

Hücrel Tarımın Geleceği: Sürdürülebilirlik, Besinsel Potansiyel ve Teknolojik Perspektifler

The Future of Cellular Agriculture: Sustainability, Nutritional Potential and Technological Perspectives

**Süveybe Rana
ESKİCORAPÇI,
Muhammet
DOĞAN**

Karamanoğlu
Mehmetbey
Üniversitesi
Karaman/Türkiye

ranaesk42@gmail.com

ORCID: 0009-0001-
7030-2966

Karamanoğlu
Mehmetbey
Üniversitesi
Karaman/Türkiye

mtdogan1@gmail.com

ORCID:0000-0003-
3138-5903

Sorumlu yazar:
Muhammet DOĞAN

Karamanoğlu
Mehmetbey
Üniversitesi
Karaman/Türkiye

Makalenin referans gösterilmesi:

Eskiçorapçı, S. R.,
Doğan M. (2025).
Hücrel Tarımın
Geleceği:
Sürdürülebilirlik,
Besinsel Potansiyel
ve Teknolojik
Perspektifler. SCAR,
4(2), 28-43.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18105242>

Makale geliş Tarihi:
15.08.2025

**Makale Kabul
Tarihi:**
24.12.2025

Özet

Hücrel tarım teknolojileri, özellikle kültür eti üretimi, artan küresel gıda talebine sürdürülebilir ve etik çözümler sunma potansiyeli ile ön plana çıkmaktadır. Kültür eti üretiminde temel yapı taşlarından biri olan kök hücreler, çoğalma (proliferasyon) ve farklılaşma kabiliyetleri sayesinde bu sürecin başarısını doğrudan etkilemektedir. Ancak, yüksek verimli ve ekonomik kültür eti üretimi için kök hücrelerin bölünme hızının ve canlılıklarının artırılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, serum kaynaklı büyüme faktörlerinin iyileştirilmesi, düşük maliyetli ve hayvansal içerik içermeyen ortam bileşenlerinin geliştirilmesi ve biyoreaktör sistemlerinin adaptasyonu gibi stratejiler öne çıkmaktadır. Makro ve mikro besin öğeleri dengesi, enerji metabolizmasını destekleyen ortam formülasyonları ve oksidatif stresin azaltılması, hücrelerin kültür ortamında daha uzun süre canlı kalmasını ve bölünmesini teşvik etmektedir. Ayrıca, hücre tipine özgü sinyal yollarının modülasyonu, proliferasyonu doğrudan etkileyen önemli biyolojik süreçlerdendir. Mekanik gerilim, substrat sertliği ve oksijen konsantrasyonu gibi fiziksel parametrelerin kontrolü de kök hücre davranışı üzerinde belirleyici olmaktadır. Sonuç olarak, kültür eti üretiminde kök hücrelerin proliferasyon potansiyelini artırmak; biyoteknolojik, biyokimyasal ve hücrel mühendislik yaklaşımlarının entegre edilmesiyle mümkün olabilmektedir. Bu alanda sürdürülen multidisipliner araştırmalar hem üretim verimliliğini artırmakta hem de endüstriyel ölçekli üretimin önündeki engelleri azaltmaktadır. Bu derleme çalışmanın amacı, hücrel tarımın sürdürülebilirlik potansiyelini, besin değeri açısından avantajlarını ve gelecekteki gıda sistemlerine katkı sağlayabilecek perspektifleri bilimsel veriler ışığında ortaya koymaktır.

Anahtar Kelimeler: Biyoteknoloji, Beslenme, Gıda güvenliği, Hücrel tarım, Sürdürülebilirlik

Abstract

Cellular agriculture technologies, particularly cultured meat production, are emerging as sustainable and ethical solutions to meet the increasing global food demand. Stem cells, which serve as the foundational building blocks in cultured meat production, directly influence the success of the process due to their capacity for proliferation and differentiation. However, enhancing the proliferation rate and viability of stem cells is essential for efficient and cost-effective cultured meat production. In this context, strategies such as improving serum-derived growth factors, developing low-cost and animal-free culture medium components, and adapting bioreactor systems have come to the forefront. Balancing macro- and micronutrients, formulating media that support energy metabolism, and reducing oxidative stress promote longer cell viability and proliferation in culture conditions. Furthermore, modulation of cell type-specific signaling pathways plays a critical role in directly regulating proliferation. Physical parameters such as mechanical stress, substrate stiffness, and oxygen concentration are also key determinants of stem cell behavior. Ultimately, enhancing the proliferative potential of stem cells in cultured meat production can be achieved through the integration of biotechnological, biochemical, and cellular engineering approaches. Ongoing multidisciplinary research in this field not only improves production efficiency but also addresses barriers to industrial-scale implementation. The aim of this review is to examine the sustainability potential of cellular agriculture, highlight its nutritional advantages, and explore the future perspectives it offers for global food systems, based on current scientific evidence.

Keywords: Biotechnology, Nutrition, Food safety, Cellular agriculture, Sustainability

GİRİŞ

Hücre tarım, hayvan ve bitki organizmalarının doğrudan kullanılmasına gerek kalmadan, hücre kültürleri ve mikroorganizmalar aracılığıyla tarımsal ürünlerin üretilmesini ifade eder (Rubio vd., 2019; Stephens ve Ellis, 2020). Bu yaklaşım; endüstriyel biyoteknoloji, kimya ve yenilikçi malzeme teknolojileriyle birlikte, insanlığa besleyici, güvenli ve sağlıklı gıdalar sağlamayı, aynı zamanda enerji, toprak ve su gibi temel kaynakların kullanımını en aza indirmeyi, mevsimsel ve coğrafi sınırlamalardan bağımsız üretimi mümkün kılmayı ve atıkları azaltmayı hedeflemektedir. Son yıllarda, gıda, kozmetik ve çeşitli malzeme üretiminde kullanılmak üzere hücre ürünlerine olan ilgi önemli ölçüde artmıştır. Geleneksel çiftçilikte hayvan veya bitki yetiştirmek yerine, tarımsal emtiaların üretiminde konuk organizma hücre kültürlerinin kullanılması anlamına gelen 'hücre tarım' terimi bu çerçevede önerilmiştir (Rischer vd., 2020). Her ne kadar bu terim ilk olarak 2015 yılında ortaya atılmış olsa da hayvan veya bitki kaynaklı üretime alternatif olarak biyoteknolojik yöntemlerle ürün elde etme fikri çok daha eskiye dayanmaktadır. Bu bağlamda, 1970'li yıllarda metilotrofik (tek karbonlu bileşiklerle beslenen) bir bakteriden elde edilen ilk ticari mikrobiyal yem ürünü olan Pruteen'in geliştirilmesi, bu alanın öncü çalışmaları arasında yer almaktadır (Nyyssölä vd., 2022). Hücre tarımda üretim, biyoreaktörlerde yapılan hücre kültürlerinden elde edilen ürünler aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu sayede biyolojik atık minimuma indirilir ve potansiyel enfeksiyon riskleri üretim sürecinde hızlı bir şekilde tespit edilerek ortadan kaldırılabilir (Soice ve Johnston, 2021a).

Et, özellikle yetersiz beslenmenin sorun olduğu sanayileşmemiş ülkelerde önemli bir besin kaynağıdır (Jahir vd., 2023). Hayvansal et, besin yoğunluğu ve lezzeti ile kültürel etkenlere bağlı olarak birçok batı tarzı beslenme kültürünün hatırı sayılır bir kısmını oluşturur (Bharatgiri Goswami vd., 2023). Gittikçe artan dünya nüfusunun ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla besinlere olan devamlı yükselen talep, et üretiminin çevresel talepleri noktasındaki ciddi endişelerle bir araya geldiğinde, et ve et muadillerini üretmek için yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmasına sebep olmuştur. Hücre tarım alanı, mevcut hücre kültürü tekniklerinden yararlanarak et ürünleri üretmeyi amaçlamaktadır. Bu hedefe ulaşabilmek için, laboratuvar ortamında geliştirilen tekniklerin endüstriyel ölçekte uygulanabilmesi adına çeşitli teknik ve ekonomik zorlukların aşılması gerekmektedir. Bu yeni teknolojilerin çevresel fayda sağlayıp sağlamayacağı ve sağlayacaksa bunun nasıl gerçekleşeceği henüz netlik kazanmamıştır. Ancak, geleneksel tarımın çevresel ve kaynak temelli baskılarını azaltma potansiyeli nedeniyle hücre tarıma yönelik artan bir ilgi bulunmaktadır (Charlesworth vd., 2024). Öte yandan, artan küresel gıda talebi ve gıda dağılımındaki eşitsizlikler, gıda güvenliği sorununu daha da derinleştirmektedir. Gıda güvenliği; tüm bireylerin her zaman, aktif ve sağlıklı bir yaşam sürdürebilmeleri için gerekli olan beslenme ihtiyaçlarını ve gıda tercihlerini karşılayacak düzeyde yeterli, güvenli ve besleyici gıdaya fiziksel ve ekonomik olarak erişebilmesiyle tanımlanmaktadır (Smith vd., 2022).

