

TARIM, ORMAN VE SU BİLİMLERİNDE KURAMSAL VE UYGULAMALI YAKLAŞIMLAR

**Editör
Prof. Dr. Gökhan ŞEN**



**TARIM, ORMAN VE
SU BİLİMLERİNDE
KURAMSAL VE UYGULAMALI
YAKLAŞIMLAR**

Editör

Prof. Dr. Gökhan ŞEN



**TARIM, ORMAN VE SU BİLİMLERİNDE KURAMSAL VE
UYGULAMALI YAKLAŞIMLAR**
Editör: Prof. Dr. Gökhan ŞEN

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design
Baskı: Mayıs 2025
Yayıncı Sertifika No: 49837
ISBN: 978-625-5885-37-1

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir
Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com
duvar kitabevi@gmail.com

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

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm1

Alglerin Sürdürülebilir Biyomalzeme Potansiyeli ve
Nanofiber Teknolojisi ile Yenilikçi Uygulamaları
Esra ARMAĞAN, Osman ARMAĞAN

2. Bölüm16

Alg Tabanlı Nanopartiküllerin Kozmesötik Formülasyonlarda Kullanımı:
Biyoaktif Özellikler ve Nanoteknolojik Perspektifler
Esra ARMAĞAN, Osman ARMAĞAN

3. Bölüm35

Bal Arılarının *İn Vitro* Koşullarda Yetiştiriciliği
Görkem YANIK

4. Bölüm48

Koyunlarda Mitokondriyal DNA Temelli Filogenetik Çalışmalar
Mehmet SARAÇOĞLU

5. Bölüm67

Pestisit Uygulamalarında İnsansız Hava Araçlarının Kullanımı ve Geleceği
Süleyman Safa ARSLAN, ERGİN DURSUN2

1. Bölüm

Alglerin Sürdürülebilir Biyomalzeme Potansiyeli ve Nanofiber Teknolojisi ile Yenilikçi Uygulamaları

Esra ARMAĞAN¹, Osman ARMAĞAN²

1. Giriş

Algler, fotosentez yapan tek hücreli veya çok hücreli organizmalardır ve gelişimlerine göre prokaryotlar ve ökaryotlar olarak sınıflandırılırlar (Pereira, 2021). Algler, kara, nemli bölgeler (karasal algler) veya okyanuslar, denizler, nehirler, göller, göletler, acı su (su algleri) veya buzullar gibi farklı habitatlarda yaşarlar (Barsanti ve Gualtieri, 2022). Karbondioksit emilimi ve oksijen üretimini sağlayan algler, güneş ışığını enerjiye dönüştürme özelliği sebebiyle suda yaşayan besin zincirinin birincil üreticileridir (Pereira, 2021). Algler çeşitli morfolojik özelliklere sahiptir ve yapılarında gerçek kök, gövde, damar sistemi veya yapraklar bulunmaz (Irkin, 2019). Çoğu alg polisakkaritler ve lipitlerden oluşan hücre duvarlarına sahiptir. Polisakkaritler, alg hücre duvarının en önemli bileşenleridir ve iki ana elemana sahiptir: alg hücre duvarının temel iskeletini oluşturan fibriller (selüloz, mannanlar, ksilanlar) ve fibriller kısmı çevreleyen amorf matris (aljinik asit, fukoidan, galaktanlar, vb.) (El-Sheekh ve Abomohra, 2021).

Algler, besin rezervinin biyokimyasal yapısı, fotosentetik pigmentler, hücre duvarı bileşimi, kamçılar, hücrede çekirdeklerin varlığı veya yokluğu ve üreme biçimi gibi temel özelliklerine göre sınıflandırılır (Guschina ve Harwood, 2006). Alglerin mikroskobikten makroskobiğe kadar değişen farklı türleri vardır, en küçüğü fitoplankton oluşturan tek hücreli mikroalgler ve en büyüğü 60 metreye kadar büyüeyebilen makroalglerdir (Carlsson ve ark., 2007). Mikroalgler kendi başlarına, zincirler halinde veya gruplar halinde bulunurlar ve boyutları birkaç ile birkaç yüz mikrometre arasındadır (Irkin, 2019). Diatomlar (Bacillariophyceae), yeşil algler (Chlorophyceae) ve altın algler (Chrysophyceae) mikroalglerin en bol bulunan üç sınıfıdır (Kim, 2015). Diatomlar, dünya biyokütlesinin en büyük

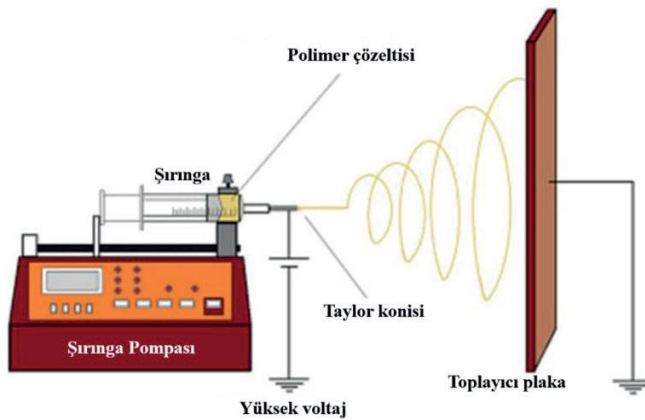
¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Ermenek Uysal ve Hasan Kalan Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Karaman, Türkiye,
ORCID: 0000-0002-5414-2392

² Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Karaman, Türkiye,
ORCID: 0000-0002-7860-0909

bölümünü oluşturur ve hücre duvarları polarize silika içerir (Carlsson ve ark., 2007). Yeşil ve altın algler ise çoğunlukla tatlı suda bol miktarda bulunur. Deniz yosunu olarak da bilinen makroalgler, birkaç milimetre veya santimetrelilik mikroskobik türlere sahip çok hücreli organizmalardır (Mouritsen, 2013). Makroalgler, içerdikleri pigmentlerin türü ve sayısına ve doku yapısına göre üç ana gruba ayrılır: kırmızı (Rhodophyta), kahverengi (Phaeophyceae) ve yeşil (Chlorophyta) (Kılınç ve ark., 2013). Hem makro hem de mikroalgler zorlu koşullara dayanıklıdır, sıcaklık değişimine, tuzluluğa, pH'a, ışık yoğunluğu aralıklarına dayanıklıdır, çok hızlı büyür ve güneş enerjisini yüksek verimlilikle biyokütleye dönüştürür (Irkin, 2019). Algler, polisakkaritler, protein, lipitler, vitaminler, mineraller, antioksidanlar ve enzimler gibi biyoaktif bileşikler içerir (Morais ve ark., 2015). Nişasta, selüloz, şeker ve diğer polisakkaritler (laminarin, aljinat, fukan) gibi karbonhidratlar alglerin yapısında bulunur (El-Sheekh ve Abomohra, 2021). Ayrıca, lesitin, fosfatidil gliserol ve inozitol alglerde bulunan lipitlerdir (Irkin, 2019).

Nanofiberler (NF), yüksek yüzey-hacim oranı ve gözeneklilik, yüzey işlevselliklerinde esneklik ve üstün mekanik performans gibi benzersiz özellikler sergiler; bu nedenle, bu lifler çeşitli uygulama alanlarında kullanılır (Karaduman ve ark., 2022). NF'lerin üretiminde santrifüjlü üretim, çözeltiden üfleme, eriyik çekim, faz ayırma, kendiliğinden dizilim, kalıp yöntemi gibi birçok yöntem kullanılmasına rağmen elektroğirme (elektrospinning) en yaygın kullanılan tekniktir (Alghoraibi ve Alomari, 2018). Elektroğirme yöntemi, küçük çaplı bir şırıngadan veya iğneli kılcal tüpten, ayrıca yüksek voltaj kaynağından ve bir metal toplayıcıdan oluşur. Elektrik alanı kullanılarak, doğal ve sentetik polimerler, nanopartiküller, seramikler ve metaller, kontrol edilebilir gözenek yapısına sahip sadece birkaç nanometrelilik ince liflere dönüştürülebilir (Horzum ve ark., 2019). Enjektör içindeki polimer çözeltisi yüksek voltajlı bir elektrik alanına maruz bırakılarak sıvı yüzeyinde bir elektrik yükü oluşturulur. Uygulanan elektrik alanı kritik bir değere ulaştığında, itici elektrik kuvvetleri yüzey gerilimini yenerek Taylor konisi olarak bilinen konik bir şekil oluşturur. Taylor konisinin ucundaki yüklü bir çözelti jeti püskürtülür. Çözücü buharlaşır veya katılaşır ve toplayıcı üzerinde birbirine bağlı küçük liflerden oluşan bir ağ oluşur (Karaduman ve ark., 2022) (Şekil 1). Bu şekilde, farklı polimerler kullanılarak 1 µm ile 3 nm çapında lifler elde edilmekte ve biyomedikal, enerji, filtrasyon, koruyucu giyim alanları, doku mühendisliği ve rejeneratif tıp, ilaç ve terapötik ajanların salınımı, fotokataliz, sensör çalışmaları, batarya, güneş enerjileri gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Arica ve ark., 2021; Zhang ve ark., 2020; Lim, 2017). Sadece poliakrilonitril (PAN), polietilen oksit (PEO), polistiren, poliüretanlar, polilaktik asit (PLA), polikaprolakton (PCL) gibi sentetik

polimerler değil aynı zamanda polisakkaritler (selüloz ve türevleri, kitin, kitosan, siklodekstrin, hyaluronik asit, aljinat, vb.) ve protein içeren biyo/doğal polimerler (kolajen, jelatin, ipek fibrinojeni, vb.) de NF üretiminde kullanılmaktadır (Polat ve Kınalı, 2019). Sentetik polimerler daha ekonomik ve çok yönlü olsa da, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir, biyouyumlu, antibakteriyel aktivite gösteren ve düşük toksisiteye sahip olmaları nedeniyle biyo/doğal polimerler özellikle ilgi çekicidir (Karaduman ve ark., 2022). Ancak, elektrospinning biyopolimerleri, güçlü hidrojen bağı, moleküler ağırlık, düşük viskoelastik özellik, zayıf fiziksel yapı, yüklü grupların dağılımı, yüksek kristallilik, bazı organik çözücülerde zayıf çözünürlük ve düşük mekanik özellikler gibi bazı dezavantajlara sahiptir (Horzum ve ark., 2013). Biyopolimerlerin yanı sıra uçucu yağlar, bitki özleri, sakız, aloe vera, ananas, alg gibi doğal maddeler de biyokompozit NF'lerin üretiminde kullanılmaktadır (Ataei ve ark., 2020; Fatehi ve Abbasi, 2020). Doğal polimerlerle biyouyumluluk, biyolojik olarak parçalanabilirlik, mekanik dayanıklılık ve fiziksel özellikler elde edilebilmesine rağmen, NF'lerin biyolojik aktivitesi, terapötik etkisi veya suda çözünürlük özelliği bazı uygulamalar için hala yetersiz kalmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, zengin biyolojik bileşenler (polisakkaritler, fenolik bileşikler, pigmentler, vb.) içeren algler, çok sayıda uygulamada tercih edilmektedir. NF'lerin bakteri, virüs, mantar ve alg gibi mikroorganizmaların immobilizasyonu ve kapsüllemesi için iyi destekleyici malzemeler olduğu bildirilmiştir. Bu, NF'lerin mikroorganizmaların eklenmesiyle verimliliklerinin artırılması yoluyla işlevselleştirilmesi olarak düşünülebilir (Zamel ve Khan, 2021).



Şekil 1. Elektrospinning yönteminin şematik gösterimi (Çeliközlü, 2023)

2. Alg Katkılı Nanofiberlerin Üretimi

Alg temelli biyopolimerler, zayıf reolojik özellikleri ve düşük mekanik dayanım gibi dezavantajlardan dolayı tek başlarına elektrospunlenemez. Alglerin elektrospinning tekniği ile üretimi sırasında karşılaşılan başlıca zorluklardan biri kararsız jet oluşumuna ve homojen olmayan NF membranların oluşumuna neden olan yüksek çözelti viskozitesi, yüzey gerilimi ve elektriksel iletkenliğidir. Bu sorun organik çözücüler ve çapraz bağlayıcı maddeler kullanılarak aşılabilmekle birlikte, her ikisi de toksik olup, membranları in vivo uygulamalar için ideal olmaktan çıkarılabilir. Bir diğer nokta ise PEO, PVA ve PCL gibi elektrospinning edilebilir ek polimerlere olan ihtiyaçtır. Alglerin sentetik veya doğal polimerlerle birleştirilmesi, termal ve mekanik dayanımlarını artırırken, biyolojik aktivitelerinin korunmasına da yardımcı olur; ayrıca elektrospunlenmiş NF'ler, yüksek yüzey alanları sayesinde bu işlevselliği destekler (Karaduman ve ark., 2022).

