

Fonksiyonel Gıdalarda Akıllı Sistemler 8

Recep Taş¹

Özet

Beslenme bilimi, günümüzde popülasyon tabanlı genel diyet önerilerinden uzaklaşarak, bireylerin genetik yapısı, metabolik özellikleri ve yaşam tarzı verilerini temel alan “kişiselleştirilmiş beslenme” paradigmasına doğru evrimleşmektedir. Bu kitap bölümü, fonksiyonel gıdaların akıllı teknolojilerle entegrasyonunu ele alarak, bu yeni yaklaşımın halk sağlığı ve bireysel sağlık yönetimindeki dönüştürücü etkisini incelemektedir. Çalışmada, üretimden tüketime kadar olan süreçte Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ (AI) ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerin gıda sistemlerine nasıl entegre edildiği detaylandırılmaktadır. Fonksiyonel bileşenlerin biyoyararlanımını ve stabilitesini artıran nanoemülsiyonlar ve lipozomlar gibi nanoteknolojik taşıyıcı sistemlerin, hedefe yönelik besin salımlarındaki kritik rolüne odaklanılmaktadır. Buna paralel olarak, biyosensörler ve giyilebilir teknolojiler aracılığıyla elde edilen gerçek zamanlı fizyolojik verilerin, yapay zekâ algoritmalarıyla işlenerek kişiye özgü dinamik beslenme planlarına dönüştürülmesi süreci analiz edilmektedir. Ayrıca akıllı ambalaj sistemleri, 3D gıda baskısı ve mobil sağlık uygulamalarının tüketici deneyimini nasıl iyileştirdiği tartışılmaktadır. Son olarak çalışma, kişisel verilerin gizliliği, etik kaygılar ve yasal düzenlemelerdeki eksiklikler gibi zorluklara dikkat çekerken; fonksiyonel gıdalar ve akıllı sistemlerin sinerjisinin, kronik hastalıkların önlenmesinde ve sürdürülebilir toplum sağlığının inşasında proaktif bir çözüm sunduğu sonucuna varmaktadır.

1. Kişiselleştirilmiş Beslenmenin Yükselişi

Beslenme bilimi uzun yıllar boyunca genellenmiş öneriler ve popülasyon düzeyinde standart diyet rehberleri üzerine kurulmuştur. Ancak son dönemde, bilimsel veriler ve değişen tüketici beklentileri, “herkese uyan tek tip diyet” yaklaşımının yetersiz kaldığını ortaya koymakta ve

1 Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Bartın, Türkiye, rtas@bartin.edu.tr, 0000-0002-3743-7770

beslenmenin bireysel farklılıklar göz önüne alınarak düzenlenmesi gereğini vurgulamaktadır (Adams vd., 2020; Ordovas vd., 2018). Kişiselleştirilmiş beslenme kavramı, her bireyin genetik yapısı, yaşam tarzı ve metabolik özelliklerindeki varyasyonlar nedeniyle aynı beslenme programlarına farklı yanıtlar verebileceği gerçeğine dayanmaktadır. Nitekim, son yıllarda yapılan çalışmalar benzer diyet uygulamalarına karşı bireyler arasında belirgin metabolik yanıt farklılıkları olabildiğini göstermiştir (Berry vd., 2020; Zeevi vd., 2015). Bu bulgular ışığında, kişiye özgü hazırlanmış beslenme planlarının, tek tip önerilere kıyasla sağlık sonuçlarını iyileştirmede daha etkili olabileceği düşünülmektedir (Celis-Morales vd., 2017; Roman vd., 2024). Özellikle obezite ve diyabet gibi beslenme ile ilişkili kronik hastalıkların önlenmesi ve yönetiminde kişiselleştirilmiş beslenmenin önemli faydalar sağlayabileceği ileri sürülmektedir (Lam vd., 2025; Ordovas vd., 2018).

Kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımı, nutrigenetik ve nutrigenomik bulgular başta olmak üzere bireyin kendine özgü biyolojik ve davranışsal özelliklerinin beslenme planlamasına entegre edilmesini içerir (Adams vd., 2020; Ordovas vd., 2018). Nutrigenetik, genetik polimorfizmlerin (ör. belirli bir gen varyantının) besin öğelerine verilen metabolik tepkileri nasıl etkilediğini incelerken; nutrigenomik, besin öğelerinin ve besin kaynaklı biyoaktif bileşenlerin gen ekspresyonu üzerindeki etkilerini araştırır (Roman vd., 2024). Buna ek olarak, beslenmeye bağlı epigenetik değişimler (nutri-epigenetik) ve bireyin bağırsak mikrobiyota profili (nutri-metagenomik) gibi faktörler de giderek artan bir şekilde kişiselleştirilmiş beslenme planlarına dahil edilmektedir (Lam vd., 2025; Ordovas vd., 2018). Bireyin yaşam tarzına ilişkin veriler (örn. fiziksel aktivite düzeyi, uyku düzeni, stres yönetimi) ve klinik fenotip özellikleri (örn. vücut kitle indeksi, kan biyokimyası, metabolik belirteçler) de bu kapsamda değerlendirilerek, beslenme önerilerinin mümkün olan en yüksek hassasiyetle bireye uygun hale getirilmesi hedeflenir (Adams vd., 2020). Son yıllardaki teknolojik gelişmeler ve çoklu “-omik” veri analiz yöntemlerinin yaygınlaşması da genetik testler, kan biyobelirteç ölçümleri ve dijital sağlık uygulamalarından elde edilen büyük verilerin beslenme planlarına dahil edilmesini kolaylaştırmıştır (Adams vd., 2020). Bu sayede bireylerin genetik yatkınlıkları ve mevcut metabolik durumlarıyla uyumlu, kişiye özel beslenme önerileri geliştirmek mümkün hale gelmektedir.

Fonksiyonel gıdalar kavramı, kişiselleştirilmiş beslenme alanında önemli bir bağlam oluşturmaktadır. Fonksiyonel gıdalar, temel besleyici değerlerinin ötesinde, içerdiği biyolojik olarak aktif bileşenler aracılığıyla sağlık üzerinde faydalı etkiler gösteren ve hastalık riskini azaltmaya katkı sağlayan gıdalar olarak tanımlanır (Lam vd., 2025). Örneğin, posa (diyet lifi) yönünden zengin gıdaların tokluk hissini artırarak glisemik kontrolü iyileştirdiği,

polifenol içeriği yüksek meyve-sebzelerin antioksidan ve anti-inflamatuvar etkileriyle kronik hastalık riskini azalttığı, omega-3 yağ asitleri içeren besinlerin kan lipid profilini iyileştirip kardiyovasküler risk etmenlerini düşürebildiği bilimsel çalışmalarla gösterilmiştir (Lam vd., 2025). Benzer şekilde, probiyotik veya prebiyotik özellikteki fonksiyonel gıdaların bağırsak mikrobiyotasını dengeleyerek metabolik ve immün fonksiyonlara olumlu katkılar sağladığı bilinmektedir (Lam vd., 2025). Kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımında, bu tür fonksiyonel gıdaların bireyin özgün ihtiyaçlarına göre seçilip vurgulanması söz konusudur. Başka bir deyişle, bireyin genetik yatkınlıkları veya sağlık durumuna göre belirli fonksiyonel bileşenlerden zengin gıdaların diyetle ön plana çıkarılması hedeflenir. Örneğin, kardiyovasküler hastalık riski yüksek bir bireyde omega-3 yağ asitlerince zengin balık ve yağlı tohumların tüketimine ağırlık verilmesi veya bağırsak mikrobiyotasında dengesizlik (disbiyozis) olan bir bireyde probiyotik içeren fermente süt ürünleri ile prebiyotik lif kaynaklarının artırılması, kişiselleştirilmiş fonksiyonel beslenme stratejilerine örnek olarak verilebilir. Nitekim folat metabolizması geninde belirli bir varyasyona sahip kişilerde, folik asit açısından zengin beslenmenin kardiyovasküler hastalık riskini azaltmada özellikle önemli olabileceği gösterilmiştir (Lam vd., 2025). Bu tür örnekler, fonksiyonel gıdaların akılcı kullanımı yoluyla bireyin genetik ve metabolik gereksinimlerine uygun beslenme düzenlemeleri yapılabileceğini ortaya koymaktadır.

