikleri, biyoaktif bileşenlerin çevresel faktörlerden korunmasını sağlayarak oksidatif stabiliteyi artırabilmektedir. Özellikle emülsiyon bazlı taşıyıcı sistemler, liposomal yapılar, nanoemülsiyonlar ve biyopolimer kapsülleme sistemleri omega-3 yağ asitlerinin korunmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler aktif bileşen ile çevre arasındaki teması azaltarak oksidasyon hızını düşürmekte ve kontrollü salım avantajı sağlamaktadır (Vellido-Perez vd., 2021).

Sprey kurutma ve dondurarak kurutma yöntemleri, deniz kaynaklı yağların korunmasında en yaygın kullanılan teknikler arasında yer almaktadır. Sprey kurutma ekonomik ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir yöntem olmasına rağmen yüksek sıcaklık nedeniyle bazı hassas bileşiklerde kayıplara yol açabilmektedir. Dondurarak kurutma yöntemi ise daha düşük sıcaklıklarda çalışması nedeniyle oksidatif stabilitenin korunmasında daha başarılı sonuçlar vermektedir. Ayrıca son yıllarda nanolipozomal sistemler ve çok katmanlı emülsiyon yapıları da omega-3 stabilizasyonunda umut verici teknolojiler olarak değerlendirilmektedir (Hadian, 2016).

Doğal antioksidan kullanımı da stabilizasyon stratejileri arasında önemli bir yere sahiptir. Özellikle tokoferoller, askorbik asit, fenolik bileşikler ve alg kaynaklı doğal antioksidanlar lipid oksidasyonunu yavaşlatabilmektedir. Bunun yanında aktif ambalajlama sistemleri ve yenilebilir film teknolojileri, oksijen geçirgenliğini azaltarak raf ömrünü uzatabilmektedir. Denizel polisakkaritler olan kitosan ve aljinat bazlı biyopolimerlerin hem

taşıyıcı sistem hem de aktif ambalaj materyali olarak önemli potansiyele sahip olduğu bildirilmektedir (Wang vd., 2021).

Günümüzde deniz kaynaklı fonksiyonel gıdalar alanındaki araştırmalar, daha yüksek biyoyararlanım sağlayan ve kontrollü salım özelliklerine sahip akıllı taşıyıcı sistemlere yönelmektedir. Nanoemülsiyonlar, nanolipozomlar, biyobozunur nanopartiküller ve çok katmanlı kapsülleme sistemleri bu alandaki en önemli yenilikçi yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Ayrıca mikroalg kaynaklı DHA üretimi, sürdürülebilir deniz biyoteknolojileri ve döngüsel ekonomi uygulamaları da gelecekte önem kazanacak araştırma alanları olarak görülmektedir. Özellikle balık işleme yan ürünlerinden biyoaktif bileşen geri kazanımı, sürdürülebilir fonksiyonel gıda üretimi açısından dikkat çekmektedir (Chokshi vd., 2026).

Tüketici eğilimlerinin doğal, sürdürülebilir ve sağlık destekleyici ürünlere yönelmesi, deniz kaynaklı fonksiyonel bileşenlere olan ilgiyi artırmaktadır. Bununla birlikte gelecekteki çalışmaların yalnızca biyolojik aktiviteye değil; aynı zamanda stabilite, biyoyararlanım, duyu kalite ve endüstriyel uygulanabilirlik kriterlerine de odaklanması gerekmektedir. Bu doğrultuda gelişmiş enkapsülasyon teknolojileri, aktif ambalaj sistemleri ve nanoteknolojik taşıyıcı yapılar deniz kaynaklı fonksiyonel gıdaların ticari başarısında belirleyici rol oynayacaktır.

5. SONUÇ

Sonuç olarak, deniz kaynaklı fonksiyonel bileşenler; omega-3 yağ asitleri, biyoaktif peptitler, polisakkaritler, doğal pigmentler ve antioksidanlar gibi sağlık üzerinde olumlu etkileri bulunan çok sayıda biyolojik olarak aktif bileşiği içermektedir. Bu bileşenler kardiyovasküler hastalıklardan nörodejeneratif bozukluklara kadar birçok sağlık alanında potansiyel yarar

sağlamakta ve fonksiyonel gıda ile nutrasötik sektörlerinde giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. Bununla birlikte, bu bileşiklerin oksidasyon, ışık, sıcaklık ve depolama koşullarına karşı duyarlılığı, ticari uygulamalarının önündeki en önemli engellerden biridir. Günümüzde geliştirilen ekstraksiyon, enkapsülasyon ve taşıyıcı sistem teknolojileri, deniz kaynaklı biyoaktif bileşenlerin stabilitesini ve biyoyararlanımını artırarak fonksiyonel gıda uygulamalarındaki kullanım potansiyelini genişletmektedir. Gelecekte sürdürülebilir deniz kaynaklarının etkin değerlendirilmesi, gelişmiş koruma teknolojilerinin kullanımı ve yüksek katma değerli ürün geliştirme çalışmaları, deniz kaynaklı fonksiyonel gıdaların gıda endüstrisindeki yerini daha da güçlendirecektir.

KAYNAKÇA

- Anekthanakul, K., Senachak, J., Hongsthong, A., Charoonratana, T. & Ruengjitchatchawalya, M. (2019). Natural ACE Inhibitory Peptides Discovery from *Spirulina (Arthrospira platensis)* Strain C1. *Peptides*, 118, 170107.
- Batista, A., Gouveia, L., Bandarra, N., Franco, J. & Raymundo, A. (2013). Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Research*, 2, 164–173.
- Chhabra, N., Arora, M., Garg, D. & Samota, M. K. (2024). Spray freeze drying-a synergistic drying technology and its applications in the food industry to preserve bioactive compounds. *Food Control*, 155, 110099.
- Chokshi, K., Ahmad, A., Ashraf, S. S., Banat, F. & Hachem, M. (2026). Development of functional foods with stable encapsulated docosahexaenoic acid. *Frontiers in Nutrition*, 13, 1754055.
- Cunha, S.A. & Pintado, M.E. (2022). Bioactive Peptides Derived from Marine Sources: Biological and Functional Properties. *Trends Food Sci. Technol.*, 119, 348–370.
- Du, J., Xiao, M., Sudo, N. & Liu, Q. (2024). Bioactive Peptides of Marine Organisms: Roles in the Reduction and Control of Cardiovascular Diseases. *Food Sci. Nutr.*, 12, 5271–5284.
- Ehrlich, H., Maldonado, M., Spindler, K-D, Eckert, C., Hanke, T., Born, R., Goebel, C., Simon, P., Heinemann, S. & Worch, H. (2007). First evidence of chitin as a component of the skeletal fibers of marine sponges. Part I. Verongidae (*Demospongia: Porifera*). *J. Exp. Zool. (Mol. Dev. Evol.)*, 308B, 347–356.

- Ehrlich, H., Krautter, M., Hanke, T., Simon, P., Knieb, C., Heinemann, S. & Worch, H. (2007). First evidence of the presence of chitin in skeletons of marine sponges. Part II. Glass sponges (*Hexactinellida: Porifera*). *J. Exp. Zool. (Mol. Dev. Evol.)*, 308B, 473–483.
- Ferraz, C.A.A., Grougnet, R., Nicolau, E., Picot, L. & de Oliveira Junior, R.G. (2022). Carotenoids from Marine Microalgae as Antimelanoma Agents. *Mar. Drugs*, 20, 618.
- Gomez d'Ayala, G., Malinconico, M., & Laurienzo, P. (2008). Marine derived polysaccharides for biomedical applications: chemical modification approaches. *Molecules*, 13(9), 2069-2106.
- Hadian, Z. (2016). A review of nanoliposomal delivery system for stabilization of bioactive omega-3 fatty acids. *Electronic Physician*, 8(1), 1776.
- Hamed, I., Özogul, F., Özogul, Y., & Regenstein, J. M. (2015). Marine bioactive compounds and their health benefits: a review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 14(4), 446-465.
- Hatta, F. A. M. & Othman, R. (2020). Carotenoids as Potential Biocolorants: A Case Study of Astaxanthin Recovered from Shrimp Waste. *Carotenoids: Prop. Process. Appl.*, 289–325. DOI: 10.1016/B978-0-12-817067-0.00009-9
- Holdt, S. L. & Kraan, S. (2011). Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *Journal of applied phycology*, 23(3), 543-597.
- Innes, J. K. & Calder, P. C. (2020). Marine omega-3 (N-3) fatty acids for cardiovascular health: an update for 2020. *International journal of molecular sciences*, 21(4), 1362.

- Jacobsen, C., Sørensen, A. D. & Nielsen, N. S. (2013). Stabilization of omega-3 oils and enriched foods using antioxidants. In Food enrichment with omega-3 fatty acids. *Woodhead Publishing*, 130-149.
- Jafari, S. M., Assadpoor, E., He, Y. & Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Drying technology*, 26(7), 816-835.
- Khaw, K. Y., Parat, M. O., Shaw, P. N. & Falconer, J. R. (2017). Solvent supercritical fluid technologies to extract bioactive compounds from natural sources: A review. *Molecules*, 22(7), 1186.
- Leong, Y.K. & Chang, J.S. (2024). Proteins and Bioactive Peptides from Algae: Insights into Antioxidant, Anti-Hypertensive, Anti-Diabetic, and Anti-Cancer Activities. *Trends Food Sci. Technol.*, 145, 104352.
- Lordan, S., Ross, R.P. & Stanton C. (2011). Marine bioactives as functional food ingredients: potential to reduce the incidence of chronic diseases. *Mar Drugs*, 9:1056–100.
- Mancuso Nichols, C.A., Guezennec, J. & Bowman, J.P. (2005). Bacterial Exopolysaccharides from Extreme Marine Environments with special Consideration of the Southern Ocean, sea Ice, and deep-Sea Hydrothermal Vents: A Review. *Marine Biotechnol.*, 7, 253–271.
- Augustin, M.A. & Sanguansri, L. (2015). Challenges and Solutions to Incorporation of Nutraceuticals in Foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6:463–477. DOI: 10.1146/annurev-food-022814-015507
- Ngo, D. H. & Kim, S. K. (2013). Sulfated polysaccharides as bioactive agents from marine algae. *International Journal of Biological Macromolecules*, 62, 70-75.

- Okeke, E.S., Okagu, I.U., Chukwudozie, K. , Ezike, T.C. & Ezeorba, T.P.C. (2024). Marine-Derived Bioactive Proteins and Peptides: A Review of Current Knowledge on Anticancer Potentials, Clinical Trials, and Future Prospects. *Nat. Prod. Commun.*, 19, 1–19.
- Paliwal, C., Ghosh, T., George, B. et al. (2016). Microalgal carotenoids: potential nutraceutical compounds with chemotaxonomic importance. *Algal Research*, 15, 24–31.
- Ojagh, S. M., Rezaei, M., Razavi, S. H. & Hosseini, S. M. H. (2010). Development and evaluation of a novel biodegradable film made from chitosan and cinnamon essential oil with low affinity toward water. *Food chemistry*, 122(1), 161-166.
- Rafieezadeh, D. & Esfandyari, G. (2024). Marine Bioactive Peptides with Anticancer Potential, a Narrative Review. *Int. J. Biochem. Mol. Biol.*, 15, 118–126.
- Rasmussen, R.S. & Morrissey, M.T. (2007). Marine biotechnology for production of food ingredients. *Adv Food Nutr Res*, 52:237–92.
- Rohym, H.H., Hemeda, M.S., Elsayed, A.M., Farrag, M.S., Elsayed, H.A., Ezzat, A.A., Ibrahim, M.A. & Makloph, M. (2025). Interleukin-10 levels in azithromycin-induced cardiac damage and the protective role of combined selenium and vitamin E treatment. *Toxicol. Rep.*, 14, 101860.
- Stachowiak, B. & Szulc, P. (2021) Astaxanthin for the Food Industry. *Molecules*, 26(9), 2666. DOI: 10.3390/molecules26092666
- Senadheera, T. R., Hossain, A. & Shahidi, F. (2023). Marine bioactives and their application in the food industry: A review. *Applied sciences*, 13(21), 12088.

- Sachdeva, V., Roy, A. & Bharadvaja, N. (2020). Current prospects of nutraceuticals: A review. *Current pharmaceutical biotechnology*, 21(10), 884-896.
- Shahidi, F. & Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits. *Annual review of food science and technology*, 9, 345-381.
- Shaw, L. A., McClements, D. J. & Decker, E. A. (2007). Spray-dried multilayered emulsions as a delivery method for omega-3 fatty acids into food systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 3112–3119. DOI: 10.1021/jf063068s
- Song, Q., Kong, F., Liu, B.F., Song, X., Ren, N.Q. & Ren, H.Y. (2025). Ozone oxidation of actual waste leachate coupled with culture of microalgae for efficient lipid production under different temperatures. *Water Res.*, 277, 123305.
- Sun, H., Wang, Y., He, Y., Liu, B., Mou, H., Chen, F. & Yang, S. (2023). Microalgae-Derived Pigments for the Food Industry. *Mar. Drugs.*, 21(2), 82. DOI: 10.3390/md21020082
- Vellido-Perez, J. A., Ochando-Pulido, J. M., Brito-de la Fuente, E., & Martinez-Ferez, A. (2021). Novel emulsions-based technological approaches for the protection of omega-3 polyunsaturated fatty acids against oxidation processes—a comprehensive review. *Food Structure*, 27, 100175.
- Venkatesan, J., Anil, S., Kim, S.K. & Shim, M.S. (2017). Marine Fish Proteins and Peptides for Cosmeceuticals: A Review. *Mar. Drugs*, 15, 143.
- Wang, J., Han, L., Wang, D., Sun, Y., Huang, J. & Shahidi, F. (2021). Stability and stabilization of omega-3 oils: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 17-35.

- Yenipazar, H. & Şahin-Yeşilçubuk, N. (2023). Effect of packaging and encapsulation on the oxidative and sensory stability of omega-3 supplements. *Food Science & Nutrition*, 11(3), 1426-1440.
- Younes, I. & Rinaudo, M. (2015). Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. *Marine drugs*, 13(3), 1133-1174.
- Yu, Z., Xu, Z., Li, S., Tian, Z., Feng, Y., Zhao, H., Xue, G., Cui, J., Yan, C. & Yuan, J. (2024). Prophylactic vitamin C supplementation regulates DNA demethylation to protect against cisplatin-induced acute kidney injury in mice. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 695, 149463.
- Zhang, R., Ren, Y., Ren, T., Yu, Y., Li, B. & Zhou, X. (2025). Marine-derived antioxidants: a comprehensive review of their therapeutic potential in oxidative stress-associated diseases. *Marine Drugs*, 23(6), 223.
- Zeng, Q., Liao, M., Li, Y., She, F. & Zhang, P. (2025). Association between dietary vitamin E intake and incident cardiovascular disease, cardiovascular, and all-cause mortality: A prospective cohort study using NHANES 2003-2018 data. *Int. J. Cardiol. Cardiovasc. Risk Prev.*, 24, 200340.

FOCUSING ON INNOVATION: EXPLORING DIGITALIZATION IN THE FOOD INDUSTRY AND SMEs

Aslıhan TÜĞEN¹

Louiza BELKACEMI²

Hidaya LIAZID³

1. INTRODUCTION

Changes in consumption behaviors, along with demographic expansion and increased market competition, has led to a rise in the complexity of food production processes and customer expectations for quality assurance (Schiefer 2004). To address this change, the agri-food industries need to adopt a sustainability paradigm within food production processes through digitalization, from supply to production and reaching the consumer.

Digitalization is considered a key tool for efficiency and process monitoring in the implementation of sustainability (Bigliardi & Galati 2013, Boland 2008; Fig. 1.). It is transforming the value chain, which creates a demand-driven structure extending from production to consumption in the food sector (Demeter et al. 2020, Szász et al. 2021). This enables consumers

¹ PhD Student, Afyon Kocatepe University Institute of Science, Department of Food Engineering, Afyonkarahisar, Türkiye, ORCID: 0000-0001-5344-2804.

² Prof.Dr. Agricultural, Agri-food Production Techniques and Sustainable Development, Higher School of Agronomy of Mostaganem, Mostaganem, Algeria, ORCID: 0000-0002-0955-8604.

³ Dr., Agricultural, Agri-food Production Techniques and Sustainable Development, Higher School of Agronomy of Mostaganem, Mostaganem, Algeria, ORCID: 0009-0009-4760-0971.

to directly participate in the production process and to manage their needs quickly. This leads to an increase in demand for personalized products and services, increasing interest in innovative technologies and reducing producer costs. In this structure, technologies such as digital systems, big data, artificial intelligence, the Internet of Things, and cloud computing are cited as key tools in this process (Bigliardi & Galati 2013, Boland 2008, Demeter et al. 2020, Szász et al. 2021, Luo et al. 2018, Beltrami et al. 2021, Bahrin et al. 2022, European Commission 2021).

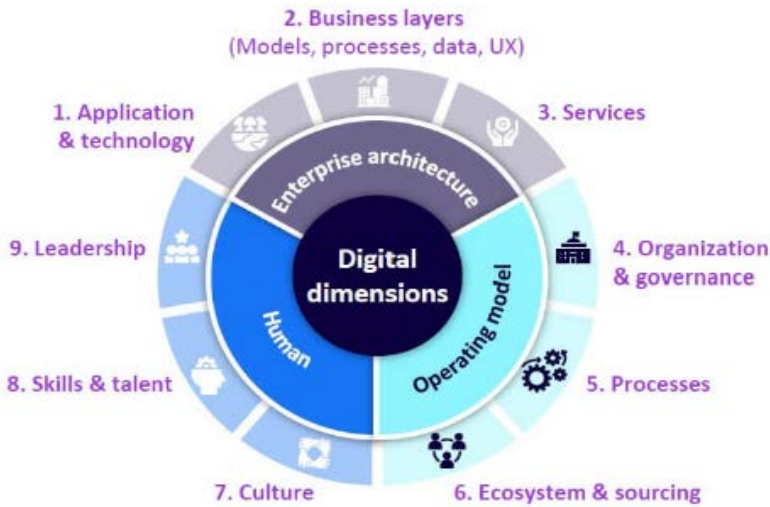


Fig. 1. Dimensions of digitalization.

The Industry 5.0 approach integrates the technical infrastructure of Industry 4.0 with the principles of human-centeredness, social benefit, and sustainability, highlighting not only smart factories but also intelligent systems that work in harmony with humans (European Commission 2021, Anderl 2015). The fundamental dimensions of digitalization are not limited to technological processes; they require the creation of an integrated corporate architecture with a multidimensional

approach encompassing human factors, culture, organizational structure, and processes (Christensen et al. 1996, Demartini et al. 2018). Environmental sustainability encompasses the protection of natural resources and the reduction of waste production; digital technologies play a critical role in achieving these goals (Christensen et al. 1996, Demartini et al. 2018). However, access to the necessary technology, high costs, and lack of expertise in the digitalization process pose significant obstacles, especially for small and medium-sized enterprises (SMEs) (Longoni & Cagliano 2015).

Despite this, the development of innovative business models offers significant opportunities, such as the design of customer-focused production processes and faster response to global market demands, thereby improving traceability, food safety, and quality standards (Almada-Lobo 2015, Khan & Turowski 2016, Tonelli et al. 2016). The literature indicates that e-commerce is one of the most important drivers of digitalization in the food sector (Atak & Özkoç 2023, Lehmann et al. 2012, Iqbal et al. 2017). This is achieved through artificial intelligence, mobile devices, digital coupons, and self-service scanning technologies (Anderl 2015, Lehmann et al. 2012, Jonsson et al. 2017, Crowe 2018).

1.1. Research gap and contribution

The use of digital technologies in the food sector has been extensively studied in the literature. However, studies that address the adoption of innovative practices, managerial strategies, and supply chain resilience in a holistic manner are limited. Studies that consider both the innovation-driven and operational challenges of digital transformation within the same framework, particularly for small and medium-sized enterprises (SMEs), have been identified as a shortcoming in modeling. This paper bridges this gap by:

- Proposing a theoretical framework integrating the Diffusion of Innovation (DOI) model (Hagberg et al. 2017) and Supply Chain Resilience Theory (Christopher & Peck 2004, Ponomarov & Holcomb 2009).
- Conducting a comparative case study of SMEs to identify practical challenges and solutions in digital transformation.
- Offering policy and managerial recommendations tailored to the food industry's unique regulatory and operational landscape.

1.2. Goal of the study

In this context, we aim to analyze the transformation brought about by I4.0 and I5.0 applications in the food industry, particularly for small and medium-sized enterprises. This includes identifying key opportunities and challenges, assessing their impacts, and formulating strategic recommendations. This approach is thought to offer some insights into the academic and practical aspects of the food industry by examining digitalization in the context of SMEs.

Two fundamental theoretical frameworks help to understand the fundamental digital transformation of the food industry. The Diffusion of Innovation Model (DIM) addresses the fundamental phenomena involved in the adoption of technological innovations, while the Supply Chain Resilience Theory focuses on mitigating risks in supply chains and preventing potential new risks.

1.3. Diffusion of innovation (DOI) model

The DOI model, developed by Rogers, examines the innovation processes of individuals and institutions (24). According to this model, large enterprises rapidly integrate digital tools, while SMEs lag behind in digitalization due to structural

problems and financial constraints. This fundamental distinction is cited as the primary reason for the speed and influence of processes in the diffusion of innovations. Large enterprises, due to their strong capital structures and institutionalization, rapidly open doors to innovation and increase efficiency in operational processes. With Enterprise Resource Planning (ERP) systems, artificial intelligence, and blockchain-based algorithms, management processes, and traceability process management, they can shoulder high costs and quickly adapt to digital transformation. SMEs, on the other hand, struggle to cope with these processes and progress slowly due to resistance stemming from lack of knowledge and weak institutional relationships.

Traditional production management often prevents habits from changing and leaves them outside the transformation. Policymakers, in particular, need to support SMEs to accelerate digital transformation to overcome high initial costs. Furthermore, government-supported financing, digital literacy training, and sectoral collaborations play a key role in the effective implementation of this process.

1.4. Supply chain resilience theory

Digitalization in supply chains has created numerous opportunities. However, it also creates various disadvantages. The Supply Chain Resilience Theory emphasizes the importance of digitalization in not only increasing businesses' resilience to crises but also enabling faster responses to them. Indeed, digitalization provides transparency and insight by providing real-time tracking. Innovative technologies such as the Internet of Things (IoT), blockchain, and AI-powered data analytics enable control and optimization in supply chains. This process carries certain risks, the most common of which are cybersecurity threats and data breaches. Preventing these risks requires establishing a robust infrastructure, which in turn imposes a significant financial

burden. For SMEs, these costs, combined with a lack of technical expertise and limited access to digital infrastructure, make adoption particularly difficult. SMEs often have difficulty harmonizing new digital tools with existing organizational processes, which slows down digital transformation. In this context, it is stated that collaborating with alternative suppliers at different points in the supply chain can increase operational resilience in the event of potential crises.

2. METHODS

2.1. Research focus and thematic framework

The study examines the impact of digital technology integration in production, logistics, and sustainability practices in the food and agriculture sectors. Specifically, applications of robotics, the Internet of Things (IoT), big data analytics, and artificial intelligence (AI) were evaluated in improving efficiency, food safety, and sustainability in supply chains (Chai et al. 2022). Within this framework, the focus was on the status of SMEs in adopting digital solutions, considering financial, technical, and organizational constraints.

The thematic structure of the review utilizes key constructs from the DOI model, particularly in analyzing the rate of technological adoption and the barriers faced by SMEs. Furthermore, Supply Chain Resilience Theory served as an analytical lens to assess how digitalization contributes to supply chain resilience and risk reduction. A critical assessment was made of how digital tools such as blockchain-enabled traceability systems, predictive analytics, and IoT-focused tracking mechanisms increase supply chain transparency while also introducing new risk factors such as cybersecurity vulnerabilities and over-reliance on technological infrastructure.