Spirulina sp., *C. vulgaris*, *H. pluvialis*, *Phaeodactylum tricornutum* ve *Scenedesmus almeriensis* gibi alg türleri elektrospinning yönteminde kullanılmaktadır, ancak en çok kullanılan mikroalg türü *Spirulina* sp.'dir. Elektrospinning kabiliyetini geliştirmek için PEO, PLA, PCL, PHA, PHB-HV, aljinat, jelatin, ipek fibroini ve selüloz asetat gibi ek polimerler kullanılmaktadır. Yeşil çözücüler (su, metanol, formik asit, etil asetat, etanol, aseton) kullanılmasına rağmen, son ürün biyolojik uygulamalarda kullanılsa bile çalışmaların çoğu halojenli (örn. kloroform, diklorometan, hekzafloroizopropanol, trifloroetanol) ve toksik çözücülerle (örn. dimetilformamid, tetrahidrofuran) yapılmaktadır (Karaduman ve ark., 2022).

da Silva Figueira ve ark. *Spirulina* gibi mavi-yeşil alglerden elde edilen bir pigment olan C-phycocyanin (C-PC) bileşiğinin, elektrospinning yöntemiyle polietilen oksit (PEO) temelli NF yapılar içerisine entegre edilmesini araştırmıştır. C-PC'nin elektrospunlenmiş NF'lere başarıyla entegre edilmesi, hem morfolojik kaliteyi artırmakta hem de termal stabiliteyi iyileştirmekte, bu da bileşiğin biyomedikal uygulamalarda kullanılabilirliğini güçlendirmektedir (da Silva Figueira ve ark., 2016). Kuntzler ve ark. *Spirulina* sp. LEB 18 ile kapsüllenmiş PLA/PEO NF'leri kullanarak kolorimetrik pH indikatörü geliştirmişlerdir (Kuntzler ve ark., 2020). Kim ve ark., merkezi sinir sisteminin hasarlı sistemlerinde önemli bir rol oynayan birincil astrositlerin kültürü için *Spirulina* hücreleri içeren PCL NF'lerini ilk kez üretti (Kim ve ark., 2012). Kültür ortamına *Spirulina* özütünün eklenmesi, sitotoksikite olmaksızın sıçan birincil astrositlerinin büyümesini ve metabolik aktivitesini artırdı. *Spirulina*-PCL NF'lerinin iltihabı azaltılabileceği ve astrosit aktivitesini hafifletebileceği ortaya çıktı. *Spirulina* özütü yüklü PCL NF, dermal fibroblast katmanlarının

yenilenmesi için kullanıldı (Jung ve ark., 2013). Yapay deri iskeleti, sitotoksiste, yapışma, infiltrasyon, canlılık ve çoğalma açısından değerlendirildi. *Spirulina* özütü içeren bir iskelete fibroblast infiltrasyonu üzerine ilk çalışma başarıyla gerçekleştirildi. Birleşen koşullarda stresi azaltan ve uzun süreli kültüre olanak sağlayan *Spirulina* özütünün olumlu etkisi vurgulandı. Alg katkılı NF'lerin üretiminde kullanılan türler Tablo 1'de gösterilmiştir ve bu da mikroalglerin makroalglerden daha çok tercih edildiğini göstermektedir. Özellikle mikroalg türlerinden biri olan *Spirulina* sp., anti-inflamatuvar, antibakteriyel, anti-fungal, antioksidan ve antimikrobiyal özelliklerine ek olarak fikoeritrin, fikosiyanin, klorofil ve Beta-karoten gibi zengin içeriği nedeniyle tercih edilmiştir (Kuntzler ve ark., 2020).

Tablo 1. Alg katkılı nanofiber üretiminde kullanılan bazı alg türleri, kullanılan polimer çözeltileri ve uygulama alanları

Alg türü	Kullanılan polimer	Uygulama alanı	Referans
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	PAN	Atık yönetimi	(Poddar ve ark., 2022)
<i>Ulva fasciata</i>	PVA	Biyomedikal	(Madany ve ark., 2021)
<i>Chlorella fusca</i>	PAN	Karbondioksit fiksasyonu	(Comitre ve ark., 2021)
<i>Cystoseira barbata</i>	PAN	Ağır metal giderimi	(Karaduman ve ark., 2024)
<i>Spirulina</i> sp. LEB18	PLA	Gıda paketlenme	(Terra ve ark., 2023)
<i>Spirulina</i> (<i>Arthrospira</i> ekstraktı)	PCL	Biyomedikal	(Kim ve ark., 2012)
<i>Spirulina</i>	PCL	Biyomedikal	(Jung ve ark., 2013)
<i>S. platensis</i>	PEO	Termal stabilite	(Figueira ve ark., 2016)
<i>Spirulina</i> sp. LEB 18	PLA / PEO	Gıda paketlenme	(Kuntzler ve ark., 2020)
Lanasol (kırmızı alg ekstraktı)	PMMA / PEO	Biyomedikal	(Andersson ve ark., 2014)

3. Alg Katkılı Nanofiberlerin Yenilikçi Uygulama Alanları

NF'ler, sentetik polimer, doğal polimer veya biyopolimerlerden oluşan uzun ince yapılardır. Bu nanomalzemeler, mekanik, elektriksel ve termal özellikleriyle ilgili farklı özellikler sergiler ve bu da onlara ilaç, kozmetik, tekstil ve gıda endüstrilerinde çeşitli uygulanabilirlik kazandırır. Ek olarak, NF'ler

gözeneklilikleri nedeniyle yüksek taşıma kapasitelerine sahip çeşitli maddelerin kontrollü salınımına izin verir. NF'ler, faz ayırma, çekme ve elektrospinning ile geliştirilebilir. Elektrospinning, ölçeklendirme kolaylığı, tekrarlanabilirlik ve biyoaktif bileşikler ve polimerler olarak lifleri geliştirmek için kullanılan/eklenen biyobileşiklere agresif olmayan koşulların uygulanmasıyla ilgili bir avantaja sahiptir (Moreira ve ark., 2018; Moreira ve ark., 2020). Yüksek gözeneklilikleri, küçük gözenek boyutları ve yüksek yüzey alanları nedeniyle, polisakkarit bazlı NF'lerin uygulaması ilaç dağıtımı, doku mühendisliği, kemik rejenerasyonu ve yara pansumanı gibi çeşitli alanları içerir. Polisakkarit bazlı NF'ler, ilaçların güvenli bir şekilde uygulanması için çekici ve ümit verici sonuçlar göstermiştir (Zhang ve ark., 2021).

Polisakkaritler gibi alg biyopolimerlerine dayalı sentezlenmiş nanomalzemeler, kaplama ve kapsülleme için kullanılabilir ve sürdürülebilirliğe katkıda bulunabilir (Ahmad ve ark., 2022). Polisakkarit bazlı nanomalzemelerin yara iyileşmesi, kanser tedavisi, doku mühendisliği, ilaç dağıtımı, gen dağıtımı ve antimikrobiyal aktiviteler gibi biyomedikal uygulamalar için olduğu bildirilmiştir (Meng ve ark., 2022). Öte yandan, alg polisakkaritlerine dayalı NF'ler, pansumanlar, gen dağıtımı, doku mühendisliği ve ilaç dağıtımı gibi farklı alanlarda potansiyele sahiptir (Ahmad ve ark., 2022). Dahası, polisakkarit bazlı nanomalzemeler, sağlık yararları sağlayan ve hastalıkları önleyebilen veya tedavi edebilen biyolojik olarak aktif özelliklere sahip oldukları için işlevsel bileşenler olarak geniş uygulamalara sahiptir (Karimzadeh ve ark., 2018). Polisakkarit bazlı nanomalzemelerin bir diğer potansiyeli, çeşitli işlenmiş gıda ürünlerinin enerji yoğunluğunu azaltmaktır (Li ve Liu, 2021; Perumal ve ark., 2019). Ek olarak, polisakkaritler, nanomalzemeler oluşturmak ve biyolojik olarak parçalanabilir, antimikrobiyal ve toksik olmayan yapıya sahip gıda ambalajları geliştirmek için diğer ticari biyopolimerlerle birleştirilebilir (Ahmad ve ark., 2022).

3.1. Su Arıtımı

Alg fotolizi, sucul çevre kirleticilerinin bozunması için olası bir alternatif yoldur. Alg hücreleri, kirleticilerin bozunmasını başlatan reaktif radikalleri fotoöretebilir (Deng ve ark., 2008). Alglerin TiO_2/Ag hibrid NF membran üzerindeki $Cr(VI)$ giderme etkinliğini gösteren çalışmada, alg hücreleri, ultra ince TiO_2/Ag kitosan hibrid NF matına yüklenerek alg- TiO_2/Ag biyonano hibrid materyali hazırlanmıştır. Taze alglerin ve TiO_2/Ag nanomateryalin sinerjik fotokatalitik etkisi, $Cr(VI)$ giderimi ile incelenmiştir. Sonuçlar, alglerin eklenmesinin, TiO_2/Ag hibrid nanomateryal ile sistemde görünür ışık altında $Cr(VI)$ 'nın foto-giderimini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir (Wang ve ark., 2017). *Chara corallina* adlı bir makroalg türünden elde edilen nanoselüloz

bazlı membranların sudaki nikel, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metal iyonlarını uzaklaştırma potansiyelinin araştırıldığı başka bir çalışmada bu NF membranların sudaki ağır metal kirliliğini gidermede umut vadeden, biyolojik kaynaklı bir membran materyali olduğu bulunmuştur (Yousif ve ark., 2024). Kahverengi alglerden elde edilen doğal bir polimer olan sodyum aljinat ve polivinil alkol (PVA) kullanılarak elektrospinning yöntemiyle üretilen NF'lerin, sulu çözeltilerden kadmiyum (Cd) iyonlarının uzaklaştırılmasındaki etkinliğini inceleyen çalışma aljinat/PVA nanofiblerinin Cd iyonları için yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir (Ebrahimi ve ark., 2019).

3.2 Biyomedikal Uygulamalar

NF'ler, insan vücudunun hücre dışı matrisine yapısal benzerlikleri nedeniyle, doku mühendisliği için potansiyel bir malzeme olarak önemli ilgi görmüştür (Ko ve ark., 2019). Çeşitli adaylar arasında, birincil polisakkaritleri olarak ulvanlar içeren *Ulva* cinsine ait algler, bu alanda NF üretimi için umut vadetmektedir. Çözücü olarak su kullanan çevre dostu bir ekstraksiyon yöntemi kullanılarak, polisakkaritler *Ulva fasciata*'dan başarıyla çıkarılmış ve ulvan/polivinil alkol nanofiberleri geliştirilmiştir. Bu NF'ler, arzu edilen termal kararlılık ve mekanik özellikler sergilemiş ve bunları yalnızca doku mühendisliği için değil, aynı zamanda bir dizi başka biyomedikal uygulama için de uygun hale getirmiştir (Madany ve ark., 2021). Karragenan, kırmızı alglerden elde edilen ve ilaç dağıtımı, doku mühendisliği gibi biyomedikal uygulamalarda, özellikle de gıda endüstrisinde kullanılan doğal olarak oluşan bir polisakkarittir. Yapılan bir araştırmada mikroalglerden elde edilen peptitlerin polikaprolakton (PCL) ve karragenan NF'lerine dahil edilerek biyouyumlu kompozitlerin sentezi ve bu kompozitlerin antibakteriyel ve yara iyileştirme özellikleri incelenmiştir. Üretilen peptit içeren nanofiblerin, çeşitli patojenik bakterilere karşı (örneğin *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*) etkili antibakteriyel aktivite gösterdiği belirlenmiştir. Mikroalgal peptitlerin salınımı sayesinde, enfeksiyon riskini azaltabilecek bir yara örtüsü potansiyeli sunulmaktadır. Bu tür biokompozitler, özellikle enfeksiyon riskinin yüksek olduğu yara tedavilerinde önemli uygulamalar bulabilir (Raghunathan ve ark., 2024). Choi ve ark. elektrospinning yöntemiyle aljinat ve PCL polimerlerinden NF'ler üreterek bu NF'lere biyoaktif bileşenler içeren *Spirulina* özütünü emdirmiştir. Bu sayede, hem aljinatın nem tutma ve yara iltihabını emme özelliklerinden hem de PCL'nin mekanik dayanımından ve *Spirulina* özütünün iyileştirici potansiyelinden yararlanılmıştır. *Spirulina* özütünün içeriğindeki çeşitli biyoaktif bileşenlerin (örneğin proteinler, vitaminler, antioksidanlar) yara iyileşme sürecini hızlandırdığı ve cilt yenilenmesini desteklediği, bu bileşenlerin anti-inflamatuvar, antimikrobiyal ve

hücre proliferasyonunu teşvik edici etkileri olabileceği ve cilt yenilenmesini destekleyen umut vadeden bir yara örtüsü materyali olduğu belirlenmiştir (Choi ve ark., 2017). Bir diğer çalışmada Hijiki adlı bir tür kahverengi makroalgden (*Sargassum fusiforme*) elde edilen özütlerin, biyoyumlu polimerlerden (PCL) üretilen NF uygulamalarındaki antibakteriyel ve sitotoksiste özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular alg temelli bu NF'lerin antibakteriyel özelliklere sahip ve düşük sitotoksiste gösteren malzemeler üretmek için kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (Gümüş, 2025). Bu tür NF'ler, enfeksiyon riskinin azaltılması gereken biyomedikal uygulamalarda umut vadeden alternatifler sunabilir.