Kişiselleştirilmiş beslenme, fonksiyonel gıdaların stratejik kullanımıyla birleştiğinde, bireyin sağlık potansiyelini en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Mevcut araştırmalar, bu yaklaşımın kişinin diyetle uyumunu artırabildiğini ve sağlığa yönelik olumlu davranış değişikliklerini destekleyebildiğini göstermektedir (Celis-Morales vd., 2017). Bununla birlikte, kişiye özel beslenme planlarının uzun vadeli etkinliğini ve güvenliğini doğrulamak için daha fazla bilimsel çalışmaya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmaktadır (Adams vd., 2020; Ordovas vd., 2018). Sonuç olarak, genetik, yaşam tarzı ve metabolik faktörlere dayalı kişiselleştirilmiş beslenme, değişen tüketici ihtiyaçları ve bilimsel ilerlemelerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan yeni bir beslenme paradigmasıdır. Fonksiyonel gıdalarla zenginleştirilmiş bu kişiye özel beslenme uygulamalarının, gelecekte beslenme rehberlerinde ve halk sağlığı stratejilerinde önemli bir yer tutması beklenmektedir (Roman vd., 2024).

2. Akıllı Gıda Sistemlerinin Temelleri

Akıllı gıda sistemleri, üretimden tüketime kadar tüm aşamalarda ileri teknolojilerin (IoT, yapay zekâ, büyük veri analitiği) ve biyolojik bilimlerin

entegre edilmesiyle gıda güvenliği, kalite kontrolü ve kişiselleştirilmiş beslenme gibi alanlarda inovatif çözümler sunan sistemlerdir (Rejeb vd., 2021; Shoomal vd., 2024). Bu sistemler, geleneksel gıda tedarik zincirlerine kıyasla dinamik izleme, veri toplama ve analiz kabiliyetleri ile ürün kalitesini artırmayı, tüketici taleplerine daha hassas yanıt verebilmeyi ve israfı azaltmayı hedeflemektedir (Shoomal vd., 2024).

Akıllı gıda sistemlerinin temel bileşenleri arasında fiziksel sensörler (sıcaklık, nem, pH, gaz analizi gibi), RFID/NFC etiketler, akıllı cihazlar (örneğin, akıllı tartılar veya buzdolapları), veri toplama altyapıları ve yapay zekâ algoritmaları bulunmaktadır (de Abreu ve van Deventer, 2022). Bu bileşenler, gıdanın üretim koşullarından raf ömrüne kadar geçen süreçte kritik verileri toplamakta ve bu verilerin işlenmesiyle gıda güvenliği ve kalitesi hakkında çıkarımlar yapılmasını sağlamaktadır. Özellikle fonksiyonel gıdalar alanında, belirli biyolojik etkileri hedefleyen içeriklerin (ör. omega-3 yağ asitleri, probiyotikler) kişiselleştirilmiş şekilde sunulabilmesi için akıllı sistemlerin sunduğu veri odaklı yaklaşım büyük önem taşımaktadır (Ordovas vd., 2018).

Gıdalarda “akıllı” kavramı, ürünün çevresel koşullara tepki verebilme, kalite değişimlerini algılayabilme ve gerektiğinde tüketiciye veya üreticiye bilgi iletebilme özellikleri taşımasını ifade eder (Drago vd., 2020). Bir gıdanın veya ambalajın “akıllı” sayılabilmesi için algılama, kayıt, iletişim ve tepki verebilme gibi yeteneklere sahip olması beklenir (Abekoon vd., 2024).

Örneğin, akıllı ambalaj sistemleri içerisine entegre edilen sensörler sayesinde ürünlerin sıcaklık, nem ve gaz değişimleri izlenebilmekte ve bu değişimler tüketiciye renk değişimi, gösterge işaretleri veya mobil bildirimler yoluyla iletelebilmektedir (Fuertes vd., 2016). Ayrıca, akıllı ambalajlar QR kodlar, RFID çipleri ve hatta blockchain destekli veri akış sistemleri sayesinde gıdanın tarladan sofraya kadar olan tüm yolculuğunu şeffaf bir şekilde belgeleyebilmektedir (Rejeb vd., 2021).

Akıllı gıda entegrasyonu yalnızca ambalajla sınırlı değildir; akıllı mutfak teknolojileri (ör. internete bağlı buzdolapları, akıllı fırınlar) da tüketicilerin gıdayla etkileşimini değiştirmiştir. Bu sistemler, gıda stoğunu izleyebilir, son kullanma tarihlerini yönetebilir ve kullanıcıya bireysel beslenme ihtiyaçlarına uygun tarifler önerebilir (Shoomal vd., 2024).

IoT (Nesnelerin İnterneti), yapay zekâ (AI) ve büyük veri analizi, akıllı gıda sistemlerinin en önemli itici güçleridir. IoT teknolojileri, gıdaya entegre edilen sensörler aracılığıyla sıcaklık, nem, basınç ve diğer çevresel parametreleri sürekli izlerken; bu veriler bulut tabanlı platformlara aktarılır

ve gerçek zamanlı değerlendirmeye tabi tutulur (de Abreu ve van Deventer, 2022; Shoomal vd., 2024).

Yapay zekâ sistemleri, bu büyük veri yığınlarını işleyerek örüntüleri tanır, anormallikleri tespit eder ve gerektiğinde otomatik müdahaleler gerçekleştirebilir. Örneğin, bir üretim hattında sıcaklık sensörlerinden gelen verilerin analiziyle ürün bozulması riski öngörülebilir ve süreçler otomatik olarak optimize edilebilir (Rejeb vd., 2021). Yapay zekâ ayrıca, bireysel tüketici verileri (genetik bilgi, yaşam tarzı, hastalık geçmişi gibi) ile beslenme bilgilerini eşleştirerek kişiye özel gıda önerileri oluşturabilir (Ordovas vd., 2018).

Veri analitiği ise IoT ve yapay zekâdan gelen verilerin uzun vadeli analiziyle tüketim trendlerini, sağlık risklerini ve ürün geliştirme fırsatlarını ortaya çıkarır. Bu sayede gıda sektörü, sadece ürün kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda tüketici davranışlarını da daha iyi anlayarak kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdaların geliştirilmesini destekler (Fuertes vd., 2016).

Özellikle kişiselleştirilmiş beslenme bağlamında, IoT ve yapay zekâ destekli sistemler sayesinde bireylerin günlük sağlık verileri (ör. aktivite düzeyi, kan şekeri takibi) ile anlık gıda önerileri yapılabilir hale gelmiş, böylece sağlığı destekleyici bireyselleştirilmiş beslenme planları uygulanabilir olmuştur (Berry vd., 2020).