2.2. Research design and data sources

This research aimed to understand the impact of digitalization and its applications in small and medium-sized enterprises (SMEs) within the agri-food sector. The study was carried out by analysing the existing literature available in Google Scholar, Web of Science, Scopus, and Springer databases. The research material consisted of academic articles addressing the potential, challenges, and impacts of digital technologies in food sector applications. The literature review was based on sources offering a detailed perspective on the opportunities and challenges provided by digitalization. The selection criteria were established to ensure a robust evaluation of scholarly contributions discussing the adoption of digital technologies, challenges faced by small and medium-sized enterprises (SMEs), and the implications of digital transformation for supply chain resilience. For this purpose, the terms ‘digitalization in the food sector,’ ‘Industry 4.0 in the food sector,’ ‘SMEs’ and ‘food technology and innovation’ were used as keywords.

The material in Appendix 1 was firstly categorised and evaluated through headings within the scope of classification in document analysis. Sources were critically examined to identify recurring themes, theoretical perspectives, and empirical findings relevant to the study’s scope. The selection process involved a structured document analysis approach, categorizing literature according to thematic dimensions derived from the Diffusion of Innovation (DOI) model (Hagberg et al. 2017) and Supply Chain Resilience Theory (Christopher & Peck 2004, Ponomarov & Holcomb 2009).

The review process was conducted in alignment with the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) framework to ensure methodological rigor (54). The research started with the identification phase, during

which a total of 56 documents were accessed. After removing duplicate records, 53 documents remained for the screening phase. In the eligibility phase, 48 full-text articles that could be accessed were further evaluated, resulting in the exclusion of 22 studies. Among the excluded studies, 13 were theses, 4 were outside the field, 2 did not meet the date criterion, 1 was purely theoretical, and 2 did not contain relevant findings. The final analysis included 34 scholarly sources. A flow diagram detailing this selection process was prepared following the PRISMA guidelines and is presented in Fig. 2.

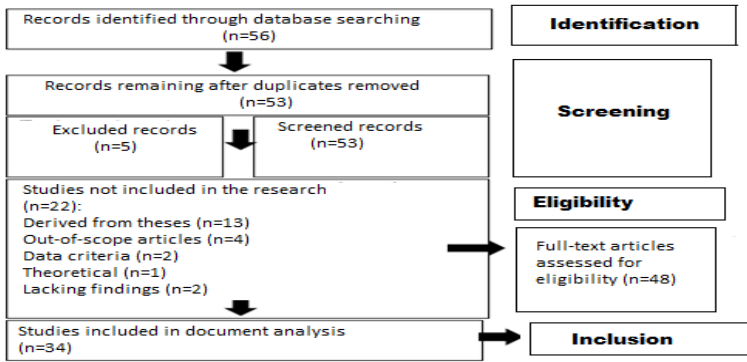


Fig. 2. PRISMA diagram

The data analysis phase employed qualitative document analysis and secondary data synthesis to extract key insights. Literature was coded according to core themes, including technological adoption drivers, SME-specific barriers, and supply chain resilience mechanisms. A comparative synthesis was conducted to identify convergence and divergence across studies, providing a holistic understanding of the digital transformation landscape in the food sector. This approach facilitated a structured assessment of both the opportunities presented by digitalization and the systemic challenges that must be addressed to ensure inclusive technological advancement.

Results

Due to current technological advancements, innovation processes are considered crucial for economic development and environmental sustainability in the food sector. In terms of sustainability goals, digital transformation has been reported to increase both efficiency and quality on an industrial scale (Saguy et al. 2018, Broday 2022). Furthermore, while digitalization offers numerous opportunities, such as extending product shelf life, ensuring quality and safety, process monitoring, and user-friendly solutions, it has also brought various challenges, particularly for small and medium-sized enterprises (SMEs) (Ben Ayed & Hanana 2021). With new-generation industrial applications, more efficient and integrated solutions are being developed across all processes, from production to consumption, to enable SMEs to effectively utilize digital technologies. However, despite all these advances, establishing sustainable production systems remains a significant challenge (Christopher & Peck 2004, Moher et al. 2009, Klerkx & Begemann 2020).

2.3. Digital tools and applications benefits in SMEs

Digital tools and applications are reported to play a critical role in enhancing competitiveness, improving productivity, and ensuring sustainability, particularly in small and medium-sized enterprises (SMEs). Studies suggest that these technologies have impacts across various categories. Iqbal et al. (2017) reported that robotic applications have transformed food processing, packaging, and service processes, offering significant opportunities, particularly in the areas of food safety and quality assurance. Disinfection in the food industry is a key component of food safety, and that of non-thermal surfaces presents significant challenges due to the resilience of microorganisms and the limitations of traditional methods. At this fact, the pulsed light technology demonstrated its effectiveness in disinfection of non-

thermal surface (Rowan, 2019). Qian et al. (2020) stated that traceability systems should meet both legal and consumer needs, and that blockchain is an important tool for transparency. Blockchain, in particular, strengthens trust in food safety standards by providing end-to-end traceability (Qian et al., 2020, Barbosa, 2021). Besides, blockchain technology has increased consumer confidence by providing traceability, transparency, and security (Qian et al.,2020), and enabling companies to meet consumer preferences more effectively and improve supply chain flexibility and responsiveness (Jagtap et al., 2021 , Carvalho et al., 2021). Real-time monitoring systems, AI-powered predictive analytics, and smart logistics networks (Ben Ayed & Hanana, 2021 , Zhu et al., 2021) allow companies to anticipate potential disruptions and implement proactive strategies.

Li et al. (2019) demonstrated that machine learning methods can accelerate quality assurance processes by up to 80%. As for Zhu et al. (2021) who reported that machine vision demonstrates strong performance in classification, error detection, and grading. Franceschelli et al. (2021) demonstrated that e-nose, e-tongue, imaging, and machine learning techniques can classify fish freshness and safety with up to 93% accuracy, revealing the industrial potential of fast and non-destructive quality control. Jagtap et al. (2020) explained that Food Logistics 4.0 improves transparency, cost, delivery, and quality. Furthermore, Moysiadis et al. (2021) reported that the IoT increases efficiency and reduces costs. Ben Ayed and Hanana (2021) explained that artificial intelligence offers predictive tools for agricultural productivity, resource management, and food safety. Artificial intelligence has automated separation and classification processes, saving labor and time (Qian et al.,2020). Misra et al. (2020) examined the broad applications of IoT, Big Data, and AI, from agriculture to supply chain modernization, noting that commercial applications are increasing but scaling

and transfer challenges remain. Glaros (2023) reported that “digital farm gate” approaches strengthen local distribution.

Food experience science and nutrition are another important aspect in food industries including SMEs. Chai et al. (2022) reported that AR/MR technologies are becoming widespread in the food sector in dietary assessment, nutrition, sensory science, retail, and education.

Furthermore, digitalization has created opportunities for resource optimization and reduced environmental impact through tools such as sensors, drones, satellite imaging, and RFID systems. These tools are considered important for SMEs in increasing operational efficiency, reducing quality losses, and improving process automation (Hasnan & Yusoff, 2018 , Franceschelli et al., 202, Bigliardi et al., 2023 , López-Morales et al., 2020).

In summary, Hasnan and Yusoff (2018), discussing Industry 4.0 applications, stated that these technologies increase traceability and efficiency, but emphasized the importance of developing user-friendly solutions and infrastructure for SMEs.

2.4. Barriers to the digitalization of SMEs

Despite offering significant opportunities, the digitalization process of small and medium-sized enterprises (SMEs) faces numerous obstacles and challenges. The most frequently highlighted issues in the literature are infrastructure deficiencies, standardization challenges, and integration difficulties. Infrastructure deficiencies, in particular, inadequate internet connectivity, missing digital platforms, and interoperability issues in large-scale IoT systems constitute the most common problems (Anderl R.,2015, Christensen JL et al.1996, Lehmann RJ,et al.2012) . It has been noted that SMEs' limited access to advanced technology suppliers creates dependency on external actors and slows down the pace of

adoption (Demartini M et al 2018). Saguy et al. (2018) believe that a lack of interdisciplinary collaboration is slowing down digital transformation in food engineering and technology. Rowan (2019) stated that the lack of international standards and methodological consensus hinders widespread adoption. Similarly, Chai et al. (2022) reported that connectivity issues and object recognition in complex environments constitute critical barriers in augmented/mixed reality (AR/MR) applications. Misra et al. (2020) determined that IoT, Big Data, and AI applications have been commercialized, but scalability and transfer challenges persist. Qian et al. (2020) highlighted the lack of multi-stakeholder governance frameworks in traceability systems. Barbosa (2021) stated that neglecting short supply chains poses a risk to resilience.

Beyond the aforementioned points, and contrary to larger enterprises with greater financial and technical capacity, small and medium-sized enterprises (SMEs) face significant obstacles such as high implementation costs. For SMEs, the high installation costs required for IoT sensors, AI software, and cloud analytics (Ponomarov SY et al 2009, Bigliardi B et al 2023, Hassoun A et al 2024, Jagtap S et al 2020) are considered a significant obstacle (Franceschelli L et al 2021, Misra NN 2020, Hassoun A 2023). Besides, a lack of specialized personnel in data analytics, machine learning, or IoT prevents SMEs from fully capitalizing on digital transformation opportunities (Demeter K, 2020; Atak MC 2023). In addition, cultural resistance to change and uncertainties about return on investment further constrain the pace of adoption (Anderl R 2015, Tonelli F et al 2016). These situations create a digital divide where early adopters gain a competitive advantage and late adopters struggle to transition (Misra NN 2020, Chai JJ ,2022).

Finally, the increasing reliance on digital infrastructures creates new risks, such as cybersecurity threats, data privacy

breaches, and over-reliance on automated systems (Moysiadis T,2021, Qian J et al. 2020). Cyberattacks targeting food supply chains involve the disruption of blockchain integrity and errors in AI-based decision-making processes. Strong management strategies highlight the need for security protocols (Glaros A ,2023; Li J , 2019). Inconsistent regulations regarding blockchain traceability, AI-based quality control, and IoT-supported monitoring systems (Zhu L et al. 2021, Carvalho AV et al.2021) create compliance challenges, particularly for companies operating in global markets.

An evaluation of the obstacles faced by SMEs in the digitalization process reveals that these obstacles revolve around technological constraints, high costs, cultural/social barriers, and governance gaps.

2.5. Solutions to the digitalization of SMEs

It is frequently emphasized that addressing technological infrastructure and standardization deficiencies in SMEs is crucial for digitalization. Therefore, harmonizing international technology standards, ensuring platform integration, and developing user-friendly, low-cost solutions are generally recommended (Hasnan & Yusoff 2018). Furthermore, the commercialization of IoT, artificial intelligence, and machine learning-based systems with practical applications stands out as factors facilitating digital transformation (Misra et al. 2020). Financial and operational support are also considered key elements that will pave the way for digitalization, and it is known that high installation costs restrict SMEs' access to technology. Therefore, government-supported incentives, grant programs, and appropriate loans are critical. It is stated that infrastructure investments should be shared through public-private partnerships and shared digital service centers should be established (Saguy et al. 2018). Indeed, the development of low-cost business models

is also believed to facilitate the participation of small businesses, in particular, in the digital transformation. In addition to all these, it is stated that the situation of human resources is also important (Rotz et al. 2019, Bahn et al. 2021). In this context, it is stated that digital literacy training programs should be developed for SME employees, applied R&D projects should be carried out through university-industry collaborations and human-centered Industry 5.0 approaches should be adopted (Saguy et al. 2018, Hassoun et al. 2024). Deficiencies in governance, policy and data security limit the sustainability of digitalization (Wolfert et al. 2017; Qian et al. 2020). For this reason, it is documented that the development of multi-stakeholder governance models, the dissemination of blockchain-based transparent traceability systems and the establishment of policies based on data ownership and security are necessary (Barbosa ,2021).

3. CONCLUSIONS

The food sector's role in economic development and environmental sustainability is undeniable. However, structural and operational barriers pose challenges to the digital transformation process, particularly for SMEs. Technologies such as artificial intelligence, blockchain, IoT, augmented reality, and 3D printing are known to offer the potential to optimize resource use, increase traceability, improve quality management, and reduce food waste. However, high installation costs, regulatory requirements, and a lack of digital literacy are reportedly limiting this process. Digitalization increases the efficiency and global competitiveness of SMEs and plays a crucial role in transforming the food sector into a demand-driven and personalized structure. Realizing these benefits requires financial and infrastructural support, the development of cost-effective models, and the implementation of digital literacy and workforce training

programs. This can only be achieved through the support of sustainable policies. Furthermore, cybersecurity and supply chain resilience, public-private partnerships, comparative policy analyses, and the adoption of global standards suggest that digital transformation will become more widespread and contribute to the sustainability of the sector.

REFERENCES

- Almada-Lobo, F. 2015. The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management* 3(4): 16–21. https://doi.org/10.24840/2183-0606_003.004_0003
- Anderl, R. 2015. Industrie 4.0 – technological approaches, use cases, and implementation. *at-Automatisierungstechnik* 63(10): 753–765. <https://doi.org/10.1515/auto-2015-0025>
- Atak, M.C. & Özkoç, E.E. 2023. The impact of Metaverse on work life: A Delphi study. *Journal of Metaverse* 3(2): 144–151. <https://doi.org/10.57019/jmv.1297129>
- Bahrin, M.A.K., Othman, M.F., Nor, N.H.M. & Azli, N.N. 2022. Towards industry 5.0: A human-centric and sustainable manufacturing system. *Journal of Industrial Integration and Management* 7(2): 217–236. <https://doi.org/10.1142/S2424862222500112>
- Bahn, R.A., Yehya, A.A. & Zurayk, R. 2021. Digitalization for sustainable agri-food systems: Potential, status, and risks for the MENA region. *Sustainability* 13(6): 3223. <https://doi.org/10.3390/su13063223>
- Barbosa, M.W. 2021. Uncovering research streams on agri-food supply chain management: A bibliometric study. *Global Food Security* 28: 100517. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100517>
- Beltrami, M., Orzes, G., Sarkis, J. & Sartor, M. 2021. Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. *Journal of Cleaner Production* 312: 127733. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733>
- Ben Ayed, R. & Hanana, M. 2021. Artificial intelligence to improve the food and agriculture sector. *Journal of Food*

Quality 2021: 5584754.
<https://doi.org/10.1155/2021/5584754>

- Bigliardi, B. & Galati, F. 2013. Innovation trends in the food industry: The case of functional foods. *Trends in Food Science & Technology* 31(2): 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.03.006>
- Bigliardi, B., Bottani, E., Casella, G., Filippelli, S., Petroni, A., Pini, B. & Gianatti, E. 2023. Industry 4.0 in the agrifood supply chain: A review. *Procedia Computer Science* 217: 1755–1764. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.375>
- Boland, M. 2008. Innovation in the food industry: Personalised nutrition and mass customisation. *Innovation* 10(1): 53–60. <https://doi.org/10.5172/impp.453.10.1.53>
- Brewster, C., Roussaki, I., Kalatzis, N., Doolin, K. & Ellis, K. 2017. IoT in agriculture: Designing a Europe-wide large-scale pilot. *IEEE Communications Magazine* 55(9): 26–33. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600528>
- Broday, E.E. 2022. The evolution of quality: From inspection to Quality 4.0. *International Journal of Quality and Service Sciences* 14(3): 368–382. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-09-2021-0121>
- Carvalho, A.V., Enrique, D.V., Chouchene, A. & Charrua-Santos, F. 2021. Quality 4.0: An overview. *Procedia Computer Science* 181: 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.176>
- Chai, J.J., O’Sullivan, C., Gowen, A.A., Rooney, B. & Xu, J.L. 2022. Augmented/mixed reality technologies for food: A review. *Trends in Food Science & Technology* 124: 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.021>

- Christopher, M. & Peck, H. 2004. Building the resilient supply chain. *International Journal of Logistics Management* 15(2): 1–13. <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>
- Christensen, J.L., Rama, R. & von Tunzelmann, N. 1996. Industry studies of innovation using CIS data: Study on innovation in the European food products and beverage industry. Report for the European Commission. Brussels: EIMS SPRINT. <https://aei.pitt.edu/50001/1/A9241.pdf>
- Crowe, E. 2018. How technology is shaping the future of food retail. *SmartBrief*. Available from <https://www.smartbrief.com/original/how-technology-shaping-future-food-retail>
- Demartini, M., Pinna, C., Tonelli, F., Terzi, S., Sansone, C. & Testa, C. 2018. Food industry digitalization: From challenges and trends to opportunities and solutions. *IFAC-PapersOnLine* 51(11): 1371–1378. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.337>
- Demeter, K., Losonci, D., Marciniak, R., Nagy, J., Móricz, P., Matyusz, Z., Baksa, M., Freund, A., Jám bor, Z., Pistru, B. & Diófási-Kovács, O. 2020. Industry 4.0 through the lenses of technology, strategy, and organization: A compilation of case study evidence. *Vezetéstudomány/Budapest Management Review* 51(11): 14–25. <https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2020.11.02>
- Demand Driven Manufacturing. 2013. *Synchrano.com*. Available from: <https://www.synchrano.com/resources/demand-driven-manufacturing/>
- European Commission. 2021. Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/308407>

- Franceschelli, L., Berardinelli, A., Dabbou, S., Ragni, L. & Tartagni, M. 2021. Sensing technology for fish freshness and safety: A review. *Sensors* 21(4): 1373. <https://doi.org/10.3390/s21041373>
- Glaros, A. 2023. Sustainable food systems transformation, from critique to practice: Describing and designing food futures. Doctoral dissertation, University of Guelph. <https://hdl.handle.net/10214/27490>
- Hagberg, J., Jonsson, A. & Egels-Zandén, N. 2017. Retail digitalization: Implications for physical stores. *Journal of Retailing and Consumer Services* 39: 264–269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jretconser.2017.08.005>
- Hassoun, A., Aït-Kaddour, A., Abu-Mahfouz, A.M., Rathod, N.B., Bader, F., Barba, F.J., Biancolillo, A., Cropotova, J., Galanakis, C.M., Jambrak, A.R. & Lorenzo, J.M. 2023. The fourth industrial revolution in the food industry — Part I: Industry 4.0 technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 63(23): 6547–6563. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2034735>
- Hassoun, A., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G., Duong, L.N., Saxena, P., Bouzemrak, Y., Treiblmaier, H., Para-López, C., Carmona-Torres, C. & Dev, K. 2024. From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying technological enablers and potential future applications in the food sector. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 23(6): e370040. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70040>
- Hasnan, N.Z. & Yusoff, Y.M. 2018. Short review: Application areas of Industry 4.0 technologies in food processing sector. *2018 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*: 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2018.8711184>

- Iqbal, J., Khan, Z.H. & Khalid, A. 2017. Prospects of robotics in food industry. *Food Science and Technology (Campinas)* 37(2): 159–165. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.14616>
- Jagtap, S., Bader, F., Garcia-Garcia, G., Trollman, H., Fadiji, T. & Salonitis, K. 2020. Food logistics 4.0: Opportunities and challenges. *Logistics* 5(1): 2. <https://doi.org/10.3390/logistics5010002>
- Jonsson, A., Egels-Zandén, N., Hagberg, J., Lamngård, C. & Sundström, M. 2017. Handelns digitalisering och förändrade affärer. *DiVA Portal*. Available from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1262694/FULLTEXT01.pdf>
- Khan, A. & Turowski, K. 2016. A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for Industry 4.0. In: *Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’16), Volume 1*: 15–26. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33609-1_2
- Klerkx, L. & Begemann, S. 2020. Supporting food systems transformation: The what, why, who, where and how of mission-oriented agricultural innovation systems. *Agricultural Systems* 184: 102901. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102901>
- Lehmann, R.J., Reiche, R. & Schiefer, G. 2012. Future internet and the agri-food sector: State-of-the-art in literature and research. *Computers and Electronics in Agriculture* 89: 158–174. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.005>
- Lezoche, M., Hernandez, J.E., Díaz, M.D., Panetto, H. & Kacprzyk, J. 2020. Agri-food 4.0: A survey of the supply

- chains and technologies for the future agriculture. *Computers in Industry* 117: 103187. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103187>
- Li, J., Wang, L.E., Zhang, X., Liu, L., Li, J., Chan, M.F., Sui, J. & Yang, R. 2019. Machine learning for patient-specific quality assurance of VMAT: Prediction and classification accuracy. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* 105(4): 893–902. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2019.07.049>
- Longoni, A. & Cagliano, R. 2015. Environmental and social sustainability priorities: Their integration in operations strategies. *International Journal of Operations & Production Management* 35(2): 216–245. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-04-2013-0182>
- Lopez-Morales, J.A., Skarmeta, A.F. & Martinez, J.A. 2020. Agri-food research centres as drivers of digital transformation for smart agriculture. In: *2020 Global Internet of Things Summit (GIIoTS)*: 1–5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/GIIoTS49054.2020.9119646>
- Luo, J., Ji, C., Qiu, C. & Jia, F. 2018. Agri-food supply chain management: Bibliometric and content analyses. *Sustainability* 10(5): 1573. <https://doi.org/10.3390/su10051573>
- Melis, K., Campo, K., Lamey, L. & Breugelmans, E. 2016. A bigger slice of the multichannel grocery pie: When does consumers' online channel use expand retailers' share of wallet? *Journal of Retailing* 92(3): 268–286. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2016.05.001>
- Misra, N.N., Dixit, Y., Al-Mallahi, A., Bhullar, M.S., Upadhyay, R. & Martynenko, A. 2020. IoT, big data, and artificial intelligence in agriculture and food industry. *IEEE*

- Internet of Things Journal* 9(9): 6305–6324.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2998584>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. & Altman, D.G. 2009. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *BMJ* 339: b2535.
<https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
- Moysiadis, T., Adamides, G., Stylianou, A., Zotos, N., Giannakopoulou, M. & Alexiou, G. 2021. Use of IoT technologies for irrigation and plant protection: The case for Cypriot fruits and vegetables. In: *Bio-Economy and Agri-Production*: 175–194. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819774-5.00010-2>
- Ponomarov, S.Y. & Holcomb, M.C. 2009. Understanding the concept of supply chain resilience. *International Journal of Logistics Management* 20(1): 124–143.
<https://doi.org/10.1108/09574090910954873>
- Qian, J., Ruiz-Garcia, L., Fan, B., Villalba, J.I., McCarthy, U., Zhang, B., Yu, Q., Wu, W. 2020. Food traceability system from governmental, corporate, and consumer perspectives in the European Union and China: A comparative review. *Trends in Food Science & Technology* 99: 402–412.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.025>
- Rogers, E.M. 2003. *Diffusion of innovations*. 5th ed. Free Press, New York.
- Rotz, S., Duncan, E., Small, M., Botschner, J., Dara, R., Mosby, I., Reed, M. & Fraser, E.D. 2019. The politics of digital agricultural technologies: A preliminary review. *Sociologia Ruralis* 59(2): 203–229.
<https://doi.org/10.1111/soru.12233>
- Rowan, N.J. 2019. Pulsed light as an emerging technology to cause disruption for food and adjacent industries – Quo