Son yıllarda, tüketicilerin gıdaya yönelik ilgisi sağlıklı beslenme odaklı bir yöne evrilmiştir. Bu doğrultuda, özellikle Batı ülkelerinde hayvansal ürün tüketiminin azalması ve bunun yerine bitki bazlı alternatiflere yönelme eğilimi, bu çalışmanın konusuyla doğrudan ilişkili en dikkat çekici gelişmelerden biri olarak öne çıkmaktadır (Aschemann-Witzel vd., 2020; Bryant, 2022). Kültür et gıda güvenliği, diyet ve sağlıklı beslenme gereksinimleri ve karbon azaltımı açısından tarımsal yenilik sağlama potansiyeline sahiptir (Lewis ve Riefler, 2023). Kök hücreler çoğalma yeteneğine sahiptir ve kas, kan ve sinir hücreleri gibi farklı hücre türlerine dönüşebilir. Hücre bazlı et üretiminde ise yalnızca kas hücreleri kullanılmaktadır. Bu

hücreler, kas lifleri oluşturarak kıyma benzeri bir yapı elde etmek amacıyla köfte formuna yerleştirilir ve genellikle hamburger gibi tanınmış gıda formatlarında sunulur. En basit tanımıyla hücre bazlı et, canlı bir hayvanın katılımı veya fizyolojik süreçlerinden geçmesine gerek kalmadan üretilmektedir. Bitki bazlı et alternatiflerinin aksine, bu yöntem doğrudan kas hücrelerinden üretildiği için, yapısal ve biyolojik açıdan hayvanların ölüm sonrası oluşan iskelet kasına çok daha yakın bir ürün ortaya koyar (Jahir vd., 2023).

Teknolojinin bazı savunucuları, hücresel tarımın gelişmiş hayvan refahından iyileştirilmiş insan sağlığına kadar uzanan çeşitli olumlu yan etkiler sağlayabileceğini öne sürmektedir. Özellikle insan sağlığı açısından değerlendirildiğinde, kültürlenmiş etin içerdiği yağ miktarının ve türünün kontrol edilebilir olması sayesinde obezite ve kardiyovasküler hastalık oranlarının azalabileceği ifade edilmektedir. Ayrıca kültür etinin steril koşullarda üretilmesi, gıda kaynaklı hastalık vakalarının ve hayvandan insana bulaşan zoonotik hastalıkların görülme sıklığını azaltma potansiyeline sahiptir (Mattick, 2018). Bununla birlikte, bazı uzmanlar hayvancılığın yerini hücresel tarımın almasının, iklim değişikliğinin etkilerini tersine çevirebilecek çevresel iyileşmelere de yol açabileceğini iddia etmektedir. Hücresel tarım, kültürel açıdan önemli ve besleyici hayvansal ürünlerin üretimini mümkün kılmakta olup, bazı kültür etleri geleneksel hayvansal ürünlerle karşılaştırıldığında daha yüksek besin değerine sahip olabilmektedir (Soice ve Johnston, 2021b). Hücresel tarım pazarının analizi, geleneksel gıda sektöründe etkinliği bilinen ülkelerin bu teknolojiyi yakından takip ettiğini ortaya koymaktadır. Her ne kadar bitki bazlı alternatif proteinler için pazar henüz gelişim aşamasında olsa da bu çözümlerin hücresel tarıma kıyasla daha yaygın bir şekilde benimsendiği görülmektedir (Henle, 2024).

Tüketici kabul edilebilirliği, gıda ürünü geliştirmede başarının temel itici gücüdür ve bu nedenle gıda pazarında hücresel tarım ürünlerinin başarısı için hayati öneme sahiptir (Chuah vd., 2025). Gerçekten de, genetik modifikasyon, gerçek et tanımıyla ilgili belirsizlikler, etin doğal tat ve görünümüne müdahale edilmesi yönündeki endişeler, tarım sektörüne olası etkiler ve doğal olmayan ürünlere yönelik kişisel tat tercihleri gibi faktörler, hücre bazlı ete yönelik olumsuz tutumlar arasında öne çıkmaktadır (Siddiqui vd., 2022). Tüketicilere yeterli bilgi sağlanması; gıda neofobisi, etik ve kültürel inançlara dayalı kaygıların azaltılmasına katkı sunabilse de, bu çabalar genellikle istenen organoleptik (tat, koku, doku gibi duysal) özelliklerin eksikliği sorununu tamamen telafi etmek için yetersiz kalmaktadır (Carneiro vd., 2022).

Hücresel tarımın temel amacı, geleneksel tarım yöntemleriyle üretilen ürünlere moleküler düzeyde benzerlik gösteren alternatifler üretmektir. Bu doğrultuda; bakteri, maya, mantar ve alg gibi mikroorganizma kültürlerinin yanı sıra, bitki ve hayvan hücreleri ile doku kültürlerinden de yararlanılabilmektedir (Eibl vd., 2025). Bitki doku kültürü, bitkilerin çoğaltılmasının yanı sıra (Dogan, 2017; Doğan, 2018; Doğan, 2019; Jadid vd., 2024), bitkisel bileşenlerin ve hedef metabolitlerin kontrollü koşullarda üretimine de olanak tanır (Hussain vd., 2012; Wilson ve Roberts, 2012; Devi vd., 2024). Son dönemde yapılan çalışmalar, bitkisel materyallerin hücresel tarım uygulamalarındaki potansiyelini özellikle vurgulamaktadır (Kim vd., 2024). Beslenme alışkanlıklarında yaşanacak bir değişimin, arazi kullanımına bağlı karbon emisyonlarını %78'e kadar azaltabileceğine dair bulgular mevcut olsa da yaygın bitki bazlı et alternatiflerinin varlığına rağmen hayvansal et tüketimi halen yaygınlığını korumaktadır. Bitki bazlı et benzerleri; sürdürülebilirlik, düşük çevresel etki ve kaynak verimliliği gibi avantajlar sunmakla birlikte, bitki bazlı protein, yağ ve lif bileşenlerini bir araya getirerek et benzeri ürünleri taklit etmeye çalışmaktadır. Ancak pazarda daha rekabetçi hale gelebilmeleri için bu ürünlerin biyomimikrisinde önemli iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Sürdürülebilirlikle ilgili sorunları azaltırken duysal özellikler ve lezzet deneyimini geliştirmeye yönelik potansiyel bir çözüm ise, bitki bazlı et benzerlerine hücre bazlı bileşenlerin entegre edilmesidir

(Webb vd., 2021). Bu derleme çalışmanın amacı, hücresel tarımın sürdürülebilirlik potansiyelini, besin değeri açısından avantajlarını ve gelecekteki gıda sistemlerine katkı sağlayabilecek perspektifleri bilimsel veriler ışığında ortaya koymaktır.

HÜCRESEL TARIM: YÖNTEMLER, AVANTAJLAR VE DEZAVANTAJLAR

Hücresel tarım yoluyla yapılan üretim, insan sağlığı açısından bazı bulaşıcı hastalık risklerini azaltma potansiyeline sahiptir. Özellikle hayvan kaynaklı üretim süreçlerinde ortaya çıkan ve E. coli, Salmonella gibi çeşitli patojenlerin, hem su kaynaklarını hem de et ürünlerini kontamine edebilecek şekilde aylarca hayatta kalabildiği bilinmektedir. Hücresel tarım, bu tür patojenlerin yayılımını önlemenin yanı sıra, söz konusu süreçlerde oluşan büyük miktardaki biyolojik atığın ortadan kaldırılmasına da katkı sağlayabilir. Ayrıca bu üretim yöntemi, hayvansal kaynaklı endüstrilere kıyasla tedarik zinciri kesintilerine karşı daha dayanıklı olabilir ve hayvanların zamanında taşınmasına gerek kalmaksızın gıda arzını sürdürebilir (Soice ve Johnston, 2021a). Hücresel tarımın mantığı, daha yüksek verimlilikle maliyetleri en aza indirirken, istenen çıktıyı (protein, kalori, tat, et miktarı vb. gibi) en üst düzeye çıkarmaktır (Poirier, 2022). Kültürlü gıda üretimi için kullanılan çeşitli başlangıç hücresi tipleri arasında embriyonik kök hücreleri, indüklenmiş pluripotent kök hücreler, mezenkimal kök hücreler ve iskelet kası kök hücreleri gibi yetişkin kök hücreler ve diferansiye kök hücre yer almaktadır (Chandrababu ve Puthumana, 2024).