3. Nanoteknolojik Taşıyıcı Sistemler ve Kontrollü Salım

Nanoteknolojik taşıyıcı sistemler, fonksiyonel bileşenlerin etkin bir şekilde taşınmasını ve salımını sağlamak amacıyla geliştirilmiş ileri düzey yapılar olup, fonksiyonel gıdaların biyoeffektifliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır (Tan ve McClements, 2021). Bu sistemler genellikle, hedef bileşenleri çevresel etmenlerden (ısı, pH, ışık, oksidasyon vb.) korumak, çözünürlüğünü artırmak ve biyoyararlanımını iyileştirmek için kullanılır (Singh vd., 2009).

En yaygın nanoteknolojik taşıyıcı sistemler arasında şunlar yer alır:

Nanoemülsiyonlar: 20–200 nm çapında damlacık boyutuna sahip, iki fazlı (genellikle yağ-su) sistemlerdir. Yüksek kinetik stabiliteye sahip nanoemülsiyonlar, hidrofobik (suya az çözünen) bileşenlerin suda dağılılabilirliğini artırarak biyoyararlanımı geliştirmektedir (McClements, 2004). Fonksiyonel bileşenlerin korunmasında ve sindirim sistemi boyunca taşınmasında oldukça etkilidirler.

Nanokapsüller: Bir aktif maddeyi çekirdek olarak kapsülleyen ve dışta bir polimerik veya lipidik kabukla korunan sistemlerdir. Özellikle kontrollü

salım sağlayarak bileşenlerin hedef doku veya organlara ulaşmasına imkân tanır (Taylor vd., 2005).

Liposomlar: Fosfolipid çift katmanlarından oluşan küresel veziküllerdir. Hem hidrofilik (suya çözünen) hem de lipofilik (yağda çözünen) maddeleri kapsülleyebilme yeteneğine sahiptirler (Mozafari, 2010). Biyolojik uyumlulukları ve vücut hücre zarlarına benzerlikleri nedeniyle taşıyıcı olarak büyük avantaj sağlarlar.

Bunun yanında, solid lipid nanoparticles (SLNs) ve nanostructured lipid carriers (NLCs) gibi yeni nesil lipid bazlı nanotaşıyıcılar da geliştirilmiştir. Bu yapılar, özellikle lipofilik biyoaktif bileşiklerin stabilitesinin artırılması ve taşınmasında etkili olmaktadır (Fathi vd., 2012).

Nanoteknolojik taşıyıcılar, aktif bileşenlerin yalnızca istenilen bölge veya ortam koşullarında salınmasını sağlayarak hedefe yönelik bir tedavi veya fonksiyonel etki sunar (Wang vd., 2024). Örneğin, sindirim sisteminde belirli bir pH değerinde çözünerek aktif bileşeni serbest bırakabilen nanotaşıyıcılar geliştirilmiştir (Gonçalves vd., 2023). Bu strateji, fonksiyonel gıdalarda örneğin probiyotiklerin mide asidinden korunup bağırsakta serbest bırakılması veya antioksidanların doğrudan kolon bölgesinde salımı gibi hedefli uygulamalara imkân tanımaktadır.

Hedefe yönelik salım sistemleri aynı zamanda; fonksiyonel bileşenlerin düşük konsantrasyonlarda bile etkili olmasını sağlar, yan etkileri azaltır, etkinliğin süresini artırır (Wang vd., 2024). Örneğin, fitokimyasallar (polifenoller, karotenoidler gibi) gibi oksidatif hasara hassas bileşikler, nanotaşıyıcı sistemlerle stabilize edilerek hedef dokularda daha kontrollü bir şekilde salınabilmektedir (Tan ve McClements, 2021).

Bir fonksiyonel bileşenin sağlık üzerindeki etkisi, yalnızca diyetle bulunmasıyla değil, vücut tarafından emilmesi ve kullanılabilir hale gelmesiyle mümkündür. Bu noktada, biyoyararlanım (bioavailability) kavramı devreye girer. Pek çok biyoaktif bileşen (örneğin, kurkumin, resveratrol, omega-3 yağ asitleri) doğrudan tüketildiğinde düşük biyoyararlanıma sahiptir; yani vücutta etkili konsantrasyonlara ulaşamaz (Yuan vd., 2020).

Nanoteknolojik taşıyıcı sistemler, biyoyararlanımı artırmak için çeşitli mekanizmalarla çalışır:

Çözünürlük Artışı: Hidrofobik bileşiklerin sulu ortamlarda daha iyi dağılmasını sağlar (McClements, 2004).

Koruma: Sindirim enzimlerinden veya mide asidinden koruyarak aktif bileşiğin bozulmadan bağırsaklara ulaşmasını sağlar (Fathi vd., 2012).

Hücre Zarlarından Geçişin Kolaylaştırılması: Nanopartikül boyutundaki sistemler, intestinal epitel hücrelerinden daha kolay geçebilir, bu da biyolojik erişimi artırır (Mozafari, 2010). Örneğin, kurkuminin (zerdeçalın aktif bileşeni) klasik formülasyonlarda biyoyararlanımı çok düşükken, nanoemülsiyon sistemleriyle taşındığında emilim oranı 5-10 kat artabilmektedir (Gonçalves vd., 2023). Dolayısıyla, nanoteknolojik taşıyıcı sistemler fonksiyonel gıdalarda hem etkililik hem de güvenlik açısından devrim yaratmaktadır. Bireyselleştirilmiş beslenme yaklaşımlarında bu sistemlerin kullanımı, özellikle genetik veya metabolik özelliklerine göre belirli bileşenlere ihtiyaç duyan bireyler için son derece stratejik bir rol oynamaktadır.

4. Biyosensörler ve Gıda-İzleme Teknolojileri

Biyosensörler, belirli bir biyolojik analiti algılayarak bu bilgiyi ölçülebilir bir sinyale dönüştüren cihazlardır. Temel bileşenleri bir biyoreseptör (enzim, antikor, DNA gibi) ve bir transdüser (elektiriksel, optik, piezoelektrik dönüştürücü) içerir (Turner, 2013). Fonksiyonel gıda alanında biyosensörler, bireyin sağlık durumunu gerçek zamanlı olarak izlemek ve buna uygun beslenme önerileri sunmak amacıyla kullanılmaktadır.

Vücut içi sensörler, genellikle implant edilebilir ya da ingestible (yutulabilir) formdadır. İmplant edilebilen glikoz sensörleri (örneğin diyabet yönetiminde kullanılan sürekli glikoz izleme cihazları) bireyin kan şekeri düzeylerini anlık olarak ölçer (Heikenfeld vd., 2018). Yakın gelecekte geliştirilmekte olan yutulabilir sensörler, mide veya bağırsakta pH, sıcaklık, basınç ve belirli biyomolekülleri izleyerek sindirim sürecine dair ayrıntılı bilgiler sağlayabilecektir (Kalantar-Zadeh vd., 2017).

Vücut dışı sensörler ise genellikle cilt yüzeyine takılan, giyilebilir teknolojiler (örneğin akıllı saatler, bantlar) veya çevresel sensörler (örneğin gıdaya entegre edilmiş sensör filmleri) şeklinde kullanılmaktadır. Bu sensörler, ter, tükürük veya solunum gibi vücut sıvılarından glikoz, laktat, elektrolit gibi parametreleri izleyebilir (Bandodkar vd., 2016). Böylece bireyin fizyolojik durumu hakkında invaziv olmayan bir şekilde veri toplanabilir.

Gerçek zamanlı izleme, fonksiyonel gıdaların etkin tüketimini yönlendirebilmek açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle glikoz, vitaminler ve alerjenlerin takibi, kişiselleştirilmiş beslenme planlarının uyarlanmasına doğrudan katkı sağlamaktadır.