- vadis? *Trends in Food Science & Technology* 88: 316–332. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.027>
- Saguy, I.S., Roos, Y.H. & Cohen, E. 2018. Food engineering and food science and technology: Forward-looking journey to future new horizons. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 47: 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.001>
- Salampasis, M. & Theodoridis, A. 2013. Information and communication technology in agricultural development. *Procedia Technology* 8(9): 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.001>
- Schiefer, G. 2004. New technologies and their impact on the agri-food sector: An economist's view. *Computers and Electronics in Agriculture* 43(2): 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2003.12.002>
- Shahi, C. & Sinha, M. 2021. Digital transformation: Challenges faced by organizations and their potential solutions. *International Journal of Innovation Science* 13(1): 17–33. <https://doi.org/10.1108/IJIS-09-2020-0157>
- Szász, L., Demeter, K., Rácz, B.G. & Losonci, D. 2021. Industry 4.0: A review and analysis of contingency and performance effects. *Journal of Manufacturing Technology Management* 32(3): 667–694. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0371>
- Tonelli, F., Demartini, M., Loleo, A. & Testa, C. 2016. A novel methodology for manufacturing firms value modeling and mapping to improve operational performance in the Industry 4.0 era. *Procedia CIRP* 57: 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.022>

- UN. 2024. World Population Prospects 2024. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Available from <https://population.un.org/wpp/>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C. & Bogaardt, M.J. 2017. Big data in smart farming – a review. *Agricultural Systems* 153: 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
- Yan, J., Meng, Y., Lu, L. & Li, L. 2017. Industrial big data in an Industry 4.0 environment: Challenges, schemes, and applications for predictive maintenance. *IEEE Access* 5: 23484–23491. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2765544>
- Zhu, L., Spachos, P., Pensini, E. & Plataniotis, K.N. 2021. Deep learning and machine vision for food processing: A survey. *Current Research in Food Science* 4: 233–249. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.009>

APPENDICES

Appendix 1. References materials

Study	Region	Method	Main Contribution
Category: Food Technology & Innovation			
Iqbal et al. (2017)	Global (Pakistan)	Narrative review	Examines robotics applications in food processing, packaging and service systems, showing that automation significantly improves efficiency, hygiene and safety. The study emphasises strong future potential for service robots and recommends accelerating adoption in the food sector.
Saguy et al. (2018)	Global	Survey-supported review	Evaluates the evolution of food engineering and technology and highlights the need for paradigm shifts towards interdisciplinary integration and sustainability. The study stresses stronger collaboration between academia and industry to support applied research and technological innovation.
Hasnan & Yusoff (2018)	Malaysia / Global scope	Short review (conference)	Reviews Industry 4.0 technologies in food processing and emphasises improvements in traceability, productivity and operational efficiency. The study notes that SMEs require user-friendly technologies and supportive infrastructure to benefit from digital transformation.
Rowan (2019)	Global	Review	Reviews pulsed light (PL) technology as a non-thermal disinfection method for food surfaces. The technology shows strong effectiveness against microorganisms, although wider industrial adoption depends on international standardisation and methodological harmonisation.
Franceschelli et al. (2021)	Global	Review	Explores non-invasive technologies such as electronic nose, electronic tongue, imaging and machine learning for fish freshness and safety

			assessment. These techniques achieve classification accuracy approaching 93% and demonstrate strong industrial potential for rapid quality control.
Misra et al. (2022)	Global	Review	Reviews the integration of IoT, Big Data and artificial intelligence across agri-food systems, from primary production to supply chain management. The study highlights expanding commercial applications while noting challenges related to scaling, regulation and data infrastructure.
Chai et al. (2022)	Global	Systematic review	Analyses augmented and mixed reality applications in the food sector across 111 studies. Applications include diet assessment, nutrition education, retail interaction and sensory analysis, although object recognition and connectivity remain technological barriers.
Hassoun et al. (2023)	Global	Mini-series review	Examines the impact of Industry 4.0 technologies on food system sustainability, demonstrating improvements in environmental efficiency, economic productivity and public health outcomes. The study suggests that Industry 5.0 will require a stronger human-centred technological approach.
Bigliardi et al. (2023)	Global	Systematic review	Investigates Industry 4.0 adoption within agri-food supply chains and identifies key drivers such as climate change pressures and post-COVID transformation. The study proposes strategic roadmaps for innovation and sustainability integration.
Hassoun et al. (2024)	Global	Comprehensive review	Identifies enabling technologies for Industry 5.0 in the food sector, emphasising human-centred automation, sustainability and resilience. The study proposes conceptual frameworks for building adaptive and sustainable food systems.
Category: Agriculture & Sustainability			

Salampasis (2013)	Global	Editorial / short review	Discusses the role of information and communication technologies in agriculture, highlighting improvements in efficiency, decision-making and information exchange across food systems. The study emphasises the strategic importance of widespread ICT adoption.
Brewster et al. (2017)	Europe-focused	Conceptual study	Proposes large-scale IoT pilot projects in agriculture and food value chains. The study identifies interoperability, business models and cultural change as prerequisites for successful digital transformation.
Wolfert et al. (2017)	Global	Structured/systematic review	Analyses the role of Big Data in smart farming and shows that data-driven technologies affect all stages of the food chain. The study highlights governance challenges, socio-economic risks and the need for viable business models.
Rotz et al. (2019)	North America / Europe	Critical social science review	Examines the political economy of digital agriculture, highlighting concerns related to data ownership, security, inequality and corporate power concentration. The study suggests that agroecology and digital agriculture should coexist under equitable governance structures.
Lezoche et al. (2020)	Global	Broad review	Reviews the transformation of agri-food supply chains towards the Agri-Food 4.0 paradigm through analysis of more than 100 studies. The study emphasises the importance of stakeholder alignment and supply chain optimisation.
Lopez-Morales et al. (2020)	Global / selected centres	Conceptual review	Explores the role of research centres in accelerating smart agriculture adoption. IoT-based platforms are shown to facilitate integration, knowledge transfer and technological implementation across agricultural systems.
Bahn et al. (2021)	MENA region	Systematic review	Evaluates the sustainability impact of digital technologies in MENA agri-food systems. Economic benefits drive adoption, while social and

			environmental aspects receive less attention. Balanced policy frameworks are recommended.
Jagtap et al. (2021)	Global	Review	Examines Food Logistics 4.0 and demonstrates improvements in transparency, cost efficiency, delivery performance and product quality. Integration and cybersecurity challenges remain key barriers.
Ben Ayed & Hanana (2021)	Global (Tunisia)	Review	Reviews artificial intelligence applications in agriculture and food systems, including predictive models for productivity, resource management and food security. Greater collaboration and integration of AI into existing systems are needed.
Moysiadis et al. (2021)	Global / EU examples	Review	Investigates IoT technologies for sustainable farming and demonstrates improvements in operational efficiency and cost reduction. The study highlights the need for multidisciplinary integration and SDG-based monitoring frameworks.
Misra et al. (2022)	Global	Review	Examines IoT, Big Data and AI integration across agri-food systems, including drone imaging, smart machinery and digital supply chains. Increasing commercialisation requires regulatory frameworks and robust data infrastructure.
Glarios et al. (2023)	MENA / local systems	Review / framework	Analyses digital farmgate platforms for local agri-food systems, showing improvements in local distribution and producer-consumer connectivity. Economic sustainability drives adoption, while social and environmental impacts depend on policy support.
Category: Technology Applications			
Yan et al. (2017)	Global / manufacturing	Review / framework	Proposes Big Data frameworks for predictive maintenance in industrial production systems. Cloud-based data architectures significantly improve reliability and operational performance in smart factories.

Iqbal et al. (2017)	Global	Review	Examines robotics integration in food processing and service environments. The study highlights significant efficiency gains and emphasises the need for sector-specific safety standards.
Li et al. (2019)	US / China multi-centre	Quantitative modelling (ML, PL & RF)	Develops machine learning models to predict and classify quality assurance outcomes in VMAT plans. The random forest model achieves 100% sensitivity, potentially reducing QA workload by up to 80%.
Zhu et al. (2021)	Global	Review	Reviews machine vision technologies for food quality assessment, demonstrating strong performance in classification, defect detection and grading applications. Future development requires deeper integration with deep learning systems.
Carvalho et al. (2021)	Global / manufacturing	Mapping / review	Maps quality management practices to Industry 4.0 technologies, illustrating how digital tools support Quality 4.0 transformation. The study proposes implementation roadmaps for organisations.
Chai et al. (2022)	Global	Systematic review	Reviews augmented and mixed reality technologies in the food sector and highlights applications in consumer interaction, retail environments and education. Technological barriers include object recognition and connectivity limitations.
Category: Quality & Traceability			
Li et al. (2019)	US / China multi-centre	Quantitative modelling (ML)	Demonstrates the use of machine learning for quality assurance prediction and classification, showing strong potential to optimise QA workflows and reduce operational workload.
Qian et al. (2020)	EU & China	Comparative review	Compares international food traceability systems and highlights the growing role of blockchain and artificial intelligence in enhancing transparency and regulatory compliance.

Barbosa (2021)	Global	Bibliometric review	Analyses agri-food supply chain research trends between 2008 and 2019, identifying blockchain and food security as dominant themes while noting research gaps related to short supply chains.
Carvalho et al. (2021)	Global	Mapping / review	Demonstrates how Industry 4.0 technologies complement traditional quality management practices and facilitate gradual digital transformation within organisations.
Brodar (2022)	Global	Review	Examines the evolution of quality management concepts within Industry 4.0, concluding that digital technologies enhance rather than replace traditional quality control approaches.

SPIRULINA VE MATCHA İLAVELİ FONKSİYONEL KOYUN YOĞURDU ÜRETİMİ: FORMÜLASYON, DUYUSAL ÖZELLİKLER VE FONKSİYONEL POTANSİYEL¹

Engin MEYDAN²

Fatma YOLDAŞ³

1. GİRİŞ

Beslenme biliminin son yıllardaki temel eğilimlerinden biri, gıdaların yalnızca enerji ve temel besin ögesi kaynağı olarak değil, aynı zamanda sağlığı koruyucu ve destekleyici bileşenler taşıyan ürünler olarak değerlendirilmesidir. Bu yaklaşım, fonksiyonel gıdaların akademik araştırmalarda, gıda endüstrisinde ve tüketici tercihlerinde giderek daha görünür hale gelmesini sağlamıştır. Tüketicilerin sağlıklı yaşam, bağışıklık sistemi, sindirim sağlığı, antioksidan kapasite ve doğal içerik beklentileri; geleneksel ürünlerin yenilikçi bileşenlerle yeniden formüle edilmesine zemin hazırlamaktadır.

Fermente süt ürünleri, fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarında özel bir yere sahiptir. Yoğurt, fermente yapısı, besleyici değeri, tüketim alışkanlıkları içerisindeki güçlü konumu ve farklı bileşenlerle kolayca zenginleştirilebilmesi nedeniyle bu alanda en uygun ürünlerden biridir. Yoğurt

¹ TÜBİTAK 2242 - Üniversite Öğrencileri Araştırma Proje Yarışmaları 2026/1 Spirulina ve Matcha İlavesi ile Fonksiyonel Yoğurt Üretimi.

² Doç. Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ezine Gıda İhtisas O.S.B M.Y.O, ORCID:0000-0002-1860-1715.

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ezine Gıda İhtisas O.S.B M.Y.O, ORCID: 0009-0002-3911-0277.

üretiminde kullanılan starter kültürler, ürünün karakteristik asitlik, aroma ve tekstür özelliklerinin oluşmasını sağlarken, tüketici tarafından tanınan ve güvenilir bulunan bir gıda matrisi sunar. Bu nedenle yoğurt, bitkisel veya alg kaynaklı biyoaktif bileşenlerin taşınması için işlevsel bir ortam olarak değerlendirilebilir.

Bu bölümün odak noktasını, spirulina ve matcha ilavesiyle geliştirilen fonksiyonel koyun yoğurdu oluşturmaktadır. Spirulina ve matcha, farklı biyolojik kaynaklardan elde edilen ancak ortak biçimde yüksek antioksidan potansiyelleriyle öne çıkan bileşenlerdir. Spirulina protein, mineral, vitamin ve pigment içeriğiyle; matcha ise kateşinler, klorofil ve L-teanin gibi bileşenleriyle fonksiyonel gıda formülasyonlarında dikkat çekmektedir. Bununla birlikte bu bileşenlerin güçlü renk, aroma ve tat profilleri, ürün geliştirme sürecinde duyuşal açıdan dikkatli bir optimizasyon gerektirir.

2. FONKSİYONEL GIDA KAVRAMI VE SÜT ÜRÜNLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR

Fonksiyonel gıda kavramı, temel beslenme ihtiyacını karşılamamanın ötesinde fizyolojik yarar sağlayabilen veya hastalık riskini azaltmaya yardımcı olabilen gıdaları tanımlar. Bu ürünler vitamin, mineral, posa, probiyotik mikroorganizma, prebiyotik bileşen, fenolik madde, antioksidan, yağ asidi veya farklı biyoaktif bileşenler içerebilir. Fonksiyonel gıda yaklaşımı, modern tüketicinin doğal, katkısız, besleyici ve sağlığı destekleyici ürünlere yönelmesiyle birlikte gıda endüstrisinde önemli bir yenilik alanı oluşturmuştur.

Süt ve süt ürünleri, fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarında elverişli bir matrise sahiptir. Protein, kalsiyum, fosfor, B grubu vitaminleri ve biyoyararlı mineraller bakımından

zengin olmalarının yanı sıra, fermente edilmeleri durumunda sindirim sistemiyle ilişkili olumlu etkiler gösterebilirler. Yoğurt gibi fermente süt ürünleri, tüketici tarafından geleneksel ve güvenilir ürünler olarak kabul edildiği için yeni bileşenlerin eklenmesine uygun bir taşıyıcı yapı sunar.

Fonksiyonel süt ürünü geliştirme sürecinde yalnızca ürünün besinsel değerinin artırılması yeterli değildir. Ürünün tat, koku, renk, kıvam, ağız hissi ve genel kabul edilebilirlik bakımından tüketici beklentilerini karşılaması gerekir. Özellikle spirulina ve matcha gibi yoğun aromalı ve belirgin renk veren bileşenlerin kullanıldığı ürünlerde formülasyon dengesi kritik önem taşır. Duyusal olarak kabul edilmeyen bir ürün, fonksiyonel açıdan güçlü olsa dahi pazarda sürdürülebilir bir başarı yakalayamaz.

Bu çerçevede fonksiyonel yoğurt geliştirme, çok boyutlu bir tasarım sürecidir. Hammadde seçimi, starter kültür aktivitesi, ısıtma işlem koşulları, bileşen ilave zamanı, karıştırma tekniği, pH, depolama sıcaklığı, raf ömrü ve duyusal kabul birlikte değerlendirilmelidir. Kitap bölümünde ele alınan spirulina ve matcha ilaveli koyun yoğurdu, bu çok boyutlu yaklaşımın örneklerinden biri olarak değerlendirilebilir.

2.1. Koyun Sütü ve Yoğurt Üretimindeki Teknolojik Avantajları

Koyun sütü, inek sütüne kıyasla genellikle daha yüksek yağ, protein, mineral ve kuru madde içeriğine sahiptir. Bu özellik, yoğurt üretiminde daha yoğun kıvam, daha dolgun ağız hissi ve daha yüksek besin değeri sağlayabilir. Koyun sütünden elde edilen yoğurtlar, geleneksel tüketim alışkanlıkları açısından da birçok bölgede değerli kabul edilmektedir. Çanakkale Ezine yöresi gibi süt ürünleriyle öne çıkan bölgelerde koyun sütü, yöresel kimlik ve ürün kalitesi açısından güçlü bir hammaddedir.

Fonksiyonel bileşenlerle zenginleştirilmiş yoğurt üretiminde koyun sütü kullanımı, ürünün besinsel yoğunluğunu artırma potansiyeline sahiptir. Yüksek protein ve kuru madde içeriği, spirulina ve matcha gibi toz bileşenlerin ürün matrisi içinde daha dengeli dağılmasına katkıda bulunabilir. Bununla birlikte koyun sütünün kendine özgü aroması, kullanılan fonksiyonel bileşenlerin aromatik özellikleriyle etkileşime girebilir. Bu nedenle ürün geliştirme sürecinde hem teknolojik hem de duyuusal yönler birlikte değerlendirilmelidir.

Koyun sütü yoğurdunda kaliteyi belirleyen temel faktörler arasında sütün hijyenik kalitesi, ısıtma işlem koşulları, starter kültür aktivitesi, inkübasyon sıcaklığı, pH düşüş hızı ve soğutma koşulları yer alır. Fonksiyonel bileşen ilavesi, özellikle fermentasyon sonrası yapılacaksa, ürünün mikrobiyal güvenliği ve fiziksel stabilitesi açısından uygun hijyenik koşullar sağlanmalıdır. Bu çalışmada fonksiyonel bileşenlerin yoğurt oluşumu tamamlandıktan sonra ilave edilmesi, bileşenlerin ısıtma işleminden kaynaklanabilecek olası kayıplarını azaltma bakımından uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

Tablo 1. Koyun sütünün fonksiyonel yoğurt geliştirmedeki olası avantajları

Özellik	Ürün geliştirme açısından önemi
Yüksek protein içeriği	Besinsel değeri ve kıvamı destekler.
Yüksek kuru madde	Daha yoğun tekstür ve dolgun ağız hissi sağlar.
Mineral zenginliği	Fonksiyonel değer algısını güçlendirir.
Yöresel değer	Ürünün pazarlama ve hikâyeleştirme potansiyelini artırır.
Kendine özgü aroma	Doğru formülasyonla karakteristik bir duyuusal profil oluşturur.

2.2. Spirulina: Bileşimi, Fonksiyonel Özellikleri ve Süt Ürünlerinde Kullanımı

Spirulina, fotosentetik özellik gösteren mavi-yeşil algler arasında yer alan, besinsel yoğunluğu yüksek bir mikroorganizmadır. Kurutulularak toz formda kullanılan spirulina,

protein oranı, esansiyel amino asit profili, demir, bazı B grubu vitaminleri, karotenoidler, klorofil ve fikosiyanın gibi pigmentleriyle fonksiyonel gıda çalışmalarında dikkat çekmektedir. Özellikle fikosiyanın, spirulinanın karakteristik mavi-yeşil renginden sorumlu olup antioksidan potansiyel açısından da önemli kabul edilmektedir.

Spirulina kullanımının gıda formülasyonlarındaki en önemli avantajı, küçük miktarlarda bile ürünün besinsel ve görsel özelliklerini belirgin biçimde değiştirebilmesidir. Ancak bu durum aynı zamanda bir sınırlılık da oluşturur. Spirulina yüksek oranlarda kullanıldığında algimsi koku, yoğun yeşil-mavi renk ve tüketicinin alışık olmadığı bir tat profili oluşturabilir. Bu nedenle süt ürünlerinde spirulina kullanımında optimum düzeyin belirlenmesi gerekir.

Yoğurt gibi fermente süt ürünlerinde spirulina kullanımı, ürünün protein ve antioksidan kapasitesini artırma potansiyeli taşır. Bununla birlikte starter kültür canlılığı, pH gelişimi, serum ayrılması, tekstür ve duyuşsal kabul gibi kalite özellikleri üzerinde etkili olabilir. Literatürde spirulina katkılı yoğurt çalışmalarında düşük konsantrasyonların duyuşsal açıdan daha kabul edilebilir olduğu, yüksek konsantrasyonların ise renk ve aroma nedeniyle beğeniyi azaltabildiği bildirilmektedir. Bu bölümde ele alınan çalışmada da spirulina miktarının 1 g düzeyinde tutulması, duyuşsal kabulün artırılmasında belirleyici olmuştur.

Spirulina, fonksiyonel gıda yaklaşımı açısından güçlü bir bileşen olmakla birlikte ürün geliştirme sürecinde tek başına değerlendirilmemelidir. Spirulinanın oluşturduğu yoğun algimsi notaların dengelenmesi için meyve, asitlik düzenleyici doğal bileşenler veya aromatik bitkisel bileşenler kullanılabilir. Bu çalışmada fermente ananas suyu ve limon suyunun kullanılması,

spirulinanın baskın duyuşal etkisini dengelemeye yönelik uygun bir strateji olarak yorumlanabilir.

2.3. Matcha: Biyoaktif Bileşenleri ve Gıda Formülasyonlarındaki Rolü

Matcha, *Camellia sinensis* bitkisinin gölgede yetiştirilen genç yapraklarının buharlanması, kurutulması ve taş değirmenlerde ince toz haline getirilmesiyle elde edilen özel bir yeşil çay formudur. Geleneksel yeşil çaydan farklı olarak yaprağın tamamı toz formda tüketildiği için biyoaktif bileşen alımı daha yoğun olabilir. Matcha, özellikle kateşinler, epigallokateşin gallat, klorofil, kafein ve L-teanin içeriğiyle öne çıkar.

Matchanın fonksiyonel gıda formülasyonlarındaki önemi, antioksidan kapasitesi ve karakteristik aromasıyla ilişkilidir. Yeşil çay polifenolleri, oksidatif stresin azaltılması ve metabolik sağlığın desteklenmesi açısından ilgi görmektedir. L-teanin ise matchanın zihinsel odaklanma ve sakinlik ile ilişkilendirilen bileşenlerinden biridir. Bununla birlikte matcha belirgin otsu, bitkisel ve hafif buruk tat profiline sahiptir. Bu özellikler ürüne fonksiyonel değer kazandırırken, tüketici kabulünü etkileyebilecek bir duyuşal yoğunluk da oluşturabilir.

Yoğurt formülasyonlarında matcha kullanımı, ürünün rengini canlı yeşil tonlara taşıyabilir ve antioksidan değer algısını güçlendirebilir. Ancak matcha oranı arttıkça burukluk ve bitkisel aroma baskın hale gelebilir. Bu nedenle matchanın spirulina ile birlikte kullanıldığı formülasyonlarda iki bileşenin renk ve aroma etkileri birlikte düşünülmelidir. Çalışmada en başarılı formülasyonun 6 g matcha ve 1 g spirulina içermesi, matchanın daha baskın ancak spirulinanın kontrollü düzeyde kullanıldığı bir denge noktasına işaret etmektedir.

Matcha ve spirulinanın birlikte kullanımı, literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınmış bir yaklaşımdır. Bu iki

bileşenin aynı yoğurt matrisi içinde kullanılması, hem fonksiyonel açıdan zengin hem de görsel olarak dikkat çekici bir ürün ortaya çıkarabilir. Bununla birlikte ürünün günlük tüketim alışkanlıklarına uygun olması için asitlik, tatlılık, meyvemsi notalar ve fermente ürün karakteri dengelenmelidir.

2.4. Fermente Ananas Suyu ve Limon Suyunun Formülasyondaki İşlevi

Fonksiyonel bileşenlerle zenginleştirilmiş ürünlerde duyuusal denge, ürün başarısının temel koşullarından biridir. Spirulina ve matcha gibi yoğun aromalı bileşenlerin bulunduğu formülasyonlarda fermente meyve bileşenleri, aroma maskeleyme, asitlik dengesi ve tazeleyici tat profili oluşturma açısından kullanılabilir. Bu çalışmada fermente ananas suyu ve limon suyu bu amaçla formülasyona dahil edilmiştir.

Fermente ananas suyu, meyvemsi aroma ve hafif asidik karakteriyle yoğurdun fermente yapısıyla uyum sağlayabilir. Ananasın doğal aromatik bileşenleri, spirulinanın algimsi kokusunu ve matchanın otsu tadını dengeleyebilir. Fermente edilmiş formu ise ürüne daha kompleks bir tat profili kazandırabilir. Limon suyu ise asitlik ve ferahlık sağlayarak ürünün duyuusal canlılığını artırabilir. Ayrıca limonun tüketici tarafından tanınan ve kabul gören bir aroma olması, alışılmadık fonksiyonel bileşenlerin kabulünü kolaylaştırabilir.

Bu iki bileşenin kullanımı, fonksiyonel ürün geliştirmede doğal bileşenlerden yararlanma eğilimiyle de uyumludur. Günümüzde tüketiciler, yapay aroma veya katkı maddeleri yerine meyve, bitki, fermentasyon ürünleri ve doğal asit kaynakları içeren formülasyonlara daha olumlu yaklaşabilmektedir. Bu nedenle fermente ananas suyu ve limon suyu yalnızca duyuusal değil, aynı zamanda ürün algısı açısından da önem taşır.