3.3 Gıda ve Ambalaj Endüstrisi

Özellikle mikroalgler antioksidan, antimikrobiyal ve diğer fonksiyonel özelliklere sahip biyoaktif bileşenler açısından zengindir. Biyoaktif bileşenler içeren alg katkılı NF'ler, geleneksel gıda ambalajlarına kıyasla çeşitli avantajlar sunabilmektedir. Örneğin; antimikrobiyal özelliklere sahip NF'ler gıdaların raf ömrünü uzatabilir, antioksidan içeren NF'ler, gıdaların oksidasyonunu ve besin değer kaybını azaltabilir, biyolojik kaynaklardan elde edilen polimerler ve katkı maddeleri kullanılarak daha çevre dostu ambalajlar geliştirilebilir, NF yapıları, gaz ve nem geçirgenliğini kontrol etmede potansiyel sunabilir (de Morais ve ark., 2025). Mikroalglerden elde edilen biyoaktif peptitleri içeren PCL NF'lerinin geliştirilmesi ve bu NF'lerin tavuk eti parçalarının depolama sırasındaki stabilitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada elde edilen bulgular mikroalgal biyoaktif peptitlerin NF'lere antioksidan özellik kazandırdığını, PCL/biyopeptit nanofiberlerinin tavuk etinin oksidatif süreçlerini kontrol altında tutarak ürünün kalitesini 12 gün boyunca koruduğunu göstermiştir (Gonçalver ve ark., 2017). Bu sonuçlar, mikroalgal biyoaktif peptit yüklü NF'lerin aktif gıda ambalajlama uygulamaları için umut vadeden bir yaklaşım olduğunu desteklemektedir.

3.4 Tarımda Kullanımı

Sentetik plastikleri çevreleyen çevresel endişeler karşısında, doğal polimerler umut verici bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen bu polimerler uygun maliyetlidir ve biyolojik olarak parçalanabilir olma potansiyeline sahiptir; biyolojik olarak parçalanmayan plastiklerin oluşturduğu sürdürülebilirlik zorluklarını ele alır (Zhang ve ark., 2021). Örneğin, karragenan ve aljinat gibi polimerler, bol miktarda bulunmaları, hızlı büyümeleri ve yetiştirme için minimum tatlı su gereksinimleri nedeniyle biyomalzeme uygulamalarında öne çıkmıştır (Pérez-García ve ark., 2022). Bu polisakkaritler,

sızıntı kayıplarını en aza indirmek ve toprak düzenleyicileri olarak hizmet ederek toprağın fiziksel-kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirmek için kontrollü salınlı gübrelerde kullanılmıştır. Petruz ve ark., yanlış plastik atık yönetimi ve aşırı gübre kullanımının önemli çevresel etkilerine karşı sürdürülebilir bir çözüm olarak, alg temelli NF'ler kullanarak biyobozunur, geliştirilmiş etkinlikte gübrelerin üretimine odaklanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, alg kaynaklı NF'ler ve gübrenin kombinasyonunun, gübre salınım hızını azaltan ve mekanik olarak daha güçlü biyobozunur filmler üretmek için potansiyel bir yaklaşım olduğunu göstermektedir (Petrüz ve ark., 2024). Bu tür filmlerin, özellikle çevre dostu biyobozunur bitki saksılarının geliştirilmesi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabileceği öngörülmektedir. Meng ve ark., çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir polivinil alkol (PVA) ve sodyum aljinat polimerlerinden oluşan membranların, yavaş salınlı gübreler için kaplama malzemesi olarak potansiyelini araştırmıştır. PVA ve sodyum aljinatın farklı oranlarda karıştırılmasıyla membranlar üretilmiş ve bu membranların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri (örneğin kalınlık, geçirgenlik, dayanıklılık) karakterize edilmiştir. PVA/aljinat kaplı gübre tanelerinden besin maddelerinin (azot, fosfor, potasyum gibi) su veya toprak ortamına salınım hızı ve mekanizması incelenmiştir. Membran kompozisyonunun ve kalınlığının, besin salınım hızını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma PVA ve sodyum aljinat polimerlerinin karışımından elde edilen membranların, çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikleriyle yavaş salınlı gübreler için etkili bir kaplama malzemesi olabileceğini göstermektedir (Meng ve ark., 2023). Bu teknoloji, gübre kullanımının optimizasyonu ve tarımın çevresel etkilerinin azaltılması açısından önemli bir potansiyele sahiptir.

4. Sonuç

Algler, sürdürülebilirlikleri, kolay ve ucuz üretimleri, gıda olarak kullanılabilmeleri, biyolojik olarak aktif maddeler olmaları ve antimikrobiyal, antikanser, antioksidan aktiviteler gibi özellikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Alglerin elektrospinning tekniği ile NF'lere dönüştürülmesi, yüksek yüzey alanı/hacim oranları, iyi mekanik bütünlükleri ve yüzey işlevselliklerindeki değişiklikler nedeniyle onları birçok önemli uygulama alanı için uygun bir aday haline getirir. Algler ve bunların bileşenleri gibi yeşil ve zararsız özelliklere sahip biyobazlı malzemeler, birçok uygulamada hem sentetik polimerlerin sınırlamalarından kaçınmak hem de biyobozunurlukları ile çevresel etkilerini azaltmak ve biyoyumluluk sağlamak amacıyla NF'ler üzerine eklenerek, sabitlenerek veya büyütülerek kullanılmaktadır. Alg türleri doğrudan toz özütler olarak kullanılabilir ve alglerden çıkarılan pigmentler, peptitler,

proteinler, fenolik bileşikler ve polimerler de elektrospinning lifleri elde etmek için kullanılır. PEO, PLA, PCL, PDLLA, PVA, PMMA, PHB, PHB-HV, aljinat, jelatin, ipek fibroin ve selüloz asetat gibi ek polimerler de elektrospinning çözümüne dahildir. Alg içeren fiberlerin uygulama alanları arasında doku mühendisliği, yara pansumanı ve gıda ambalajı yer almaktadır.

Sonuç olarak, NF'lerin önemi ve algler tarafından işlevselleştirilme olasılığı derinlemesine vurgulanmıştır. Alglerin çevre dostu ve kirleticilerin bozunmasında etkili olduğu bildirilmiştir ve endüstrideki uygulamalarının NF'ler gibi malzemelerin immobilizasyonu ile zenginleştirilmesi gerekmektedir. Dahası, NF'lerin atık su arıtımındaki mevcut uygulamaları gösterilmiş ve ağır metal, besin maddeleri, radyoaktif maddeler, boya ve pestisitler gibi farklı kirleticilerin daha fazla uzaklaştırılması sağlanmıştır. NF'lerin atık su arıtımında yaygın olarak kullanıldığı ve birçok araştırma makalesinin önemli etkilerini açıkladığı bulunmuştur, ancak diğer malzemelerle işlevselleştirme üzerine daha fazla çalışmanın hala araştırılması gerekmektedir. Gelecekteki beklentiler için, bilim insanlarının özellikle algler olmak üzere NF'lerle birleştirilmiş mikroorganizmaları kullanmaya daha fazla dikkat etmeleri gerekmektedir, çünkü bunlar çevre dostudur ve atık su arıtımında ve çeşitli kirleticilerin iyileştirilmesinde güçlü bir kabiliyete sahiptir. Ayrıca, NF'lerin hazırlanmasında kompozit malzemelere odaklanması, liflerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra suda çözünmezlik ve maliyet etkinliği değerlerinin de korunmasını amaçlamaktadır.

Kaynaklar

- Ahmad, K., Khan, S., Afridi, M., Hassan, A., Shah, M. M., Rasheed, H., ... & Ifqir, H. (2022). Marine macroalgae polysaccharides-based nanomaterials: An overview with respect to nanoscience applications. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 11(1), 156.
- Alghoraibi, I., & Alomari, S. (2018). Different methods for nanofiber design and fabrication. *Handbook of nanofibers*, 1, 46.
- Andersson, R. L., Martínez-Abad, A., Lagaron, J. M., Gedde, U. W., Mallon, P. E., Olsson, R. T., & Hedenqvist, M. S. (2014). Antibacterial properties of tough and strong electrospun PMMA/PEO fiber mats filled with Lanazol—A naturally occurring brominated substance. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(9), 15912-15923.
- Arica, T. A., Isik, T., Guner, T., Horzum, N., & Demir, M. M. (2021). Advances in Electrospun Fiber-Based Flexible Nanogenerators for Wearable Applications. *Macromolecular Materials and Engineering*, 306(8), 2100143.
- Ataei, S., Azari, P., Hassan, A., Pingguan-Murphy, B., Yahya, R., & Muhamad, F. (2020). Essential oils-loaded electrospun biopolymers: A future perspective for active food packaging. *Advances in Polymer Technology*, 2020(1), 9040535.
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2022). *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. CRC press.
- Carlsson, A. S., Van Beilen, J. B., Möller, R., & Clayton, D. (2007). Micro-and macro-algae: utility for industrial applications. *Outputs from the EPOBIO project*, 82.
- Choi, J. I., Kim, M. S., Chung, G. Y., & Shin, H. S. (2017). Spirulina extract-impregnated alginate-PCL nanofiber wound dressing for skin regeneration. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 22, 679-685.
- Comitre, A. A., da Silva Vaz, B., Costa, J. A. V., & de Morais, M. G. (2021). Renewal of nanofibers in *Chlorella fusca* microalgae cultivation to increase CO₂ fixation. *Bioresource Technology*, 321, 124452.
- Çeliközlü, S. (2023). Nanoencapsulation of Bioactive Compounds by Electrospinning Method. In: Yiğit, A. (ed.), *Nanotechnology and Organic Chemistry*. Özgür Publications.
- da Silva Figueira, F., Garcia Gettens, J., Vieira Costa, J. A., de Morais, M. G., Moraes, C. C., & Juliano Kalil, S. (2016). Production of nanofibers containing the bioactive compound C-phycocyanin. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(1), 944-949.

- de Morais, M. G., Kuntzler, S. G., Cruz, C. G., da Silveira, J. T., Costa, J. A. V., & Moreira, J. B. (2025). Potential use of microalgae and Amazonian fruit in electrospun nanofibers in developing innovative food packaging systems. In *Innovative Food Packaging and Processing Technologies* (pp. 417-447). Academic Press.
- Deng, L., Wu, F., Deng, N., & Zuo, Y. (2008). Photoreduction of mercury (II) in the presence of algae, *Anabaena cylindrica*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 91(2-3), 117-124.
- Ebrahimi, F., Sadeghizadeh, A., Neysan, F., & Heydari, M. (2019). Fabrication of nanofibers using sodium alginate and Poly (Vinyl alcohol) for the removal of Cd²⁺ ions from aqueous solutions: adsorption mechanism, kinetics and thermodynamics. *Heliyon*, 5(11).
- El-Sheekh, M., & Abomohra, A. E. F. (Eds.). (2021). *Handbook of algal biofuels: aspects of cultivation, conversion, and biorefinery*. Elsevier.
- Fatehi, P., & Abbasi, M. (2020). Medicinal plants used in wound dressings made of electrospun nanofibers. *Journal of tissue engineering and regenerative medicine*, 14(11), 1527-1548.
- Gonçalves, C. F., Schmatz, D. A., Uebel, L. D. S., Kuntzler, S. G., Costa, J. A. V., Zimmer, K. R., & Morais, M. G. D. (2017). Microalgae biopeptides applied in nanofibers for the development of active packaging. *Polimeros*, 27, 290-297.
- Guschina, I. A., & Harwood, J. L. (2006). Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in lipid research*, 45(2), 160-186.
- Gümüş, N. E. (2025). Nanofiber Applications From Hijiki Macroalgae: Antibacterial and Cytotoxicity Properties in Biocompatible Polymers. *Biopolymers*, 116(1), e23650.
- Horzum, N., Demir, M. M., Muñoz-Espí, R., & Crespy, D. (Eds.). (2019). *Green electrospinning* (Vol. 1, pp. 1-11). Berlin, Germany:: De Gruyter.
- Horzum, N., Demir, M. M., Nairat, M., & Shahwan, T. (2013). Chitosan fiber-supported zero-valent iron nanoparticles as a novel sorbent for sequestration of inorganic arsenic. *RSC advances*, 3(21), 7828-7837.
- Irkin, L. C. (2019). The use of Macroalgae as a Feed Supplement in Fish Diets. *IJTSRD*, 3(5), 2456-6470.
- Jung, S. M., Kim, D. S., Ju, J. H., & Shin, H. S. (2013). Assessment of Spirulina-PCL nanofiber for the regeneration of dermal fibroblast layers. In *Vitro Cellular & Developmental Biology-Animal*, 49, 27-33.
- Karaduman, F. R., Çulha, S. T., & Horzum, N. (2022). Algal nanofibers: Current status and recent developments. *Materials Today Communications*, 33, 104248.