Glikoz takibi: Gelişmiş glikoz sensörleri hem kan hem de ter yoluyla glikoz seviyelerini izleyebilmekte, bu da bireylerin karbonhidrat alımlarını anlık ihtiyaçlarına göre ayarlamalarını sağlamaktadır (Heikenfeld vd., 2018).

Bu tür sensörlerin, kişiselleştirilmiş düşük glisemik indeksli gıda önerileriyle birleştirilmesi, diyabet yönetiminde devrim yaratacak potansiyele sahiptir.

Vitamin takibi: Vücuttaki vitamin düzeylerinin izlenmesi, eksikliklerin erkenden tespit edilmesini ve buna uygun fonksiyonel gıda takviyeleri ile bireysel desteklerin planlanmasını mümkün kılar. Örneğin, yakın dönemde geliştirilen optik sensörler, deri üzerinden D vitamini düzeyini ölçmeye yönelik çalışmalar yapmaktadır (Sempionatto vd., 2020).

Alerjen takibi: Alerjenlere hassas bireyler için, gıda ürünlerinde gluten, fındık proteinleri veya laktoz gibi alerjenlerin varlığını tespit eden taşınabilir biyosensörler geliştirilmektedir (Weng vd., 2016). Bu sensörler sayesinde tüketiciler, tükettikleri gıdaların içeriklerini hızlı bir şekilde analiz edebilmekte ve alerjik reaksiyon risklerini azaltabilmektedir.

Bu sensörlerin verileri, mobil uygulamalar veya bağlı cihazlar aracılığıyla analiz edilerek bireyin o anki sağlık durumu doğrultusunda gerçek zamanlı gıda seçimlerine rehberlik edebilmektedir (Bandodkar vd., 2016).

Akıllı ambalajlar, gıda ürünlerinin tazeliği, güvenliği ve kalitesini izleyen ve tüketiciye bilgi veren sistemlerdir. Bunlar, sensörler, indikatörler veya RFID etiketleri içererek ürünlerin çevresel koşullara verdiği yanıtı algılayabilir (Han vd., 2018).

Öne çıkan akıllı ambalaj türleri şunlardır:

Tazelik indikatörleri: Ürün tazeliği veya bozulma düzeyini gösterir. Örneğin, et ürünlerinde bakteriyel büyümeyle oluşan uçucu aminlerin konsantrasyonuna bağlı olarak renk değiştiren sensörler geliştirilmiştir (Fuertes vd., 2016).

Gaz sensörleri: Oksijen, karbondioksit veya amonyak gibi gazların yoğunluğunu izleyerek ürünün bozulup bozulmadığını gösterir.

Sıcaklık zaman göstergeleri (TTI): Soğuk zincir boyunca sıcaklık sapmalarını kaydederek, ürünün doğru koşullarda saklanıp saklanmadığını izler (Taoukis, 2008).

Akıllı ambalaj sistemleri, fonksiyonel gıdaların etkinliğini korumak açısından özellikle önemlidir. Örneğin, probiyotik içeren bir üründe, canlı mikroorganizmaların canlılığını etkileyen sıcaklık ve nem değişimleri bu sistemler aracılığıyla tespit edilebilir ve tüketiciye doğru tüketim zamanı hakkında bilgi verilebilir (Han vd., 2018).

Ayrıca, blockchain teknolojisiyle entegre edilen akıllı ambalaj çözümleri sayesinde, bir ürünün üretiminden tüketiciye ulaşana kadar geçen tüm

süreç şeffaf bir şekilde kayıt altına alınabilir, bu da özellikle yüksek değerli fonksiyonel gıdalarda güven ve izlenebilirlik açısından önemli avantajlar sunar (Paliwal vd., 2020).

5. Yapay Zekâ ile Beslenme Verilerinin Yorumlanması

Yapay zekâ (AI), büyük ve karmaşık veri kümelerinden anlamlı desenler ve içgörüler çıkarma kapasitesi sayesinde kişisel sağlık verilerinin analizinde devrim yaratmıştır. Özellikle beslenme bilimi ve fonksiyonel gıda alanında, genetik veriler, mikrobiyota profilleri, metabolomik analizler, fiziksel aktivite düzeyleri, kan biyokimya sonuçları gibi çok çeşitli bireysel veri türleri yapay zekâ algoritmalarıyla entegre edilerek kişiye özel beslenme planlarının oluşturulmasına imkân tanımaktadır (de Toro-Martín vd., 2017).

Makine öğrenimi (ML) algoritmaları, özellikle bireylerin genetik varyasyonları ile beslenme ihtiyaçları arasındaki ilişkileri modellemek ve böylece spesifik diyet önerileri geliştirmek için kullanılmaktadır (Topol, 2019). Örneğin, bir kişinin lipid metabolizmasında rol oynayan gen varyantları (örneğin APOE genotipi) analiz edilerek, ona uygun yağ profiline sahip bir diyet tasarlanabilir (Abeltino vd., 2024).

Bunun yanı sıra, derin öğrenme (DL) algoritmaları kullanılarak, bireyin günlük sağlık verileri (adım sayısı, kalp atış hızı, uyku kalitesi gibi) ile besin alım kayıtları arasında ilişki kurularak enerji dengesi ve besin ihtiyaçları dinamik olarak güncellenebilmektedir (Chhetri, 2024). Böylece bireyin mevcut sağlık durumu ve yaşam tarzı değişkenlerine göre sürekli optimize edilen beslenme önerileri sunulabilmektedir.

Yapay zekâ destekli dinamik gıda öneri sistemleri, kişisel veriler ve büyük ölçekli gıda veri tabanları arasındaki ilişkiyi analiz ederek bireyler için en uygun gıda seçeneklerini belirlemektedir (Côté ve Lamarche, 2022). Bu sistemler, kullanıcının genetik yatkınlıkları, hastalık geçmişi, biyobelirteç seviyeleri ve yaşam tarzı verilerini dikkate alarak spesifik fonksiyonel gıdaların veya takviyelerin önerilmesini sağlar.

Örneğin, bir bireyin genetik analizinde D vitamini metabolizmasında yavaş işleyen bir varyant tespit edilmişse, AI destekli bir sistem bu kişiye D vitamini zengini gıdalar veya takviyeler önerebilir. Aynı şekilde, yüksek LDL kolesterol düzeyi tespit edilen bir kullanıcı için AI sistemi, bitki sterollerini ve çözünür lif içeren gıdaların tüketimini artıracak bir plan sunabilir (de Toro-Martín vd., 2017).

Gelişmiş sistemler, yalnızca bireyin mevcut sağlık verilerini değil, aynı zamanda tüketim davranışlarını, damak tadı tercihlerini, kültürel

beslenme alışkanlıklarını ve erişilebilirlik faktörlerini de modellemekte ve böylece kullanıcı dostu, sürdürülebilir ve uygulanabilir diyet önerileri geliştirebilmektedir (Côté ve Lamarche, 2022).

Bazı ileri uygulamalar, yapay zekâ destekli mobil uygulamalar üzerinden kullanıcılardan sürekli veri toplayarak, önerileri anlık güncelleyebilmekte, böylece diyetteki küçük değişikliklere veya günlük aktivite farklılıklarına bile hızlıca uyum sağlayabilmektedir (Topol, 2019).

Kişisel sağlık verilerinin bu derece kapsamlı ve hassas biçimde toplanması, analiz edilmesi ve kullanılması, beraberinde önemli veri gizliliği ve etik tartışmaları da getirmektedir. Sağlık verileri, bireylerin mahremiyet hakları açısından en yüksek koruma gerektiren veri kategorisindedir (Shabani ve Marelli, 2019).