Hücresel tarım kültürel açıdan önemli ve besleyici hayvansal ürünler sağlayabilir. Rao vd. (2013) tarafından yapılan 10 yüksek gelirli ülkeyi kapsayan bir araştırmada, en sağlıklı protein kaynaklarının 2000 kalorilik diyet başına en az sağlıklı proteinlerden yaklaşık 0,29 dolar daha pahalı olduğunu bulmuştur. Hücresel tarım geleneksel tarıma kıyasla önemli ölçüde daha verimlidir ve dolayısıyla çevresel olarak daha yararlı olacağı tahmin edilmektedir (Helliwell ve Burton, 2021). Yapılan bir araştırmada, hücre kültüründen et üretiminde sahada karşılaşılan sorunlardan birinin hücre büyümesinin doğası ve hücreyi hayvandan alıp *in vitro* yetiştirmekle bağlantılı olduğu belirtilmiştir. Bir hücre, yaşlanma sürecine girmeden önce, çoğalma kapasitesi tarafından belirlenen bir büyüme sınırına sahiptir ve bu sınır Hayflick sayısı olarak adlandırılır. Hücre hatlarının ölümsüzleştirilmesinin temel nedeni, bu çoğalma kapasitesindeki sınırlamayı aşmaktır (Goswami vd., 2024).

Hücresel tarımda et üretimi, canlı hayvanlardan biyopsiyle alınan kas hücrelerinin kültürlenmesiyle başlar. Bu hücreler, uygun ortamda çoğalarak miyotüpler adı verilen kas dokusu ipliklerini oluşturur. Bu iplikler, kas dokusunun çoğalmasını sağlayarak et üretir. Bu süreç, daha az hayvana ihtiyaç duyulmasını sağlar, çevresel etkileri azaltır ve etik sorunları ortadan kaldırır. Hücrelerin besin sağlayan iskelelere bağlı büyümesi, kas dokusunun boyutlarını ve protein içeriğini artırır. Bu yöntem, sürdürülebilir ve verimli bir protein üretimi sağlar (Roy vd., 2021). Hücresel kültüründen et üretimi, 3 adımda yapılmaktadır. İlk adımda canlı bir hayvandan hücre ve doku örneği alınması veya ölümden sonra elde edilen bir hücre veya doku biyopsisi yapılmasıdır. Bu şekilde elde edilen hücrelere birincil hatlar denilmektedir. Daha sonra, embriyonik kök hücreler veya indüklenmiş pluripotent kök hücreler gibi çok yönlü hücreler kullanılır. Ardından ölümsüz hücre hatları oluşturulur (Lanzoni vd., 2022).

Genel olarak, parametreler proteine ve konakçıya bağlı olarak değişmektedir. Bu konu üzerine veriler sunan bir başka çalışmada ise hassas hücresel tarımdaki hücresel süreç beş adıma basitleştirilebilmektedir. Öncelikle ilgi duyulan proteini ifade eden genin tanımlanması ve optimizasyonu gereklidir. Ardından genin bir DNA molekülüne dahil edilmesi ve vektörün hücresel konak tarafından alınması ve sonuç olarak dönüşüme uğratılması, dönüştürülmüş hücrede hedeflenen gen ifadesinin başlatılması ve son olarak, ilgi duyulan proteinin salgılanması ve birleştirilmesi adımları izlenmektedir. Hücresel konak başarıyla dönüşüme uğratıldığında, yüksek verimler büyük ölçüde ifade mekanizmasının iki kritik noktası

tarafından kontrol edilmektedir (Dupuis vd., 2023). Kültür eti, farklılaşmış kas hücreleri gerektirir. Sağlıklı hücreler taze besinlerle korunur, hücre sayısı ise sürekli bölünmeyle artırılır. Ancak, çoğu hücre, Hayflick sınırı nedeniyle sınırlı bölünme kapasitesine sahiptir; bu da kas dokusu kültürlerini sınırlamaktadır. Bu nedenle, kök hücrelerin bölünme kapasitelerini artırmak için etkili yöntemler geliştirilmelidir (Munteanu vd., 2021).

Kültürlenmiş et teknolojisi, deniz ürünleri üretiminde de uygulanmıştır. Denemelerde, balıkların doğal yaşam koşulları göz önünde bulundurularak kültür süreçleri geliştirilmiştir. Balık hücrelerinin daha düşük sıcaklıklarda büyüebilmesi, kültür sisteminin sabit sıcaklığını korumak için gereken enerji tüketimini azaltmakta ve bu sayede hücre bazlı deniz ürünlerinin büyük ölçekli üretimiyle ilişkili maliyetlerde azalma sağlamaktadır. Bu durum, hücre bazlı deniz ürünlerinin, hücre bazlı kara eti ürünlerine kıyasla önemli maliyet avantajları sunabileceğini göstermektedir (Rubio vd., 2019). Ayrıca yapılan çalışmalarda, kültürlenmiş et ürünlerinin tat, doku ve görünüm açısından doğal et ile benzerlikler taşıdığı, üretim süreçlerinde ürün kalitesi ve güvenliğinin sağlanmasına, kaynakların sürdürülebilirliğine ve gıda kaynaklı hastalıkların önlenmesine yönelik olumlu etkilerin olduğu ortaya konmuştur. Ancak, günümüzde kültürlenmiş et üretiminin, geleneksel et ürünlerine kıyasla halen daha yüksek maliyetlere sahip olduğu da belirtilmektedir (Lu vd., 2022).

Yapılan bir başka çalışmada, Bayes optimizasyonu olarak adlandırılan yöntem, hücresel tarım ölçümlerinde farklı zorluk seviyelerinde ve potansiyel olarak çelişen kaynaklara sahip olanlara kıyaslandığında açıkça iyi performans göstermektedir. Bayes optimizasyonu algoritmasından elde edilen medya, yalnızca küçük bir maliyet artışıyla önemli ölçüde daha fazla öncül myoblast hücre büyümesini desteklemiştir (Cosenza vd., 2022). Homolog olmayan mikrobiyal biyokütlenin süt ürünleri üretimine katkısı, tek hücreli proteinlerin alternatif protein kaynağı olarak kullanımını sağlar. Bu proteinler, mikroorganizmaların biyoreaktörlerde çoğaltılmasıyla üretilir, ardından biyokütle hasat edilip kurutulur. Bu işlemde genetik değişiklik yapılmaz, bu nedenle proteinler hayvan sütüyle benzerlik taşımaz ve "hayvansal-uzak" olarak adlandırılır. Hayvansal-uzak proteinler, hücresel tarımda esneklik sunmakta olup çeşitli gıda ürünlerinde kullanılabilir (Fytsilis vd., 2024). Hücre hatları, hücre döngüsü kontrol noktası yollarını kaybettiklerinde ve senesans sürecini atlattıklarında ölümsüz hale gelirler (Mathon ve Lloyd, 2001).

Ölümsüz hücre hatlarının oluşturulmasında üç temel yöntem kullanılmaktadır: kendiliğinden ölümsüzleşen hücre hatlarının seçilmesi, telomeraz enziminin yapay olarak eksprese edilmesi ve p53, p14 veya Rb gibi tümör baskılayıcı genleri inaktive eden viral genlerin kullanılması. Bu yöntemler, telomeraz ekspresyonunun artırılması veya hücre döngüsünün düzenlenmesinin engellenmesini içermektedir. Bu değişiklikler, doğal süreçlerle ya da genetik manipülasyon yoluyla sağlanabilmektedir. Kültürlenmiş et araştırmalarındaki önemli engellerden biri, uygun hücre hatlarının eksikliğidir. Güvenli ve endüstriyel ölçekte üretim için özel hücre hatları gerekirken, bu hücrelerin geliştirilmesi mevcut ölümsüzleştirme yöntemlerine dayanmaktadır (Soice ve Johnston, 2021b). Harvard Kök Hücre Enstitüsü, Harvard Tıp Fakültesi, MIT ve Broad Enstitüsü tarafından yapılan bir araştırmaya göre, laboratuvarıda çoğaltılan kök hücreler genellikle hücre büyümesini ve bölünmesini düzenleyen önemli bir tümör baskılayıcı gen olan TP53 (p53) geninde mutasyonlar biriktirmektedir (Merkle vd., 2017).