- Karaduman, F. R., Türk Çulha, S., & Horzum, N. (2024). Seaweed Superheroes: Cystoseira barbata-Incorporated Electrospun Fibers for Lead Ion Sequestration. *ACS Applied Bio Materials*, 7(8), 5345-5358.
- Karimzadeh, M., Eslampanah-Seyyedi, E., & Behniafar, H. (2018). Poly (tetramethylene oxide)-coated silica nanoparticles incorporated into poly (4, 4'-oxydiphenylene-pyromellitimide) matrix. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(10), 1093-1099.
- Kılınç, B., Cirik, S., Turan, G., Tekogul, H., & Koru, E. (2013). Seaweeds for food and industrial applications. In *Food industry*. IntechOpen.
- Kim, S. H., Shin, C., Min, S. K., Jung, S. M., & Shin, H. S. (2012). In vitro evaluation of the effects of electrospun PCL nanofiber mats containing the microalgae Spirulina (Arthrospira) extract on primary astrocytes. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 90, 113-118.
- Kim, S. K. (Ed.). (2015). *Springer handbook of marine biotechnology* (pp. 1-1512). Berlin: Springer.
- Ko, S. W., Lee, J. Y., Aguilar, L. E., Oh, Y. M., Park, C. H., & Kim, C. S. (2019). Fabrication of a micro/nano-net membrane using cellulose nanocrystals derived from seaweed. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(4), 2232-2235.
- Kuntzler, S. G., Costa, J. A. V., Brizio, A. P. D. R., & de Moraes, M. G. (2020). Development of a colorimetric pH indicator using nanofibers containing Spirulina sp. LEB 18. *Food Chemistry*, 328, 126768.
- Li, Q., & Liu, S. (2021). Applications of nanocellulose in the food industry. In *Nanocellulose: Synthesis, Structure, Properties and Applications* (pp. 257-285).
- Lim, C. T. (2017). Nanofiber technology: current status and emerging developments. *Progress in polymer science*, 70, 1-17.
- Madany, M. A., Abdel-Kareem, M. S., Al-Oufy, A. K., Haroun, M., & Sheweita, S. A. (2021). The biopolymer ulvan from Ulva fasciata: Extraction towards nanofibers fabrication. *International Journal of Biological Macromolecules*, 177, 401-412.
- Meng, Q., Zhong, S., Gao, Y., & Cui, X. (2022). Advances in polysaccharide-based nano/microcapsules for biomedical applications: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 220, 878-891.
- Meng, W., Zhang, X., Zhang, Y., Zhang, X., Zhu, W., Huang, H., ... & Xu, C. (2023). Poly (vinyl alcohol)/sodium alginate polymer membranes as eco-friendly and biodegradable coatings for slow release fertilizers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(7), 3592-3601.

- Morais, M. G. D., Stillings, C., Dersch, R., Rudisile, M., Pranke, P., Costa, J. A. V., & Wendorff, J. (2015). Biofunctionalized nanofibers using *Arthrospira* (Spirulina) biomass and biopolymer. *BioMed Research International*, 2015(1), 967814.
- Moreira, J. B., de Moraes, M. G., de Moraes, E. G., da Silva Vaz, B., & Costa, J. A. V. (2018). Electrospun polymeric nanofibers in food packaging. In *Impact of nanoscience in the food industry* (pp. 387-417). Academic Press.
- Moreira, J. B., Kuntzler, S. G., Terra, A. L. M., Costa, J. A. V., & de Moraes, M. G. (2020). Electrospun nanofibers: Fundamentals, food packaging technology, and safety. In *Food packaging* (pp. 223-254). CRC Press.
- Mouritsen, O. G. (2013). *Seaweeds: edible, available, and sustainable*. University of Chicago Press.
- Pereira, L. (2021). *Macroalgae*. *Encyclopedia 2021*, 1, 177–188.
- Pérez-García, F., Klein, V. J., Brito, L. F., & Brautaset, T. (2022). From brown seaweed to a sustainable microbial feedstock for the production of riboflavin. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 863690.
- Perumal, A. B., Nambiar, R. B., Sellamuthu, P. S., & Sadiku, E. R. (2019). Application of biosynthesized nanoparticles in food, food packaging and dairy industries. In *Biological Synthesis of Nanoparticles and Their Applications* (pp. 145-158). CRC Press.
- Petruz, A., Faez, R., & Souza, C. F. (2024). Enhancing marine algae composites with cellulose nanofibrils for sustainable nutrient management. *Cellulose*, 31(9), 5763-5777.
- Poddar, M., Lakshmi, G. B. V. S., Sharma, M., Chaudhary, N., Nigam, S., Joshi, M., & Solanki, P. R. (2022). Environmental friendly Polyacrylonitrile nanofiber mats encapsulated and coated with green algae mediated Titanium oxide nanoparticles for efficient oil spill adsorption. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113971.
- Polat, N. H., & Kınalı, N. A. (2019). Curcumin-loaded bio-based electrospun polyurethane scaffolds. *Cumhuriyet Science Journal*, 40(1), 125-135.
- Raghunathan, S., Kandasamy, S., Pillai, A. B., Senthilathiban, D. P., Thajuddin, N., Kamli, M. R., ... & Davoodbasha, M. (2024). Synthesis of biocomposites from microalgal peptide incorporated polycaprolactone/ κ -carrageenan nanofibers and their antibacterial and wound healing property. *International Journal of Pharmaceutics*, 655, 124052.
- Terra, A. L. M., Kuntzler, S. G., Costa, J. A. V., de Moraes, M. G., & Moreira, J. B. (2023). Electrospun Nanofibers Based on Microalgae Pigments and

- Their Applications in Intelligent Food Packaging. *Electrospun Nanofibres*, 236-249.
- Wang, L., Zhang, C., Gao, F., Mailhot, G., & Pan, G. (2017). Algae decorated TiO₂/Ag hybrid nanofiber membrane with enhanced photocatalytic activity for Cr (VI) removal under visible light. *Chemical Engineering Journal*, 314, 622-630.
- Yousif, Y. M., Hassan, O. M., & Ibraheem, I. J. (2024). Removal of heavy metal ions from water using nanocellulose-based membranes derived from macroalgae Chara corallina. *Journal of Degraded & Mining Lands Management*, 11(3).
- Zamel, D., & Khan, A. U. (2021). Bacterial immobilization on cellulose acetate based nanofibers for methylene blue removal from wastewater: Mini-review. *Inorganic Chemistry Communications*, 131, 108766.
- Zhang, J., Zhan, P., & Tian, H. (2021). Recent updates in the polysaccharides-based Nano-biocarriers for drugs delivery and its application in diseases treatment: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 115-128.
- Zhang, W., He, Z., Han, Y., Jiang, Q., Zhan, C., Zhang, K., ... & Zhang, R. (2020). Structural design and environmental applications of electrospun nanofibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 106009.
- Zhang, Z., Chen, Z., Shang, L., & Zhao, Y. (2021). Structural color materials from natural polymers. *Advanced Materials Technologies*, 6(11), 2100296.

2. Bölüm

Alg Tabanlı Nanopartiküllerin Kozmesötik Formülasyonlarda Kullanımı: Biyoaktif Özellikler ve Nanoteknolojik Perspektifler

Esra ARMAĞAN¹, Osman ARMAĞAN²

1. Giriş

Kozmetikler, insanlar tarafından uzun zamandır kullanılan ve genellikle cilt yenileyici etkileri nedeniyle tercih edilen ürünlerdir. Bu ürünler, genellikle harici olarak uygulanır ve doğal ya da yapay kaynaklardan elde edilen tek bir maddeden veya maddelerin birleşiminden oluşabilir. Kozmetikler, “vücudun yapısını veya işlevlerini değiştirmeden, insan vücuduna temizlik sağlamak, güzelleştirmek, çekiciliği artırmak veya görünümü değiştirmek amacıyla uygulanan ürünler olarak tanımlanır (Gupta ve ark., 2022). Bir başka tanıma göre ise kozmetikler “epidermis, saç, tırnak, dudak, dış genital organlar, dişler veya ağız mukozası gibi vücudun dış bölümleriyle temas etmek üzere tasarlanmış; bu bölgeleri temizlemek, koku vermek, görünümünü değiştirmek, korumak ya da sağlıklı tutmak amacıyla kullanılan maddeler” olarak tanımlanır (Dhull ve ark., 2015).

Kozmesötikler, geleneksel kozmetik ürünlerden farklı olarak, yalnızca yüzeysel etki göstermekle kalmayıp, aynı zamanda tedavi edici özelliklere sahip aktif bileşenler içeren ürünlerdir. Bu ürünler; hasarlı saç, kırışıklıklar, güneşe bağlı yaşlanma (fotoyaşlanma), cilt kuruluğu, lekeler, aşırı pigmentasyon gibi çeşitli cilt ve saç problemlerinin giderilmesinde kullanılır. Kozmesötikler, ilaçlar ile güzellik ürünleri arasında bir köprü işlevi görerek, görünümde somut ve gözle görülür bir iyileşme sağlamayı amaçlar (Fatima ve ark., 2021). Günümüzde kozmesötikler, kişisel bakım sektörünün en hızlı büyüyen alanlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bireylerin kendi görünüm ve ihtiyaçlarına göre ürün tercih etmesiyle bu pazar da hızla genişlemektedir (Kaul ve ark., 2018). Bu alanda, özellikle nanoteknoloji destekli ürünlerin (nanokozmesötikler) araştırılması, geliştirilmesi ve uygulanmasına yönelik çalışmalar hızla artmaktadır.

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Ermenek Uysal ve Hasan Kalan Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Karaman, Türkiye,
ORCID: 0000-0002-5414-2392

² Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Karaman, Türkiye,
ORCID: 0000-0002-7860-0909

Nanoteknoloji, 1-100 nanometre aralığında çalışan ve kozmesötikler dahil birçok sektörde büyük değişimlere yol açan güçlü bir teknolojidir (Gupta ve ark., 2022). Kozmetik ve kozmesötik ürünlerin geliştirilmesinde nanomalzemelerin kullanılması, bu ürünlerin “nanokozmetik” veya “nanokozmesötik” olarak adlandırılmasına neden olmuştur. Bu teknolojinin getirdiği başlıca avantajlar; ürünün etki süresinin uzaması, biyoyararlanımının artması ve estetik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Nanoteknolojiyle geliştirilen kozmesötikler, geleneksel ürünlere kıyasla daha küçük boyutlu olup, daha geniş bir yüzey alanına sahiptir. Bu sayede cilde daha iyi yapışır, ciltte daha homojen dağılır ve etkili sonuçlar sunar. Üreticiler, nano boyutlu bileşenleri kullanarak ürünlerin UV korumasını, cilde nüfuz etme yeteneğini, renk, koku salınımı, bitiş kalitesi, yaşlanma karşıtı etkiler gibi özelliklerini geliştirmeyi hedeflemektedir. Ayrıca, bu bileşenler sayesinde aktif maddelerin kontrollü bir şekilde iletimi, belirli bölgelere hedeflenmesi, biyoyumuluğun artırılması ve ilaç taşıma kapasitesinin yükseltilmesi sağlanmaktadır. Bu gelişmeler, nanokozmesötik ürünlerin tüketiciler arasında daha popüler hale gelmesini sağlamakta; ancak aynı zamanda güvenlik açısından daha fazla araştırma yapılmasını da gerekli kılmaktadır. Özellikle yaşlanma karşıtı ürünlerde sıkça kullanılan bu teknolojiler; cilt, saç ve tırnak bakımında da yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu ürünler, saç ve tırnakların büyümesini desteklediği, yapısını koruduğu ve nemlendirme gücünü artırdığı iddiasıyla pazarlanmaktadır (Dhawan ve ark., 2020).

Nanoteknolojinin kozmesötiklere entegrasyonu, ürün etkinliğinde önemli iyileştirmeler sunarak cilt bakımında yeni bir dönemi başlatmıştır. Nanoskala malzemelerin benzersiz özelliklerinden faydalanılarak, cilde daha derinlemesine nüfuz edebilen ve cilt problemlerini daha etkili şekilde hedef alabilen formülasyonlar geliştirilebilmektedir. Bu sayede, aktif bileşenlerin belirli cilt katmanlarına ulaşması sağlanarak, terapötik etkiler optimize edilmekte ve ürün performansı artırılmaktadır. Ayrıca, küçük parçacık boyutları ciltte daha iyi emilim sağlar ve nemlendirme, yaşlanma karşıtı bakım ve cilt yenileme gibi konularda daha etkili sonuçlar elde edilir. Bu teknoloji, daha hedefli, kalıcı ve etkili sonuçlar vadeden cilt bakım ürünleri için umut verici bir yaklaşımı temsil eder. Ancak tüm bu faydalarına rağmen nanokozmesötiklerin bazı sınırlamaları da vardır. Bunlar arasında ürün stabilitesi, büyük ölçekli üretim zorlukları, maliyet ve toksisite gibi sorunlar yer alır. Özellikle nanopartiküllerin (NP) küçük boyutları, geniş yüzey alanları ve pozitif yüzey yükleri, biyolojik sistemlerle etkileşim potansiyelini artırmakta ve bu da olası toksisite risklerine yol açabilmektedir. Ayrıca, farklı uygulama yollarıyla NP’lerin doza bağlı toksik etkileri ortaya çıkabilir. Bir aktif bileşenin vücutta ne kadar işe yaradığı (biyoyararlanımı), genellikle dozdan daha fazla etkilenir ve bu durum, özellikle

kozmetik ürünlerde dikkatle değerlendirilmelidir (Gupta ve ark., 2022). Bu nedenle, nanoformülasyonların geliştirilmesinde en büyük endişelerden biri, aktif maddelerin kana geçiş miktarını artırarak istenmeyen toksik etkilere yol açma riskidir (Souto ve ark., 2020).