Özellikle genetik bilgiler, metabolomik veriler veya bağırsak mikrobiyomu profilleri gibi biyolojik imzalar, yalnızca bireysel sağlık hakkında değil, aynı zamanda akrabalık ilişkileri ve hastalık riskleri hakkında da hassas bilgiler içerebilir. Bu verilerin kötüye kullanılması veya izinsiz paylaşılması hem bireysel hem de toplumsal düzeyde ciddi etik sorunlar doğurabilir (Shabani ve Marelli, 2019).

Bu nedenle, kişisel sağlık verilerinin yapay zekâ sistemlerinde kullanılması için aşağıdaki etik ilkelerin sağlanması önerilmektedir:

Veri gizliliği ve güvenliği: Verilerin şifrenmesi, anonimleştirilmesi ve sadece yetkilendirilmiş kullanıcılar tarafından erişilmesi.

Bilgilendirilmiş onam: Verilerin nasıl kullanılacağına dair açık, anlaşılır ve şeffaf bilgilendirme yapılması.

Veri mülkiyeti: Bireylerin kendi sağlık verileri üzerinde tam kontrol hakkına sahip olması.

Adalet ve erişilebilirlik: Yapay zekâ temelli beslenme önerilerinin sadece belirli sosyal gruplara değil, tüm bireylere eşit erişim sağlayacak şekilde tasarlanması (Shabani ve Marelli, 2019).

Ayrıca, algoritmik önyargıların (bias) önlenmesi de önemlidir; örneğin, eğitilmiş veri kümelerinin demografik çeşitliliği yeterince yansıtmaması, belirli etnik veya sosyoekonomik gruplar için hatalı öneriler üretilmesine yol açabilir (Chhetri, 2024).

Sonuç olarak, yapay zekâ ile kişisel beslenme verilerinin yorumlanması büyük potansiyel taşısa da bu süreçte etik prensiplere, veri gizliliğine ve birey

haklarına öncelik verilmesi gereklidir. Bu yaklaşım hem bilimsel ilerlemenin sürdürülebilirliğini hem de toplumun teknolojiye olan güvenini koruyacaktır.

6. Tüketici Deneyimi ve Kullanıcı Odaklı Gıda Tasarımı

Fonksiyonel gıdaların başarısı yalnızca sağlık etkileriyle değil, aynı zamanda tüketici beklentilerine hitap eden tat, doku ve aroma özellikleriyle de belirlenmektedir. Kişiselleştirilmiş beslenme anlayışı, bireylerin genetik, kültürel ve psikolojik farklılıklarını dikkate alarak kişiye özel tat profili oluşturmayı ve buna uygun gıda tasarımı yapmayı amaçlamaktadır (Escalante-Aburto vd., 2021).

Araştırmalar, bireyler arasındaki tat algısının genetik varyasyonlardan (örneğin TAS2R38 geni ve acı tat algısı) etkilendiğini göstermektedir (Garcia-Bailo vd., 2009). Bu bağlamda, bireylerin genetik tat duyarlılıklarına göre özelleştirilmiş gıdalar tasarlamak mümkündür. Örneğin, acı tatlara hassas bireyler için daha az acı profiline sahip sebze bazlı ürünler veya kafeinsiz içecek alternatifleri geliştirilebilir.

Bununla birlikte, gıda yapılandırması teknolojileri sayesinde, gıdaların fiziksel özellikleri (örneğin gevreklik, kıvam, viskozite) bireysel tercihlere göre ayarlanabilmektedir. 3D gıda baskısı (three-dimensional food printing) gibi yeni nesil teknolojiler, tüketiciye özel besin profiline ve tat/aroma tercihlerine göre gıda ürünleri üretebilme imkânı sunmaktadır (Sun vd., 2018).

Dolayısıyla, kişiye özel tat profili oluşturulması ve gıda yapılandırması hem tüketici memnuniyetini artırmakta hem de bireylerin önerilen fonksiyonel gıdaları benimsemesini kolaylaştırmaktadır.

Kişiselleştirilmiş gıda sistemlerinin tüketici tarafından benimsenmesi için, kullanıcı dostu platformlar ve mobil uygulamalar kritik bir rol oynamaktadır. Bu tür sistemler, bireyin sağlık verilerini, damak tadı tercihlerini ve günlük alışkanlıklarını toplayarak, kolayca anlaşılabilir ve uygulanabilir beslenme önerileri sunmayı hedefler (de Toro-Martín vd., 2017).

Örneğin, bazı mobil uygulamalar, kullanıcının yediği gıdaların fotoğrafını analiz ederek içerik ve kalori tahmini yapabilmekte ve buna göre kişisel beslenme hedeflerine uygun önerilerde bulunabilmektedir (Wang, 2016). Diğer taraftan, genetik veriye dayalı beslenme önerileri sunan uygulamalar, DNA test sonuçlarına entegre olarak bireye özel vitamin, mineral ve makrobesin ihtiyaçlarını raporlayabilmektedir (Ordovas vd., 2018).

Başarılı kullanıcı deneyimi sağlayan platformlar basit, sezgisel arayüzler, gerçek zamanlı veri entegrasyonu, kişisel hedeflere göre uyarlanabilir öneriler,

eğitim ve motivasyon unsurları (örneğin haftalık raporlar, başarı rozetleri) gibi ortak özelliklerde sunar.

Bu platformlar sayesinde tüketiciler, fonksiyonel gıda tüketimini bilinçli bir şekilde yönetebilir, sağlık hedeflerine daha etkin ulaşabilir ve bireysel davranış değişikliklerini sürdürebilir hale gelirler.

Kullanıcı odaklı gıda tasarımı bir diğer önemli unsur, davranışsal geri bildirim sistemlerinin entegrasyonudur. Bu sistemler, bireyin tüketim davranışlarını sürekli izleyerek, motivasyonu artırıcı ve davranış değişimini destekleyici geri bildirimler sağlar (Cadario, 2020).

Örneğin, akıllı mobil uygulamalar veya giyilebilir cihazlar, kullanıcının adım sayısını, su tüketimini veya lif alımını izleyerek gün sonunda hedeflerine ulaşp ulaşmadığını bildiren bildirimler gönderebilir. Başarı durumunda ödüllendirici geri bildirimler (örneğin sanal rozetler, puanlar), hedefe ulaşamadığında ise yapıcı uyarılar ve basit tavsiyeler sunulabilir (McCarroll vd., 2017).

Davranışsal geri bildirim sistemlerinin etkili olabilmesi için; gerçek zamanlı ve kişiye özgü olması, pozitif pekiştirme tekniklerini kullanması, kullanıcının ilerlemesini açıkça gösterebilmesi gerekmektedir (Cadario, 2020).

Özellikle fonksiyonel gıda tüketimi gibi uzun vadeli alışkanlık değişimi gerektiren alanlarda, bireyin motivasyonunu canlı tutmak için bu tür sistemlerin kullanılması büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, kişiye özel tat profili oluşturma, kullanıcı dostu dijital platformlar ve davranışsal geri bildirim sistemleri birlikte çalışarak, tüketici deneyimini geliştirir ve kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdaların benimsenmesini destekler. Bu yaklaşım, sadece bireysel sağlık iyileştirmelerine değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda sektöründe sürdürülebilir tüketici bağlılığının oluşmasına da katkı sağlar.