BIYOTEKNOLOJİ VE HÜCRESEL TARIM ARASINDAKİ İLİŞKİ

Günümüzde küresel ölçekte yaşanan bir dizi zorluk, toplumun gıda güvenliği konusundaki endişelerini yoğunlaştırmaktadır. Bu doğrultuda yapılan kültür et girişimlerinin sayısı artış göstermektedir. Geleneksel et endüstrisi bu yeni gıda biyoteknolojisiyle ilgilenmektedir. Çalışmalara dayanarak, kültür eti biyoteknolojisinin son yıllarda önemli

ilerlemeler gösterdiği gözlemlenmektedir (Fernandes vd., 2022a). Temiz et, muazzam bir ticari ilgi ve büyüme alanı olarak hızla ortaya çıkmakta ve hem akademik ve biyoteknolojik araştırmacılara hem de endüstri ortaklarına büyük ölçekli hücre kültürü ve doku mühendisliği uzmanlıklarını kullanarak yeni bir alanı ilerletme konusunda önemli fırsatlar sunmaktadır. Son iki yıldaki prototiplerin, gösterilerin ve tadımların sayısı, bu yöndeki çabanın uygulanabilirliğini engelleyen hiçbir temel teknolojik kusurun olmadığını göstermektedir (Specht vd., 2018).

Gelecek odaklılık, biyoteknolojinin bir alt alanı olarak hücre tarım için daha da kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Biyoteknoloji girişimlerinin hem yenilikçi teknolojiler geliştirmesi hem de risk sermayedarlarının ilgisini çekebilmek için cazip ve ikna edici gelecek vizyonları tasarlaması gerekmektedir. Ancak, hangi vizyonların çekici bulunduğu bağlama göre değişiklik göstermektedir. Hayvancılığa yönelik eleştirilerde üretim süreçlerinin şeffaflaştırılması vurgulandığından, hücre tarım alanındaki araştırmacıların mevcut yaklaşımlardan farklı bir perspektif sunmaları zorunlu görünmektedir (Jönsson, 2020). Mevcut çalışmalar, mikrobiyal protein üretiminin biyoteknolojik bir araç olarak kullanılması sayesinde ilerleyen yıllarda besleyici protein kaynaklarının güvence altına alınmasına katkı sağlayacağını göstermektedir (Matassa vd., 2016). Ancak, bu teknolojilerin olumlu ve olumsuz yönleri, kontrol edilebilir faktörlerden bağımsız olarak yüksek düzeyde belirsizlik ve risk taşımaktadır. Bu nedenle, bilim insanları, bu yeni biyoteknolojinin vaatlerini somutlaştırmak veya çürütmek için karşı karşıya oldukları çok boyutlu ve belirgin engelleri dikkatle gözlemlemek zorundadırlar (Fernandes vd., 2022b).

HÜCRESEL TARIMDA KULLANILAN BİYOREAKTÖR SİSTEMLERİ VE BİYOPROSES YÖNTEMLERİ

Kültürlenmiş et üretiminde uygulanan biyoproses, belirli hedeflere sahip iki ana fazdan oluşur: İlk faz olan 'çoğalma aşamasında', başlangıçtaki hücre grubundan mümkün olan en yüksek sayıda hücre elde edilmesi amaçlanır. İkinci faz ise 'farklılaşma ve olgunlaşma aşamasıdır'; bu aşamada hücreler biyoyumlu iskele yapılarına eklenir, iskelet kası hücrelerine dönüşmeleri sağlanır ve kas protein sentezinin artırılması hedeflenir (hipertrofi aşaması). Bu aşamaların her biri, ortam, iskele ve biyoreaktörler için kendi tasarım gereksinimlerini sunmaktadır (Djissalov vd., 2021). Kullanılan biyoreaktör veya biyoproses sisteminin türü hem biyoüretimin ölçeği hem de maliyeti açısından önemli bir belirleyicidir ve bu nedenle bir üretim paradigmasının geliştirilmesi için önemli bir husustur (Allan vd., 2019).

Büyük ölçekli hücre kitle üretimini gerçekleştirebilmek için, yüzlerce litreden yedi bin litreye kadar işlem kapasitesine sahip özel biyoreaktör sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, karıştırmalı tank biyoreaktörleri genellikle süspansiyon kültürlerinde hücre büyümesi için tercih edilirken; sabit yataklı veya içi boş fiber biyoreaktörler, daha nadir olmakla birlikte, yapışık hücre proliferasyonu için kullanılmaktadır. Süspansiyon biyoreaktörlerinde hücreler, tekil hücreler ya da küçük hücre kümeleri halinde çoğaltılabilmektedir. Ayrıca, hücrelerin yüzeylerine tutunabildiği küçük boncuklar olan mikrot taşıyıcıların kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Günümüzde mikrot taşıyıcılar yenilebilir malzemelerden üretilmekte ve bu sayede, kültürasyon sürecinden sonra hücrelerle birlikte doğrudan işlenmelerine olanak tanımaktadır (Albrecht vd., 2024). İçi boş elyaf biyoreaktörler, silindirik bir kartuş içerisinde yer alan gözenekli kılcal liflerin paralel diziliminde hücre kültürü gerçekleştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Sabit yataklı ve içi boş elyaf biyoreaktör sistemleri, oksijen transferini tehlikeye atmadan yüksek hücre yoğunluklarına ulaşmayı mümkün kılan düşük kayma gerilimi ortamları sağlayarak, ölçeklenebilir üretim açısından önemli potansiyel sunmaktadır. Özellikle içi boş elyaf sistemleri, biyolojik ürünlerin üretiminde memeli hücrelerinin verimli ve büyük ölçekli kültürasyonu için uygulanabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Nitekim, içi boş lifli biyoreaktörlerin, yağ dokusundan türetilen kök hücrelerin

çoğalmasını ve bu hücrelerin olgun yağ hücrelerine farklılaşarak üç boyutlu yağ dokusu oluşturmasını desteklediği gösterilmiştir (Fish vd., 2020).

Hücre biyoreaktörlerinde yaygın olarak kullanılan karıştırılmış tank reaktörleri, hücreleri süspansiyon halinde tutar ve ölçeklenebilirlik avantajı sunar. Ancak, karıştırma işlemi hücrelerde yüksek kayma gerilmelerine neden olabilir. Alternatif olarak, içi boş fiber reaktörler, hücrelerin mikro fiberler üzerinde büyümesine veya lifler arasında asılı kalmasına olanak tanıyarak kayma gerilimini azaltır ve besinlerin lif lümeninden hücrelere yayılmasını sağlar (Ge vd., 2023).

Kültürlenmiş et üretim sistemlerinin çevresel performansını iyileştirmek amacıyla, araştırma ve geliştirme çalışmalarının belirli alanlara odaklanması gerektiği önerilmektedir. Bu kapsamda, hücre hatlarının geliştirilmesi yoluyla kültür ortamı kullanım verimliliğinin ve protein üretiminin artırılması, daha etkili kültür ortamı formülasyonlarının oluşturulması, biyoproseslerde yenilenebilir enerji kaynaklarının ve sürdürülebilir kültür ortamı bileşenlerinin kullanılması, enerji tüketimini azaltmaya yönelik biyoreaktör tasarımlarının yapılması ve süreç sırasında oluşan yan ürünlerin değerlendirilmesini sağlayacak verimli bir akış aşağı proses geliştirilmesi gibi konular öncelikli araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır (Tuomisto vd., 2022).

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA HÜCRESEL TARIM

Hücresel tarım ve mikrobiyal protein üretimi, büyüyen dünya nüfusuna gıda güvenliği sağlamak için geliştirilmiştir. Geleneksel tarımın hücresel tarıma dönüştürülmesinin sürdürülebilirliğini sağlamak için yeşil enerji teknolojilerinin kullanılması önerilir (El Wali vd., 2024). Kontrollü çevre tarımının uygulanabilirliğinin orta vadede en yüksek seviyeye ulaşacağı öngörülmektedir. Hücresel tarım ise hızla ticarileşmeye yaklaşmakla birlikte, geleneksel hayvancılık sistemleriyle rekabet edebilir ve sürdürülebilir bir alternatif haline gelmesi için önemli teknik ve altyapısal engellerin aşılması gerekmektedir. Bu bağlamda, 2050 yılına kadar hücresel tarımın ekolojik etkilerini en aza indirmek amacıyla, düşük karbonlu enerji kaynaklarının kullanımı ve üretim süreçlerinin döngüsel kaynak kullanım sistemlerine entegrasyonu gibi alanlarda kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Glaros vd., 2022). Artan bir nüfusun diyet gereksinimlerini karşılamak için yeterli miktarda uygun fiyatlı, erişilebilir, besin açısından dengeli ve sürdürülebilir kaynaklı protein sağlamanın birleşik zorluklarının üstesinden gelmek, çözülmesi gereken önemli bir sorundur (Behm vd., 2022; Safdar vd., 2023; Wu vd., 2014).