3. ÜRÜN GELİŞTİRME ÇALIŞMALARINDA UYGULANAN İŞLEMLER

3.1. Materyal Seçimi

Çalışmada temel hammadde olarak Çanakkale Ezine bölgesinden temin edilen koyun sütü ve koyun yoğurdu kullanılmıştır. Fonksiyonel bileşen olarak matcha tozu ve spirulina tozu tercih edilmiştir. Duyusal denge oluşturmak amacıyla fermente ananas suyu ve limon suyu kullanılmıştır. Deneme aşamalarında ayrıca yarım yağlı yoğurt, tam yağlı yoğurt, mango ve Hindistan cevizi yağı içeren alternatif formülasyonlar da değerlendirilmiştir.

Materyal seçimi, ürünün hem fonksiyonel değerini hem de duyusal kabulünü artırma amacıyla yapılmıştır. Koyun sütü ürünün besinsel yoğunluğunu desteklerken, matcha ve spirulina biyoaktif bileşen kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Fermente ananas suyu ve limon suyu ise ürünün aromatik dengesini sağlamak ve tüketici kabulünü artırmak amacıyla formülasyona dahil edilmiştir.

3.2. Yoğurt Üretim Süreci

Yoğurt üretiminde öncelikle sütün yabancı maddelerden ayrılması amacıyla filtrasyon işlemi uygulanmıştır. Ardından süt kalite özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla renk, koku, pH, titrasyon asitliği, toplam kuru madde ve yoğunluk gibi temel analizler dikkate alınmıştır. Üretime uygun bulunan süt, homojenizasyon ve ısıl işlem aşamalarından geçirilmiştir. Isıl işlem, sütte bulunabilecek istenmeyen mikroorganizmaların azaltılması, serum proteinlerinin denatürasyonu ve yoğurt kıvamının geliştirilmesi açısından önemlidir.

Isıl işlem sonrası süt, yoğurt starter kültürlerinin gelişebileceği uygun sıcaklık aralığına soğutulmuştur. Mayalama aşamasında *Streptococcus thermophilus* ve

Lactobacillus delbrueckii subsp. *bulgaricus* kültürlerinin etkinliği esas alınmıştır. İnkübasyon işlemi, yaklaşık 42-45 °C sıcaklıkta yoğurt oluşumu tamamlanıncaya kadar sürdürülmüştür. pH yaklaşık 4,5 düzeyine ulaştığında fermentasyon sonlandırılmış ve ürün soğutulmuştur.

Fonksiyonel bileşenler, yoğurt oluşumu tamamlandıktan sonra ilave edilmiştir. Bu yaklaşım, matcha ve spirulina gibi ısıya duyarlı bazı biyoaktif bileşenlerin yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmasını azaltabilir. İlave sonrası ürün topaklanmayı önleyecek biçimde homojen olarak karıştırılmış ve 4 °C’de muhafaza edilmiştir.

4. DENEME FORMÜLASYONLARI VE ÜRETİM AKIŞI

Ürün geliştirme sürecinde farklı bileşen kombinasyonları denenmiş ve duyuusal değerlendirmeler sonucunda en uygun formülasyon belirlenmiştir. İlk denemelerde matcha tek başına yoğurt matrisi içinde değerlendirilmiş, daha sonra spirulina, Hindistan cevizi yağı, mango, fermente ananas suyu ve limon suyu gibi bileşenlerle alternatif ürünler oluşturulmuştur.

Tablo 2. Deneme formülasyonları

Formülasyon	Bileşenler	Amaç
F1	60 g yarım yağlı yoğurt + 2 g matcha	Matchanın temel yoğurt matrisiyle uyumunu değerlendirmek
F2	60 g tam yağlı yoğurt + 4 g matcha + 2 g spirulina + 4 g Hindistan cevizi yağı	Spirulina ve yağ bileşeninin etkisini değerlendirmek
F3	60 g tam yağlı yoğurt + 5 g matcha + 1,5 g spirulina + 10 g mango	Meyve aromasının duyuusal dengeye katkısını incelemek
F4	60 g tam yağlı yoğurt + 6 g matcha + 1 g spirulina + 15 g fermente ananas suyu + 15 g limon suyu	En yüksek duyuusal kabul için nihai formülasyonu oluşturmak

Üretim akışı şu şekilde özetlenebilir: çiğ süt alımı, filtrasyon, homojenizasyon, pastörizasyon, soğutma, mayalama, inkübasyon, soğutma, fonksiyonel bileşen ilavesi ve depolama. Bu akış, geleneksel yoğurt üretim basamaklarını korurken ürünün son aşamada fonksiyonel bileşenlerle zenginleştirilmesine olanak tanır.

Tablo 3. Üretim akışının teknolojik amacı

Aşama	Teknolojik amaç
Filtrasyon	Sütte bulunabilecek yabancı maddeleri uzaklaştırmak
Homojenizasyon	Yağ globüllerinin dağılımını iyileştirerek kıvamı desteklemek
Pastörizasyon/Isıl işlem	Mikrobiyal yükü azaltmak ve yoğurt tekstürünü geliştirmek
Soğutma	Starter kültür için uygun sıcaklığa ulaşmak
Mayalama ve inkübasyon	Yoğurt oluşumunu sağlamak
Soğutma	Fermantasyonu yavaşlatmak ve ürün stabilitesini korumak
Bileşen ilavesi	Matcha, spirulina ve meyve bileşenleriyle fonksiyonel değer kazandırmak
Depolama	Ürünü 4 °C'de muhafaza ederek raf ömrünü desteklemek

5. DUYUSAL ANALİZ YAKLAŞIMI

Fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarında duyu analizi, ürünün tüketici tarafından kabul edilip edilmeyeceğini belirlemek açısından zorunlu bir aşamadır. Bu çalışmada duyu analizi 45 kadın ve 25 erkek olmak üzere toplam 70 katılımcı ile gerçekleştirilmiştir. Tüketici testi yaklaşımı kullanılarak ürünlerin renk, koku, aroma, tat, kıvam ve genel kabul edilebilirlik özellikleri değerlendirilmiştir.

Duyu analizinde panelistlerin ürüne ilişkin algıları, yalnızca formülasyonun lezzetini değil, aynı zamanda fonksiyonel bileşenlerin tüketiciye ne ölçüde uyumlu

sunulabildiğini de gösterir. Spirulina ve matcha gibi alışılmış yoğurt aromalarının dışında kalan bileşenler kullanıldığında panelistlerin alışkanlıkları, sağlıklı ürünlere açıklığı ve yeni tatlara toleransı sonuçları etkileyebilir.

Bu nedenle duyuusal analiz sonuçları yorumlanırken ürünün hedef tüketici kitlesi de dikkate alınmalıdır. Fonksiyonel gıdalara ilgi duyan tüketiciler, geleneksel yoğurt tüketicilerine kıyasla yeşil renk, bitkisel aroma veya hafif burukluk gibi özelliklere daha olumlu yaklaşabilir. Bununla birlikte ürünün geniş tüketici kitlesine sunulması hedefleniyorsa, aroma dengeleme stratejileri ve servis önerileri geliştirilmelidir.

Tablo 4. Duyusal değerlendirilmede dikkate alınan özellikler

Duyusal özellik	Değerlendirme kapsamı
Renk	Yeşil tonun doğal, canlı ve iştah açıcı algılanması
Koku	Algımsı, bitkisel veya fermente notaların dengesi
Tat	Asitlik, burukluk, meyvemsi tat ve yoğurt tadının uyumu
Aroma	Matcha, spirulina, ananas ve limon bileşenlerinin bütünlüğü
Kıvam	Yoğurdun akışkanlık, yoğunluk ve ağız hissi
Genel kabul	Tüm duyuusal özelliklerin tüketici beğenisine etkisi

Duyusal analiz sonuçları, fonksiyonel bileşen kullanımında optimum düzeyin önemini açık biçimde göstermiştir. Spirulina ve matcha ürüne fonksiyonel değer kazandırmakla birlikte yüksek oranlarda kullanıldıklarında tat ve koku yoğunluğu oluşturabilmektedir. Bu nedenle formülasyon geliştirme sürecinde yalnızca bileşenlerin besinsel katkısı değil, ürünün tüketici tarafından nasıl algılandığı da dikkate alınmalıdır.

Çalışmada en yüksek duyuusal kabul, 6 g matcha, 1 g spirulina, 15 g fermente ananas suyu ve 15 g limon suyu içeren formülasyonda elde edilmiştir. Bu sonuç, matchanın ürüne karakteristik yeşil çay aroması ve renk kazandırdığı, spirulinanın ise kontrollü miktarda kullanıldığında fonksiyonel katkı

sağlarken duyuasal baskınlık oluşturmadığı şeklinde yorumlanabilir. Fermente ananas suyu ve limon suyu ise ürünün asitlik ve aroma dengesini destekleyerek genel beğeniyi artırmıştır.

Spirulina kullanımında en önemli duyuasal sorunlardan biri algimsi koku ve yoğun pigment etkisidir. Bu çalışmada spirulina miktarının 1 g düzeyinde kullanılması, ürünün kabul edilebilirliğini artıran temel faktörlerden biri olmuştur. Daha yüksek spirulina oranlarının tüketici beğenisini azaltılabileceği, özellikle geleneksel yoğurt beklentisine sahip katılımcılarda yabancı tat algısı oluşturabileceği düşünülmektedir.

Matcha açısından değerlendirildiğinde, 6 g düzeyinin ürün içinde belirgin ancak kabul edilebilir bir bitkisel aroma oluşturduğu görülmektedir. Matcha, spirulinaya kıyasla tüketici tarafından daha tanınabilir bir bileşen olabilir. Son yıllarda içecek, tatlı ve sağlıklı atıştırmalık kategorilerinde matcha kullanımının artması, tüketicinin bu aromaya aşinalığını artırmıştır. Bu durum, matchanın fonksiyonel yoğurt formülasyonlarında daha yüksek kabul görmesini destekleyebilir.

Fermente ananas suyu ve limon suyunun birlikte kullanımı, ürünün nihai duyuasal başarısında önemli rol oynamıştır. Ananasın meyvemsi karakteri ve limonun ferahlatıcı asitliği, yoğurdun doğal ekşimsi yapısıyla uyum göstermiştir. Böylece ürün yalnızca fonksiyonel bileşenlerle zenginleştirilmiş bir yoğurt olmaktan çıkmış, dengeli ve yenilikçi bir tat profili kazanmıştır.

Tablo 5. Nihai formülasyonun değerlendirilmesi

Bileşen	Miktar	Formülasyondaki rolü
Matcha	6 g	Antioksidan katkı, yeşil renk, bitkisel aroma
Spirulina	1 g	Protein, pigment ve fonksiyonel bileşen katkısı
Fermente ananas suyu	15 g	Meyvemsi aroma ve duyuusal dengeleme
Limon suyu	15 g	Asitlik, ferahlık ve tat dengesi
Koyun yoğurdu	60 g	Ana matris, protein ve kıvam kaynağı

6. SONUÇ

Spirulina ve matcha ilaveli fonksiyonel koyun yoğurdu, niş ve yenilikçi bir ürün kategorisi olarak değerlendirilebilir. Ürün, özellikle sağlıklı beslenmeye ilgi duyan, doğal bileşenleri tercih eden, yüksek antioksidan içeriğe sahip ürün arayan ve yeni tat profillerine açık tüketicilere yönelik geliştirilebilir. Koyun sütü kullanımı, ürüne yöresel ve premium bir kimlik kazandırabilir.

Endüstriyel üretim açısından bazı teknik konuların ayrıntılı biçimde incelenmesi gerekir. Bunlar arasında bileşenlerin homojen dağılımı, renk stabilitesi, serum ayrılması, raf ömrü, mikrobiyal güvenlik, ambalaj seçimi ve depolama koşulları yer alır. Spirulina ve matcha tozlarının topaklanma eğilimi gösterebilmesi nedeniyle karıştırma tekniği ve ilave aşaması standartlaştırılmalıdır. Ayrıca ürünün ışığa duyarlı pigmentler içermesi nedeniyle ambalaj materyali de önemlidir.

Çalışmanın sınırlılıkları arasında duyuusal analiz sonuçlarının belirli bir katılımcı grubu ile sınırlı olması, fizikokimyasal ve mikrobiyolojik analizlerin daha ayrıntılı sayısal verilerle desteklenmesi gerekliliği ve raf ömrü boyunca kalite değişimlerinin izlenmemiş olması sayılabilir. Kitap bölümü formatında bu sınırlılıklar, gelecekte yapılacak çalışmalar için yönlendirici niteliktedir.

Gelecek araştırmalarda toplam fenolik madde miktarı, antioksidan kapasite, pH değişimi, titrasyon asitliği, su tutma kapasitesi, tekstür profili, renk parametreleri, probiyotik canlılık ve raf ömrü analizleri ayrıntılı biçimde yapılmalıdır. Ayrıca farklı tatlandırıcılar, meyve püreleri, prebiyotik lifler veya doğal aroma bileşenleriyle alternatif formülasyonlar geliştirilebilir. Tüketici segmentasyonu yapılarak sağlıklı yaşam odaklı tüketiciler ile geleneksel yoğurt tüketicilerinin algıları karşılaştırılabilir.

Tablo 6. Gelecek çalışmalar için önerilen analizler

Analiz/çalışma alanı	Beklenen katkı
Antioksidan kapasite	Matcha ve spirulina katkısının fonksiyonel etkisini nicel olarak göstermek
Toplam fenolik madde	Biyoaktif bileşen düzeyini değerlendirmek
pH ve titrasyon asitliği	Fermentasyon ve depolama stabilitesini izlemek
Tekstür analizi	Kıvam ve ağız hissini objektif olarak belirlemek
Renk analizi	Yeşil pigmentlerin stabilitesini değerlendirmek
Mikrobiyolojik analiz	Starter kültür canlılığı ve ürün güvenliğini belirlemek
Raf ömrü çalışması	Depolama boyunca duyu ve mikrobiyal kaliteyi izlemek
Tüketici segmentasyonu	Hedef kitlenin ürün algısını daha ayrıntılı anlamak

Bu kitap bölümünde spirulina ve matcha ilaveli fonksiyonel koyun yoğurdu üretimi, fonksiyonel gıda yaklaşımı ve duyu kabul edilebilirlik açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, spirulina ve matchanın koyun yoğurdu formülasyonlarında kullanılabileceğini, ancak kullanım oranlarının dikkatli biçimde optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Fonksiyonel bileşenlerin yüksek besinsel değer sağlaması tek başına yeterli değildir; ürünün tüketici tarafından beğenilmesi, düzenli tüketim potansiyeli ve pazarlanabilirliği açısından belirleyicidir.

Çalışmada en başarılı formülasyonun 6 g matcha, 1 g spirulina, 15 g fermente ananas suyu ve 15 g limon suyu içeren ürün olduğu belirlenmiştir. Bu formülasyon, matcha ve spirulinanın fonksiyonel katkısını fermente ananas ve limonun duyusal dengeleyici etkisiyle birleştirmiştir. Böylece ürün, alışılmış yoğurt profiline yenilikçi bir yorum getirmiş ve fonksiyonel süt ürünleri alanında değerlendirilebilecek özgün bir alternatif sunmuştur.

Sonuç olarak spirulina ve matcha ilaveli koyun yoğurdu; akademik araştırmalar, yöresel ürün geliştirme, sağlıklı beslenme odaklı pazarlar ve fonksiyonel süt ürünleri endüstrisi açısından potansiyel taşımaktadır. Ürünün endüstriyel ölçekte değerlendirilebilmesi için daha kapsamlı fizikokimyasal, mikrobiyolojik, duyusal ve raf ömrü çalışmalarına ihtiyaç vardır. Bununla birlikte mevcut bulgular, doğal ve biyoaktif bileşenlerle desteklenmiş yenilikçi fermente süt ürünlerinin geliştirilmesine yönelik değerli bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aydemir, S., & Öner, Z. (2020). Farklı konsantrasyonlarda *Spirulina platensis* eklenmiş yoğurtların kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(3), 553-565.
- Barkallah, M., Atitallah, A. B., Hentati, F., Dammak, M., Hadrich, B., Fendri, I., Ayadi, M. A., Michaud, P., & Abdelkafi, S. (2017). Effect of *Spirulina platensis* fortification on physicochemical, textural, antioxidant and sensory properties of yogurt during fermentation and storage. *LWT - Food Science and Technology*, 84, 323-330.
- Baştürk, A., & Özerson, D. (2025). Fonksiyonel fermente süt ürünlerinin tüketici sağlığı üzerindeki etkileri. *Journal of Dairy Science and Technology*, 12(1), 45-58.
- Coşkun, T. (2005). Fonksiyonel besinlerin sağlığımız üzerine etkileri. *Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Dergisi*, 48(1), 69-84.
- Çevik, M., Kaya, S., & Yılmaz, H. (2023). Fermente süt ürünlerinde tüketici tercihleri ve duyu kalite değerlendirmesi. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 18(2), 112-121.
- Donkor, O. N., Stojanovska, L., Ginn, P., Ashton, J., & Vasiljevic, T. (2012). Germinated grains: Sources of bioactive compounds. *Food Chemistry*, 135(3), 950-959.
- Food and Agriculture Organization. (2018). Fermented fruits and vegetables: A global perspective. *FAO Publications*.
- Granato, D., Branco, G. F., Cruz, A. G., Faria, J. A. F., & Shah, N. P. (2010). Probiotic dairy products as functional

foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(5), 455-470.

Granato, D., Nunes, D. S., & Barba, F. J. (2020). An integrated strategy between food chemistry, biology, nutrition, and statistics in the development of functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 181-193.

Guldas, M., Irkin, R., & Ozdemir, N. (2017). Influence of *Spirulina platensis* addition on physicochemical and sensory properties of yogurt. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12933.

Habib, M. A. B., Parvin, M., Huntington, T. C., & Hasan, M. R. (2008). A review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

Karkos, P. D., Leong, S. C., Karkos, C. D., Sivaji, N., & Assimakopoulos, D. A. (2011). Spirulina in clinical practice: Evidence-based human applications. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2011, 1-4.

Kıymaz, A., & Süel, E. (2024). Sağlıklı beslenmede fermente süt ürünlerinin önemi. *Beslenme ve Diyetetik Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 25-34.

Najgebauer-Lejko, D. (2014). Effect of green tea supplementation on the microbiological, antioxidant, and sensory properties of probiotic milks. *Dairy Science & Technology*, 94(4), 327-339.

Park, Y. W., Juárez, M., Ramos, M., & Haenlein, G. F. W. (2007). Physico-chemical characteristics of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, 68(1-2), 88-113.

- Paseephol, T., & Sherkat, F. (2008). Probiotic stability and sensory properties of yogurt flavored with fruit juice. *Food Chemistry*, 109(3), 547-552.
- Ranadheera, C. S., Evans, C. A., Adams, M. C., & Baines, S. K. (2012). Probiotic viability and physicochemical and sensory properties of plain and stirred fruit yogurts made from goat milk. *Food Chemistry*, 135(3), 1411-1418.
- Şen Arslan, H., & Kaymaz, K. (2024). Fonksiyonel gıda kavramına bir bakış: Süt ve süt ürünleri. *Journal of Agriculture, Food and Ecology*, 1(1), 1-6.
- Singh, B. N., Shankar, S., & Srivastava, R. K. (2011). Green tea catechin, epigallocatechin-3-gallate (EGCG): Mechanisms, perspectives and clinical applications. *Biochemical Pharmacology*, 82(12), 1807-1821.
- Travicic, A., Novak, I., & Horvat, M. (2023). Antioxidant activity of functional foods and their role in oxidative stress prevention. *Foods*, 12(8), 1542.
- World Health Organization. (2020). Healthy diet and functional foods. *WHO Publications*.

MİKROFİLİZLER: ÜRETİMDEN TÜKETİME BESİNSEL VE FONKSİYONEL BİR YAKLAŞIM

Evren NAS¹

Turan AKDAĞ²

Süleyman DOĞU³

1. GİRİŞ

Küresel gıda sistemlerinin kentleşme, iklim değişkenliği ve sağlıklı beslenmeye yönelik tüketici baskısı altında daha besleyici, daha hızlı üretilen ve düşük kaynak girdisi gerektiren taze bitkisel ürünlere yönelmekte olduğu belirtilmektedir (Kyriacou ve ark., (2016); Ebert (2022)). Mikrofiliz yöntemi, yenilebilir fide dokularının erken gelişme evresinde hasat edilmesiyle, elde edilen ve yüksek besin yoğunluğuyla öne çıkan özel bir ürün grubu olarak tanımlanmaktadır (Mir ve ark., 2017; Choe ve ark., 2018). Gastronomi alanındaki kullanımı 1980'li yıllarda seçkin restoran pratikleriyle görünür hale gelmiş; sonrasında kontrollü çevre tarımı ve yerel üretim modellerinin yaygınlaşmasıyla birlikte daha kapsamlı bir gıda kategorisine dönüşebildiği görülmektedir (Kyriacou ve ark., 2016; Renna ve Paradiso, 2020).

Bu tarihsel süreçte, mikrofilizler yalnızca dekoratif bir garnitür olarak değil, besleyici ve işlevsel bir gıda bileşeni olarak

¹ Öğr. Gör., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram Meslek Yüksekokulu, ORCID: 0000-0003-2760-0623.

² Doç. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram Meslek Yüksekokulu, ORCID: 0000-0003-3175-6751.

³ Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram Meslek Yüksekokulu, ORCID: 0000-0002-5352-9288.

kabul görmüştür (Choe ve ark., 2018; Bhaswant ve ark., 2023). Yapılan bir çalışmada *Brassicaceae*, *Amaranthaceae*, *Apiaceae* ve *Fabaceae* familyalarına ait türlerin vitamin, mineral, karotenoid, fenolik bileşik ve glukozinolat içerikleri bakımından geniş bir yelpazede farklılaştığı bildirilmektedir (Xiao ve ark., 2012; Ghoola ve ark., 2020). Bu çeşitlilik, tür seçimi, hasat zamanı ve yetiştirme koşullarının mikrofiliz kalitesi üzerindeki etkisini belirleyici bir etken olarak değerlendirilmektedir (Turner ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2021).

Geleneksel sebze üretimi, uzun yetiştirme süresi, tarla kaynaklı çevresel değişkenlik, taşıma kayıpları ve hasat sonrası bozulma gibi güçlüklerle karşı karşıya kaldığı bilinmektedir. Filiz üretimi ise yüksek su aktivitesi ve kapalı çimlendirme ortamı nedeniyle mikrobiyolojik güvenlik açısından daha kırılgan ve daha hassas kabul edilmektedir (Riggio ve ark., 2019; Turner ve ark., 2020). Mikrofilizlendirmenin bu iki üretim biçimi arasında kısa üretim döngüsü, yenilebilir yaprak dokusu ve denetimli hasat olanağıyla özgün bir konumda olduğu görülmektedir (Mir ve ark., 2017; Ebert, 2022).

Mikrofilizlerin üretim tekniği, biyokimyasal dönüşümleri ve gıdasal değeri birlikte ele alınmadığında ürün kalitesinin bütüncül biçimde açıklanamayacağı varsayılmaktadır (Choe ve ark., 2018; Bhaswant ve ark., 2023). Işık spektrumu, sıcaklık, nem, substrat, sulama ve hasat sonrası muhafaza koşullarının besin içeriği ile raf ömrünü doğrudan etkileyebilecek değişkenler olduğu ifade edilmektedir (Samuoliene ve ark., 2019; Cowden ve ark., 2024).