7. Zorluklar ve Gelecekteki Araştırma Alanları

Fonksiyonel gıdaların kişiselleştirilmiş beslenme ile birleştiği noktada ortaya çıkan nanoteknolojik, biyosensör temelli ve yapay zekâ destekli sistemler, teorik olarak büyük bir potansiyel barındırır da uygulamada önemli sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar hem teknolojik hem de biyolojik düzeyde kendini göstermektedir (McClements, 2023; Tsolakidis vd., 2024).

Teknolojik sınırlamalar arasında en başta gelişmiş taşıyıcı sistemlerin ölçeklenebilirliği yer almaktadır. Nanoemülsiyonlar, liposomlar, nanokapsüller gibi sistemler laboratuvar koşullarında etkili performans sergilese de, endüstriyel düzeyde üretimleri sırasında kararlılık, maliyet ve sürdürülebilirlik gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir (Mozafari, 2010). Ayrıca bu taşıyıcıların insan vücudundaki uzun vadeli biyouyumluluğu ve potansiyel toksisitesi halen tartışmalıdır (McClements ve Xiao, 2017).

Biyolojik sınırlamalar ise bireyler arası yüksek düzeyde farklılık gösteren genetik, epigenetik, metabolik ve mikrobiyal profillerin tam anlamıyla çözümlenememiş olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, aynı fonksiyonel gıda bileşeni bazı bireylerde fayda sağlarken diğerlerinde etkisiz ya da olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir (Abeltino vd., 2024). Bu durum, kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıda önerilerinin güvenilirliğini ve etkinliğini sınırlandırmaktadır.

Ayrıca, yapay zekâ algoritmalarının veri setleri çoğu zaman sınırlı veya temsili olmayan örneklemelere dayandığı için algoritmik önyargı (bias) riski taşımaktadır. Bu da belirli sosyoekonomik veya etnik grupların öneri sistemlerinde dışlanmasına yol açabilir (Chhetri, 2024).

Kişiselleştirilmiş fonksiyonel beslenme sistemlerinin yaygınlaşmasında en önemli engellerden biri de regülasyon ve standardizasyon eksikliğidir. Mevcut ulusal ve uluslararası gıda mevzuatları, genellikle klasik gıda tanımları ve popülasyon temelli beslenme önerileri çerçevesinde hazırlanmıştır. Bu çerçevede, bireye özel formüle edilen, genetik veri kullanan veya yapay zekâ tabanlı öneriler sunan gıdaların hukuki statüsü belirsizdir (Marcum, 2020).

Özellikle Avrupa Birliği'nde "novel food" (yeni gıda) kategorisine giren nanoteknolojik taşıyıcılar veya biyolojik veri temelli fonksiyonel gıdalar için ayrı izin süreçleri uygulanmaktadır ve bu süreçler oldukça uzun ve maliyetlidir (Turck vd., 2021). Benzer şekilde, Amerika Birleşik Devletleri'nde bu tür ürünlerin FDA tarafından "nutraceutical" veya "medical food" olarak sınıflandırılıp sınıflandırılmayacağı tartışmalıdır.

Diğer taraftan, kişisel verilerin kullanıldığı dijital sağlık uygulamaları ve mobil gıda öneri sistemleri de veri gizliliği, şeffaflık ve algoritma denetimi açısından yasal boşluklar içermektedir (Shabani ve Marelli, 2019). Tüm bu düzenleyici belirsizlikler, sektörde yatırımcıların çekimser kalmasına ve yeniliklerin yaygınlaşmasının yavaşlamasına neden olmaktadır.

Tüm bu zorluklara rağmen, fonksiyonel gıdalarla kişiselleştirilmiş beslenmenin keşişiminde çok sayıda araştırma ve inovasyon fırsatı

bulunmaktadır. Özellikle aşağıdaki alanlar gelecekte ön plana çıkması beklenen başlıca konulardır:

Nutrigenetik ve mikrobiyom temelli modellerin entegrasyonu: Genetik yatkınlıklar ve bağırsak mikrobiyotası profilleri bir arada değerlendirilerek daha hassas beslenme önerileri geliştirilebilir (Abeltino vd., 2024).

Giyilebilir ve ingestible sensör teknolojilerinin gelişimi: Ter, tükürük, dışkı ve hatta mide içeriği analizini yapabilen miniaturize sensörlerle bireyin beslenme durumu daha yakından izlenebilir (Heikenfeld vd., 2018).

Yapay zekâ destekli gıda tasarımı: Kullanıcı verilerini gerçek zamanlı analiz eden AI sistemleri hem bireye özel beslenme planları hem de dinamik ürün formülasyonları (ör. 3D yazıcılarla üretilen özelleştirilmiş gıdalar) geliştirebilir (Tsolakidis vd., 2024).

Etik veri yönetimi platformları: Bireylerin sağlık verilerini güvenli ve şeffaf biçimde yönetebileceği, veri sahipliğinin kullanıcılarda olduğu “kişisel veri kasaları” (personal data vaults) gibi dijital altyapılar araştırma odağı haline gelmektedir (Shabani ve Marelli, 2019).

Sürdürülebilir ve bitki bazlı fonksiyonel içerikler: Çevresel etkiler göz önüne alınarak hem insan sağlığına faydalı hem de ekolojik ayak izi düşük biyoaktif bileşenlerin (ör. mikrobiyal proteinler, alg bazlı lifler) kullanımı yaygınlaştırılabilir (Nozari vd., 2022).

Bu bağlamda, disiplinler arası iş birlikleri (beslenme bilimi, veri bilimi, biyoteknoloji, hukuk ve etik) teşvik edilmeli ve hem bireylerin sağlığını iyileştirecek hem de toplumun dijital sağlık okuryazarlığını artıracak sistemler geliştirilmeye devam edilmelidir.

8. Sonuç: Gıda-Teknoloji İlişkisini Yeniden Tanımlamak

Son yıllarda yaşanan teknolojik devrim, sadece sağlık hizmetleri ya da mühendislik alanlarında değil, aynı zamanda gıda sistemlerinde de radikal bir dönüşüm başlatmıştır. Fonksiyonel gıdaların kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımlarıyla birleşmesi hem bireysel sağlık optimizasyonunu hem de kamu sağlığının iyileştirilmesini hedefleyen yeni nesil bir beslenme paradigması doğurmuştur (Côté ve Lamarche, 2022; de Toro-Martín vd., 2017). Bu paradigma, bireylerin genetik yapıları, metabolik tepkileri ve yaşam tarzı farklılıklarını dikkate alan, dinamik ve veri temelli gıda çözümlerini merkezine almaktadır.

Kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdalar, yalnızca bireylerin hastalık riskini azaltmakla kalmayıp, sağlıklı yaşam tarzlarının sürdürülebilirliğini

destekleyen araçlar olarak konumlanmaktadır (Ordovas vd., 2018). Toplum düzeyinde bu tür gıdaların benimsenmesi, obezite, diyabet, kardiyovasküler hastalıklar gibi yaygın kronik hastalıkların önlenmesi için önemli bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, bireylerin sağlıklarına yönelik proaktif bir tutum geliştirmelerini teşvik ederek, gıdanın tedavi edici değil, önleyici rolünü ön plana çıkarmaktadır (Bianchetti vd., 2023).

Bununla birlikte, bu gıdaların toplumdaki yerini yalnızca bireysel sağlık faydalarıyla sınırlamak yeterli değildir. Sosyoekonomik eşitsizlikler, dijital okuryazarlık düzeyi, kültürel beslenme alışkanlıkları gibi faktörler de kişiselleştirilmiş gıda sistemlerinin erişilebilirliğini ve kabulünü doğrudan etkilemektedir (Shabani ve Marelli, 2019). Bu nedenle, teknolojik ilerlemelerle birlikte bu sistemlerin kapsayıcı, adil ve kültürel olarak uyarlanabilir olması da büyük önem taşımaktadır.