Tüketiciler ayrıca hayvanların etiği ve refahı konusundaki endişeleri yüzünden hayvansal gıda tüketimini azaltmakta ve hayvansal besinleri bitki bazlı muadil ürünlerle değiştirerek karbon ayak izlerini azaltmaya çalışmaktadır (Bryant, 2022; Vallone ve Lambin, 2023; Verkuijl vd., 2024). Mikoprotein kullanımının faydaları ve sınırlamalarının araştırıldığı bir çalışmaya göre, hücresel tarım ile tüketilen proteinler daha düşük karbon ayak izine sahiptir ve daha az sera gazı emisyonu üretmektedir (Maseko vd., 2025).

Mevcut rejim, tüketicinin teknolojiye olan güvenini artıran açık ve şeffaf iletişim yoluyla kültürlü et gibi ürünlerin gelişimini ilerletebilir. Kamu sübvansiyonları, gelişmelerle ilgili şeffaf iletişim ve açık sektörler arası iş birliği, geleneksel hayvancılık üretiminin statüsünü sarsacak ve gıda sistemlerinin sürdürülebilirliğini ilerletecek somut çözümlerdir. Bilimsel, teknik ve ölçeklenebilirlikle ilgili zorluklar, gıda sistemlerinin sürdürülebilirlik geçişinde kültürlü etin potansiyelini gerçekleştirmek için önceliklerdir (Moritz vd., 2023). Bugüne kadar, kültürlü et üretimi hararetle tartışılan bir konudur, uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği konusunda çelişkili görüşler vardır. Kimya ve biyomedikal endüstrisindeki ürünler ve işlemler, özellikle maliyet ve sürdürülebilirlik açısından, büyük ölçekli hücre ve doku kültürleri için gereklilikleri karşılamamaktadır (Lanzoni vd., 2022).

HÜCRESEL TARIM VE SÜT ÜRÜNLERİ

Avrupa'da 2021 yılında çiftliklerde 160 milyon tondan fazla süt üretilmiş olup, süt ve süt ürünleri büyük bir pazar oluşturmaktadır. Buna karşın, bitkisel proteinler ve hücrel tarım yoluyla elde edilen süt ikameleri önemli bir gelişim potansiyeli taşımaktadır. Ancak, Avrupa Birliği'nde hücrel tarım kaynaklı süt proteinlerinin gıda ürünlerinde kullanımına henüz izin verilmemiştir. Buna rağmen, hücre bazlı süt analogları geliştiren girişimlerin sayısı artmakta olup, mevcut araştırmalar verimli ve sürdürülebilir protein üretim yöntemlerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır (Fytsilis vd., 2024). Süt sektöründe hücrel tarım, fermantasyona dayalı ve hayvan hücresi kültürü tabanlı yaklaşımlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Çoğu girişim fermantasyonla süt bileşenleri üretmeye odaklanmakta olup, bu yöntem 'Genetiği Değiştirilmiş Organizma' kaynaklı endişelerle sınırlanmaktadır. Diğer yandan, bazı şirketler hayvan hücrelerinden elde edilen epitel hücrelerini kullanarak süt üretimini hedeflemektedir. Hücre kültürüyle üretilen sütün ekonomik sürdürülebilirliği açısından, maliyetlerin geleneksel sütle rekabet edebilecek düzeye indirilmesi ve tüketici erişiminin sağlanması kritik önemdedir (Kwon vd., 2024).

Yapılan bir çalışma, süt proteininin karbon ayak izinin ve hücrel olarak üretilen süt proteininin karbon ayak izinin benzer olmasının mikrobiyal üretim sürecinde kullanılan ham maddelere ve enerji profiline dikkat edildiği sürece mümkün olduğunu göstermektedir (Behm vd., 2022). Hücrel tarım teknolojisiyle birlikte yeni ve öngörülemeyen riskler de ortaya çıkabilir. Örneğin, substratların veya kültür ortamının kirlenme olasılığı görülmektedir, bu da teknolojinin kendisinden çok üretim standartlarıyla ilgili olabilir. Bu sorunu aşmak için, hücrel tarım ürünlerinin üretimi, gıda güvenliğini sağlamak için sıkı düzenleme ve denetim gerektirecektir (Mendly-Zambo vd., 2021).

HÜCRESEL TARIM VE DENİZ ÜRÜNLERİ

Geleneksel deniz ürünleri avcılığı ve yetiştiriciliğiyle ilişkili birçok zorluk göz önüne alındığında, hücre kültürüne dayalı deniz ürünleri, geleneksel üretim yöntemlerinin üzerindeki baskıyı azaltabilecek potansiyel olarak sürdürülebilir bir alternatif kaynak sunmaktadır (Chan vd., 2024). Hücre bazlı balık ürünleri ile geleneksel balık ürünleri arasındaki gıda güvenliği planlarındaki en temel fark, üretim sürecinin başlangıç noktasında ortaya çıkmaktadır. Geleneksel deniz ürünleri endüstrisinde başlıca tehlikeler genellikle hasat sonrası işleme aşamalarında ortaya çıkarken, hücre bazlı ürünlerde üretimin temel aşaması hücrelerin biyoreaktör veya fermentörlerde çoğaltılması ve farklılaştırılmasıdır. Hücre bazlı deniz ürünlerinin son ürün hâline gelmesinden sonra, etiketleme gereklilikleri ambalajlama şekline ve olası alerjen bileşenlerin açık bir şekilde belirtilmesine bağlıdır (Ovissipour vd., 2024).

Nüfusun hücrel tarım yolu ile üretilmiş deniz ürünlerine karşı olan tutumlarının araştırıldığı bir makalede belirli tüketici segmentleri arasında hücre bazlı deniz ürünlerine güçlü bir ilgi olduğunu göstermiştir. Yeni deneyimlere daha açık olan, yaşı daha genç olan tüketiciler ve deniz ürünleri üretimi hakkında çevreye duyarlı düşünce gösteren tüketiciler, hücre bazlı deniz ürünlerini denemeye daha fazla eğilim göstermiştir. Ek olarak, deniz ürünleri yiyen ve satın alan tüketicilerin hücre bazlı deniz ürünleri satın alma olasılığının daha yüksek olduğu raporlanmıştır (Chuah vd., 2025). Genel olarak, şu anki haliyle, hücre bazlı deniz ürünlerinin anlamlı balıkçılık iyileşmesine ve yan okyanus koruma faydalarına yol açma şansı düşüktür. Ancak bundan bağımsız olarak hücre bazlı deniz ürünlerinin başka önemli çevresel veya sosyal faydalar sağlayabileceğini göz önüne almak gereklidir. Örneğin, deniz ürünleri tüketiminin, ilişkili risklerden daha ağır basan hem kısa hem de uzun vadeli sağlık faydaları sağladığı gösterilmiştir. Hücre bazlı teknolojinin benimsenmesi, birçok insan için ek besleyici gıda alternatifleri sağlama ve deniz ürünleri tüketimindeki açığı kapatmaya ve insan sağlığını iyileştirmeye yardımcı olma potansiyeline sahiptir (Halpern vd., 2021).

Deniz ürünleri hücre kültürlerinin, doğal balık kas dokusunun benzersiz özelliklerine dayanarak, memeli hücre kültürlerine kıyasla sıcaklık, pH ve oksijen gereksinimleri açısından daha hoşgörülü olabileceği düşünülmektedir. Bu fark, enerji kullanımı ve dolayısıyla hücre bazlı deniz ürünlerinin seri üretimi için maliyet hususları açısından önemli etkilere sahiptir. Bu farklar ayrıca hücresel tarım ve genel olarak büyük ölçekli doku mühendisliği için yeni bir araştırma fırsatları kümesi sunmaktadır. Doku mühendisliğinin çoğu, genellikle organlardan daha büyük olmayan daha küçük ölçekli dokular üretmeye odaklanmaktadır (Rubio vd., 2019).

HÜCRESEL TARIM ÜRÜNLERİNE KARŞI TÜKETİCİ YAKLAŞIMLARI

Modern bitki bazlı etler, et yiyenler için önemli olan tat ve doku gibi ürün özelliklerini daha doğru bir şekilde taklit etmek için bitkisel bileşenleri yenilikçi yollarla işler. Tüketicilerin hücresel proteine olan tutumlarının incelenmesi amacıyla Belçika'da yapılan bir araştırmanın sonucuna göre, tüketiciler, hücresel protein kaynaklarını sağlıklı besin tüketim kaygısından çok, hayvanlara verilen zarar ve sürdürülebilirlik açısından tercih etmektedir (Bryant ve Sanctorem, 2021). Yine tüketicilerin yaklaşımlarının ölçülmesi üzerine Çin'de yapılan bir çalışmada, katılımcılar en çok bitki bazlı et alternatiflerini tüketmeye istekli olduğu, ardından kültürlü et, sonra da böcek bazlı ürünler için ılımlı yaklaşıtlarını raporlanmıştır. Doğal olmama algısı, tüketim niyetine yönelik en güçlü engel olarak ortaya çıkmıştır. Ancak, et ve et ürünlerindeki ilaç kalıntıları konusunda endişeleri olan katılımcıların, protein alternatiflerini satın almak için daha yüksek bir fiyat ödemeye dahi istekli oldukları görülmüştür (Chia vd., 2024).