Bu bölümde mikrofilizlendirme tekniği ele alınmakta; bu yöntemlerin prensipleri ve gıdasal önemi değerlendirilmektedir.

2. MİKROFİLİZLENDİRME

2.1. Tanım ve Tarihsel Gelişim

Mikrofilizler, tohumun çimlenmesini izleyen erken fide döneminde büyük ölçüde kotiledon yaprakları ve ilk gerçek yaprak başlangıçlarının gelişimiyle hasat edilen genç yenilebilir bitkiler olarak tanımlanmaktadır (Mir ve ark., 2017; Choe ve ark., 2018). Kök dokusuyla birlikte tüketilen filizlerin aksine, genellikle substrat üzerinde yetiştirilmekte ve kök kısmı hasat sırasında uzaklaştırılmaktadır (Turner ve ark., 2020; Ebert, 2022). Uygulamada bu ayrımın mikrofilizlerin hem tarımsal üretim tekniği hem de gıda güvenliği açısından bağımsız bir ürün sınıfı olarak konumlandırılmasına zemin hazırlamaktadır (Riggio ve ark., 2019; Renna ve Paradiso, 2020).

Günümüze kadar mikrofilizlendirme, mutfak estetiğiyle başlayan bir uygulama olmakla birlikte, yerel taze gıda üretimi ve kontrollü çevre tarımını da kapsadığı görülmektedir. Üretim döngüsünün çoğu türde yaklaşık 7-21 gün arasında tamamlanabilmesi, bu ürünleri kentsel tarım, dikey üretim ve sınırlı alan uygulamaları için elverişli kılan başlıca etkenler arasında sayılmaktadır (Mir ve ark., 2017; Ebert, 2022). Mikrofilizlerin geleneksel sebzelere doğrudan bir ikame sunmaktan ziyade taze sebze tüketimini besin yoğunluğu yüksek bir bileşenle destekleyen tamamlayıcı bir gıda işlevi üstlendiği görüşü savunulmaktadır (Zhang ve ark., 2021; Bhaswant ve ark., 2023).



Şekil 1. Mikrofilizlendirme örnek I

2.2. Filizlendirme Prosesinin Biyokimyası

Proses, tohumun su almasıyla başlayan imbibisyon, enzim aktivasyonu, depo bileşiklerinin parçalanması ve yeni fide dokularının oluşumu aşamalarını kapsamaktadır (Wojdylo ve ark., 2020; Ebert, 2022). Nişasta, protein ve lipit gibi depo maddelerinin metabolik olarak kullanılabilir bileşiklere dönüştürülmesi sonrası fide büyümesi için enerji ve yapı taşı sağladığı bilinmektedir (Choe ve ark., 2018; Bhaswant ve ark., 2023). Bu biyokimyasal dönüşümün bazı vitaminlerin, fenolik bileşiklerin ve antioksidan kapasiteyle ilişkili metabolitlerin artışına katkı sağlayabileceği ileri sürülmektedir (Xiao ve ark., 2012; Wojdylo ve ark., 2020).

Çimlenme sırasında enzimatik hidroliz, fitat gibi mineral bağlayıcı bileşiklerin azaldığı ve biyoyararlanım düzeyinin iyileşmesine katkı sağladığı ifade edilmektedir (Ebert, 2022; Zhang ve ark., 2021). Işığa maruz kalmayla birlikte klorofil, karotenoid ve bazı fenolik metabolitlerin sentezinin uyarıldığı; bunun sonucunda mikrofilizlerin besin profilinin karanlıkta üretilen filizlerinkinden belirgin biçimde ayrıştığı belirtilmektedir (Samuoliene ve ark., 2019; Bhaswant ve ark.,

2023). Tür ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak, *Brassica* türlerinde glukozinolat ile bunların hidroliz ürünleri olan izotiyosiyanat bileşiklerinin insan sağlığıyla ilişkili fitokimyasallar arasında yer aldığı rapor edilmektedir (Choe ve ark., 2018; Teng ve ark., 2021).

3. MİKROFİLİZLENDİRME TEKNİĞİ

3.1. Tohum Seçimi ve Hazırlık

Tohum seçiminin, mikrofiliz üretiminde ürün güvenliği, çimlenme homojenliği ve besin bileşimi üzerinde belirleyici bir başlangıç aşaması olduğu kabul edilmektedir (Riggio ve ark., 2019; Turner ve ark., 2020). Yüksek çimlenme oranına sahip, patojen yükü düşük ve gıda amaçlı kullanıma uygun tohum materyalinin tercih edilmesinin üretim kayıplarını ve mikrobiyolojik riski azaltabileceği öngörülmektedir (Riggio ve ark., 2019; Ebert, 2022). Tohum türünün genetik özellikleri, nihai ürünün renk, aroma, doku ve fitokimyasal bileşimini önemli ölçüde farklılaştırdığı da ifade edilmektedir (Xiao ve ark., 2012; Marchioni ve ark., 2021).

Tekniğin hazırlık aşamasında fiziksel temizlik, gerektiğinde yüzey sanitasyonu ve denetimli su alma işlemleri uygulanmaktadır (Riggio ve ark., 2019; Turner ve ark., 2020). Sanitasyon uygulamalarının çimlenme gücünü azaltmaması ve kalıntı riski oluşturmaması gerekmektedir. Üretim başarısını etkileyen temel başlangıç parametreleri ise;

- Kullanılan tohum türü ve çimlenme oranı
- Tohum partisinin mikrobiyolojik kalitesi
- Ekim yoğunluğu ve tohum büyüklüğü
- Substratın su tutma kapasitesi ve hijyeni
- Ön ıslatma süresi ve yüzey sanitasyonu

- Üretim alanının temizliği ve çapraz bulaşma denetimi (Mir ve ark., 2017; Cowden ve ark., 2024)

Substrat seçimi, tohum hazırlığından sonra mikrofiliz kalitesini belirleyen ikinci kritik üretim basamağı olarak değerlendirilmektedir (Renna ve Paradiso, 2020; Cowden ve ark., 2024). Torf, Hindistan cevizi lifi, perlit, tekstil tabanlı yetiştirme keçeleri ve hidroponik (topraksız tarım) yüzeyler, su tutma kapasitesi, havalanma, maliyet ve sürdürülebilirlik bakımından farklı sonuçlar verdiği bildirilmektedir (Mir ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2021). Yapılan çalışmalar bu faktörlerin substratın yalnızca fideyi taşıyan edilgen bir ortam değil, su yönetimi, kök oksijenlenmesi ve mikrobiyal yük açısından kaliteyi doğrudan etkileyen etkin bir üretim bileşeni olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Riggio ve ark., 2019; Cowden ve ark., 2024).

3.2. Yetiştirme Koşulları

Yetiştirme koşulları, mikrofilizlerde biyokütle oluşumu, renk gelişimi, besin yoğunluğu ve duyu kalite üzerinde doğrudan etkili olan çevresel değişkenlerden oluşur. Işık kalitesi ve miktarı, fotosentetik foton akı yoğunluğu (FFAY) üzerinden bitki morfolojisini ve ikincil metabolit sentezini yönlendirebileceği ifade edilmektedir (Samuoliene ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2021). Sıcaklık ve bağıl neme bağlı su kaybı, çimlenme hızı ve mikrobiyal çoğalma riski üzerindeki belirleyici rolü nedeniyle üretim ortamında birlikte izlenmesi gerektiği önerilmektedir (Riggio ve ark., 2019; Turner ve ark., 2020).

Teknik uygulamalarda çoğu tür için 18-24 °C aralığı ile dengeli nem yönetiminin uygun olabileceği kabul edilmekle birlikte, optimum değerlerin tür ve substrata göre değişkenlik gösterebileceği ifade edilmektedir (Mir ve ark., 2017; Cowden ve ark., 2024). Kırmızı ve mavi LED ışık kombinasyonlarının bazı *Brassicaceae* türlerine ait mikrofilizlerinde askorbik asit, fenolik madde ve mineral yoğunluklarının düzenlenmesinde etkili olduğu

da ayrıca rapor edilmektedir (Samuoliene ve ark., 2019; Cowden ve ark., 2024). Mikrofilizlendirme başarısını etkileyen yetiştirme parametreleri şu şekildedir;

1. Işık spektrumu ve FFAY değeri
2. Fotoperiyot süresi ve ışık-gölge dengesi
3. Sıcaklık aralığı ve günlük dalgalanma
4. Bağıl nem düzeyi ve hava sirkülasyonu
5. Substrat türü ve drenaj kapasitesi
6. Sulama sıklığı, su kalitesi ve besin çözeltisi yönetimi (Renna ve Paradiso, 2020; Zhang ve ark., 2021)



Şekil 2. Mikrofilizlendirme örnek II

Tablo 1. Mikrofilizlendirme yönteminin başlıca avantaj ve dezavantajları (Mir ve ark., 2017; Riggio ve ark., 2019; Turner ve ark., 2020).

	Avantaj	Dezavantaj
Üretim süresi	Hasat çoğu türde kısa sürede yapılabilmesi	Kısa döngü, planlama hatalarının hızlı kalite kaybına dönüşmesine yol açabilmesi
Alan kullanımı	Tepsi, raf ve dikey sistemlerde yoğun üretim yapılabilmesi	Yüksek ekim yoğunluğu hava sirkülasyonu ve hastalık denetimini güçleştirebilmesi
Besin değeri	Vitamin, mineral ve fitokimyasal yoğunluğu yüksek ürün elde edilebilir	Besin profili tür, ışık ve hasat zamanına göre geniş değişkenlik gösterebilmesi
Gıda güvenliği	Kök-filiz ayrışımı	Tohum kaynaklı patojenler ve nemli ortam nedeniyle hijyen yönetiminin zorunlu olması.
Pazar değeri	Taze, renkli ve aromatik ürünlerin gastronomide katma değer oluşturabilmesi	Raf ömrü sınırlı olduğundan soğuk zincir ve ambalajlamanın önem kazanması

Besin çözültisi kullanımının, özellikle geçirgen substratlarda yetiştirilen mikrofilizlerde mineral bileşimi ve verimi etkileyebilecek bir yönetim aracı olduğu ileri sürülmektedir (Renna ve ark., 2020; Cowden ve ark., 2024). Yüksek elektriksel iletkenlik ya da dengesiz besin oranının fide stresini artırarak biyokütle kaybına, istenmeyen tat oluşumuna ve görsel kalitenin gerilemesine yol açabileceği bildirilmektedir (Renna ve Paradiso, 2020; Zhang ve ark., 2021). Yapılan çalışmalarda yetiştirme koşullarının yalnızca maksimum verim hedefiyle değil, besin yoğunluğu, duyu kalite, su kullanım etkinliği ve gıda güvenliğini bir arada gözetilen bir anlayışla oluşturulması gerekliliği vurgulanmaktadır (Samuoliene ve ark., 2019; Cowden ve ark., 2024).

3.3. Hasat ve Muhafaza

Mikrofilizlerin hedeflenen morfolojik gelişme düzeyine, tür özelliklerine ve pazar gereksinimlerine göre planlanan kritik bir aşama olan hasat zamanındaki gecikmenin bazı türlerde sertleşme, acılaşma ve duysal kabulün azalması gibi kalite değişikliklerine yol açabileceği rapor edilmektedir (Mir ve ark., 2017; Renna ve Paradiso, 2020; Turner ve ark., 2020). Hasadın kotiledon yaprakların tam açıldığı ve ilk gerçek yaprakların belirginleşmeye başladığı dönemde gerçekleştirildiğinde tekstür ile besin yoğunluğu açısından elverişli bir denge sağlayabileceği ifade edilmektedir (Choe ve ark., 2018; Ebert, 2022)

Muhafaza sürecinde mikrofilizlerin yüksek yüzey alanı, ince yapısı ve yüksek solunum hızı nedeniyle su kaybına ve mekanik zararlara karşı duyarlı olduğu bildirilmektedir (Turner ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2021). Hasat sonrası düşük sıcaklıkta saklama, uygun ambalaj geçirgenliği, dikkatli yıkama gibi uygulamaların raf ömrünün korunmasında temel stratejik noktalar olduğu belirtilmektedir (Riggio ve ark., 2019; Turner ve ark., 2020). Modifiye atmosfer paketleme ile soğuk zincir yönetiminin kalite kaybını yavaşlatabildiği, ancak bu yöntemlerin mikrobiyolojik güvenlik için başlangıç hijyeninin yerini alamayacağı öne sürülmektedir (Riggio ve ark., 2019; Renna ve Paradiso, 2020).

Hasat sonrası yıkama kararı; ürünün hedef pazarı, başlangıç mikrobiyal yükü ve ambalajlama stratejisi dikkate alınarak verilmelidir. Yıkama işleminin yüzeydeki partikülleri ve bazı mikroorganizmaları azaltabileceği ve yeterli kurutma yapılmadığında serbest su miktarını artırarak bozulmayı da hızlandırabileceği bildirilmektedir (Riggio ve ark., 2019; Turner ve ark., 2020). Bu nedenle ticari uygulamalarda hasat bıçağı hijyeni, personel pratikleri, temiz ambalaj materyali, düşük sıcaklıkta dağıtım gibi uygulamaların yıkama işleminden

bağımsız olarak birlikte denetlenmesi gereken temel kontrol noktaları olarak ele alınması gerektiği ifade edilmektedir (Riggio ve ark., 2019; Renna ve Paradiso, 2020).

4. GIDASAL ÖNEMİ

4.1. Vitamin ve Mineral İçeriği

Küçük porsiyonlarda yüksek vitamin, mineral ve fitokimyasal yoğunluk nedeniyle mikrofilizlerin gıdasal önemi artmaktadır. Özellikle askorbik asit, tokoferoller, filokinon, karotenoidler, potasyum, kalsiyum, demir ve çinko gibi bileşenlerin türler arasında belirgin düzeyde farklılık gösterdiği görülmektedir (Xiao ve ark., 2012; Balık ve ark., 2025). Mikrofilizlerin besin değerlerinin tek bir tür üzerinden genellenmesi yerine, tür ve üretim koşulu ekseninde değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmektedir (Renna ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2021) .

Çalışmalar bazı mikrofilizlerin olgun yaprak ya da tohum formuna kıyasla belirli mikrobeseinler açısından yoğunlaşmış bir profil sergileyebileceğini bildirmektedir (Xiao ve ark., 2012; Choe ve ark., 2018). Yüksek besin yoğunluğu, porsiyon miktarı, tüketim sıklığı ve bileşiklerin biyoyararlanımı dikkate alınmadan doğrudan sağlık etkisi olarak yorumlanmamalıdır (Ebert, 2022; Bhaswant ve ark., 2023).

Tablo 2. Farklı mikrofiliz türlerinin seçilmiş besin içeriği karşılaştırması (Xiao ve ark., 2012; Balik ve ark., 2025).

Mikrofiliz türü	Öne çıkan bileşen	Bildirilen düzey
Kırmızı lahana	Askorbik asit	Yaklaşık 147 mg/100 g taze ağırlık
Garnet amarant	Filokinon	Yaklaşık 4,1 µg/g taze ağırlık
Brokoli	Askorbik asit ve demir	49,02 mg/100 g askorbik asit; 2610,42 µg/100 g demir
Fasulye	Askorbik asit ve potasyum	80,45 mg/100 g askorbik asit; 416,05 mg/100 g potasyum
Ayçiçeği	Askorbik asit, kalsiyum ve çinko	67,55 mg/100 g askorbik asit; 145,29 mg/100 g kalsiyum; 956,34 µg/100 g çinko

Yapılan son çalışmalarda mineral ve vitamin içeriğinin artırılması amacıyla biyozenginleştirme yaklaşımlarının mikrofiliz üretiminde giderek daha fazla önem kazandığı görülmektedir (Kathi ve ark., 2023; Balik ve ark., 2025). Brokoli mikrofilizlerinde C vitamini biyozenginleştirilmesi üzerine yürütülen çalışmalar, yetiştirme ortamına uygulanan hedefli besin müdahalelerinin ürün bileşimini değiştirebileceğine işaret etmektedir (Kathi ve ark., 2023; Bhaswant ve ark., 2023). Biyozenginleştirme uygulamalarında hedef bileşen artışının toksisite sınırları, tat değişimi, maliyet ve mevzuat uygunluğuyla birlikte irdelenmesi gerektiği de ayrıca belirtilmektedir (Ebert, 2022; Renna ve ark., 2020).

4.2. Fenolik Bileşikler ve Antioksidan Aktivite

Fenolik bileşiklerin mikrofilizlerde renk, tat, stres yanıtı ve antioksidan aktivite ile ilişkilendirilen ikincil metabolitler arasında yer aldığı bilinmektedir (Wojdylo ve ark., 2020; Marchioni ve ark., 2021). Toplam fenolik madde miktarı ve flavonoid profilinin bitki türü, ışık düzeni, hasat zamanı ve besin çözeltisi koşullarına göre değişkenlik gösterebileceği ifade

edilmektedir (Samuoliene ve ark., 2019; Bhaswant ve ark., 2023). Bu bileşiklerin varlığı, mikrofilizlerin fonksiyonel gıda potansiyelini destekleyen başlıca kimyasal göstergelerden biri olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir (Choe ve ark., 2018; Teng ve ark., 2021).

Antioksidan kapasite çoğunlukla DPPH, ABTS, FRAP veya ORAC gibi in vitro yöntemlerle ölçülmektedir. Bu testlerin insan fizyolojisindeki biyolojik etkiyi doğrudan temsil etmeyebileceği vurgulanmaktadır (Wojdylo ve ark., 2020; Bhaswant ve ark., 2023). Işık spektrumu ve abiyotik stres yönetiminin fenolik birikimini artırabildiği; bununla birlikte aşırı stresin verim ve duysal kalite üzerinde olumsuz etkiler doğurabileceği de rapor edilmektedir (Samuoliene ve ark., 2019; Cowden ve ark., 2024). Bu nedenle fenolik zenginleştirme yaklaşımlarının yalnızca kimyasal artışa değil, biyokütle, lezzet, güvenlik ve tüketici kabulüne göre optimize edilmesi gerektiği ifade edilmektedir (Renna ve Paradiso, 2020; Zhang ve ark., 2021).

4.3. Sağlık Üzerine Etkileri

Günümüzde mikrofilizlerin sağlık üzerine etkileri, vitaminler, mineraller, diyet lifi, fenolik bileşikler, karotenoidler ve kükürtlü bileşiklerin bir arada oluşturduğu beslenme matrisi üzerinden tartışılmaktadır (Choe ve ark., 2018; Bhaswant ve ark., 2023). *Brassica* türleri mikrofilizlerinde bildirilen glukozinolat ve izotiyosiyanat bileşiklerinin antioksidan savunma, inflamasyon yanıtı ve hücrel koruma mekanizmalarıyla ilişkili olabileceği ileri sürülmektedir (Teng ve ark., 2021; Bhaswant ve ark., 2023). Karotenoid içeriğinin ise göz sağlığı ve provitamin A etkinliğiyle ilişkilendirilen bileşenlerin diyetle alımına katkı sağlayabileceği de ifade edilmektedir (Xiao ve ark., 2012; Zhang ve ark., 2021).

Mikrofilizlerin sağlık üzerine etkileri değerlendirilirken mikrofilizlerin bir tedavi aracı olarak değil, dengeli beslenme içinde taze ve besin yoğunluğu yüksek bir bileşen olarak konumlandırılması gerektiği savunulmaktadır (Ebert, 2022; Bhaswant ve ark., 2023). İnsan çalışmalarının sınırlılığı in vitro ve hayvan modeli bulgularının doğrudan klinik sonuca dönüştürülmesini kısıtlamaktadır (Choe ve ark., 2018; Turner ve ark., 2020). Günlük beslenmede sebze çeşitliliğini artırma, renkli fitokimyasal kaynakları çoğaltma ve taze ürün tüketimini destekleme açısından mikrofilizlerin göz ardı edilemeyecek bir pratik potansiyel taşıdığı görülmektedir (Zhang ve ark., 2021; Ebert, 2022).

Duyusal özellikler, mikrofilizlerin sağlık potansiyelinin günlük tüketim alışkanlığına dönüşebilmesi için belirleyici olarak kabul edilmektedir (Choe ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2021). Renk, gevreklik, acılık, keskin koku ve bitkisel aroma türlerine göre değişmekte olup özellikle turp, hardal, bezelye ve ayçiçeği mikrofilizlerinde tüketici algısını şekillendirdiği bildirilmektedir (Marchioni ve ark., 2021; Ebert, 2022). Gıdasal önem değerlendirmelerinde yalnızca kimyasal bileşimin değil, porsiyonlanabilirlik, yemek içinde kullanım kolaylığı ve kabul edilebilir duyuşal profilin de birlikte gözetilmesi gerektiği de ayrıca vurgulanmaktadır (Renna ve Paradiso, 2020; Bhaswant ve ark., 2023).

5. SONUÇ

Mikrofilizlendirme tekniğinin kısa üretim döngüsü, düşük alan gereksinimi ve denetimli çevre koşullarına uyarlanabilirliği nedeniyle güncel gıda üretim sistemleri içinde dikkat çekici bir uygulama olarak görülmektedir.

Ürün kalitesinin türler arasında önemli farklılıklar sergilemesi, standart üretim protokollerinin geliştirilmesini ve tür

bazlı besin bileşimi veritabanlarının güçlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

İleri çalışmalarda mikrofilizlerin biyoerişilebilirlik, biyoyararlanım, sindirim sonrası metabolit profili ve insan sağlığı göstergeleri üzerindeki etkilerinin kontrollü çalışmalarla araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Balik, S., Elgudayem, F., Dasgan, H. Y., Kafkas, N. E., Gruda, N. S. (2025). Nutritional quality profiles of six microgreens. *Scientific Reports*, 15, 6213. doi:10.1038/s41598-025-85860-z
- Bhaswant, M., Shanmugam, D. K., Miyazawa, T., Abe, C., Miyazawa, T. (2023). Microgreens—a comprehensive review of bioactive molecules and health benefits. *Molecules*, 28(2), 867. doi:10.3390/molecules28020867
- Choe, U., Yu, L. L., Wang, T. T. Y. (2018). The science behind microgreens as an exciting new food for the 21st century. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(44), 11519–11530. doi:10.1021/acs.jafc.8b03096
- Cowden, R. J., Markussen, B., Ghaley, B. B., Henriksen, C. B. (2024). The effects of light spectrum and intensity, seeding density, and fertilization on biomass, morphology, and resource use efficiency in three Brassicaceae microgreens. *Plants*, 13(1), 124. doi:10.3390/plants13010124
- Ebert, A. W. (2022). Sprouts and microgreens—novel food sources for healthy diets. *Plants*, 11(4), 571. doi:10.3390/plants11040571
- Ghoora, M. D., Babu, D. R., Srividya, N. (2020). Nutrient composition, oxalate content and nutritional ranking of ten culinary microgreens. *Journal of Food Composition and Analysis*, 91, 103495. doi:10.1016/j.jfca.2020.103495
- Kathi, S., Laza, H., Singh, S., Thompson, L., Li, W., Simpson, C. (2023). Vitamin C biofortification of broccoli microgreens and resulting effects on nutrient composition.