Fonksiyonel gıdaların yapay zekâ, biyosensörler ve nanoteknolojik taşıyıcılar ile entegre biçimde sunulması, bilimsel ve teknolojik açıdan heyecan verici bir gelecek vadetse de bu gelişmeler etik, yasal ve sosyal sorumluluklar çerçevesinde değerlendirilmelidir (Marcum, 2020; McClements, 2023).

Her bireyin genetik verilerinin, sağlık geçmişinin ve davranışsal bilgilerinin yapay zekâ algoritmalarıyla analiz edilerek beslenme önerilerine dönüştürülmesi; mahremiyet, veri güvenliği ve algoritmik tarafsızlık gibi temel etik sorunları gündeme getirmektedir. Bu noktada, teknolojik ilerlemeyle insan hakları arasında bir denge kurulması, sistemlerin şeffaf, denetlenebilir ve adil şekilde çalışması sağlanmalıdır (Shabani ve Marelli, 2019).

Ayrıca, bilimsel temelli bireyselleştirilmiş gıda önerilerinin sadece elit bir kesimin erişimine açık kalması, toplumsal sağlık eşitsizliklerini derinleştirme riskini de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdaların geliştirilmesinde kamu yararını gözetten bir inovasyon anlayışı benimsenmeli; bu gıdaların tüm toplumsal kesimler için erişilebilir, ekonomik ve güvenilir olması hedeflenmelidir (Côté ve Lamarche, 2022).

Sonuç olarak, kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdalar, yalnızca bireyin sağlığını iyileştiren değil; aynı zamanda toplumun gıdayla kurduğu ilişkiyi dönüştüren bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın kalıcı, etik ve etkili olabilmesi için bilim, teknoloji ve insan odaklı etik ilkeler arasında hassas bir denge gözetilmelidir. Ancak bu şekilde, gıda bilimi 21. yüzyılda sadece bir beslenme aracı değil; aynı zamanda bireyin sağlığına, toplumsal eşitliğe ve sürdürülebilir kalkınmaya hizmet eden stratejik bir alan haline gelebilecektir.

Kaynakça

- Abekoon, T., Buthpitiya, B. L. S. K., Sajindra, H., Samarakoon, E. R. J., Jayakody, J. A. D. C. A., Kantamaneni, K., ve Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review to evaluate the synergy of intelligent food packaging with modern food technology and artificial intelligence field. *Discover Sustainability*, 5(1).
- Abeltino, A., Hatem, D., Serantoni, C., Riente, A., De Giulio, M. M., De Spirito, M., De Maio, F., ve Maulucci, G. (2024). Unraveling the Gut Microbiota: Implications for Precision Nutrition and Personalized Medicine. *Nutrients*, 16(22).
- Adams, S. H., Anthony, J. C., Carvajal, R., Chae, L., Khoo, C. S., Latulippe, M. E., Matusheski, N. V., McClung, H. L., Rozga, M., Schmid, C. H., Wopereis, S., ve Yan, W. (2020). Perspective: Guiding Principles for the Implementation of Personalized Nutrition Approaches That Benefit Health and Function. *Advances in Nutrition*, 11(1), 25-34.
- Bandodkar, A. J., Jeerapan, I., ve Wang, J. (2016). Wearable Chemical Sensors: Present Challenges and Future Prospects. *Acs Sensors*, 1(5), 464-482.
- Berry, S. E., Valdes, A. M., Drew, D. A., Asnicar, F., Mazidi, M., Wolf, J., Capdevila, J., Hadjigeorgiou, G., Davies, R., Al Khatib, H., Bonnett, C., Ganesh, S., Bakker, E., Hart, D., Mangino, M., Merino, J., Linenberg, I., Wyatt, P., Ordovas, J. M., Gardner, C. D., Delahanty, L. M., Chan, A. T., Segata, N., Franks, P. W. ve Spector, T. D. (2020). Human postprandial responses to food and potential for precision nutrition. *Nature Medicine*, 26(11), 964-973.
- Bianchetti, G., De Maio, F., Abeltino, A., Serantoni, C., Riente, A., Santarelli, G., Sanguinetti, M., Delogu, G., Martinoli, R., Barbaresi, S., De Spirito, M., ve Maulucci, G. (2023). Unraveling the Gut Microbiome-Diet Connection: Exploring the Impact of Digital Precision and Personalized Nutrition on Microbiota Composition and Host Physiology. *Nutrients*, 15(18).
- Cadario, R., ve Chandon, P. (2020). Which healthy eating nudges work best? A meta-analysis of field experiments. *Marketing Science*, 39(3), 465-486.
- Celis-Morales, C., Livingstone, K. M., Marsaux, C. F. M., Macready, A. L., Fallaize, R., O'Donovan, C. B., Woolhead, C., Forster, H., Walsh, M. C., Navas-Carretero, S., San-Cristobal, R., Tisirigoti, L., Lambrinou, C. P., Mavrogianni, C., Moschonis, G., Kolossa, S., Hallmann, J., Godlewska, M., Surwillo, A., Traczyk, I., Drevon, C. A., Bouwman, J., van Ommen, B., Grimaldi, K., Parnell, L. D., Matthews, J. N., Manios, Y., Daniel, H., Martinez, J. A., Lovegrove, J. A., Gibney, E. R., Brennan, L., Saris, W. H., Gibney, M., Mathers, J. C., Food4Me Study. (2017). Effect of personalized nutrition on health-related behaviour change: evidence from the

- Food4Me European randomized controlled trial. *International Journal of Epidemiology*, 46(2), 578-588.
- Chhetri, K. B. (2024). Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Food Quality Control and Safety Assessment. *Food Engineering Reviews*, 16(1), 1-21.
- Côté, M., ve Lamarche, B. (2022). Artificial intelligence in nutrition research: perspectives on current and future applications. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 47(1), 1-8.
- de Abreu, C. L., ve van Deventer, J. P. (2022). The Application of Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Artificial Intelligence Research, Sacair 2021*, 1551, 32-46.
- de Toro-Martín, J., Arsenault, B. J., Després, J. P., ve Vohl, M. C. (2017). Precision Nutrition: A Review of Personalized Nutritional Approaches for the Prevention and Management of Metabolic Syndrome. *Nutrients*, 9(8).
- Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., ve Perego, P. (2020). Innovations in Smart Packaging Concepts for Food: An Extensive Review. *Foods*, 9(11).
- Escalante-Aburto, A., Trujillo-de Santiago, G., Alvarez, M. M., ve Chuck-Hernández, C. (2021). Advances and prospective applications of 3D food printing for health improvement and personalized nutrition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5722-5741.
- Fathi, M., Mozafari, M. R., ve Mohebbi, M. (2012). Nanoencapsulation of food ingredients using lipid based delivery systems. *Trends in Food Science ve Technology*, 23(1), 13-27.
- Fuertes, G., Soto, I., Carrasco, R., Vargas, M., Sabattin, J., ve Lagos, C. (2016). Intelligent Packaging Systems: Sensors and Nanosensors to Monitor Food Quality and Safety. *Journal of Sensors*, 2016.
- Garcia-Bailo, B., Toguri, C., Eny, K. M., ve El-Sohemy, A. (2009). Genetic Variation in Taste and Its Influence on Food Selection. *Omics-a Journal of Integrative Biology*, 13(1), 69-80.
- Gonçalves, R. F. S., Vicente, A. A., ve Pinheiro, A. C. (2023). Incorporation of curcumin-loaded lipid-based nano delivery systems into food: Release behavior in food simulants and a case study of application in a beverage. *Food Chemistry*, 405.
- Han, J. W., Ruiz-Garcia, L., Qian, J. P., ve Yang, X. T. (2018). Food Packaging: A Comprehensive Review and Future Trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 860-877.
- Heikenfeld, J., Jajack, A., Rogers, J., Gutruf, P., Tian, L., Pan, T., Li, R., Khine, M., Kim, J., Wang, J., ve Kim, J. (2018). Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects. *Lab on a Chip*, 18(2), 217-248.