Yapılan bir başka araştırma, Güney Afrika'da kültürlenmiş ete yönelik tüketici tutumlarının genel olarak olumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, çevresel ve hayvan refahına ilişkin sağlanan bilgilerin, geleneksel et tüketimini azaltmaktan ziyade, bitki bazlı ve laboratuvarıda kültürlenmiş et alternatiflerine olan ilgiyi artırabileceğini göstermektedir (Tsvakirai vd., 2023). Öte yandan, Hwang vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, alternatif et ürünlerinin pazarlanmasında 'laboratuvarıda üretildi' ya da 'biyoteknolojik olarak geliştirilmiştir' gibi ifadelerin kullanılması, tüketiciler üzerinde olumsuz bir algı oluşturabilmektedir. Bu durum, doğallık algısı ve biyoteknolojiye karşı güvensizlik gibi faktörlerin, satın alma niyeti üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, bu bağlamda geleneksel etin 'doğallığı'nın da tüketici nezdinde bir avantaj olarak öne çıktığı vurgulanmalıdır.

GELECEK PERSPEKTİFLERİ

2040 yılına kadar kültür eti, mevcut değer zincirlerinde hayvansal ürünleri tamamlayabilecek bir seçenek olarak öngörülmektedir. Ancak bu konuda çalışan uzmanlar ikiye ayrılmaktadır: Bir kesim, kültür etinin et sektöründe dönüştürücü etkiler yaratacağını savunurken, diğerleri pazar ilgisinin sınırlı kalacağı ve tüketici kabulünün düşük olacağı görüşündedir. Tüketici kabulünden bağımsız olarak, kültür etinin yaygınlaşması önünde hâlâ önemli teknolojik, ekonomik ve düzenleyici engeller bulunmaktadır (Reis vd., 2025). Kültürlü etinin önceki yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları, kültür et üretimi için düşük arazi kullanımına rağmen nispeten yüksek enerji kullanımı olduğunu ortaya koymuştur. Buna bağlı olarak, kültür etinin çevresel etkisini azaltmak için kapsamlı olarak tasarlanmış biyoproses geliştirmeye yönelik inovasyon yakın gelecekte odak noktası olmalıdır (Jahir vd., 2023). Ayrıca Hollanda, Amerika Birleşik Devletleri ve Brezilya gibi ülkelerdeki gıda güvenliği otoriteleri/politika yapıcılar, yakın gelecekte kontrollü koşullar altında kültür etinin tadına bakılmasını mümkün kılmak için düzenlemeler üzerinde çalışmaktadır (Deliza vd., 2023). Ancak bununla birlikte ölçeklendirme ve ticarileştirmeye yönelik teknik ve bilimsel zorlukların yanı sıra, gelecekteki iyileştirmeler için dikkate alınması gereken çok önemli hususlar tüketici kabulü ve düzenleyici mevzuattır. Herhangi bir yeni gıda türünde olduğu gibi, düzenleyici

çerçeve ve kültürlü etin kamu tarafından kabulü yaygın kabulün de anahtarlarıdır (Knežić vd., 2022).

ZORLUK VE SINIRLAMALAR

Kültürlü et ürünlerinin üretimini sürdürülebilir bir şekilde ölçeklendirmek, bunları et alternatifleri olarak satışa sunmanın kritik aşamalarından biri olarak bildirilmiştir. Kültürlü etin büyük ölçekli üretiminde karşılaşılan temel zorluklardan biri, önemli miktarda hücre elde etmek için hücre üretiminin etkili bir şekilde nasıl genişletileceğidir (Zheng vd., 2024). Kültürlü et üretimi hararetle tartışılan bir konudur, uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği konusunda çelişkili görüşler bulunmaktadır. Bu konuda karşılaşılan zorluklar teknik ve biyoteknolojik olarak gruplandırılmakta olup biyoteknolojik zorlukların arasında; hücre hasadı için hayvan ve toplama yerinin seçimi, hücre hasadı yöntemleri, etik zorluklar, yüksek hücre çoğalması ve genetik dengesizlik, kültürlenmiş etin besinsel ve işlevsel özellikleri, kültürlenmiş et için gıda kontrol sistemi gibi sınırlar yer almaktadır (Lanzoni vd., 2022). Bitki bazlı ürünlere olan ilgi ve tüketim son zamanlarda belirgin bir şekilde artmıştır. Bu sebeple bitki bazlı şirketlere yapılan yatırımlar kültürlü et şirketlerine yapılan yatırımlardan çok daha önemlidir. Çevresel bir bakış açısından, bitki bazlı gıda seçenekleri sistematik olarak geleneksel ete ve kültürlü et alternatiflerine hâkim görünmektedir. Ancak, temel zorluk etin tadını yalnızca bitkilerle yeniden üretmektir (Treich, 2021). Sentetik biyolojinin gıda güvenliğiyle ilgili düzenleyici yönleri, sosyopolitik zorluklar ve ürün düzenlemesi için yasal unsurlarla birlikte tartışılmalıdır. Ayrıca, kırsal geçim kaynaklarında sentetik et üretiminin sosyal etkilerinin analizinin ve et üretiminin yan ürünlerine ilişkin ek düşüncelerin önemli olduğu vurgulanmaktadır (Fernandes vd., 2020).

SONUÇ

Güncel literatürün incelenmesi, özellikle hücresel tarım, bitki bazlı ürünler ve yeni nesil deniz ürünleri teknolojileri alanlarında alternatif protein kaynaklarının geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi konusunda önemli bir popülerlik kazanıldığını göstermektedir. Kök hücre yetiştiriciliği ve fermantasyon teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde geliştirilen kültürlü et ve süt ürünleri, artık sadece laboratuvar düzeyinde kalmayıp ticari anlamda üretilebilir hale gelmeye başlamıştır. Bu ürünler, geleneksel hayvancılığa kıyasla özellikle sera gazı salımı, arazi kullanımı ve tatlı su tüketimi gibi çevresel etkileri azaltma potansiyeli taşıdığı için dikkat çekmektedir. Benzer şekilde, bitki bazlı protein ürünleri de gıda işleme teknolojilerindeki gelişmeler ve baklagiller, algler ve mantarlar gibi yeni bileşenlerin kullanımı sayesinde tat, doku ve besin değeri açısından büyük ilerleme kaydetmiştir. Ayrıca, vejetaryen beslenme tarzlarına yönelik artan ilgi ve çevresel duyarlılıkla birlikte bu ürünler özellikle Batı ülkelerinde geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşmıştır. Aynı zamanda, laboratuvar ortamında üretilen deniz ürünleri de okyanusların aşırı avlanma, kirlilik ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi sorunlarına çözüm getirebilecek önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Et, süt ve yumurta gibi geleneksel hayvansal ürünleri taklit eden alternatifler hem tat hem de besin içeriği bakımından giderek orijinalleriyle benzer hale gelmektedir. Ölçek büyütme, üretim maliyetlerinin düşürülmesi, tüketici tarafından kabul görme ve yasal düzenlemeler gibi bazı zorluklar sürse de bu teknolojiler ortak bir amaç doğrultusunda ilerlemektedir: geleneksel hayvansal ürünlere etik, çevre dostu ve sağlıklı alternatifler sunmak. Biyoteknoloji, gıda bilimi ve sürdürülebilirlik alanlarındaki çalışmaların bir araya gelmesi, gelecekteki küresel gıda sistemlerinin nasıl şekilleneceğine dair önemli ipuçları vermektedir. Ancak bu teknolojilerin potansiyelini tam olarak gerçekleştirebilmesi için, bilimsel araştırmalar, özel sektör yatırımları, kamu politikaları ve tüketici farkındalığını kapsayan çok paydaşlı bir iş birliği gereklidir. Genel olarak, yenilik, sürdürülebilirlik ve etik değerlerin bulunduğu bu alanlar, gıda sektörünü daha sorumlu ve dayanıklı bir geleceğe taşımaktadır.

Araştırmacıların katkı oranı beyanı:

S.R.E : Literatür taraması, ilk taslağın yazımı, içerik düzenlemeleri.

M.D : Çalışma konusu ve kapsamının belirlenmesi, içerik düzenlemeleri, sonuçların değerlendirilmesi ve son okuma.

Her iki yazar da çalışmanın son metni onaylamıştır.

Etik Kurul Kararı: İhtiyaç yoktur.