- Frontiers in Plant Science, 14, 1145992.
doi:10.3389/fpls.2023.1145992
- Kyriacou, M. C., Roupheal, Y., Di Gioia, F., Kyrtatzis, A., Serio, F., Renna, M., De Pascale, S., Santamaria, P. (2016). Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. Trends in Food Science & Technology, 57, 103–115. doi:10.1016/j.tifs.2016.09.005
- Marchioni, I., Martinelli, M., Ascrizzi, R., Gabbrielli, C., Flamini, G., Pistelli, L., Pistelli, L. (2021). Small functional foods: Comparative phytochemical and nutritional analyses of five microgreens of the Brassicaceae family. Foods, 10(2), 427. doi:10.3390/foods10020427
- Mir, S. A., Shah, M. A., Mir, M. M. (2017). Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57(12), 2730–2736. doi:10.1080/10408398.2016.1144557
- Renna, M., Paradiso, V. M. (2020). Ongoing research on microgreens: Nutritional properties, shelf-life, sustainable production, innovative growing and processing approaches. Foods, 9(6), 826. doi:10.3390/foods9060826
- Renna, M., Stellacci, A. M., Corbo, F., Santamaria, P. (2020). The use of a nutrient quality score is effective to assess the overall nutritional value of three Brassica microgreens. Foods, 9(9), 1226. doi:10.3390/foods9091226
- Riggio, G. M., Wang, Q., Kniel, K. E., Gibson, K. E. (2019). Microgreens—a review of food safety considerations along the farm to fork continuum. International Journal of Food Microbiology, 290, 76–85. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.09.027
- Samuoliene, G., Brazaityte, A., Virsile, A., Miliauskienė, J., Vastakaitė-Kairienė, V., Duchovskis, P. (2019). Nutrient

- levels in Brassicaceae microgreens increase under tailored light-emitting diode spectra. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1475. doi:10.3389/fpls.2019.01475
- Teng, J., Liao, P., Wang, M. (2021). The role of emerging microgreens in human diet and health. *Food & Function*, 12(20), 9789–9802. doi:10.1039/D1FO02100A
- Turner, E. R., Luo, Y., Buchanan, R. L. (2020). Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: A review. *Journal of Food Science*, 85(4), 870–882. doi:10.1111/1750-3841.15049
- Wojdyło, A., Nowicka, P., Tkacz, K., Turkiewicz, I. P. (2020). Sprouts vs. microgreens as novel functional foods: Variation of nutritional and phytochemical profiles and their in vitro bioactive properties. *Molecules*, 25(20), 4648. doi:10.3390/molecules25204648
- Xiao, Z., Lester, G. E., Luo, Y., Wang, Q. (2012). Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: Edible microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(31), 7644–7651. doi:10.1021/jf300459b
- Zhang, Y., Xiao, Z., Ager, E., Kong, L., Tan, L. (2021). Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods*, 1(1), 58–66. doi:10.1016/j.jfutfo.2021.07.001

FOOD SAFETY AND SUSTAINABILITY IN MODERN RAISIN PRODUCTION: AI, SMART DRYING, AND TRACEABILITY PERSPECTIVES

Nilgün Başak TECER¹

Ayşen BABACAN²

1. INTRODUCTION

Grapes (*Vitis vinifera* L.) are among the most widely cultivated fruit crops worldwide and are extensively processed into raisins through dehydration. As a nutritious and shelf stable product, raisins hold an important position in global food markets (Benlloch-Tinoco et al., 2015; Ning et al., 2024; Raihen & Akter, 2023). Türkiye remains one of the most important grape producing countries worldwide, with approximately 3.47 million tons of grapes produced in 2024 (FAOSTAT, 2026). This strong production capacity is reflected in the country's dominant position in the international raisin market, where global raisin exports reached approximately 874,570 tons and Türkiye accounted for 23.54% of total exports (205,900 tons), maintaining its status as the leading exporter. Other major exporting countries include South Africa (9.21%), China (8.75%), Uzbekistan (8.67%), Afghanistan (7.98%), Chile (6.76%), India (6.36%), and the United States (6.14%). Despite the economic importance of the raisin sector, growing consumer demand for safe, high-

¹ Lecturer, Ph.D., Ankara University, Kalecik Vocational School, Viticulture and Vineyard Products Technology Programme, ORCID: 0000-0001-8724-5585.

² Lecturer, Ankara University, Kalecik Vocational School, Food Technology Programme, ORCID 0000-0002-7859-9573.

quality, and sustainably produced foods has intensified the need to modernize raisin production systems (Çınar et al., 2020; Yao et al., 2026). Consequently, enhancing food safety, optimizing processing efficiency, reducing environmental impacts, and improving traceability throughout the supply chain have become key priorities for the raisin industry.

Recent advances in digital agriculture and food processing technologies are transforming raisin production by integrating artificial intelligence (AI), sensor networks, Internet of Things (IoT) platforms, blockchain technologies, and data-driven decision support systems across the supply chain. These technologies enable real-time monitoring of vineyard conditions, disease development, and drying processes, thereby improving production efficiency, supporting early risk detection, and strengthening preventive food safety management (Agadi et al., 2025; Aghababaei et al., 2025; Fu & Sun, 2026). Through the continuous analysis of environmental and processing parameters, AI-assisted monitoring systems can support the prediction of conditions associated with fungal contamination and mycotoxin formation, enabling timely interventions before product quality and safety are compromised. In parallel, digital traceability systems supported by IoT sensors, cloud computing, blockchain, and AI facilitate continuous product tracking from vineyard to consumer, enhancing transparency, traceability, and process control while supporting regulatory compliance and increasing consumer confidence through verifiable information on product origin, processing history, and quality attributes (Hoque et al., 2025; Jayan et al., 2025).

2. SUSTAINABLE RAISIN PRODUCTION SYSTEMS

Sustainable raisin production increasingly relies on the integration of food safety management, climate resilient agricultural practices, smart drying technologies, artificial intelligence, and digital traceability systems. This section examines the major food safety challenges in raisin production, particularly mycotoxin contamination, while exploring how emerging technologies can support safer, more sustainable, and more resilient raisin supply chains.

Climate-smart viticulture integrates sustainable management practices and advanced technologies to mitigate the impacts of climate change on vineyards while maintaining grape yield and quality. Key approaches include regulated deficit irrigation, partial root-zone drying, subsurface drip irrigation, cover cropping, mulching, composting, and reduced tillage, which improve water use efficiency (WUE), soil performance, and drought resilience (Romero et al., 2022). Smart irrigation platforms further enhance water management by combining remote and proximal sensing technologies with decision-support systems to monitor vine water status and optimize irrigation under water-limited conditions (Finco et al., 2022; Sun et al., 2023).

Precision viticulture employs Global Positioning Systems (GPS), Geographic Information Systems (GIS), unmanned aerial vehicles (UAVs), remote sensing, Internet of Things (IoT) networks, and artificial intelligence (AI) to monitor vineyard variability and support site-specific management practices. These technologies enable real-time assessment of vine health, soil conditions, water status, and disease risks, improving resource efficiency and grape quality while reducing environmental impacts (Aghababaei et al., 2025). Sensor-based disease monitoring systems further support sustainable production

through early disease detection, reduced pesticide applications, and lower contamination risks (Ashtiani & Martynenko, 2025).

Sustainability assessment of raisin production commonly relies on indicators such as water footprint (WF), carbon footprint (CF), and energy consumption. In Southern European vineyards, the average WF has been reported as $223 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, with approximately 75% attributed to irrigation water, while the mean farming-stage CF reaches $98 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot \text{ton}^{-1}$, primarily associated with irrigation energy, fuel consumption, and fertilizer-related emissions (Tomaz et al., 2025). These findings highlight the importance of efficient water and energy management throughout the raisin supply chain.

The integration of climate-smart viticulture, precision agriculture technologies, and sustainability metrics provides a comprehensive framework for sustainable raisin production by improving resource-use efficiency, reducing environmental impacts, and enhancing resilience under changing climatic conditions. Since drying represents one of the most energy-intensive stages of raisin processing, optimization of drying parameters remains essential for improving both product quality and environmental sustainability (Srivastava et al., 2021).

2.1. Drying Optimization

The drying process is a critical control point in raisin production, directly influencing both mycotoxin levels and product quality. AI-driven optimization enables processors to identify ideal combinations of temperature, airflow, and drying time, simultaneously minimizing toxin risk and preserving nutritional and sensory quality.

Raisin production can be achieved through traditional sun drying, shade drying, and modern mechanical drying systems. While conventional drying methods are cost-effective and widely practiced, they are highly dependent on climatic conditions and

may result in variable product quality (Arefi et al., 2026; Ma et al., 2024). In contrast, controlled drying technologies offer shorter drying times, improved process efficiency, enhanced food safety, and more consistent product quality, making them increasingly attractive for sustainable raisin production, as illustrated in Figure 1 (Ge et al., 2026).

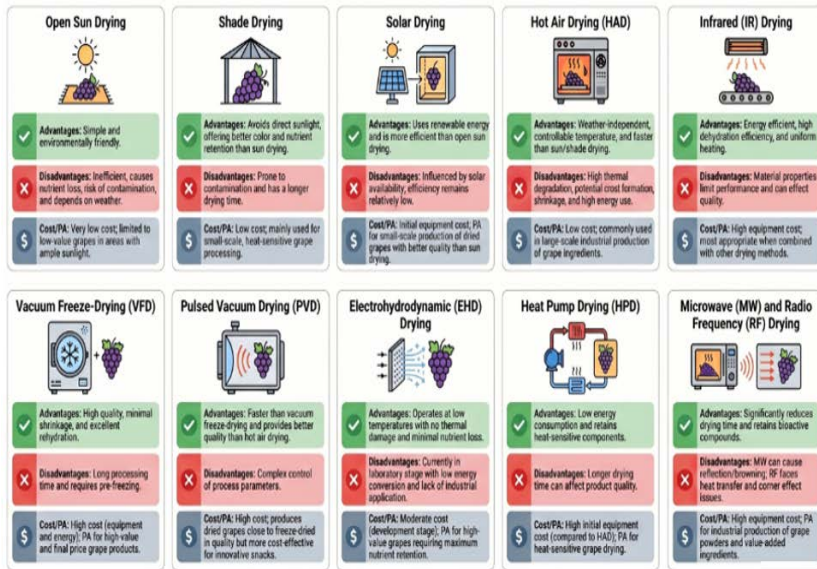


Figure 1. Comprehensive comparisons of various conventional and emerging drying technologies (Ge et al., 2026)

2.2. Food Safety Risks in Modern Raisin Production

Modern raisin production faces the dual challenge of ensuring food safety while minimizing environmental impacts. Food safety risks may arise throughout the production chain from cultivation and drying to processing, storage, and distribution and include pesticide residues, mycotoxin contamination (particularly ochratoxin A, OTA), and supply chain vulnerabilities (Covarelli et al., 2012; Sadek et al., 2026). Simultaneously, increasing pressures related to water scarcity, energy consumption, climate change, and resource efficiency necessitate the adoption of more sustainable production practices (Ge et al., 2026). Therefore,

routine monitoring, regulatory compliance, integrated pest management, and digital traceability systems are essential for improving both the safety and sustainability of modern raisin production (Srivastava et al., 2021).

2.2.1. OTA and Mycotoxins

Ochratoxin A (OTA) contamination is one of the most critical food safety concerns in raisin production. Artificial intelligence offers powerful tools for early risk assessment. Mechanistic models have been developed to predict the risk of OTA contamination in grapes, incorporating interdependent environmental parameters such as temperature, water activity, and rainfall to simulate the infection cycle of *Aspergillus carbonarius*, the primary OTA-producing species (Paola & Marco, 2015). More recently, a fully connected artificial neural network (FCANN) was developed based on RGB values obtained from a multimodal biosensor, enabling accurate on-site or remote prediction of OTA concentration within seconds, with a detection limit as low as 7.10 pg mL^{-1} . Furthermore, machine learning algorithms and deep learning models have been applied to analyze elaborate datasets from different analytical platforms, enabling risk-based monitoring programs for mycotoxins in food products with optimized cost and model performance (Liu et al., 2025).

According to Behfar et al. (2025), microwave-assisted convective drying can significantly improve raisin safety and quality by reducing ochratoxin A (OTA) contamination as well as yeast and mold populations. The authors reported that optimized drying conditions (220 W microwave power and 38.68°C air temperature) resulted in raisins with desirable physicochemical and sensory properties while enhancing microbial safety compared with conventional drying methods (Behfar et al., 2025).

2.2.2. Pesticide Residues

Due to the heavy application of plant protection chemicals in grape cultivation, agrochemical residues may accumulate in raisins at toxic levels. Furthermore, the drying process can concentrate certain pesticide residues, posing a risk to consumer safety. A validated LC MS/MS and GC MS/MS method for 314 pesticides in raisins found that all conventional raisin samples contained multiple residues (2–24 per sample), with 55 pesticides detected; organic raisins were free of analyzed pesticides. About 13.5% of samples violated MRL equivalent limits; acute risk assessment for EU approved pesticides did not indicate acute risk, but detection of non approved pesticides and missing toxicological data raised health concerns, especially for children (Constantinou et al., 2021). This underlines the need for systematic monitoring of dried fruits within official controls, and for integrating residue information into digital traceability to support risk management.

2.2.3. Climate Change and Food Safety

Climate driven increases in temperature and water stress affect disease and pest pressures in vineyards, altering pesticide use and potentially mycotoxin risks. Climate-induced phenological shifts, increasing temperatures, and the associated risk of fungal contamination highlight the importance of sensor-based disease monitoring and climate-smart vineyard management practices for ensuring food safety throughout raisin production chains (Sun et al., 2023).

3. SMART DRYING TECHNOLOGIES AND SUSTAINABILITY

Smart drying technologies have also emerged as a key component of sustainable raisin production. Compared with

conventional drying methods, advanced solar assisted, heat pump, and sensor controlled drying systems provide better control of temperature and moisture conditions, improving product quality, reducing energy consumption, and minimizing food safety risks associated with improper drying (Ning et al., 2024; Srivastava et al., 2021).

3.1. IoT-Based Smart Drying and Energy Performance

The Internet of Things (IoT) has emerged as a key enabling technology in modern food drying systems by facilitating real-time monitoring, automation, and data-driven process management. IoT platforms integrate sensors, actuators, communication networks, and cloud-based applications to continuously collect, transmit, and analyze operational data. In raisin production, IoT-based drying systems enable continuous monitoring of critical parameters such as temperature, relative humidity, airflow velocity, and drying time through interconnected sensors and remote-control platforms. These systems allow operators to monitor drying conditions in real time and make rapid adjustments to improve process efficiency, product quality, and food safety (Mishra et al., 2023).

The integration of IoT with blockchain technologies (IoT-BC) further enhances traceability and process control throughout drying operations. Smart drying platforms can automatically record environmental conditions, equipment performance, and processing history while generating alerts when critical process limits are exceeded. Such capabilities reduce dependence on manual monitoring, support quality assurance programs, and improve compliance with food safety requirements. In addition, real-time control of drying parameters contributes to lower energy consumption and improved sustainability by optimizing equipment utilization and reducing unnecessary energy losses (Mishra et al., 2023).

Recent advances in smart drying have highlighted the need for continuous monitoring of quality attributes during dehydration. Moisture content is one of the most critical parameters affecting drying endpoint determination, product stability, and shelf life. Conventional measurement methods rely on physical sampling and laboratory analyses, which are labor-intensive and unable to provide real-time information. To overcome these limitations, soft sensor technologies have been developed to estimate physical, chemical, and quality-related parameters using mathematical models, machine learning algorithms, and data obtained from non-invasive sensing systems (Ashtiani & Martynenko, 2025).

Modern soft sensor systems integrate digital imaging, thermal imaging, near-infrared spectroscopy (NIR), hyperspectral imaging (HSI), multispectral imaging (MSI), low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), electronic noses, and electromagnetic sensors to monitor drying processes in real time. By combining these sensing technologies with artificial intelligence and predictive analytics, soft sensors can accurately estimate moisture content and quality attributes, enabling adaptive process control that reduces energy consumption, greenhouse gas emissions, and quality losses. Consequently, the integration of IoT platforms, advanced sensors, and soft sensor technologies is expected to play a central role in the development of next-generation smart drying systems for producing high-quality raisins with improved energy efficiency and sustainability (Ashtiani & Martynenko, 2025).

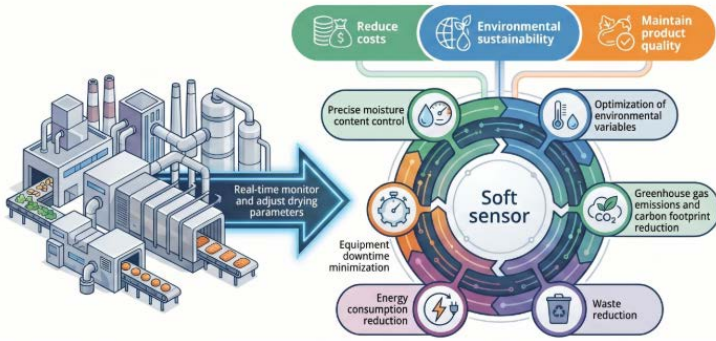


Figure 2. Soft sensor role in optimizing drying for cost reduction, product quality, sustainability, and efficiency (Ashtiani & Martynenko, 2025)

Digital Twin concepts extend this further by building a virtual replica of the dryer that exchanges real-time data with the physical system for dynamic optimization and advanced control. Integrating computer vision (color change monitoring) with deep learning (LSTM) allowed accurate non-destructive prediction of moisture content in drying potato slices, illustrating AI-supported control strategies relevant for raisin drying (Arefi et al., 2026).

A wind-field automatic control (WFAC) system in natural raisin drying rooms used fans controlled via HMI and wireless communication to optimize airflow; the best configuration shortened drying by up to 7 days and increased green-grade raisin proportion to 78%, 4% higher than traditional rooms. The results of the study indicate that the optimized WFAC system can significantly improve drying performance while maintaining product quality. These findings may support future advancements in drying chamber design, process optimization, and sustainable industrial grape drying operations. (Ma et al., 2024).

3.2. AI, Machine Vision, and Quality Classification

Machine vision technologies integrated with artificial intelligence have demonstrated significant potential for

automated raisin quality assessment and purity classification. Karimi et al. (2017) developed a machine vision-based system using bulk images of Golden Bleached raisin mixtures containing different proportions of pure and impure raisins. A total of 146 texture features were extracted from the images using gray-level histogram, gray-level co-occurrence matrix (GLCM), gray-level run-length matrix (GLRLM), and local binary pattern (LBP) techniques. Principal Component Analysis (PCA) was subsequently applied to identify the most informative features, and classification models based on Artificial Neural Networks (ANN) and Support Vector Machines (SVM) were developed. Among the evaluated models, the SVM classifier using the top 50 selected features achieved the highest classification accuracy (92.7%) in distinguishing raisin mixtures according to purity level (Karimi et al., 2017). These findings demonstrate that machine vision combined with machine learning can provide a rapid, objective, and non-destructive approach for raisin grading, defect detection, and automated quality control in modern processing systems. RGB image analysis combining 8 morphological, 30 color, and 36 textural features achieved 99% correct classification of raisin varieties when using linear discriminant analysis and all feature sets, outperforming models based on single feature groups (Wang et al., 2012). This demonstrates the power of hybrid image features for high-accuracy, fast, non-invasive grading, which could be extended to color defects, mold spots, and mechanical damage.

In drying systems more broadly, machine vision integrated with deep learning models (e.g., LSTM) has been used to relate color changes to moisture, enabling AI-based moisture prediction and adaptive drying control (Arefi et al., 2026). Such AI-supported soft sensors are presented as especially suitable for handling complex, nonlinear drying data and supporting Industry 4.0-ready autonomous dryers (Ashtiani & Martynenko, 2025).

4. BLOCKCHAIN AND TRACEABILITY

4.1. Blockchain-Enabled Raisin Supply Chains

Blockchain technology provides a decentralized and tamper-proof platform for recording and verifying information throughout the raisin supply chain. By creating immutable records of production, processing, storage, logistics, and distribution activities, blockchain improves transparency, traceability, and trust among stakeholders (van Hilten et al., 2020). In raisin export chains, blockchain-based systems can support compliance with increasingly stringent food safety regulations, including limits for ochratoxin A (OTA), while facilitating rapid product recalls and supply chain verification.

Several blockchain frameworks have been proposed for agricultural and fruit supply chains. These systems combine smart contracts, distributed ledgers, and secure data storage to record production and logistics data, improve data authenticity, and reduce opportunities for fraud or information loss (Yang et al., 2021; Wang et al., 2021). For fruit supply chains, blockchain platforms have demonstrated the ability to enhance provenance verification, monitor critical quality parameters, and improve resistance to data tampering throughout production, packaging, transportation, and distribution stages (Rashid et al., 2026). Furthermore, blockchain traceability systems can improve food safety certification, reduce intermediary-related inefficiencies, and strengthen consumer confidence in farm-to-fork supply chains (Prashar et al., 2020).

4.2. Farm-to-Fork Traceability

Farm-to-fork traceability is particularly important in raisin production because quality and safety must be maintained from vineyard management through drying, storage, processing, and export. Blockchain-based traceability systems enable real-time tracking of products and quality records while supporting

communication among producers, processors, distributors, retailers, and regulatory authorities. Through smart contracts and digital records, these systems improve transparency, facilitate regulatory compliance, and strengthen food safety management throughout the raisin supply chain (Rashid et al., 2026).

4.3. Challenges and Future Adoption

Despite their potential, most blockchain applications in food systems remain at the pilot or proof-of-concept stage. Challenges related to scalability, interoperability, implementation costs, and data standardization continue to limit widespread adoption. Future developments are expected to focus on integrating blockchain platforms with IoT sensors, artificial intelligence, and automated quality monitoring systems to support predictive risk assessment and digital food safety management in dried fruit supply chains (Rashid et al., 2026).

5. FUTURE PERSPECTIVES

Emerging Industry 4.0 technologies are expected to further transform raisin production by improving process efficiency, food safety, and sustainability. Digital twins can create virtual representations of drying systems that continuously exchange data with physical processes, enabling real-time monitoring, predictive simulations, and process optimization. Similarly, AI-supported HACCP systems integrating IoT sensing, predictive analytics, and blockchain technologies offer new opportunities for proactive food safety management and rapid contamination risk assessment (Paris et al., 2026).

Smart packaging technologies incorporating sensors, RFID, biosensors, and intelligent indicators may provide real-time information on product quality, shelf life, and storage conditions, while supporting digital traceability systems

throughout distribution chains (Madhu, 2025). In parallel, the development of AI-controlled solar and microwave-assisted hybrid drying systems, combined with real-time energy monitoring, may contribute to more energy-efficient and potentially carbon-neutral raisin production without compromising product quality or food safety.

6. CONCLUSIONS

Current research shows that sustainable raisin production can be advanced by combining climate smart, precision viticulture with quantified water and carbon footprints, then coupling this with energy efficient, IoT and AI enabled drying systems. Machine vision and soft sensors allow high accuracy, non invasive raisin quality assessment and support intelligent control that reduces energy use and quality losses. Food safety risks, particularly pesticide residues, remain significant, justifying systematic monitoring and integration of residue data into digital traceability. Finally, blockchain based, IoT integrated traceability architectures provide promising tools for farm to fork transparency and rapid incident response, though large scale adoption, standards, and full integration with smart sensing and AI remain key future challenges.