Deniz kaynaklı doğal ürünlerin, yaşlanma karşıtı etkiye sahip aktif bileşenler açısından potansiyel bir kaynak olarak kullanımı uzun süre sınırlı kalmıştır. Ancak son yıllarda teknoloji ve hasat yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde daha önce keşfedilmemiş pek çok biyoaktif molekül ortaya çıkarılmıştır. Dünya okyanusları, gezegenin yüzeyinin %70'inden fazlasını kaplamakta ve farklı yaşam alanları ile zaman zaman aşırı koşullar barındırmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, özellikle kozmetik sektöründe kullanılabilecek çeşitli kimyasal bileşikler açısından değerli bir kaynak oluşturmaktadırlar (Mittal ve ark., 2023). Algler, içeriklerindeki sekonder metabolitler, proteinler, peptitler ve pigmentler sayesinde “nano-biyofabrika” gibi davranabilirler. Bu zengin içerikleri nedeniyle çevre dostu “yeşil sentez” uygulamalarında giderek daha popüler hale gelmektedirler (Zhu ve ark., 2018; Yang ve ark., 2023). Ayrıca, hızlı büyürler, kolay hasat edilirler ve düşük maliyetle büyük ölçeklerde üretilebilirler; bu da onları biyolojik NP sentezi için ideal hale getirir. Algler, yeryüzündeki en ilkel canlılardan biri olarak, fotosentez yapan organizmalar arasında yer alır. Aynı zamanda metalleri biriktirme ve bunları NP'lere dönüştürme yetenekleriyle de dikkat çekerler. Mavi-yeşil algler (Cyanophyceae), kahverengi algler (Phaeophyceae), yeşil algler (Chlorophyceae) ve kırmızı algler (Rhodophyceae) gibi farklı alg türlerinden, çeşitli metal ve metal oksit NP'leri üretilebilmektedir. Bu alg kaynaklı NP'ler, cilt bakımı ve estetik alanlarında umut vadeden bir teknolojik yenilik olarak öne çıkmaktadır. NP'lerin kullanımı, kozmesötik ürünlerin hem etkinliğini hem de güvenliğini artırabilecek avantajlar sunmaktadır (Mandal ve ark., 2023). Günümüzde kozmetik endüstrisi, çevreye duyarlı ve sağlık odaklı ürünlere yönelik artan tüketici talepleri doğrultusunda, doğal ve sürdürülebilir içeriklere daha fazla yer vermeye başlamıştır. Bu bağlamda mikroalglerden elde edilen NP'ler, doğadan gelen güçlü bir bileşen olarak öne çıkmaktadır.

Alg NP'leri, sadece sentetik bileşenlerin yerine geçmekle kalmaz; aynı zamanda antioksidan etkiler, UV koruması ve cildi besleyici özellikler gibi ek faydalar da sağlar. Bu bölümün amacı, alg kaynaklı NP'lerin kozmetik alanındaki çeşitli kullanım alanlarını kapsamlı bir şekilde incelemektir.

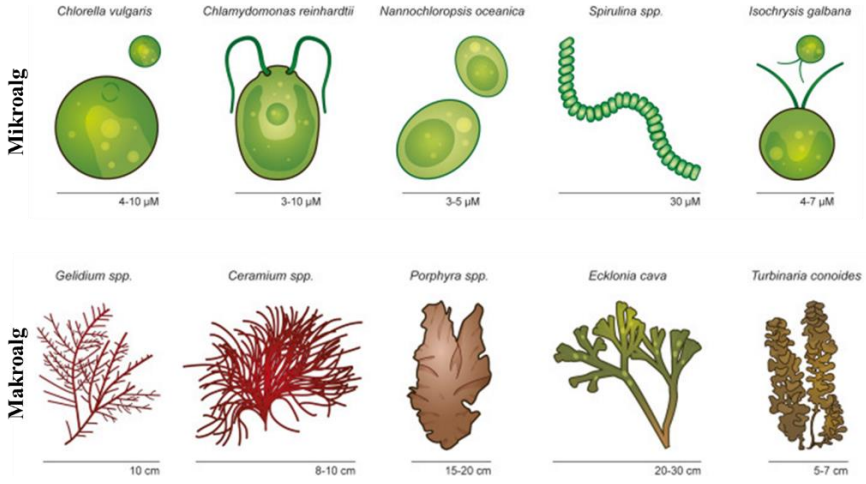
2. Alg Türevlerinin Nanopartikül Sentezinde Kullanımı

Alglerle yapılan NP sentezi, geleneksel kimyasal yöntemlere göre daha çevre dostu ve daha az toksik olduğu için sürdürülebilir üretim açısından oldukça cazip

bir seçenektir (Rastogi ve ark., 2017). Kimyasal yöntemler genellikle zararlı kimyasallar kullanır ve toksik atıklar oluşturur. Buna karşılık, alg temelli sentez, su bazlı ortamlarda gerçekleşir ve tamamen mikroalglerin doğal biyolojik aktivitelerine dayanır. Bu durum, çevreye ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri azaltır.

Chlorophyta, Charophyta ve Bacillariophyta gibi farklı mikroalg grupları, metal iyonlarını indirgeme ve bunları metalik NP'lere dönüştürme yeteneğine sahiptir (Ebrahiminezhad ve ark., 2017). Bu süreçte, algler metal iyonları içeren bir ortamda büyütülür. Büyüme sırasında çevrelerine çeşitli organik maddeler ve enzimler salgırlar. Bu maddeler, ortamdaki metal iyonlarının (örneğin gümüş veya altın) indirgenerek NP haline dönüşmesini sağlar. Bu yöntem sayesinde, oluşan NP'lerin boyutu ve şekli daha iyi kontrol edilebilir. Bu da nanoteknoloji uygulamaları için büyük bir avantaj sağlar. Geleneksel yöntemlerin aksine, burada yüksek enerji kullanımı veya zararlı kimyasallara gerek kalmaz. Sonuç olarak, mikroalgler kullanılarak NP üretimi; alglerin metal iyon içeren ortamlarda yetiştirilmesi, bunların salgıladığı enzimlerle iyonların indirgenmesi ve NP'lerin oluşması süreçlerini içerir. Bu biyolojik yöntem, özellikle kozmesötikler gibi alanlarda, çevreye zarar vermeden, kontrollü özelliklere sahip NP'ler üretmek için umut vadeden bir alternatiftir.

Farklı mikroalg ve makroalg grupları (Şekil 1), NP üretiminde kullanılmak üzere araştırılmış ve her biri kendine özgü özellikleri ve kullanım alanlarıyla dikkat çekmiştir (Ebrahiminezhad ve ark., 2017). Seçilen alg türü, elde edilen NP'lerin özelliklerini ve hangi alanlarda kullanılabileceğini doğrudan etkiler. Alg kökenli NP'ler, özellikle kozmesötik alanında sahip oldukları özellikler sayesinde büyük bir potansiyele sahiptir. Genellikle birkaç nanometre ile mikrometre arasında değişen boyutlara sahip bu parçacıklar, mikroalglerin işlenmesi yoluyla elde edilir (Mandal ve ark., 2023). Kahverengi, kırmızı, mavi-yeşil ve yeşil algler, NP üretimi için kullanılan başlıca alg türlerindendir. Her biri, NP sentezi ve uygulama yönünden farklı avantajlar sağlar. Bu alg NP'lerin en önemli avantajlarından biri, doğal olarak biyoyoumlu olmaları ve toksik olmamalarıdır. Kimyasal yollarla üretilen NP'lerin aksine, alg NP'leri zararlı kimyasallar içermez ve stabilizasyon için ek maddelere ihtiyaç duymaz. Bu özellikleri sayesinde özellikle cilt bakım ürünlerinde güvenli bir şekilde kullanılabilirler; çünkü kozmetik uygulamalarda insan cildiyle uyumluluk ve güvenlik temel önceliklerdendir (Behera ve ark., 2023).

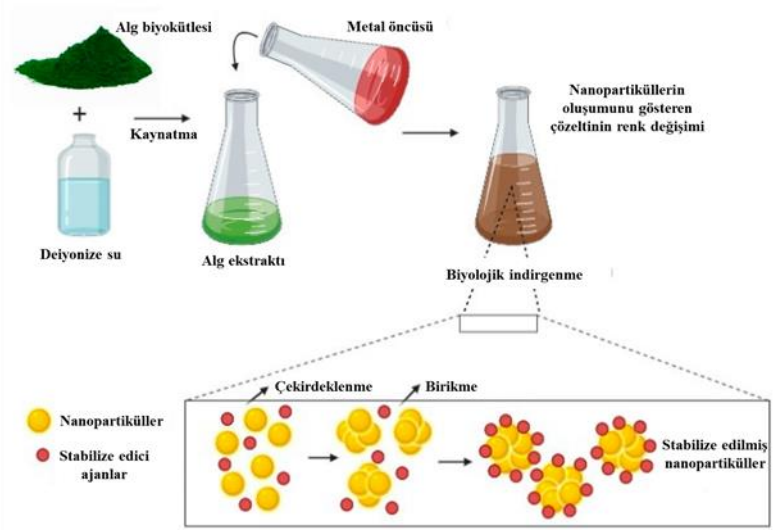


Şekil 1. Nanopartikül üretiminde kullanılan bazı alg türleri (Aslam ve ark., 2021).

Ayrıca, alg NP'leri, biyoaktif maddelerin cilde daha etkili taşınmasını sağlayarak kozmesötik formülasyonlara önemli katkılar sunar. Yüksek yüzey-hacim oranları sayesinde, antioksidanlar, vitaminler ve peptitler gibi etken maddeleri hem kapsülleyebilir hem de kontrollü şekilde salabilirler. Bu da cilt üzerinde maksimum fayda ve etkinlik sağlar (Raj ve ark., 2012).

3. Alg Bazlı Nanopartiküllerin Sentez Yöntemleri ve Karakterizasyonu

Alglerle metal NP'lerin sentezlenmesi süreci, hem canlı hem de kurutulmuş biyokütle kullanılarak yapılabilir. Canlı algler, güçlü hücresel yapıları sayesinde NP'lerin sentezini kolaylaştırır ve bu süreçte oluşan NP'ler çevredeki kültür ortamına salınabilir. Diğer taraftan, cansız ve kurutulmuş alg biyokütlesi, NP'lerin hücre dışı şekilde üretimi için kullanılabilir. Alglerin, metalik NP'lerin biyosentezi için kullanılması, geleneksel yöntemlere göre daha uygun, daha az toksik ve çevre dostu bir alternatif sunar (Khan ve diğerleri, 2022). Alg NP'lerin üretimi, çeşitli biyolojik mekanizmaların çalışmasını gerektirir. Algler, metal iyonlarını biriktirme ve bunları indirgeme yeteneğine sahiptir, bu da NP'lerin oluşumuna yol açar (Şekil 2). Bu sentez süreci alg hücrelerinin içinde, hem hücre içi hem de hücre dışı olarak gerçekleşebilir, bu da üretim sürecine esneklik ve çok yönlülük sağlar (Khan ve diğerleri, 2022).



Şekil 2. Alg aracılı inorganik/metalik nanopartiküllerin sentezi için genel mekanizma (Uzair ve ark., 2020).

Hücre içi sentez, alg organizmalarının hücresel yapılarında gerçekleşir ve bu süreç, metabolik reaksiyonlar sırasında indirgeme ajanlarının salınmasıyla metal iyonlarının indirgenmesine ve NP'lerin oluşmasına yardımcı olur. *Spirulina platensis* ve *Tetraselmis kochinensis* gibi alg türleri, hücre içi NP sentezinde oldukça verimli bir şekilde çalışır. Hücre dışı sentez ise, metal iyonlarının alg hücrelerinin dış yüzeyine bağlandığı çevrede gerçekleşir. Bu süreçte, alglerde bulunan metabolitler metal iyonlarını indirger ve NP'ler oluşur. Hücre dışı sentez, saflaştırma ve ölçeklenebilirlik açısından büyük avantajlar sunar. *Turbinaria conoides* ve *Sargassum myriocystum* gibi alg türleri, bu yöntemi etkili bir şekilde kullanmıştır.

Algler, hem deniz hem de tatlı su ortamlarında yaygın olarak bulunan, nanomalzeme üretimi için oldukça umut verici organizmalardır. Bu algler, ekonomik uygulanabilirlik, çoklu kullanım kapasiteleri ve etkili metal adsorpsiyon özellikleri gibi birçok fayda sunar. Ayrıca, algler ağır metal iyonlarını aşırı miktarda biriktirme yeteneğine sahiptir ve bu metallerin NP'lere dönüştürülmesini kolaylaştırır, bu da onları biyo-nanomalzeme üretimi için çok uygun hale getirir. NP sentezleme süreci, pH seviyesi, öncül malzemelerin konsantrasyonu, reaksiyon süresi, maruz kalma süresi ve sıcaklık gibi bir dizi fiziksel parametreyi içerir. Bu parametreler, NP'lerin boyutlarını ve yapısını değiştirebilir ve bir araya gelmelerini engelleyebilir. Alg özleri, karbonhidratlar, vitaminler, besinler, yağlar, doymamış yağ asitleri, antioksidanlar, pigmentler ve fikobilinler gibi birçok biyoaktif bileşenden oluşur ve bu bileşikler NP'lerin

sentezi sırasında etken veya dengeleyici olarak görev yapabilir (Dini, 2023; Bhukal ve ark., 2022).

Farklı alg türleri, metalik NP'leri biyolojik olarak sentezleme sürecinde kullanılmıştır. Örneğin, *Oscillatoria limnetica* ve *Nostoc ellipsosporum* gibi siyanobakteriler, altın NP'lerin hücre içi sentezinde kullanılmıştır. *Caulerpa racemose*, *Ulva fasciata* ve *Chlorella pyrenoidosa* gibi yeşil algler, gümüş ve çinko oksit NP'lerin sentezinde kullanılmıştır. Kahverengi algler, özellikle *Bifurcaria bifurcate* ve *Padina tetrastrum*, NP sentezinde de kullanılmıştır (Gupta ve ark., 2022).