Çatışma beyanı: Çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- Albrecht, F. B., Ahlfeld, T., Klatt, A., Heine, S., Gelinsky, M., Kluger, P. J. (2024). Biofabrication's contribution to the evolution of cultured meat. *Advanced Healthcare Materials*, 13(13), 2304058.
- Allan, S. J., De Bank, P. A., Ellis, M. J. (2019). Bioprocess design considerations for cultured meat production with a focus on the expansion bioreactor. *Frontiers In Sustainable Food Systems*, 3(44).
- Aschemann-Witzel, J., Gantriis, R. F., Fraga, P., Perez-Cueto, F. J. A. (2020). Plant-based food and protein trend from a business perspective: markets, consumers, and the challenges and opportunities in the future. *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*, 61(18), 3119-3128.
- Behm, K., Nappa, M., Aro, N., Welman, A., Ledgard, S., Suomalainen, M., Hill, J. (2022). Comparison of carbon footprint and water scarcity footprint of milk protein produced by cellular agriculture and the dairy industry. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(8), 1017-1034.
- Bharatgiri Goswami, A., Charlesworth, J., Biazik, J. M., Rybchyn, M. S., Le Coutre, J. (2023). Cultured meat technology: an overview. *Burleigh Dodds Series In Agricultural Science*, (3-26).
- Bryant, C. J. (2022). Plant-based animal product alternatives are healthier and more environmentally sustainable than animal products. *Future Foods*, 6, 100174.
- Bryant, C., ve Sanctorem, H. (2021). Alternative proteins, evolving attitudes: comparing consumer attitudes to plant-based and cultured meat in Belgium in two consecutive years. *Appetite*, 161, 105161.
- Carneiro, R., James, C., Aung, T., O'Keefe, S. (2022). Challenges for flavoring fish products from cellular agriculture. *Current Opinion In Food Science*, 47, 100902.
- Chan, D. L. K., Lim, P. Y., Sanny, A., Georgiadou, D., Lee, A. P., Tan, A. H. M. (2024). Technical, commercial, and regulatory challenges of cellular agriculture for seafood production. *Trends in Food Science and Technology*, 144, 104341.
- Chandrababu, A., ve Puthumana, J. (2024). CRISPR-edited, cell-based future-proof meat and seafood to enhance global food security and nutrition. *Cytotechnology*, 76, 619–652.
- Charlesworth, J. C., Jenner, A., le Coutre, J. (2024). Plant-based hydrolysates as building blocks for cellular agriculture. *Food Chemistry*, 460, 140621.
- Chia, A., Shou, Y., Wong, N. M. Y., Cameron-Smith, D., Sim, X., Van Dam, R. M., Chong, M. F. F. (2024). Complexity of consumer acceptance to alternative protein foods in a

- multiethnic Asian population: a comparison of plant-based meat alternatives, cultured meat, and insect-based products. *Food Quality and Preference*, 114, 105102.
- Chuah, S. X. Y., Gao, Z., Arnold, N. L., Farzad, R. (2025). United States consumers' attitudes towards cell-based seafood: effective marketing strategies and policy recommendations. *Marine Policy*, 173, 106554.
- Cosenza, Z., Astudillo, R., Frazier, P. I., Baar, K., Block, D. E. (2022). Multi-information source Bayesian optimization of culture media for cellular agriculture. *Biotechnology and Bioengineering*, 119(9), 2447-2458.
- Deliza, R., Rodríguez, B., Reinoso-Carvalho, F., Lucchese-Cheung, T. (2023). Cultured meat: a review on accepting challenges and upcoming possibilities. *Current Opinion in Food Science*, 52, 101050.
- Devi, R. S., Dhal, P. B., & Tripathi, S. (2024). Managing browning in plant tissue culture: strategies and control measures for successful in-vitro propagation and secondary metabolite production. *The Journal of Plant Science Research*, 40(2), 346-356.
- Djisašlov, M., Knežić, T., Podunavac, I., Živojević, K., Radonic, V., Knežević, N., Bobrinetskiy, I., Gadjanski, I. (2021). Cultivating multidisciplinary: manufacturing and sensing challenges in cultured meat production. *Biology*, 10(3), 204.
- Dogan, M. (2017). Multiple shoot regeneration from shoot tip and nodal explants of *Rotala rotundifolia* (Buch-Ham. ex Roxb) Koehne. *Anatolian Journal of Botany*, 1(1), 4-8.
- Doğan, M. (2018). *In vitro* shoot regeneration of *Limnophila aromatica* (Lamk.) Merr. from nodal and internodal explants. *Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech.* 8(3): 77-84, 2018
- Doğan, M. (2019). *In vitro* rapid propagation of an aquatic plant *Pogostemon erectus* (Dalzell) Kuntze. *Anatolian Journal of Botany*, 3(1), 1-6.
- Dupuis, J. H., Cheung, L. K. Y., Newman, L., Dee, D. R., Yada, R. Y. (2023). Precision cellular agriculture: the future role of recombinantly expressed protein as food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22 (2), 882-912.
- Eibl, R., Senn, Y., Gubser, G., Jossen, V., Van Den Bos, C., Eibl, D. (2025). Cellular agriculture: opportunities and challenges. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12, 51-73.
- El Wali, M., Rahimpour Golroudbary, S., Kraslawski, A., Tuomisto, H. L. (2024). Transition to cellular agriculture reduces agriculture land use and greenhouse gas emissions but increases demand for critical materials. *Communications Earth and Environment*, 5(1), 61.
- Fernandes, A. M., de Souza Teixeira, O., Palma Revillion, J. P., de Souza, Â. R. L. (2020). Conceptual evolution and scientific approaches about synthetic meat. *Journal of Food Science and Technology*, 57(6), 1991-1999.
- Fernandes, A. M., Teixeira, O. de S., Fantinel, A. L., Revillion, J. P. P., Souza, Â. R. L. de. (2022a). Technological prospecting: the case of cultured meat. *Future Foods*, 6, 100156.
- Fernandes, A. M., Teixeira, O. de S., Revillion, J. P., Souza, Â. R. L. de. (2022b). Panorama and ambiguities of cultured meat: an integrative approach. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62 (209) 5413-5423.
- Fish, K. D., Rubio, N. R., Stout, A. J., Yuen, J. S. K., Kaplan, D. L. (2020). Prospects and challenges for cell-cultured fat as a novel food ingredient. *Trends in Food Science and Technology*, 98, 53-67.

- Fytsilis, V. D., Urlings, M. J. E., van Schooten, F. J., de Boer, A., Vrolijk, M. F. (2024). Toxicological risks of dairy proteins produced through cellular agriculture: current state of knowledge, challenges and future perspectives. *Future Foods*, 10, 100412.
- Ge, C., Selvaganapathy, P. R., Geng, F. (2023). Advancing our understanding of bioreactors for industrial-sized cell culture: health care and cellular agriculture implications. *American Journal of Physiology - Cell Physiology*, 325(3), 580-591.
- Glaros, A., Marquis, S., Major, C., Quarshie, P., Ashton, L., Green, A. G., Kc, K. B., Newman, L., Newell, R., Yada, R. Y., Fraser, E. D. G. (2022). Horizon scanning and review of the impact of five food and food production models for the global food system in 2050. *Trends in Food Science and Technology*, 119, 550-564.
- Goswami, A. B., Rybchyn, M. S., Walsh, W. R., le Coutre, J. (2024). Obtaining source material for cellular agriculture. *Heliyon*, 10(18).
- Halpern, B. S., Maier, J., Lahr, H. J., Blasco, G., Costello, C., Cottrell, R. S., Deschenes, O., Ferraro, D. M., Froehlich, H. E., McDonald, G. G., Millage, K. D., Weir, M. J. (2021). The long and narrow path for novel cell-based seafood to reduce fishing pressure for marine ecosystem recovery. *Fish and Fisheries*, 22(3), 652-664.
- Helliwell, R., ve Burton, R. J. F. (2021). The promised land? exploring the future visions and narrative silences of cellular agriculture in news and industry media. *Journal of Rural Studies*, 84, 180-191.
- Henle, T. (2024). *Precision fermentation in the food system: is applied precision cellular agriculture in the food industry a potential disruptive innovation for the food system?* (Yüksek Lisans tezi), Comillas Pontifical University/ Madrid.
- Hussain, A., Qarshi, I. A., Nazir, H., & Ullah, I. (2012). Plant tissue culture: current status and opportunities. In *Recent advances in plant in vitro culture*. IntechOpen.
- Hwang, J., You, J., Moon, J., Jeong, J. (2020). Factors affecting consumers' alternative meats buying intentions: plant-based meat alternative and cultured meat. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14), 5662.
- Jadid, N., Anggraeni, S., Ramadani, M. R. N., Arieny, M., & Mas' ud, F. (2024). In vitro propagation of Indonesian stevia (*Stevia rebaudiana*) genotype using axenic nodal segments. *BMC Research Notes*, 17(1), 45.
- Jahir, N. R., Ramakrishna, S., Abdullah, A. A. A., Vigneswari, S. (2023). Cultured meat in cellular agriculture: advantages, applications and challenges. *Food Bioscience*, 53, 102614.
- Jönsson, E. (2020). On breweries and bioreactors: probing the “present futures” of cellular agriculture. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 45(4), 921-936.
- Kim, W. J., Kim, Y., Ovissipour, R., Nitin, N. (2024). Plant-based biomaterials as scaffolds for cellular agriculture. *Future Foods*, 10, 100468.
- Knežić, T., Janjušević, L., Djisalov, M., Yodmuang, S., Gadjanski, I. (2022). Using vertebrate stem and progenitor cells for cellular cgriculture-state-of-the-art, challenges, and future perspectives. *Biomolecules*, 12(5), 699.
- Kwon, H. C., Jung, H. S., Kothuri, V., Han, S. G. (2024). Current status and challenges for cell-cultured milk technology: a systematic review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 15(1), 81.