REFERENCES

- Agadi, S. A., Kudari, M., Nandeppanavar, A. S., Thotad, P. N., & Kallur, S. (2025, 22–23 Aug. 2025). Image-Based Identification and Classification of Dry Fruits Using Deep Learning. 2025 5th Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)
Doi: 10.1109/ASIANCON66527.2025.11280868
- Aghababaei, A., Aghababaei, F., Pignitter, M., & Hadidi, M. (2025). Artificial Intelligence in Agro-Food Systems: From Farm to Fork. *Foods*, 14(3), 411. Doi: 10.3390/foods14030411
- Arefi, A., Vilas, C., Delele, M. A., Foerst, P., Gruber, S., Kaveh, M., Khoshnam, F., Hashim, N., Mohd Ali, M., Zohrabi, S., Tayyab, M., Parmar, A., Aradwad, P., Ndisya, J., Amjad, W., Babor, M., Mahn, A., & Sturm, B. (2026). Convergence of Digital Twins and food drying technology: How to bring the next generation of dryers to life!? *Journal of Food Engineering*, 404, 112770. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112770>
- Ashtiani, S.-H. M., & Martynenko, A. (2025). Advances in Soft Sensors for Smart Food Drying: Innovations, Challenges, and Industrial Perspectives. *Journal of Food Process Engineering*, 48(10), e70221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpe.70221>
- Behfar, M., Heshmati, A., Sharifzadeh, A., Taghdir, M., & Abbaszadeh, S. (2025). Raisin Production by Convective-Microwave Dryer and Optimization of Ochratoxin A Content, Physicochemical, Sensory Characteristics, and Fungal Load of Raisin. *Food Sci Nutr*, 13(1), e4661. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4661>

- Benlloch-Tinoco, M., Carranza-Concha, J., Camacho, M. M., & Martínez-Navarrete, N. (2015). Chapter 22 - Production of Raisins and its Impact on Active Compounds. In V. Preedy (Ed.), *Processing and Impact on Active Components in Food* (pp. 181–187). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00022-6>
- Constantinou, M., Louca-Christodoulou, D., & Agapiou, A. (2021). Method validation for the determination of 314 pesticide residues using tandem MS systems (GC–MS/MS and LC-MS/MS) in raisins: Focus on risk exposure assessment and respective processing factors in real samples (a pilot survey). *Food Chemistry*, 360, 129964. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129964>
- Covarelli, L., Beccari, G., Marini, A., & Tosi, L. (2012). A review on the occurrence and control of ochratoxigenic fungal species and ochratoxin A in dehydrated grapes, non-fortified dessert wines and dried vine fruit in the Mediterranean area. *Food Control*, 26(2), 347–356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.01.044>
- Çınar, İ., Koklu, M., & Taşdemir, P. D. Ş. (2020). Classification of Raisin Grains Using Machine Vision and Artificial Intelligence Methods [Kuru Üzüm Tanelerinin Makine Görüşü ve Yapay Zeka Yöntemleri Kullanılarak Sınıflandırılması]. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 6(3), 200–209.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). FAOSTAT: Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>

- Finco, A., Bentivoglio, D., Chiaraluce, G., Alberi, M., Chiarelli, E., Maino, A., Mantovani, F., Montuschi, M., Raptis, K. G., Semenza, F., Strati, V., Vurro, F., Marchetti, E., Bettelli, M., Janni, M., Anceschi, E., Sportolaro, C., & Bucci, G. (2022). Combining Precision Viticulture Technologies and Economic Indices to Sustainable Water Use Management. *Water*, 14(9), 1493.
- Fu, Y., & Sun, D.-W. (2026). Advancing Fruit Quality Monitoring with Artificial Intelligence-Augmented Non-Destructive Technologies. *Food Engineering Reviews*, 18(2), 9. <https://doi.org/10.1007/s12393-026-09437-w>
- Ge, Y., Ma, Q.-Y., Wang, S.-Y., Mujumdar, A. S., Huang, X., Xiao, H.-W., Liu, Z.-L., & Nie, S. (2026). Recent advances of pretreatments and drying technologies in processing small berries: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 169, 105553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105553>
- Hoque, A., Roy, S., Padhiary, M., Prasad, G., Swain, B., Saikia, P., & Saha, D. (2025). Integrating remote sensing and AI in smart greenhouse solar dryers: Enhancing efficiency, traceability, and sustainability in the drying of fruits and spices. *Journal of Agriculture and Food Research*, 23, 102310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102310>
- Jayan, H., Min, W., & Guo, Z. (2025). Applications of Artificial Intelligence in Food Industry. *Foods*, 14(7), 1241.
- Karimi, N., Ranjbarzadeh Kondrood, R., & Alizadeh, T. (2017). An intelligent system for quality measurement of Golden Bleached raisins using two comparative machine learning algorithms. *Measurement*, 107, 68–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.009>

- Liu, Q., Li, S., Li, Z., Zou, C., Feng, S., Song, J., Zhang, J., & Li, X. (2025). A novel multimodal nano-sensor detection system based on artificial intelligence and two-dimensional Mxenes for Ochratoxin A in food. *Food Control*, 170, 111055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.111055>
- Ma, S., Xu, L., Xu, S., Yu, M., Tan, H., Yan, C., & Shen, C. (2024). Development and performance evaluation of wind field automatic control system for raisin drying room. *Journal of Food Engineering*, 370, 111968. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.111968>
- Madhu, B. (2025). AI-Driven Food Packaging Systems: A New Frontier in Intelligent Food Safety and Shelf-Life Management. *Journal of Food Science*, 90(12), e70716. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1750-3841.70716>
- Mishra, N., Jain, S. K., Agrawal, N., Jain, N. K., Wadhawan, N., & Panwar, N. L. (2023). Development of drying system by using internet of things for food quality monitoring and controlling. *Energy Nexus*, 11, 100219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100219>
- Ning, M., Ma, H., Wang, Y., Cai, L., & Chen, Y. (2024). A Raisin Foreign Object Target Detection Method Based on Improved YOLOv8. *Applied Sciences*, 14(16), 7295.
- Paola, B., & Marco, C. L. (2015). OTA-Grapes: A Mechanistic Model to Predict Ochratoxin A Risk in Grapes, a Step beyond the Systems Approach. *Toxins (Basel)*, 7(8), 3012–3029. <https://doi.org/10.3390/toxins7083012>

- Paris, M. J., Jiménez-González, O., González-Pérez, J. E., & Ramírez-Corona, N. (2026). Exploring the potential of digital twins in the food industry and their role in developing food formulations. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 219, 110583. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110583>
- Prashar, D., Jha, N., Jha, S., Lee, Y., & Joshi, G. P. (2020). Blockchain-Based Traceability and Visibility for Agricultural Products: A Decentralized Way of Ensuring Food Safety in India. *Sustainability*, 12(8), 3497.
- Raihen, M. N., & Akter, S. (2023). Prediction modeling using deep learning for the classification of grape-type dried fruits. *International Journal of Mathematics and Computer in Engineering*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.2478/ijmce-2024-0001>
- Rashid, A., Ahmad, R. W., Nachouki, M., & Khan, A. U. R. (2026). Enhancing fruit supply chain traceability through blockchain and cryptographic protocols for achieving UN sustainable development goals. *Scientific Reports*, 16(1), 7219. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-37534-7>
- Romero, P., Navarro, J. M., & Ordaz, P. B. (2022). Towards a sustainable viticulture: The combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. *Agricultural Water Management*, 259, 107216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107216>
- Sadek, N. F., Suryoprabowo, S., Fuhrmann, R. L. N., Wang, Z., Osire, T., & Guo, Y. (2026). Multiclass pesticide residues in grapes and grape products: occurrence, analytical advances, and food safety implications. *Food Research International*, 119585.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.119585>

- Srivastava, A., Anand, A., Shukla, A., Kumar, A., Buddhi, D., & Sharma, A. (2021). A comprehensive overview on solar grapes drying: Modeling, energy, environmental and economic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101513. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101513>
- Sun, Q., Granco, G., Groves, L., Voong, J., & Van Zyl, S. (2023). Viticultural Manipulation and New Technologies to Address Environmental Challenges Caused by Climate Change. *Climate*, 11(4), 83.
- Tomaz, A., Dôres, J., Martins, I., Catarino, A., Boteta, L., Santos, M., Patanita, M., & Palma, P. (2025). Water and carbon footprints in irrigated vineyards: an on-farm assessment. *Irrigation Science*, 43(4), 971–987. <https://doi.org/10.1007/s00271-024-00926-6>
- van Hilten, M., Ongena, G., & Ravesteijn, P. (2020). Blockchain for Organic Food Traceability: Case Studies on Drivers and Challenges [Policy and Practice Reviews]. *Frontiers in Blockchain*, Volume 3 - 2020. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.567175>
- Yao, X., Hu, M., Wang, Y., Shi, W., Wang, X., Xue, C., Liu, S., & Luan, D. (2026). Enhanced inactivation of *Aspergillus niger* in low water activity raisins by microwave processing: evidence of non-thermal effects. *Food Research International*, 225, 118088. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.118088>
- Wang, S., Liu, K., Yu, X., Wu, D., & He, Y. (2012). Application of hybrid image features for fast and non-invasive

classification of raisin. Journal of Food Engineering.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.028>

Wang, L., Xu, L., Zheng, Z., Liu, S., Li, X., Cao, L., Li, J., & Sun, C. (2021). Smart Contract-Based Agricultural Food Supply Chain Traceability. IEEE Access, 9, 9296-9307.
<https://doi.org/10.1109/access.2021.3050112>

Yang, X., Li, M., Yu, H., Wang, M., Xu, D., & Sun, C. (2021). A Trusted Blockchain-Based Traceability System for Fruit and Vegetable Agricultural Products. IEEE Access, 9, 36282-36293.
<https://doi.org/10.1109/access.2021.3062845>

MOLEKÜLER GASTRONOMİDE SFERİFİKASYON: BİLİMSEL TEMELLER VE GÜNCEL UYGULAMALAR

Hatice KARABULUT MOLHEM¹

Serena KELER KENT²

Betül KARSLIOĞLU³

1. GİRİŞ

Gastronomi, Yunanca *gastro* (mide) ve *nomas* (yasa) kelimelerinden türemiş olup, yemek ve kültür arasındaki ilişkiyi inceleyen disiplinlerarası bir alan olarak tanımlanmaktadır (Barham vd., 2010; Caporaso & Formisano, 2016). Bilimsel ve teknolojik gelişmeler gastronomi alanını da dönüştürmüş, bu dönüşümün en dikkat çekici örneklerinden biri yaratıcılığı ve duyuusal deneyimi ön plana çıkaran moleküler gastronomi (MG) olmuştur.

Moleküler gastronomi, gıdaların hazırlanması ve tüketimi sırasında gerçekleşen fiziksel ve kimyasal süreçleri bilimsel açıdan inceleyen ve bu bilgileri yenilikçi pişirme tekniklerine dönüştürmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır (Chauhan & Philosophers, 2023; This, 2009). Gıda bilimi, kimya ve fiziğin kesişiminde yer alan bu yaklaşım, yüksek duyuusal kaliteye sahip özgün ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. MG

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü.

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü.

³ Doç. Dr., Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Turizm Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları, ORCID: 0000-0002-8956-4245.

kavramı, 1980'li yılların sonlarında Nicholas Kurti ve Hervé This tarafından ortaya konulmuş ve günümüzde modern gastronominin önemli bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Barham vd., 2010; Chang vd., 2025).

Moleküler gastronomide kullanılan başlıca teknikler arasında sferifikasyon, sıvı nitrojenle şok dondurma, köpük ve emülsiyon oluşturma ile sous-vide uygulamaları yer almaktadır (Baslar, 2024; de Souza vd., 2023; Van der Linden vd., 2008). Bu tekniklerden sferifikasyon, sıvıların ince bir jel zar ile kaplanarak küresel yapılara dönüştürülmesini sağlayan yenilikçi bir yöntemdir (Lee & Rogers, 2012). İlk olarak 1942 yılında William Peschardt tarafından patentlenen teknik, 2003 yılında Ferran Adrià tarafından gastronomide yaygınlaştırılmıştır (Caporaso & Formisano, 2016).

Sferifikasyon; estetik sunum, aroma salınımı ve tekstürel özellikleri sayesinde gastronomide geniş kullanım alanı bulmakta, aynı zamanda fonksiyonel bileşenlerin enkapsülasyonunda da değerlendirilmektedir (Gaikwad vd., 2019; Tireki, 2025a). Bu kitap bölümü, sferifikasyonun bilimsel temellerini, mekanizmasını, uygulama yöntemlerini ve gastronomideki güncel kullanım alanlarını ele alarak araştırmacılar ve uygulayıcılar için kapsamlı bir kaynak sunmayı amaçlamaktadır.

2. SFERİFİKASYONUN TEMEL PRENSİPLERİ VE ÇALIŞMA MEKANİZMASI

Sferifikasyon, sıvı bir bileşenin ince bir polimer film ile kaplanarak içi sıvı dolu küresel yapılar oluşturulması esasına dayanır (Tsai vd., 2017). Bu yöntemle elde edilen sıvı çekirdekli hidrojel boncuklar, protein ve polisakkarit gibi yenilebilir biyopolimerlerden üretilebilmektedir. Gıda endüstrisinin yanı sıra tıp, biyoteknoloji ve eczacılıkta fonksiyonel bileşiklerin

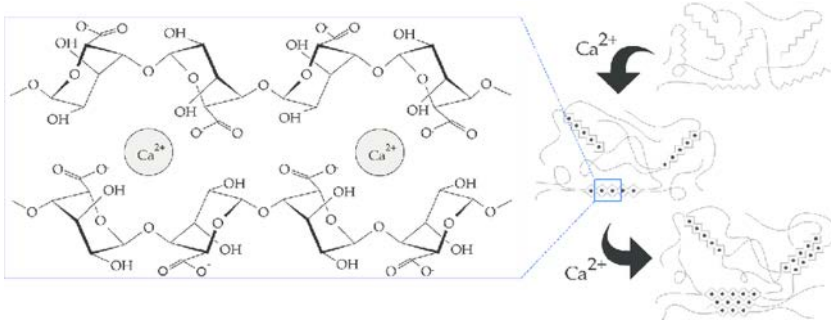
taşınması ve kontrollü salımı amacıyla kullanılan bu yapılar, enzim immobilizasyonu, ilaç taşıma sistemleri ve istenmeyen tatların maskelenmesi gibi uygulamalarda da değerlendirilmektedir (D'Angelo vd., 2016; Fu vd., 2014).

Gastronomi alanında ise sferifikasyon, özellikle moleküler mutfak uygulamalarında görsel sunumu güçlendirmek, duyuusal etkiyi artırmak ve farklı doku-tat deneyimleri oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır (Özkaya & Özel, 2018). Bu teknikle birlikte meyve suları, kahve ve çeşitli aromalı içecekler, sodyum aljinat ve kalsiyum içeren çözelti aracılığıyla ince bir jel membran ile kaplanarak küresel formlara dönüştürülmektedir. Oluşturulan bu kapsüller, tüketim sırasında ağız içinde parçalanarak içerdikleri sıvının ani salınımına olanak tanımakta; bu durum aromatik bileşenlerin yoğun bir şekilde algılanmasını sağlayarak tüketiciye özgün ve çok boyutlu bir duyuusal deneyim sunmaktadır.

Sferifikasyon sürecinin temelini, sodyum aljinat ile kalsiyum iyonları arasındaki çapraz bağ oluşumuna bağlı kontrollü jelasyon mekanizması oluşturmaktadır (Bennacef vd., 2021; Bubin vd., 2019; Tsai vd., 2017; Zou vd., 2024). Bu süreç sonucunda elde edilen yapılar, dışta jel benzeri bir kabuk ve içte sıvı çekirdekten oluşan kapsüller elde edilir. Bu sayede sıvılar, yapısal bütünlüğünü koruyarak stabil bir şekilde kapsüllenebilmektedir.

Kahverengi deniz yosunlarından elde edilen sodyum aljinat, biyobozunur, biyoyumlu ve toksik olmayan bir polisakkarit olup, bu jel yapıların oluşturulmasında en yaygın kullanılan bileşenlerden biridir (Lee & Rogers, 2012). Aljinatlar, suda çözünebilen, viskoziteyi artırıcı özellik gösteren ve genellikle doku düzenleyici olarak kullanılan hidrokolloidler sınıfında yer almaktadır (Qin vd., 2018).

Aljinatın moleküler yapısı, 1→4 bağlı α -D-mannuronik asit (M bloğu) ve β -L-guluronik asit (G bloğu) artıklarından oluşan doğrusal bir kopolimerdir (Cao vd., 2020). Sodyum aljinat, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} ve Sr^{2+} gibi iki değerlikli katyonların varlığında iyonik çapraz bağlanma yoluyla yoğun ve güçlü jel yapıları oluşturabilmektedir (George & Abraham, 2006). Özellikle kalsiyum iyonları, guluronik asit (G) blokları üzerinde iki polimer zincirini köprüleyerek “egg-box” modeli olarak bilinen yapıyı meydana getirir (Braccini & Pérez, 2001; Cao vd., 2020; Sikorski vd., 2007) (Şekil 1).



Şekil 1. Aljinat zincirlerinin kalsiyum iyonlarıyla çapraz bağlanması sonucu oluşan “egg-box” modeline göre jel yapısının oluşumu (da Silva vd., 2017).

Bu modelde kalsiyum iyonları, birbirine paralel dizilmiş G blokları arasında “yumurta kutusu” benzeri boşluklarda lokalize olarak zincirler arası güçlü çapraz bağların oluşmasını sağlar. Bu nedenle G oranı yüksek aljinatlar daha rijit ve kırılğan jeller üretirken, M oranı yüksek olanlar daha elastik ve esnek yapılar meydana getirir. Bu modelde kalsiyum iyonları, birbirine paralel dizilmiş G blokları arasında “yumurta kutusu” benzeri boşluklarda lokalize olarak zincirler arası güçlü çapraz bağların oluşmasını sağlar. Bu nedenle G oranı yüksek aljinatlar daha rijit ve kırılğan jeller üretirken, M oranı yüksek olanlar daha elastik ve esnek yapılar meydana getirir (Senturk Parreidt vd., 2018; Wang vd., 2024).

3. SFERİFİKASYONUN KULLANILAN HAMMADDELER VE YARDIMCI MADDELER

3.1. Sodyum Aljinat

Sferifikasyon tekniği, bir polimerin iki değerlikli katyonlarla etkileşerek iyonik çapraz bağlar oluşturmaları ve bu sayede jel haline gelmesi prensibine dayanır. Bu sürecin başarısı, ise kullanılan hammaddelerin doğru seçilmesi ve proses koşullarının hassas bir şekilde kontrol edilmesiyle doğrudan ilişkilidir (Tsai vd., 2017). Bu bağlamda, kahverengi deniz yosunlarından elde edilen biyobozunur ve biyoyumlu bir polisakkarit olan sodyum aljinat, sferifikasyonun temel polimeri olarak öne çıkar (George & Abraham, 2006). Sodyum aljinat, sulu çözeltilerde viskoz bir yapı oluşturur ve iki değerlikli katyonların varlığında, literatürde "yumurta kutusu modeli" (egg-box model) ile açıklanan mekanizma aracılığıyla anında bir jel ağı meydana getirirler.

3.2. Agar

Agar, alg kökenli önemli bir polisakkarit olup *Gelidium* ve *Gracilaria* gibi kırmızı alg türlerinden elde edilmektedir. Gıda endüstrisinde sıklıkla kullanılan agar, U.S. Food and Drug Administration (FDA) tarafından 1972 yılında "Genel Olarak Güvenli Kabul Edilen" (GRAS) maddeler arasında sınıflandırılmıştır. Uzun süreli kullanımına rağmen, insan sağlığı açısından herhangi bir olumsuz etkiye dair bulguya rastlanmamış olması, bu bileşiğin güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Agar, yalnızca gıda alanında değil, aynı zamanda mikrobiyoloji ve biyoteknoloji uygulamalarında da önemli bir rol oynamaktadır. Mikroorganizmaların yetiştirilmesi için uygun bir katı besiyeri olarak kullanılan agar, gıda sektöründe ise reçel, jöle, kek, çikolata, şekerleme ve sos gibi ürünlerde yapı kazandırıcı ve

stabilite artırıcı bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. (Ural vd., 2024).

3.3. Karagenan

Karagenan, kırmızı deniz yosunlarından elde edilen sülfatlanmış bir polisakkarit olup, özellikle kappa ve iota formları jelleştirici ajan olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bubin vd., 2019). Hidroksil grupları su ile etkileşimi artırırken, sülfat grupları belirli katyonların varlığında güçlü jel ağlarının oluşmasını sağlamaktadır. Kappa ve iota karagenan potasyum ve kalsiyum iyonları ile jel oluşturabilirken, lambda karagenan yüksek sülfatlanma derecesi nedeniyle jel oluşturmayıp koyulaştırıcı olarak kullanılmaktadır. Karagenanlar gıda endüstrisinin yanı sıra ilaç taşıma sistemleri, doku mühendisliği, biyosensörler ve çeşitli endüstriyel jel uygulamalarında da kullanılmaktadır (Ural vd., 2024).

3.4. Kalsiyum tuzları (Ca²⁺)

Kalsiyum iyonları, aljinat zincirlerindeki guluronik asit blokları ile etkileşerek polimer zincirleri arasında iyonik köprüler oluşturur ve üç boyutlu jel yapısının meydana gelmesini sağlar. Bu nedenle kullanılan kalsiyum kaynağı, jelasyon hızı, jel mukavemeti ve ürünün duyu özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Puguan et al., 2014). Sferifikasyonda en yaygın kullanılan kalsiyum tuzları kalsiyum klorür, kalsiyum laktat ve kalsiyum glukonattır. Kalsiyum klorür hızlı ve güçlü jel oluşumu sağlasa da metalik ve acı tat oluşturabilmesi nedeniyle özellikle içilebilir ürünlerde sınırlı kullanılmakta ve küreler oluşturulduktan sonra yıkama işlemi gerektirmektedir. Kalsiyum laktat, tat kusuru oluşturmaması ve dengeli jel yapısı nedeniyle gıdalarda daha fazla tercih edilmekle birlikte çözünürlüğünün düşük olması jelasyon hızını yavaşlatmaktadır. Kalsiyum glukonat ise nötr tada sahip olmasına rağmen daha düşük jel oluşturma kapasitesi nedeniyle istenen sertliğe ulaşmak için daha

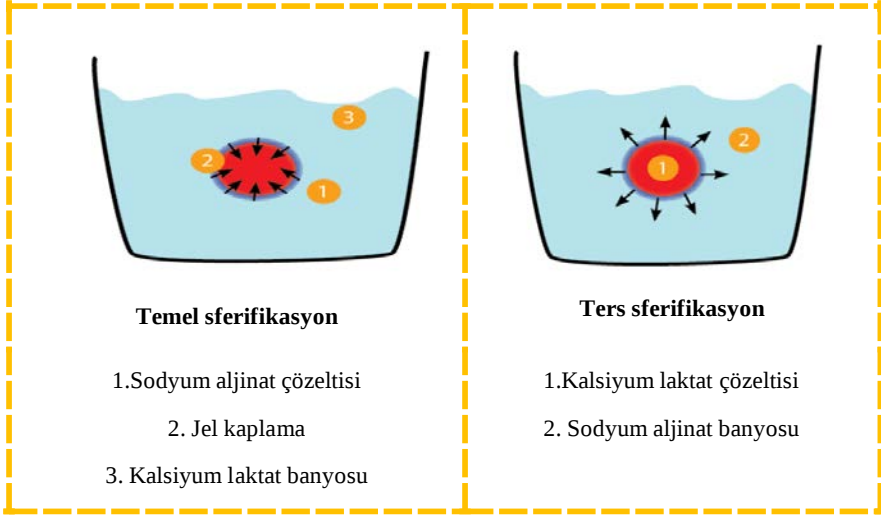
yüksek konsantrasyonlarda kullanılmaktadır(Karşlıoğlu vd., 2025; Lee vd., 2018; Lin vd., 2018; Wiriyapaisong vd., 2025).

3.5. Yardımcı bileşenler

Ana bileşenlerin yanı sıra, çeşitli yardımcı maddeler de sferifikasyon sürecinde kritik işlevlere sahiptir. Özellikle düşük pH değerine sahip matrislerde, serbest kalsiyum iyonlarının varlığı aljinatın çözünürlüğünü ve jel oluşumunu olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durumda şelatlama kapasitesine sahip bir ajan olan sodyum sitrat, Ca^{2+} iyonlarını bağlayarak çözeltinin pH'sını tamponlamakta ve aljinatın jel oluşturma kabiliyetini stabilize etmektedir (Samard, Jiranitsarawit, & Ryu, 2023). Ayrıca, meyve suları, kahve, şarap ve balzamik sirke gibi sıvı gıda bileşenleri genellikle küresel yapıların çekirdek fazını meydana getirmekte; doğal pigmentler ve aroma vericiler ise elde edilen kürelerin renk, görünüm ve aromatik profiline katkıda bulunarak duyu kaliteyi artırmaktadır.