Algler tarafından üretilen NP'ler, biyolojik görüntüleme alanında umut verici bir potansiyele sahiptir. Manyetik rezonans görüntüleme (MRI), floresan tabanlı görüntüleme ve elektron mikroskobu (TEM, SEM, REM) gibi farklı görüntüleme yöntemleri, NP'lerin gözlemlenmesi ve özelliklerinin araştırılması için kullanılmıştır. Bu yöntemler, kanser tedavisi, çevresel kirleticilerin belirlenmesi ve güneş kremi gibi ürünlerin potansiyel zararlarının değerlendirilmesi gibi alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Alg NP'lerin karakterizasyonu için çeşitli teknikler kullanılır (Ghosh ve ark., 2012). Bunlar arasında transmisyon elektron mikroskobu (TEM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), dinamik ışık saçılması (DLS) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) yer alır. Bu yöntemler, alg NP'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi edinmeyi sağlar. Özellikle, TEM ve SEM, NP'lerin morfolojisini, boyutunu ve şeklini görselleştirmede kullanılır. TEM, yüksek çözünürlükteki görüntülerle NP'lerin yapısını ayrıntılı bir şekilde gösterirken, SEM yüzey görüntüleme ve üç boyutlu bilgiler sunar. XRD, alg NP'lerin kristal yapısını belirlemek için kullanılır ve bu, NP'lerin fazlarını ve kristal yapısal özelliklerini analiz etmede önemli bir araçtır. DLS, alg NP'lerinin boyut dağılımını ve yüzey yükünü ölçer. Bu teknik, NP'lerin hidrodinamik çapı ve yüzey yükü hakkında bilgi verir, bu da cilt bakım ürünlerinin etkileşimleri ve dağılılırlığı için önemlidir. FTIR ise NP'lerin kimyasal bileşimini ve fonksiyonel gruplarını analiz etmek için kullanılır, bu da NP'lerin moleküler yapısı hakkında önemli bilgiler sunar. Bu karakterizasyon teknikleri, alg NP'lerinin kozmetikteki potansiyelini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. NP'lerin fiziksel özellikleri, kristal yapıları, boyut dağılımları, yüzey yükleri ve kimyasal bileşimleri, kozmetik ve cilt bakım formüllerinde kullanılabilirliklerini belirlemek için gereken temel bilgileri sağlar.

4. Alg Nanopartiküllerinin Özellikleri ve Nitelikleri

Alg NP'leri, kozmetik ürünlerde kullanılmak üzere ideal özelliklere sahip, iyi tanımlanmış boyut, şekil ve yüzey özellikleri gösterir (Ghosh ve ark., 2012). Bu

özellikler, mikroalg türlerinin seçimi ve büyüme koşullarının ayarlanmasıyla özelleştirilebilir. Alg NP'lerinin kontrollü şekilde sentezlenmesi, cilt bakımı uygulamaları için istenen özelliklere sahip NP'ler üretilmesini sağlar.

Mikroalg aracılı biyoredüksiyonla metal NP'leri sentezlemek için yapılan araştırmalarda, her biri farklı özelliklere ve potansiyel uygulamalara sahip çeşitli mikroalg türleri incelenmiştir. Özellikle yeşil mikroalgler olarak bilinen Chlorophyta türleri, metal iyonlarını etkili bir şekilde indirgeme yetenekleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu algler, kontrollü boyut ve şekil özelliklerine sahip NP'ler üretebilme yetenekleriyle nanoteknolojide değerli adaylardır (Ebrahimezhad ve ark., 2017). Yeşil bir alg grubu olan Charophyta, NP sentezi konusunda umut verici bir başka mikroalg türüdür. Bu algler, evrimsel konumları ve biyokimyasal süreçleri sayesinde özel NP'lerin üretimi için fırsatlar sunmaktadır. Yapılan araştırmalar, Charophyta'nın kozmetik ve cilt bakımı gibi alanlarda özel NP'ler yaratma potansiyelini ortaya koymuştur. (Ebrahimezhad ve ark., 2017). Bir diğer dikkat çeken mikroalg grubu ise Bacillariophyta olarak bilinen diatomlardır. Diatomlar, karmaşık silika kabuklarına sahip olup bu yapılar, metal NP'lerinin belirli şekil ve boyutlarda oluşması için şablon görevi görebilir. Diatom tabanlı yöntem, NP'lerin özellikleri üzerinde hassas kontrol sağlamaya olanak tanır ve bu sayede kozmetikler dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulama imkanı sunar (Ebrahimezhad ve ark., 2017).

NP sentezinde kullanılan mikroalg türünün seçimi, elde edilen NP'lerin özelliklerini ve kullanım alanlarını önemli ölçüde etkiler. Chlorophyta, Charophyta ve Bacillariophyta gibi çeşitli mikroalg grupları, farklı endüstriyel ve kozmetik amaçlar için özel metal NP'lerin mikroalgler aracılığıyla biyolojik olarak üretilmesinde (biyoredüksiyon) büyük bir potansiyel sunmaktadır. Alg NP'leri, yüksek yüzey alanlarının hacimlerine oranla çok büyük olması sayesinde reaktiflikleri artar ve cilt bakımında kullanılan aktif maddelerin etkili bir şekilde içlerine hapsedilmesi için ideal hale gelir (Mohanpuria ve ark., 2008). Bu özel yapı, alg NP'lerini peptitler, vitaminler ve antioksidanlar gibi biyoaktif maddeler için mükemmel taşıyıcılar yapar ve bu maddelerin cilde hedeflenmiş bir şekilde ulaşımını kolaylaştırır. Yüksek yüzey-hacim oranı, alg NP'lerine kozmetik ve dermokozmetik ürünlerde değerli özellikler kazandırır (Mohanpuria ve ark., 2008). Bu özellik, NP'lerin yüzey alanının, daha büyük parçacıklara veya normal malzemelere göre çok daha fazla olmasından kaynaklanır. Bu durum, etkileşim için daha geniş bir yüzeyin mevcut olması anlamına gelir. Cilt bakımı ve kozmetik formülasyonlarında bu durum özellikle faydalıdır. Geniş yüzey alanları sayesinde alg NP'leri, biyoaktif maddeleri etkili bir şekilde içlerine alabilir ve cilde taşıyabilir (Mohanpuria ve ark., 2008). Peptitlerden vitaminlere ve antioksidanlara kadar çeşitli biyoaktif bileşikler, cilt sorunlarını hedef alan cilt

bakım ürünlerinin temel bileşenleridir. Alg NP'lerinin yüksek yüzey-hacim oranı, bu biyoaktif maddelerin ciltle kolayca etkileşime girmesini sağlayarak reaktifliklerini artırır. Bu artan reaktiflik, daha iyi emilime, cilde daha iyi nüfuz etmeye ve bu bileşiklerin cildin belirli katmanlarına hedeflenmiş olarak iletilmesine yardımcı olur (Mohanpuria ve ark., 2008). Sonuç olarak, alg NP'leri içeren cilt bakım ürünleri, yaşlanma karşıtı, UV koruması, cilt beyazlatma ve genel cilt sağlığı gibi konularda daha etkili ve odaklanmış çözümler sunabilir.

Alg NP'lerinin sahip olduğu yüksek yüzey-hacim oranı, onların reaktifliklerini ve biyoaktif maddeleri etkili bir şekilde içlerine alma ve taşıma yeteneklerini artırmada kritik bir rol oynar. Bu özellik, alg NP'lerini çeşitli cilt bakım bileşenleri için değerli taşıyıcılar yaparak, kozmetik uygulamalardaki etkinliklerine ve cilt bakım sektöründe çığır açma potansiyellerine katkıda bulunur. Alg NP'lerinin bu benzersiz özellikleri, biyoaktif maddeler için taşıyıcı görevi görmelerini, cilde daha iyi nüfuz etmelerini ve hedeflenen bölgelere ulaşmalarını sağlar (Pimsin ve ark., 2025). Ayrıca, yüksek yüzey-hacim oranları sayesinde cilt bakım bileşenlerini etkili bir şekilde içlerine alarak, kozmetik formülasyonlara eklendiklerinde bu bileşenlerin kararlılığını ve vücut tarafından kullanılabilirliğini artırır. Bu NP'lerin UV koruması, yaşlanma karşıtı etki, cilt beyazlatma özelliği ve cilt bakım ürünlerinde biyoaktif maddelerin daha iyi iletilmesi gibi potansiyelleri de bulunmaktadır. Alg NP'lerinin bu belirgin özellikleri, onları çok çeşitli kozmetik uygulamalar için son derece uygun hale getirir. Özellikle yüksek yüzey-hacim oranları, onları biyoaktif maddeler için ideal taşıyıcılar yapar ve bu da cilt bakım formüllerindeki etkinliklerinin temelini oluşturur.

Sonuç olarak, alg NP'leri biyoaktif bileşenleri etkili bir şekilde içlerine hapsederek kozmetik ürünlere eklendiklerinde bu bileşenlerin kararlılığını ve cilt tarafından emilimini artırır. Bu da cilde hedeflenen faydaların ulaşmasını sağlayarak daha güçlü cilt bakım ürünleri ortaya çıkarır. Ancak alg NP'lerinin faydaları sadece bu kadarla sınırlı değildir. Benzersiz özellikleri sayesinde kozmetik ve cilt bakım alanlarında çok yönlü kullanım imkanı sunarlar. Örneğin, geniş yüzey alanları sayesinde UV ışınlarını etkili bir şekilde dağıtabilir ve emebilirler. Bu özellik, doğal bir güneş koruması sağlayarak güneş kremi ve benzeri ürünlerde cildi zararlı UV ışınlarından koruyan değerli bir bileşen olmalarını sağlar. Dahası, aynı yüksek yüzey-hacim oranı, biyoaktif maddelerin cilde daha iyi nüfuz etmesine ve hedeflenen bölgelere ulaşmasına yardımcı olur. Bu, alg NP'lerinin antioksidanları ve peptitleri cildin daha derin katmanlarına etkili bir şekilde taşıyabilmesi anlamına gelir ve bu da gelişmiş yaşlanma karşıtı etkiler sunar. Ek olarak, melanin üretimini engelleme potansiyelleri sayesinde cilt

tonunu eşitlemeyi hedefleyen ürünlerde aranan bir özellik olan cilt beyazlatma etkisine katkıda bulunurlar (Pimsin ve ark., 2025).

Özetle, alg NP'lerinin benzersiz özellikleri, özellikle yüksek yüzey-hacim oranları, onları kozmetik uygulamalar için oldukça ideal kılar. Biyoaktif maddeler için mükemmel taşıyıcılar olmalarının yanı sıra, UV korumasını artırır, yaşlanma karşıtı etkilere destek olur, cilt beyazlatmayı kolaylaştırır ve cilt bakım bileşenlerinin hedeflenen bölgelere iletilmesini iyileştirir. Tüm bu özellikler, alg NP'lerini gelişmiş ve etkili cilt bakım ürünlerinin formülasyonunda vazgeçilmez bir kaynak haline getirir.

5. Alg Nanopartiküllerinin Önemi

Mikroalglerden elde edilen alg NP'leri, kendilerine has özellikleri ve kozmetik ile dermokozmetik ürünlerdeki potansiyel faydaları sayesinde giderek daha fazla dikkat çekmektedir (Ghosh ve ark., 2012). Mikroalgler, biyolojik indirgeme süreçleri aracılığıyla NP üretebilme yeteneğine sahiptir ve bu, NP üretimi için sürdürülebilir ve çevreye duyarlı bir yöntem sunmaktadır. Chlorophyta, Charophyta ve Bacillariophyta gibi farklı mikroalg türleri, biyolojik indirgeme süreçleri yoluyla NP sentezleme konusunda özel bir yeteneğe sahiptir. NP üretimine yönelik bu doğal ve çevreye duyarlı yaklaşım, sürdürülebilir kozmetik bileşenlerine olan artan taleple mükemmel bir şekilde örtüşmektedir. Alg NP'lerinin öneminin temel nedenlerinden biri, doğal olarak insan cildine uyumlu olmalarıdır. Doğrudan cilde uygulanan ürünlerde güvenlik ve cilt dostu olma önceliklidir. Doğal sucul ortamlarda yaşayan mikroorganizmalardan elde edilen alg NP'leri cilt tarafından kolayca kabul edilir ve bu da olumsuz reaksiyon riskini azaltır. Bu uyumluluk, onları cilt bakım ürünleri geliştirmek için cazip bir seçenek haline getirir ve hassas ciltler de dahil olmak üzere birçok cilt tipi için uygun olmalarını sağlar. Dahası, alg NP'leri, kozmetik ürünlerde özellikle faydalı olan benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir (Ghosh ve ark., 2012). Küçük boyutları ve yüzey alanlarının hacimlerine oranla yüksek olması, cilt hücreleri ve aktif bileşenlerle etkili bir şekilde etkileşime girmelerini sağlar. Bu da cilt tarafından daha iyi emilmelerine ve faydalı cilt bakım bileşenlerinin cilde daha etkili bir şekilde taşınmasına olanak tanır. Bu özellik, yaşlanma karşıtı ve cilt beyazlatmadan güneş korumasına kadar çeşitli cilt sorunlarını etkili bir şekilde çözeabilen kozmetik ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlar.

Cilde uyumlu olmaları ve olumlu fizikokimyasal özelliklerinin yanı sıra, alg NP'leri kozmetik endüstrisine NP sentezi için sürdürülebilir bir alternatif sunar (Ghosh ve ark., 2012). Geleneksel NP üretim yöntemleri genellikle zararlı kimyasallar ve çok enerji gerektiren süreçler içerir ve bu da çevresel sorunlara katkıda bulunur. Öte yandan, algler aracılığıyla biyosentez, mikroalglerin doğal

süreçlerini kullanarak NP üretiminin çevresel etkisini azaltır. Sürdürülebilirlik kozmetik sektöründe giderek önem kazandıkça, alg NP'leri tüketicilerin ve endüstrinin çevreye duyarlı ürünlere olan talepleriyle uyum içindedir. Özetle, alg NP'lerinin kozmetik ve cilt bakım alanındaki önemi, cilde uyumlu olmaları, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri ve çevre dostu üretim süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Bu NP'ler, çeşitli cilt sorunlarına yönelik güvenli, etkili ve sürdürülebilir çözümler sunarak cilt bakım sektöründe önemli bir değişim yaratma potansiyeline sahiptir ve modern kozmetik formülasyonlarındaki önemlerini giderek artırmaktadır.