- Lanzoni, D., Bracco, F., Cheli, F., Colosimo, B. M., Moscatelli, D., Baldi, A., Rebutti, R., Giromini, C. (2022). Biotechnological and technical challenges related to cultured meat production. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(13), 6771.
- Lewis, L., ve Riefler, P. (2023). Cultured meat acceptance for global food security: a systematic literature review and future research directions. *Agricultural and Food Economics*, 11(1), 48.
- Lu, H., Ying, K., Shi, Y., Liu, D., Chen, Q. (2022). Citation: bioprocessing by decellularized scaffold biomaterials in cultured meat: a review. *Bioengineering*, 9(12), 787.
- Maseko, K. H., Regnier, T., Bartels, P., Meiring, B. (2025). Mushroom mycelia as sustainable alternative proteins for the production of hybrid cell-cultured meat: a review. *Journal of Food Science*, 90 (2), e70060.
- Matassa, S., Boon, N., Pikaar, I., Verstraete, W. (2016). Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint. *Microbial Biotechnology*, 9(5), 568-575.
- Mathon, N. F., Lloyd, A. C. (2001). Cell senescence and cancer. *Nature reviews cancer*, 1(3), 203-213.
- Mattick, C. S. (2018). Cellular agriculture: the coming revolution in food production. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 74(1), 32-35.
- Mendly-Zambo, Z., Powell, L. J., Newman, L. L. (2021). Dairy 3.0: cellular agriculture and the future of milk. *Food, Culture and Society*, 24(5), 675-693.
- Merkle, F. T., Ghosh, S., Kamitaki, N., Mitchell, J., Avior, Y., Mello, C., Kashin, S., Mekhoubad, S., Ilic, D., Charlton, M., Saphier, G., Handsaker, R. E., Genovese, G., Bar, S., Benvenisty, N., McCarroll, S. A., Eggan, K. (2017). Human pluripotent stem cells recurrently acquire and expand dominant negative P53 mutations. *Nature*, 545(7653), 229-233.
- Moritz, J., McPartlin, M., Tuomisto, H. L., Ryyänen, T. (2023). A multi-level perspective of potential transition pathways towards cultured meat: Finnish and German political stakeholder perceptions. *Research Policy*, 52(9), 104866.
- Munteanu, C., Mireşan, V., Răducu, C., Ihuţ, A., Uiuu, P., Pop, D., Neacşu, A., Cenariu, M., Groza, I. (2021). Can cultured meat be an alternative to farm animal production for a sustainable and healthier lifestyle? *Frontiers in Nutrition*, 8, 749298.
- Nyyssölä, A., Suhonen, A., Ritala, A., Oksman-Caldentey, K. M. (2022). The role of single cell protein in cellular agriculture. *Current Opinion in Biotechnology*, 75, 102686.
- Ovissipour, R., Yang, X., Saldana, Y. T., Kaplan, D. L., Nitin, N., Shirazi, A., Chiridon, B., White, W., Rasco, B. (2024). Cell-based fish production case study for developing a food safety plan. *Heliyon*, 10 (13).
- Poirier, N. (2022). On the intertwining of cellular agriculture and animal agriculture: history, materiality, ideology, and collaboration. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 907621.
- Rao, M., Afshin, A., Singh, G., Mozaffarian, D. (2013). Do healthier foods and diet patterns cost more than less healthy options? A systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*, 3(12), e004277.

- Reis, G. G., Martins da Silva, B. de F., Hartmann, A. L., Venus, T. E. (2025). Promises and uncertainties in the cultivated proteins market: Perspectives from Germany and Brazil. *Food Policy*, 131, 102820.
- Rischer, H., Szilvay, G. R., Oksman-Caldentey, K. M. (2020). Cellular agriculture - industrial biotechnology for food and materials. *Current Opinion in Biotechnology*, 61, 128-134.
- Roy, B., Hagappa, A., Ramalingam, Y. D., Mahalingam, N., Banu, A., Alaudeen, S. (2021). A review on lab-grown meat: Advantages and disadvantages. *Quest International Journal of Medical and Health Sciences*, 4(1), 19-24.
- Rubio, N., Datar, I., Stachura, D., Kaplan, D., Krueger, K. (2019). Cell-based fish: A novel approach to seafood production and an opportunity for cellular agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 435832.
- Safdar, L. B., Foulkes, M. J., Kleiner, F. H., Searle, I. R., Bhosale, R. A., Fisk, I. D., Boden, S. A. (2023). Challenges facing sustainable protein production: Opportunities for cereals. *Plant Communications*, 4 (6).
- Siddiqui, S. A., Khan, S., Ullah Farooqi, M. Q., Singh, P., Fernando, I., ve Nagdalian, A. (2022). Consumer behavior towards cultured meat: A review since 2014. *Appetite*, 179, 106314.
- Smith, D. J., Helmy, M., Lindley, N. D., Selvarajoo, K. (2022). The transformation of our food system using cellular agriculture: What lies ahead and who will lead it? *Trends in Food Science and Technology*, 127, 368-376.
- Soice, E., ve Johnston, J. (2021a). How Cellular Agriculture Systems Can Promote Food Security. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 753996.
- Soice, E., ve Johnston, J. (2021b). Immortalizing cells for human consumption. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(21), 11660.
- Specht, E. A., Welch, D. R., Rees Clayton, E. M., Lagally, C. D. (2018). Opportunities for applying biomedical production and manufacturing methods to the development of the clean meat industry. *Biochemical Engineering Journal*, 132, 161-168.
- Stephens, N., ve Ellis, M. (2020). Cellular agriculture in the UK: A review. *Wellcome Open Research*, 5 (12).
- Treich, N. (2021). Cultured meat: Promises and challenges. *Environmental and Resource Economics*, 79(1), 33-61.
- Tsvakirai, C., Nalley, L., Rider, S., Van Loo, E., ve Tshehla, M. (2023). The alternative livestock revolution: prospects for consumer acceptance of plant-based and cultured meat in south africa. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 55(4), 710-729.
- Tuomisto, H. L., Allan, S. J., Ellis, M. J. (2022). Prospective life cycle assessment of a bioprocess design for cultured meat production in hollow fiber bioreactors. *Science of the Total Environment*, 851, 158051.
- Vallone, S., ve Lambin, E. F. (2023). Public policies and vested interests preserve the animal farming status quo at the expense of animal product analogs. *One Earth*, 6(9), 1213-1226.
- Verkuijl, C., Smit, J., Green, J. M. H., Nordquist, R. E., Sebo, J., Hayek, M. N., Hötzel, M. J. (2024). Climate change, public health, and animal welfare: towards a One health approach to reducing animal agriculture's climate footprint. *Frontiers in Animal Science*, 5, 158051.

- Webb, L., Fleming, A., Ma, L., Lu, X. (2021). Uses of cellular agriculture in plant-based meat analogues for improved palatability. *ACS Food Science and Technology*, 1(10), 1740-1747.
- Wilson, S. A., & Roberts, S. C. (2012). Recent advances towards development and commercialization of plant cell culture processes for the synthesis of biomolecules. *Plant Biotechnology Journal*, 10(3), 249-268.
- Wu, G., Fanzo, J., Miller, D. D., Pingali, P., Post, M., Steiner, J. L., Thalacker-Mercer, A. E. (2014). Production and supply of high-quality food protein for human consumption: Sustainability, challenges, and innovations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1321(1), 1-19.
- Zheng, Y. Y., Hu, Z. N., Zhou, G. H. (2024). A review: analysis of technical challenges in cultured meat production and its commercialization. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65 (10), 1911–1928.