4. SFERİFİKASYONUN TEMEL PRENSİPLERİ VE ÇALIŞMA MEKANİZMASI

Küreleştirme, sıvıların ince bir jel benzeri kaplama içinde hapsedilmesiyle kısmen katı yapıda küreler veya inciler oluşturulan bir tekniktir (Serna-Gallen vd., 2022). Sferifikasyon işlemi, temel sferifikasyon ve ters sferifikasyon olmak üzere iki ana yöntemle uygulanmaktadır (Şekil 2). Her iki yöntemde de sıvının etrafında kaplamalar ve katmanlar oluşur.



Şekil 2. Temel ve ters sferifikasyon süreçlerinin şematik gösterimi

Ters sferifikasyon tekniğinde, kalsiyum kaynağı doğrudan sıvı gıdaya ilave edilmekte ve bu karışım daha sonra sodyum aljinat çözeltisine damlatılarak jelasyon sağlanmaktadır. Jel oluşumu, dıştan içe doğru ilerleyen bir mekanizma ile gerçekleşmektedir. Ca^{2+} iyonları, öncelikle damlacığın yüzeyinde polimer zincirleri arasında iyonik çapraz bağlar oluşturarak geçirgenliği düşük bir zar meydana getirir (Bubin vd., 2019; D'Angelo vd., 2016). Bu dış zar, kalsiyum iyonlarının difüzyon hızını yavaşlatmakta ve jelleşmenin daha kontrollü bir şekilde ilerlemesini sağlamaktadır. Böylece elde edilen yapılar, daha sağlam ve kalın bir dış zarla çevrelenmiş olup, sıvı çekirdeğin korunması açısından daha dayanıklı hale gelmektedir. Ayrıca bu teknikte sıvı kürenin merkezinde kaldığı için daha büyük çapta küreler oluşturmaktadır. Kürenin büyük olması, sıvının aljinat zarından tamamen difüze olmasını engeller ve bu nedenle küre kısmen katı kalır. Ters sferifikasyon yönteminin en önemli avantajı, daha yüksek kalsiyum içeriğine sahip sıvılar üzerinde uygulanabilmesi nedeniyle uygulama esnekliği açısından temel sferifikasyona göre daha avantajlıdır. Ayrıca, sodyum aljinat banyosunda gerçekleşen bu süreç, özellikle dayanıklılığın kritik

olduğu gastronomik uygulamalarda tercih edilen, daha kalın ve stabil jel zarların elde edilmesine imkân tanımaktadır.

Buna karşılık, temel sferifikasyon yönteminde, sodyum aljinat içeren sıvı bir karışım, kalsiyum iyonları içeren bir çözeltiye damlatılarak jelasyon sağlanır. Bu işlem esnasında, sırasında aljinat molekülleri ile kalsiyum iyonları arasında iyonik çapraz bağlar oluşur ve bu bağlar sıvının dış yüzeyinde ince bir jel zarı meydana getirir. Böylece sıvı çekirdeği kapsülleyen ve ağızda "patlama etkisi" yaratan küresel yapılar oluşur. Temel sferifikasyon özellikle düşük kalsiyum içeriğine sahip sıvılarda etkili bir yöntemdir. Temel sferifikasyon uygulamalarına örnek olarak "Havyar benzeri tavuk suyu hidrojel boncukları", "küresel mango ravioli" ve " sıvı bezelye ravioli" verilebilir (Şekil 3).



Şekil 3. Tavuk suyu boncukları, Küresel Mango Ravioli, Sıvı Bezelye Ravioli (Karshoğlu vd., 2025; Sen, 2017)

Ayrıca bu yöntemde sodyum aljinatın karakteristik özellikleri, temel küreleştirmede ters küreleştirmeye kıyasla parçacıkların daha küçük olması nedeniyle jel benzeri kaplamaya daha kolay nüfuz eder. Bu nedenle, zar difüzyonu temel küreleştirmede daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Ancak bu teknikte jelleşme dıştan içe doğru ilerlediği için zar zamanla kalınlaşır ve içteki sıvının akışkanlığını kaybetmesine yol açar. Bu nedenle elde edilen ürünlerin taze olarak ve mümkünse hemen tüketilmesi gerekir. Bu yöntemle ilgili temel sorunlardan biri, kapsüllerin kalsiyum banyosundan çıkarılıp durulansa bile, jel

oluşumunun iç kısma doğru devam etmesidir. Kapsüller bekletildikçe iç yapıları da jelleşerek katı hale gelir; bu da beklenen sıvı-merkezli "patlayan doku" etkisinin kaybolmasına yol açar. Bu nedenle, temel sferifikasyon ürünlerinin hızlı bir şekilde servis edilmesi büyük önem taşır.

Her iki sferifikasyonun başarısı ise, sodyum aljinat konsantrasyonu, çözeltinin pH değeri, kullanılan kalsiyum tuzunun tipi ve miktarı, karışımın viskozitesi ve damlatma koşulları gibi birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Temel ve ters sferifikasyon yöntemleri, kullanılan çözelti türleri ve jel oluşum mekanizmaları açısından farklılık göstermektedir. Temel sferifikasyon daha basit bir kurulum gerektirdiğinden, özellikle moleküler gastronomi uygulamalarına giriş seviyesinde tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemde jel tabakası zamanla kalınlaşarak merkezdeki sıvıyı katılaştırdığı için elde edilen ürünlerin raf ömrü kısadır. Buna karşın, ters sferifikasyon tekniği daha karmaşık bir hazırlık süreci gerektirse de oluşturulan jel tabakası daha dayanıklı olup, merkezdeki sıvı fazın uzun süre korunmasına imkân tanır. Bu özellik, ürünlerin önceden hazırlanarak daha uzun süre saklanabilmesine ve servis kolaylığına katkıda bulunur.

Her iki yöntemde de jel tabakasının kalınlığı ve yapısal bütünlüğü; aljinat konsantrasyonu, Ca^{2+} kaynağı ve miktarı, sıcaklık, pH, çözeltideki şeker veya tuz miktarı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Örneğin düşük pH değerlerinde aljinat moleküllerinin iyonik bağ yapma kapasitesi azaldığından jelleşme etkinliği düşmektedir. Ayrıca, içeriğinde doğal kalsiyum iyonu yüksek olan gıdalar (örneğin süt, yoğurt, meyve suları) temel sferifikasyonda doğrudan kullanılamazken, ters sferifikasyon yöntemi bu tür matrikslerde daha başarılı sonuçlar vermektedir.

5. GASTRONOMİDE UYGULAMA ALANLARI

Günümüzde tüketicilerin yalnızca besleyici değil, aynı zamanda farklı duyuusal deneyimler sunan gıdalara yönelmesiyle moleküler gastronomi ve sferifikasyona olan ilgi giderek artmaktadır. Bu durum, sferifikasyon tekniğinin gıda formülasyonlarında kullanımını teşvik etmiş ve literatürde sodyum aljinat, kalsiyum laktat ve kalsiyum klorür gibi jelleştirici sistemlerle optimum formülasyonların belirlenmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ayrıca jelasyon koşulları, aljinat konsantrasyonu, pH ve kalsiyum kaynağı gibi parametrelerin ürün özellikleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Çeşitli araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalarda, bitkisel ve meyve bazlı sıvıların ters sferifikasyon tekniğiyle kapsüllenebilirliği üzerinde durulmuştur. Örneğin, Samard vd. (2023) mavi kelebek çayı özünden sodyum aljinatın farklı konsantrasyonlarından (%0,5, %1,0, %1,5) kapsüller hazırlayarak fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu özellikler arasında uzunluk, genişlik, küresellik oranı, renk değerleri, pH ve briks yer almaktadır. .Bu çalışmada, aljinat oranının artmasıyla parlaklık (L*) değerinin yükseldiği, duyuusal analiz sonuçlarına göre ise; görünüş, tatlılık, tekstürel ve genel beğeni açısından en yüksek puan, en düşük sodyum aljinat konsantrasyonundan (%0,5) elde edildiği rapor edilmiştir. Benzer şekilde Bubin ve ark. (2019), ters sferifikasyon yöntemiyle ejder meyvesinden sodyum aljinat, kappa karragenan ve iota karragenan+sodyum aljinat kombinasyonu kullanılarak kapsüller üretmiş ve hidrokolloidlerin jel yapısı ile depolama stabilitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, sodyum aljinat ile hazırlanan kapsüllerin daha yüksek tekstürel dayanıklılık gösterdiğini, sodyum aljinat ve Kappa karragenan içeren kapsüllerin ise morfolojik ve dokusal stabilite açısından daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, Kappa karragenan ile üretilen kapsüllerin daha düşük sertlik ve kırılma

kuvvetine sahip olması nedeniyle içecek uygulamaları için daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Sutrisno vd. (2025) farklı sodyum aljinat (%0,6–1) ve kalsiyum laktat (%0,6–1) konsantrasyonları kullanarak domates suyundan havyar benzeri küreler üretmiş ve kapsüllerin β -karoten, C vitamini, pH ve duyuşal özelliklerini incelemiştir. Sonuçlar, sodyum aljinat ve kalsiyum laktat konsantrasyonlarının özellikle β -karoten içeriğı ile şekil ve doku özelliklerini etkilediğini, ancak C vitamini ve tat özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. En başarılı formülasyonun %0,6 sodyum aljinat ve %0,6 kalsiyum laktat içeren örnek olduğu bildirilmiştir. Benzer şekilde Low ve Pui (2020), ters sferifikasyon yöntemiyle mango–ananas püresinden düşük kalorili jel küreler üretmiş ve en uygun sonucun 22 Brix çözeltisinde 30 dakika bekletme ile elde edildiğini, ürünün 100 g’da 73 kcal enerji içeriğıyle sağlıklı bir alternatif sunduğunu bildirmiştir.

Çeşitli araştırmalar, sferifikasyon tekniğinin bitkisel ve meyve bazlı sıvıların yanı sıra sos, içecek ve et suyu gibi kompleks sistemlerde de başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir. Örneğın Yuasa vd. (2019), mentsuyu sosundan üretilen kapsüllerde 2,5 dakikalık kalsiyum laktat banyosunun daha yüksek yırtılma kuvveti ve parlak yüzey sağladığını bildirmiştir. Benzer şekilde Özkaya ve Özel (2023), yoğurt, ananas, domates ve çikolata bazlı kapsüllerin başarılı şekilde üretildiğini ve yöntemin farklı gıda ürünlerinde uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Sferifikasyonun fonksiyonel gıda geliştirmedeki potansiyelini vurgulayan bir başka çalışmada, Smuga-Kogut vd. (2020), tüketimi oldukça düşük olan arı ekmeğini değerlendirmek amacıyla karabuğday balından havyar formunda yeni bir ürün geliştirmiştir. Sodyum aljinat ve kalsiyum klorür kullanılarak 1:4,

1:2 ve 1:1 oranlarında üç farklı jelasyon denemesi yapılmış; en iyi sonucun 1:1 oranında elde edildiği bildirilmiştir. Bu formülasyonda üretilen havyar, ince zar yapısı, sıvı iç çekirdek, yoğun tat profili ve parlak renk özellikleriyle karakterize edilmiştir. Araştırmacılar, elde edilen “arı ekmeği havyarının” probiyotik özellik taşıdığını ve fonksiyonel bir gıda olarak yüksek tüketim potansiyeline sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Fermente içeceklerin sferifikasyonla yeniden yapılandırılmasına yönelik bir başka araştırmada, Tireki (2025b), kombucha çayı üzerine odaklanmıştır. Hibiskus ekstraktı, elma suyu konsantresi ve sakkaroz kullanılarak üç farklı formülasyon hazırlanmıştır. Elde edilen kombü küreleri, sferifikasyon açısından uygun bulunmuş; elma suyu eklenen kürelerin daha büyük ve ağır, sakkarozlu kürelerin ise daha düzgün yüzeyli olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, kombü çayının sferifikasyon yoluyla alternatif bir sunum formu kazanabileceğini vurgulamıştır.

Son dönemde yapılan çalışmalar, sferifikasyonun et ve et suyu temelli sistemlerde de uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda Karşlıoğlu vd. (2025), iyonik jelasyon yöntemiyle tavuk suyundan kapsüller üretmiş ve farklı kalsiyum laktat konsantrasyonlarının (%1, %2,5, %5) ile bekletme sürelerinin (0, 30, 60 dk) etkilerini incelemiştir. Bulgular, kalsiyum oranı ve bekletme süresi arttıkça kapsül çapının azaldığını, buna karşın yığın yoğunluğunun ve sertliğin arttığını göstermiştir. Ayrıca duyu bulgular, en yüksek beğeni ve yumuşaklık skorlarının %1 kalsiyum laktat içeren örneklerde elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, kalsiyum konsantrasyonu ve jelasyon süresinin optimize edilmesinin, aljinat bazlı hidrojel boncukların kalitesi açısından kritik olduğunu ve bu ürünlerin moleküler gastronomi ile fonksiyonel gıda geliştirmede önemli potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ

Gastronomi ve gıda bilimi alanındaki çalışmalar, tüketicilerin lezzetin yanı sıra görünüm, tekstür, sağlık ve yenilikçi ürün beklentilerine de önem verdiğini göstermektedir. Bu doğrultuda sferifikasyon, estetik sunum ve fonksiyonel bileşenlerin korunması açısından öne çıkan bir teknik olup, farklı gıdalarda renk, doku ve tat gibi duyuşsal özellikleri etkileyebilmektedir. Tekniğin etkinliğinin artırılması için jelasyon koşulları, bileşen etkileşimleri ve depolama stabilitesinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca sferifikasyonun fonksiyonel, probiyotik ve biyoaktif bileşenlerin taşınmasında kullanılabilmesi, doğal bileşenlerle optimize edilmiş yenilikçi ve besleyici ürünlerin geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Barham, P., Skibsted, L. H., Bredie, W. L., Bom Frøst, M., Møller, P., Risbo, J., Snitkjær, P., & Mortensen, L. M. (2010). Molecular gastronomy: a new emerging scientific discipline. *Chemical Reviews*, 110(4), 2313-2365.
- Baslar, M. (2024). An Innovative Approach in Gastronomy: Ultrasound Technology. *International Journal of Gastronomy Research*, 3(1), 24–29.
- Belščak-Cvitanović, A., Komes, D., Karlović, S., Djaković, S., Špoljarić, I., Mršić, G., & Ježek, D. (2015). Improving the controlled delivery formulations of caffeine in alginate hydrogel beads combined with pectin, carrageenan, chitosan and psyllium. *Food Chemistry*, 167, 378-386.
- Bennacef, C., Desobry-Banon, S., Probst, L., & Desobry, S. (2021). Advances on alginate use for spherification to encapsulate biomolecules. *Food Hydrocolloids*, 118, 106782.
- Braccini, I., & Pérez, S. (2001). Molecular basis of Ca²⁺-induced gelation in alginates and pectins: the egg-box model revisited. *Biomacromolecules*, 2(4), 1089-1096.
- Bubin, S. F. A., Mat Ali, S., Shukri, R., Wan Ibadullah, W. Z., Ramli, N. S., Mustapha, N. A., & Mohammad Rashedi, I. F. (2019). Characterization and stability of pitaya pearls from hydrocolloids by reverse spherification. *International journal of food properties*, 22(1), 1353-1364.
- Cao, L., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., & Fang, Y. (2020). Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: A review. *Carbohydrate Polymers*, 242, 116389.
- Caporaso, N., & Formisano, D. (2016). Developments, applications, and trends of molecular gastronomy among

- food scientists and innovative chefs. *Food Reviews International*, 32(4), 417-435.
- Chang, M. Y., Huang, C. X., Lin, I. K., & Chen, H. S. (2025). Exploring Product Innovation and Consumer Attitudes in Molecular Gastronomy: Marketing Insights for the Gourmet Food Industry. *Foods*, 14(2), 209.
- Chauhan, Y., & Philosophers, C. (2023). Culinary creativity unleashed: A review of innovative techniques in food gastronomy. *International Journal for Multidimensional Research Perspectives*, 1(2), 37-46.
- D'Angelo, G., Hansen, H. N., & Hart, A. J. (2016). Molecular gastronomy meets 3D printing: Layered construction via reverse spherification. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 152-159.
- da Silva, T. L., Vidart, J. M. M., da Silva, M. G. C., Gimenes, M. L., & Vieira, M. G. A. (2017). Alginate and sericin: Environmental and pharmaceutical applications. In E. A. Shalaby (Ed.), *Biological activities and application of marine polysaccharides* (pp. 57–85). InTech.
- de Souza, K. D., de Magalhães Marinho, L. Q., Alves, A. S. B., de Lima Silva, V., Colauto, G. A. L., Colauto, N. B., Otero, D. M., Costa, M. M., de Souza, C. O., & Ribeiro, C. D. F. (2023). Gastronomy and the development of new food products: Technological prospection. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 33, 100769.
- Fu, H., Liu, Y., Adrià, F., Shao, X., Cai, W., & Chipot, C. (2014). From material science to avant-garde cuisine. The art of shaping liquids into spheres. *The Journal of Physical Chemistry B*, 118(40), 11747-11756.
- Gaikwad, S., Kulthe, A., & Suthar, T. (2019). Characterization of flavoured sweet water balls prepared by basic

- spherification technique. *International Journal of Chemical Studies*, 7(1),1714–1718.
- George, M., & Abraham, T. E. (2006). Polyionic hydrocolloids for the intestinal delivery of protein drugs: alginate and chitosan- a review. *Journal of Controlled Release*, 114(1), 1-14.
- Karshoğlu, B., Soncu, E. D., Kızıldoğan, T., Gezer, D., & Almaci, S. S. (2025). Impact of Calcium Lactate Concentration and Holding Time on Caviar-like Chicken Broth Hydrogel Beads. *Molecules*, 30(19), 3926.
- Lee, B.-B., Bhandari, B. R., & Howes, T. (2018). Gelation of an alginate film via spraying of calcium chloride droplets. *Chemical Engineering Science*, 183, 1-12.
- Lee, P., & Rogers, M. (2012). Effect of calcium source and exposure-time on basic caviar spherification using sodium alginate. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(2), 96-100.
- Lin, L., Wong, M., Deeth, H., & Oh, H. (2018). Calcium-induced skim milk gels using different calcium salts. *Food Chemistry*, 245, 97-103.
- Low, Y. L., & Pui, L. P. (2020). Optimization of mango-pineapple jelly sphere production by frozen reverse spherification using a full factorial design. *Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria*, 19(2), 207-218.
- Özkaya, F., & Özel, K. (2023). Encapsulation from Molecular Kitchen Techniques: Standard Recipes Examples. *Journal of Tourism & Gastronomy Studies*, 6(Special Issue 3), 53-72.
- Puguan, J. M. C., Yu, X., & Kim, H. (2014). Characterization of structure, physico-chemical properties and diffusion

- behavior of Ca-Alginate gel beads prepared by different gelation methods. *Journal of Colloid and Interface Science*, 432, 109-116.
- Qin, Y., Jiang, J., Zhao, L., Zhang, J., & Wang, F. (2018). Applications of alginate as a functional food ingredient. In S. Kasapis, I. T. Norton, & J. Ubbink (Eds.), *Biopolymers for food design* (pp. 409–429). Academic Press.
- Samard, S., Jiranitsarawit, P., & Ryu, G. H. (2023, July). Development of vitamin c butterfly pea juice beads by reverse spherification technique. In *The 9th International PIM Conference 2023* (pp. 1062-1070).
- Sen, D. J. (2017). Cross linking of calcium ion in alginate produce spherification in molecular gastronomy by pseudoplastic flow. *World Journal of Pharmaceutical Sciences*, 1-10.
- Senturk Parreidt, T., Müller, K., & Schmid, M. (2018). Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods*, 7(10), 170.
- Serna-Gallen, P., Fortuno-Morte, M., Beltran-Mir, H., & Cordoncillo, E. (2022). “MasterChemist”: A Novel Strategy for Reviewing Stoichiometry and Introducing Molecular Gastronomy to Chemistry Students. *Journal of Chemical Education*, 99(10), 3443-3451.
- Sikorski, P., Mo, F., Skjåk-Bræk, G., & Stokke, B. T. (2007). Evidence for egg-box-compatible interactions in calcium– alginate gels from fiber X-ray diffraction. *Biomacromolecules*, 8(7), 2098-2103.
- Smuga-Kogut, M., Pabiszczak, A., Dymkowska-Malesa, M., Szymanowska, D., Kobus-Cisowska, J., & Cielecka-Piontek, J. (2020). Preparation of beebread caviar from buckwheat honey through immobilization with sodium alginate. *Molecules*, 25(19), 4483.

- Sutrisno, A. D., Taufik, Y., Apriani, A., Widiantera, T., Garnida, Y., & Hariadi, H. (2025). Study on the formation of tomato juice caviar spheres (*Lycopersicum esculentum* Mill) using sodium alginate ($\text{NaC}_6\text{H}_9\text{O}_7$) and calcium lactate ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6$) through spherification technique. *Research Square*.
- This, H. (2009). Molecular Gastronomy, a Scientific Look at Cooking. *Accounts of Chemical Research*, 42(5), 575-583.
- Tireki, S. (2025a). Basic spherification as a gelation application in the kitchen: Diffusion coefficient estimation and appearance quality of beverage pearls. *Physics of Fluids*, 37(3).
- Tireki, S. (2025b). Physicochemical properties, volatile compounds and basic spherification of hibiscus (*Hibiscus sabdariffa* L.) kombucha beverage. *Food Science and Technology International*.
- Tsai, F.-H., Chiang, P.-Y., Kitamura, Y., Kokawa, M., & Islam, M. Z. (2017). Producing liquid-core hydrogel beads by reverse spherification: Effect of secondary gelation on physical properties and release characteristics. *Food Hydrocolloids*, 62, 140-148.
- Ural, G. N., Topuz, O. K., Kaya, A., Alp, A. C., & Yersüren, S. (2024). Algae-based hydrogel beads: A mini-review. *Food and Humanity*, 3, 100453.
- van der Linden, E., McClements, D. J., & Ubbink, J. (2008). Molecular gastronomy: A food fad or an interface for science-based cooking? *Food Biophysics*, 3(3), 246–254.
- Wang, Y., Shen, Z., Wang, H., Song, Z., Yu, D., Li, G., Liu, X., & Liu, W. (2024). Progress in research on metal ion crosslinking alginate-based gels. *Gels*, 11(1), 16.

- Wiriyaumpaiwong, S., Lakthong, P., Patpak, A., Nintirak, N., Keawniwong, Y., & Wiriyaumpaiwong, P. (2025). Passion fruit juice beads production by reverse spherification technique: Effect of concentration and soaking time of calcium lactate solution. *Suan Sunandha Science and Technology Journal*, 12(1), 25-31.
- Yuasa, M., Tagawa, Y., & Tominaga, M. (2019). The texture and preference of “mentsuyu (Japanese noodle soup base) caviar” prepared from sodium alginate and calcium lactate. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 18, 100178.
- Zou, J., Zhang, K., Li, W., Qin, Y., Sun, Q., Ji, N., & Xie, F. (2024). Exploring the role of the thick and dense calcium alginate shell on the anti-digestibility mechanism of corn starch/carboxymethyl cellulose/calcium alginate liquid-core beads prepared by reverse spherification. *Food Hydrocolloids*, 156, 110357.

GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
AKADEMİK TARTIŞMALAR

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com