Mikroalgler, genellikle çeşitli sularda yaşayan tek hücreli, fotosentez yapan canlılardır. Hızlı büyürler ve çeşitli biyoaktif bileşikler üretebilirler. Özel yöntemlerle işlendiklerinde, bu mikroalgler benzersiz özelliklere sahip NP'ler oluşturur ve bu da onları kozmetik ürünlerin geliştirilmesi için değerli bir kaynak haline getirir. Alg NP'leri, doğal kaynaklı olmalarıyla bilinirler. Çevre dostu ve sağlığına önem veren ürünlere olan talebin arttığı günümüzde, kozmetik sektörü güçlü doğal referanslara sahip bileşenler aramaktadır. Alg NP'leri, bu gereksinimleri karşılayan ideal bir seçenektir ve kozmetik ürünlerinde sıkça kullanılan birçok sentetik ve petrol bazlı bileşenin yerine sürdürülebilir ve yenilenebilir bir alternatif sunar (Sharma ve ark., 2023). Bu durum, sektörün çevresel etkisini azaltma ve tüketicilerin etik ve çevresel endişelerini giderme çabasının bir sonucudur. Alg NP'lerinin çok yönlülüğü de dikkat çekicidir. Bazı mikroalg türleri yüksek yağ içeriğine sahiptir, bu da onları cildin doğal koruyucu tabakasını nemlendirmek ve güçlendirmek için çok uygun kılar. Bazı organizmalar ise kozmetik formüller için doğal renklendirici görevi gören klorofil ve karotenoidler gibi önemli miktarda pigment içerir. Ayrıca, bazı mikroalgler antioksidan, iltihap önleyici veya yaşlanma karşıtı özelliklere sahip bileşikler üreterek kozmetiklerde alg NP'lerinin kullanım alanını daha da genişletir. Etkili ve çevreye duyarlı ürünlere olan talebin artmasıyla birlikte, kozmetik alanında alg NP'lerinin kullanımı büyük bir potansiyel taşımaktadır (Wang ve ark., 2015).

6. Alg Katkılı Nanopartiküllerin Kozmetikte Kullanım Alanları

Alg NP'leri, kremler, losyonlar, serumlar ve maskeler gibi birçok cilt bakım ürününde kullanılabilecek çeşitli özelliklere sahiptir (Dini, 2023; Dwivedi ve Ahmad, 2022).

-UV koruması: Bu NP'ler, UV ışınlarını emme ve dağıtma yetenekleri sayesinde doğal güneş koruyucular gibi davranır (Wang ve ark., 2023). Sahip oldukları optik özellikler sayesinde zararlı UV ışınlarını etkili bir şekilde engelleyebilirler. Bu özellikleri, onları kimyasal içerikli güneş kremlerine çevre

dostu ve doğal bir alternatif haline getirir. Alg NP'leri, cilde uygulandığında UV ışınlarını emerek ya da dağıtarak koruyucu bir bariyer oluşturur. Işınları daha az zararlı hale dönüştürebilir ya da ısı şeklinde yayabilirler. Ayrıca, bu ışınları farklı yönlerde dağıtarak cilde ulaşan zararlı radyasyon miktarını azaltırlar. Doğal kökenli olmaları, biyoyumlu yapıları ve çevre dostu olmaları, bu NP'leri sentetik UV filtrelerine karşı avantajlı kılar. Bu yönleriyle sürdürülebilir, cilt dostu ve güvenli güneş koruyucu ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlarlar. Özellikle astaksantin içeren *Haematococcus pluvialis* adlı kırmızı mikroalgden elde edilen NP'ler, güçlü UV koruması ve antioksidan özellikleri sayesinde güneş kremlerinde kullanılmaktadır. Bu tür formülasyonlar, hem güneş ışınlarına karşı koruma sağlar hem de cilt sağlığını destekler (Dwivedi ve Ahmad, 2022; Dini, 2023; Lourenço-Lopes ve ark., 2020). Sonuç olarak, alg NP'leri güneş kremlerinin etkinliğini artırabilir. UV ışınlarına karşı koruma sağlamaları, cilt yaşlanmasını geciktirme ve cilt kanseri riskini azaltma potansiyelleriyle kozmesötik sektöründe önemli bir yere sahiptir.

-Serumlar ve yüz maskeleri: Alg NP'leriyle zenginleştirilmiş serumlar, hafif yapıları ve terapötik (tedavi edici) özellikleri sayesinde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Özellikle *Spirulina* kaynaklı NP'ler içeren serumlar, ciltteki kızarıklık azaltmada ve cilt tonunu eşitlemede etkili bulunmuştur. Ayrıca, alg NP'leri içeren kağıt ya da kil maskeleri, cilde derinlemesine besin sağlama, toksinleri uzaklaştırma (detoks etkisi) ve cildi canlandırma potansiyeline sahiptir. Bu tür maskeler, özellikle *Laminaria* gibi alg türleri kullanılarak hazırlandığında cilde ferahlatıcı ve yenileyici bir etki sunar (Lourenço-Lopes ve ark., 2020; Malakar ve Mohanty, 2020).

-Kremler ve losyonlar: Kremler ve losyonlar, alg NP'lerinin eklenmesiyle daha etkili hale getirilebilir. Bu NP'ler, cildi nemlendirme, besleme ve yaşlanma belirtilerini azaltma gibi faydalar sunar. Örneğin, *Chlorella* türü alglerden elde edilen NP'ler içeren topikal ürünler, ciltteki ince çizgilerin görünümünü azaltmaya ve cilt nemini artırmaya yardımcı olur (Gupta ve ark., 2022). Yapılan çalışmalar, alg NP'lerinin cilt bariyerini güçlendirdiğini ve bu sayede nem tutma kapasitesini artırdığını göstermektedir. Bu NP'ler, cilt üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturarak su kaybını önler ve cildin ideal nem seviyesini korumasına yardımcı olur. Nemlendiriciler ve serumlara alg NP'leri eklenerek, cildi derinlemesine nemlendiren ve besleyen etkili kozmesötik ürünler geliştirilebilir (Dwivedi ve Ahmad, 2022; Dubey ve ark., 2022; Dini, 2023).

-Yaşlanma karşıtı cilt bakımı: Alg NP'leri, güçlü antioksidan özellikleri sayesinde yaşlanma karşıtı cilt bakımında dikkat çekici bir potansiyel sunmaktadır. Bu NP'ler, ciltte yaşlanmaya neden olan serbest radikalleri etkili bir şekilde temizleyerek, oksidatif strese karşı koruma sağlar. Cilt bakım ürünlerine

alg NP'leri eklendiğinde; kırışıklıklar, ince çizgiler ve yaşlılık lekeleri gibi yaşlanma belirtilerinin görünümü azaltılabilir. Bu sayede cilt daha genç, sağlıklı ve canlı bir görünüme kavuşur (Dini, 2023; Dwivedi ve Ahmad, 2022; Lourenço-Lopes ve ark., 2020).

-Cilt rengini açma: Alg NP'lerinin cilt beyazlatma potansiyelini gösteren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu araştırmalar, özellikle cilt pigmentasyonunu azaltma ve cilt tonunu dengeleme konusunda alg NP'lerinin etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, yapılan bir çalışmada, alg NP'leri içeren ürünlerin düzenli kullanımının cilt pigmentasyonunu belirgin şekilde azalttığı gösterilmiştir. Bu da, söz konusu NP'lerin hiperpigmentasyonu hafifletme ve cilt tonunu eşitleme açısından umut verici olduğunu göstermektedir (González-Conde ve ark., 2023). Benzer şekilde, Ticona ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada, alg NP'lerinin melanin üretiminde rol oynayan tirozinaz enziminin aktivitesini baskıladığı bulunmuştur (Ticona ve ark., 2024). Bu müdahale sonucunda melanin sentezinin azaldığı, bunun da ciltte gözle görülür bir beyazlatma etkisi yarattığı tespit edilmiştir. Bu bilimsel veriler, alg NP'lerinin cilt tonu eşitsizliği, koyu lekeler ve melazma gibi hiperpigmentasyon sorunlarına karşı etkili bir çözüm sunabileceğini göstermektedir. Melanin üretimini azaltma yetenekleri sayesinde, bu NP'ler cilt beyazlatıcı kozmesötik ürünlerde güçlü ve doğal bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

-Cilt beyazlatma: Kırmızı alger gibi bazı alg türlerinden elde edilen NP'lerin, cilt aydınlatıcı özelliklere sahip olduğu keşfedilmiştir. Bu NP'ler, cilt rengini belirleyen melanin pigmentinin üretimini engelleyerek daha parlak ve eşit tonlu bir cilt görünümüne katkı sağlar (Dini, 2023; Lourenço-Lopes ve ark., 2020). Melanin üretimi, UV ışınları, hormonal değişiklikler ve iltihaplanma gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak artabilir. Bu durum, ciltte koyu lekeler, ton eşitsizliği ve melazma gibi hiperpigmentasyon sorunlarına yol açar. Alg NP'leri, özellikle melanin üretiminde kilit rol oynayan tirozinaz adlı enzimin aktivitesini baskılayarak melanin sentezini azaltır. Bu sayede koyu lekelerin görünümü zamanla hafifler ve cilt tonu daha dengeli hale gelir. Bu özellikleri sayesinde alg NP'leri, leke karşıtı ve cilt tonu eşitleyici ürünlerde etkili bir bileşen olarak kullanılabilir. Doğal ve invaziv olmayan bu yaklaşım, kullanıcıların daha aydınlık, eşit tonlu ve sağlıklı bir cilde ulaşmasına yardımcı olur. Sonuç olarak, alg NP'leri; yaşlılık lekeleri, melazma ve cilt tonu düzensizliklerini hedefleyen kozmesötik ürünlerde büyük bir potansiyel taşır.

-Makyaj ürünleri: Alg NP'leri, cilt sağlığını destekleyen ve pürüzsüz bir görünüm sağlayan özellikleri sayesinde fondöten ve BB krem gibi makyaj ürünlerine eklenmektedir. Bu ürünler, doğal içerikleri ve hafif yapılarıyla kullanıcılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir (Dubey ve ark., 2022). Ayrıca,

alg NP'leri dudak bakım ürünlerinde de kullanılmaktadır. Özellikle *Chlorella* adlı mikroalg türünden elde edilen NP'ler, dudakların nemini korumaya ve çatlamasını önlemeye yardımcı olur. Bu nedenle, bu NP'ler dudak balımı gibi ürünlerde etkili bir nemlendirici ve koruyucu bileşen olarak yer almaktadır (Dubey ve ark., 2022).

-Saç bakım ürünleri: Saç bakım ürünleri, saçın sağlığını ve görünümünü iyileştirmek amacıyla özel olarak geliştirilmiş formülasyonlardır. Genellikle temizlik sağlayan ve saç besleyen çeşitli bileşenlerin birleşiminden oluşurlar. Son yıllarda, bu ürünlere alg NP'leri eklenerek etkileri daha da artırılmıştır. Özellikle kahverengi alg türlerinden, örneğin kelp'ten elde edilen NP'ler, saç dokusunu iyileştirme, kabarıklığı azaltma ve saç derisini besleme gibi faydalar sağlar (Lourenço-Lopes ve ark., 2020). Bu özellikler sayesinde, saç sağlığı desteklenir ve saç büyümesi teşvik edilir.

-Akne tedavisi: Alg NP'leri, sahip oldukları antibakteriyel özellikler sayesinde akne tedavisinde umut verici bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle akne oluşumuna neden olan *Propionibacterium acnes* adlı bakterinin çoğalmasını engellemede etkili oldukları gösterilmiştir. Bu nedenle, alg NP'leri içeren cilt bakım ürünleri; iltihabı azaltmak, sebum üretimini dengelemek ve akne oluşumunu önlemek için etkili bir seçenek olabilir. Kozmesötik firmalar, bu özelliklerden yararlanarak akneye yönelik doğal ve cilt dostu çözümler geliştirebilir (Lourenço-Lopes ve ark., 2020).

7. Alg Nanopartiküllerinin Kozmesötiklerdeki Zorlukları ve Geleceğe Yönelik Perspektifler

Alg NP'leri, kozmesötik alanında büyük bir potansiyele sahip olsa da, bazı önemli zorluklar hâlâ devam etmektedir. Özellikle, bu NP'lerin üretiminde kullanılan sentez yöntemlerinin geliştirilmesi, daha uygun maliyetli ve büyük ölçekli üretim için büyük önem taşır. Bu süreçlerin ticari anlamda uygulanabilir olması için ekonomik, verimli ve sürdürülebilir hâle getirilmesi gereklidir. Ayrıca, sentez ve karakterizasyon tekniklerinin standartlaştırılması; ürün kalitesinin tutarlılığı, güvenilirliği ve yasal düzenlemelere uygunluk açısından kritik öneme sahiptir.