- Kalantar-Zadeh, K., Ha, N., Ou, J. Z., ve Berean, K. J. (2017). Ingestible Sensors. *Acs Sensors*, 2(4), 468-483.
- Lam, H. N., Lin, S. P., Nguyen, D. H. N., Chen, C. M., Su, C. T., Fang, T. C., ve Li, S. C. (2025). Integrative Roles of Functional Foods, Microbiotics, Nutrigenetics, and Nutrigenomics in Managing Type 2 Diabetes and Obesity. *Nutrients*, 17(4).
- Marcum, J. A. (2020). Nutrigenetics/Nutrigenomics, Personalized Nutrition, and Precision Healthcare. *Current Nutrition Reports*, 9(4), 338-345.
- McCarroll, R., Eyles, H., ve Ni Mhurchu, C. (2017). Effectiveness of mobile health (mHealth) interventions for promoting healthy eating in adults: A systematic review. *Preventive Medicine*, 105, 156-168.
- McClements, D. J. (2004). *Food emulsions: principles, practices, and techniques*. CRC press.
- McClements, D. J. (2023). Bioactive Delivery Systems for Lipophilic Nutra-ceuticals Formulation, Fabrication, and Application. In *Next-generation Bioactive Delivery Systems*. The Royal Society of Chemistry.
- McClements, D. J., ve Xiao, H. (2017). Is nano safe in foods? Establishing the factors impacting the gastrointestinal fate and toxicity of organic and inorganic food-grade nanoparticles. *npj Science of Food*, 1(1), 6.
- Mozafari, M. R. (2010). Nanoliposomes: Preparation and Analysis. *Liposomes: Methods and Protocols*, Vol 1, 605, 29-50.
- Nozari, H., Szmelter-Jarosz, A., ve Ghahremani-Nahr, J. (2022). Analysis of the Challenges of Artificial Intelligence of Things (AIoT) for the Smart Supply Chain (Case Study: FMCG Industries). *Sensors*, 22(8).
- Ordovas, J. M., Ferguson, L. R., Tai, E. S., ve Mathers, J. C. (2018). Personalised nutrition and health. *Bmj-British Medical Journal*, 361.
- Paliwal, V., Chandra, S., ve Sharma, S. (2020). Blockchain Technology for Sustainable Supply Chain Management: A Systematic Literature Review and a Classification Framework. *Sustainability*, 12(18).
- Rejeb, A., Rejeb, K., Zailani, S., Treiblmaier, H., ve Hand, K. J. (2021). Integrating the Internet of Things in the halal food supply chain: A systematic literature review and research agenda. *Internet of Things*, 13.
- Roman, S., Campos-Medina, L., ve Leal-Mercado, L. (2024). Personalized nutrition: the end of the one-diet-fits-all era. *Frontiers in Nutrition*, 11.
- Sempionatto, J. R., Jeerapan, I., Krishnan, S., ve Wang, J. (2020). Wearable Chemical Sensors: Emerging Systems for On-Body Analytical Chemistry. *Analytical Chemistry*, 92(1), 378-396.
- Shabani, M., ve Marelli, L. (2019). Re-identifiability of genomic data and the GDPR Assessing the re-identifiability of genomic data in light of the EU General Data Protection Regulation. *Embo Reports*, 20(6).

- Shoomal, A., Jahanbakht, M., Componation, P. J., ve Ozay, D. (2024). Enhancing supply chain resilience and efficiency through internet of things integration: Challenges and opportunities. *Internet of Things*, 27.
- Singh, H., Ye, A. Q., ve Horne, D. (2009). Structuring food emulsions in the gastrointestinal tract to modify lipid digestion. *Progress in Lipid Research*, 48(2), 92-100.
- Sun, J., Zhou, W. B., Yan, L. K., Huang, D. J., ve Lin, L. Y. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1-11.
- Tan, Y. B., ve McClements, D. J. (2021). Plant-Based Colloidal Delivery Systems for Bioactives. *Molecules*, 26(22).
- Taoukis, P. S. (2008). Application of time-temperature integrators for monitoring and management of perishable product quality in the cold chain. *Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods*, 61-74.
- Taylor, T. M., Weiss, J., Davidson, P. M., ve Bruce, B. D. (2005). Liposomal nanocapsules in food science and agriculture. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(7-8), 587-605.
- Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44-56.
- Tsolakidis, D., Gymnopoulos, L. P., ve Dimitropoulos, K. (2024). Artificial Intelligence and Machine Learning Technologies for Personalized Nutrition: A Review. *Informatics-Basel*, 11(3).
- Turck, D., Bresson, J. L., Burlingame, B., Dean, T., Fairweather-Tait, S., Heironen, M., Hirsch-Ernst, K. I., Mangelsdorf, I., McArdle, H. J., Naska, A., Neuhauser-Berthold, M., Nowicka, G., Pentieva, K., Sanz, Y., Siani, A., Sjödin, A., Stern, M., Tomé, D., Vinceti, M., . . . Alle, E. P. D. P. N. (2021). Guidance on the preparation and submission of an application for authorisation of a novel food in the context of Regulation (EU) 2015/2283 (Revision 1). *EFSA journal*, 19(3).
- Turner, A. P. F. (2013). Biosensors: sense and sensibility. *Chemical Society Reviews*, 42(8), 3184-3196.
- Wang, J. B., Cataldo, J. K., Ayala, G. X., Natarajan, L., Cadmus-Bertram, L. A., White, M. M., Madanat, H., Nichols, J. F. ve Pierce, J. P. (2016). Mobile and wearable device features that matter in promoting physical activity. *Journal of mobile technology in medicine*, 5(2), 2.
- Wang, X., Shi, G. H., Fan, S. F., Ma, J. M., Yan, Y. H., Wang, M. T., Tang, X. Z., Lv, P., ve Zhang, Y. (2024). Targeted delivery of food functional ingredients in precise nutrition: design strategy and application of nutritional intervention. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(22), 7854-7877.

- Weng, X., Gaur, G., ve Neethirajan, S. (2016). Rapid Detection of Food Allergens by Microfluidics ELISA-Based Optical Sensor. *Biosensors-Basel*, 6(2).
- Yuan, P. H., Cui, S. X., Liu, Y. F., Li, J. H., Du, G. C., ve Liu, L. (2020). Metabolic engineering for the production of fat-soluble vitamins: advances and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(3), 935-951.
- Zeevi, D., Korem, T., Zmora, N., Israeli, D., Rothschild, D., Weinberger, A., Ben-Yacov, O., Lador, D., Avnit-Sagi, T., Lotan-Pompan, M., Suez, J., Mahdi, J. A., Matot, E., Malka, G., Kosower, N., Rein, M., Zilberman-Schapira, G., Dohnalová, L., Pevsner-Fischer, M., Bikovsky, R., Halpern, Z., Elinav, E., Segal, E. (2015). Personalized Nutrition by Prediction of Glycemic Responses. *Cell*, 163(5), 1079-1094.