Alg NP'lerinin insan cildi üzerindeki uzun vadeli etkileri henüz tam olarak bilinmemektedir. Şimdiye kadar yapılan laboratuvar çalışmaları umut verici sonuçlar sunsa da, cilt ürünlerinde yaygın olarak kullanılan diğer içeriklerle olan etkileşimlerini ve uzun süreli kullanımın olası etkilerini daha iyi anlayabilmek için kapsamlı bilimsel araştırmalara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, güvenlik ve etkinlik açısından detaylı in vitro ve in vivo çalışmaların yapılması şarttır (Dréno ve ark., 2019). Alg NP'leri çevre dostu ve biyouyumlu olarak görülse de, bazı

zorluklar göz ardı edilmemelidir. Bunlar arasında ürün stabilitesi, yasal düzenlemelere uygunluk ve tüketici güveni gibi konular yer alır. Bu sorunların çözülmesi, bu NP'lerin kozmesötik ürünlerde güvenle kullanılabilmesi için temel şarttır.

Alg NP'lerinin kozmesötiklerde kullanımıyla ilgili dikkat çeken diğer bir zorluk ürünün kararlılığıdır. Zamanla alg NP'leri kümelenebilir veya kararsız hale gelebilir, bu da ürünün etkinliğini ve raf ömrünü olumsuz etkileyebilir. Bu sorunu çözmek için, NP'lerin kararlılığını koruyan formülasyonlar ve üretim süreçlerinin geliştirilmesi gereklidir. Bir diğer zorluk ise düzenleyici uyumluluktur. Alg NP'leri kozmetik ve cilt bakım ürünlerinde daha fazla kullanılmaya başlandıkça, düzenleyici kurumların güvenlik ve kullanım yönergeleri oluşturması gerekebilir. Bu NP'leri içeren ürünlerin, belirlenen düzenleyici gerekliliklere uygun olduğundan emin olmak, hem ürünlerin pazarlanabilirliğini hem de tüketici güvenliğini artıracaktır. Tüketici algısı da önemli bir faktördür. Alg NP'leri çevre dostu ve güvenli olsa da, tüketiciler bu yeni bileşenlere karşı çekinceli olabilir veya bu konuda yeterli bilgiye sahip olmayabilir. Tüketicileri, alg NP'lerinin faydaları ve güvenliği konusunda bilgilendirmek, bu ürünlere olan güveni artırmak için önemlidir.

Bu zorlukları aşmak için, araştırmacılar, üreticiler ve düzenleyici kurumlar arasında sıkı bir iş birliği gereklidir. Ürün stabilitesi için standart test yöntemlerinin geliştirilmesi, düzenlemelere uyum sağlanması ve tüketicilere etkili iletişim stratejilerinin sunulması, alg NP'lerinin kozmesötik sektörüne entegrasyonunu kolaylaştıracak ve potansiyellerinden tam anlamıyla faydalanılmasını sağlayacaktır. Alg NP'lerinin kozmesötiklerdeki geleceği umut vericidir. Tüketicilerin doğal ve sürdürülebilir ürünlere olan ilgisi arttıkça, alg NP'lerinin cilt bakım ürünlerine entegrasyonu da artacaktır. Bu NP'ler, güneş kremleri, yaşlanma karşıtı kremler ve cilt beyazlatıcı ürünler gibi ürünlerde önemli bir bileşen haline gelebilir. Kozmetik endüstrisi, alg NP'lerinin çok yönlülüğünden ve etkinliğinden yararlanmaya hazırdır. Dolayısıyla, bu NP'lerin kozmesötiklerdeki rolü büyümeye devam edecek gibi görünmektedir.

Alg NP'lerinin büyük bir potansiyel gösterdiği alanlardan biri güneş kremleridir. Çevre dostu bir şekilde etkili UV koruması sağlama yetenekleri, alg NP'lerini güneş kremi formülleri için tercih edilen bir seçenek haline getirebilir. Bu da, daha güvenli ve sürdürülebilir güneş koruma seçeneklerine yönelik artan talebi karşılamaya yardımcı olabilir. Ayrıca, yaşlanma karşıtı kremler ve cilt beyazlatıcı ürünler de, antioksidan özellikleri ve cildi iyileştirme etkileri sayesinde alg NP'lerini içerebilir. Bu NP'ler, oksidatif stresle mücadele, kolajen üretimini artırma ve melanin sentezini engelleme potansiyeline sahiptir; bu da, tüketicilerin genç ve düzgün tonlu bir cilt isteğiyle uyumludur. Genel olarak,

kozmetik endüstrisi, alg NP'lerinin faydalarından yararlanmaya hazırdır. Bu NP'ler, çok yönlülükleri ve etkinlikleri ile yeni nesil cilt bakım ürünlerinde değerli bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Araştırma ve geliştirme çalışmaları arttıkça, üreticiler ve tüketiciler, alg NP'lerinin daha sağlıklı, sürdürülebilir ve etkili cilt bakım çözümleri sunmada önemli bir rol oynayacağı bir geleceği öngörebilirler.

8. Sonuç ve Değerlendirme

Nanoteknoloji, birçok sektörde olduğu gibi kozmesötik alanında da önemli ilerlemeler sağlamıştır. Bu bağlamda, alg bazlı NP'ler, cilt bakım ürünlerinin etkinliğini ve güvenliğini artırabilecek özellikleri sayesinde dikkat çekici bir potansiyele sahiptir. Algal NP'ler, doğa dostu, ekonomik ve biyolojik olarak uyumlu olmaları nedeniyle çevre dostu üretim süreçlerinde tercih edilmektedir. Mikroalgler hem hücre içi hem de hücre dışı yollardan NP sentezleyebilmektedir. Her ne kadar bu alan hâlâ erken aşamalarda olsa da, NP'lerin boyut dağılımı ve kimyasal bileşimlerinin detaylı şekilde araştırılması büyük önem taşımaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu yapıların daha verimli ve kontrollü bir şekilde üretilmesini sağlayacaktır.

Kozmesötik ürünlerde algal NP'lerin kullanımı, özellikle UV koruma (doğal güneş kremi olarak), yaşlanma karşıtı etkiler (antioksidan içerikleri sayesinde), cilt beyazlatma (melanin üretimini baskılayarak) ve biyoaktif maddelerin (peptitler, vitaminler, antioksidanlar) cilde daha etkin taşınması gibi uygulamalarda öne çıkmaktadır. Bu NP'lerin boyut, şekil, bileşim ve stabilitesini değerlendirmek için TEM, SEM, XRD, DLS ve FTIR gibi karakterizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bunlar, ürün kalitesinin ve kozmesötik uygulamalar için uygunluğunun belirlenmesinde kritik rol oynar. Güncel araştırmalar, yeni alg türlerinin kullanımı ve yenilikçi formülasyonlarla bu alandaki potansiyelin giderek arttığını göstermektedir. Ancak ürün stabilitesi, yasal düzenlemelere uygunluk ve tüketici algısı gibi bazı zorluklar mevcuttur.

Gelecekte, algal NP'lerin yaygın cilt bakım ürünlerinde daha fazla yer alması beklenmektedir. Doğal kökenleri, çevre dostu üretim süreçleri ve etkinlikleri, sürdürülebilir ve doğadan ilham alan kozmesötik ürünlere olan ilgiyi artıracaktır. Ancak ticari başarı için güvenlik değerlendirmeleri, düzenleyici onaylar ve üretim süreçlerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, algal NP'ler; UV koruması, yaşlanma karşıtı etki, cilt beyazlatma ve aktif madde taşıyıcılığı gibi alanlarda çevre dostu ve etkili çözümler sunarak kozmetik ve cilt bakım sektörüne önemli katkılar sağlama potansiyeline sahiptir. Doğal ve sürdürülebilir ürünlere yönelik artan tüketici talebiyle birlikte, bu teknolojinin önemi giderek artmaktadır.

Kaynaklar

- Aslam, A., Bahadar, A., Liaquat, R., Saleem, M., Waqas, A., & Zwawi, M. (2021). Algae as an attractive source for cosmetics to counter environmental stress. *Science of The Total Environment*, 772, 144905.
- Behera, M., Behera, P. R., Bhuyan, P. P., Singh, L., & Pradhan, B. (2023). Algal nanoparticles and their antibacterial activity: current research status and future prospectives. *Drugs and Drug Candidates*, 2(3), 554-570.
- Bhukal, S., Sharma, A., Rishi, Divya, Kumar, S., Deepak, B., ... & Mona, S. (2022). Spirulina based iron oxide nanoparticles for adsorptive removal of crystal violet dye. *Topics in Catalysis*, 65(19), 1675-1685.
- Chandrashekar, B. S., Prabhakara, S., Mohan, T., Shabeer, D., Bhandare, B., Nalini, M., ... & Anbazhagan, K. (2018). Characterization of Rubia cordifolia L. root extract and its evaluation of cardioprotective effect in Wistar rat model. *Indian journal of pharmacology*, 50(1), 12-21.
- Dhawan, S., Sharma, P., & Nanda, S. (2020). Cosmetic nanoformulations and their intended use. In *Nanocosmetics* (pp. 141-169). Elsevier.
- Dhull, K., Tripathy, S., & Dureja, H. (2015). Cosmetics: Regulatory scenario in USA, EU and India. *Journal of Pharmaceutical Technology, Research and Management*, 3(2), 127-139.
- Dini, I. (2023). The potential of algae in the nutricosmetic sector. *Molecules*, 28(10), 4032.
- Dreno, B., Alexis, A., Chuberre, B., & Marinovich, M. (2019). Safety of titanium dioxide nanoparticles in cosmetics. *Journal of the European academy of dermatology and venereology*, 33, 34-46.
- Dubey, S. K., Dey, A., Singhvi, G., Pandey, M. M., Singh, V., & Kesharwani, P. (2022). Emerging trends of nanotechnology in advanced cosmetics. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 214, 112440.
- Dwivedi, S., & Ahmad, I. Z. (2022). A review of the emerging role of cyanobacteria-based nanoformulations for skin care: Opportunities and challenges. *J. Appl. Biol. Biotechnol*, 10, 210-218.
- Ebrahiminezhad, A., Taghizadeh, S., Berenjian, A., Heidaryan Naeini, F., & Ghasemi, Y. (2017). Green synthesis of silver nanoparticles capped with natural carbohydrates using ephedra intermedia. *Nanoscience & Nanotechnology-Asia*, 7(1), 104-112.
- Fatima, M., Monawwar, S., Mohapatra, S., Alex, T. S., Ahmed, A., Taleuzzaman, M., ... & Iqbal, Z. (2021). In silico drug screening based development of novel formulations for onychomycosis management. *Gels*, 7(4), 221.
- Ghosh, S., Patil, S., Ahire, M., Kitture, R., Gurav, D. D., Jabgunde, A. M., ... & Chopade, B. A. (2012). Gnidia glauca flower extract mediated synthesis of

- gold nanoparticles and evaluation of its chemocatalytic potential. *Journal of Nanobiotechnology*, 10, 1-9.
- González-Conde, M., Vega, J., López-Figueroa, F., García-Castro, M., Moscoso, A., Sarabia, F., & López-Romero, J. M. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles and its combination with *Pyropia columbina* (Rhodophyta) extracts for a cosmeceutical application. *Nanomaterials*, 13(6), 1010.
- Gupta, V., Mohapatra, S., Mishra, H., Farooq, U., Kumar, K., Ansari, M. J., ... & Iqbal, Z. (2022). Nanotechnology in cosmetics and cosmeceuticals—a review of latest advancements. *Gels*, 8(3), 173.
- Kaul, S., Gulati, N., Verma, D., Mukherjee, S., & Nagaich, U. (2018). Role of nanotechnology in cosmeceuticals: a review of recent advances. *Journal of pharmaceuticals*, 2018(1), 3420204.
- Khan, F., Shahid, A., Zhu, H., Wang, N., Javed, M. R., Ahmad, N., ... & Mehmood, M. A. (2022). Prospects of algae-based green synthesis of nanoparticles for environmental applications. *Chemosphere*, 293, 133571.
- Lourenço-Lopes, C., Fraga-Corral, M., Jimenez-Lopez, C., Pereira, A. G., Garcia-Oliveira, P., Carpena, M., ... & Simal-Gandara, J. (2020). Metabolites from macroalgae and its applications in the cosmetic industry: A circular economy approach. *Resources*, 9(9), 101.
- Malakar, B., & Mohanty, K. (2020). The budding potential of algae in cosmetics. In *Algae: Multifarious Applications for a Sustainable World* (pp. 181-199). Singapore: Springer Singapore.
- Mandal, A. K., Nayak, R., Pradhan, B., Behera, C., Behera, A. K., Parida, S., ... & Jena, M. (2023). Algal-derived nanoparticles and their antibacterial potential: Current evidence and future prospectives. *Journal of Microbiological Methods*, 211, 106790.
- Mittal, R., Sharma, A., Bhardwaj, A. K., Bhateria, R., Bansal, S., Kashyap, R., & Bhukal, S. (2023). Removal of chromium (VI) using spirulina assisted synthesized mesoporous iron oxide nanoparticles. *Inorganic Chemistry Communications*, 154, 110881.
- Mohanpuria, P., Rana, N. K., & Yadav, S. K. (2008). Biosynthesis of nanoparticles: technological concepts and future applications. *Journal of nanoparticle research*, 10, 507-517.
- Pimsin, N., Jansongsawang, J., Chanthai, S., Thongsom, M., Nuengmatcha, P., & Porrawatkul, P. (2025). In-Situ Synthesis of AgNPs using *Boesenbergia Rotunda* L. Extract as Reducing Agent Development of Antibacterial and UV Protective Muslin Fabrics. *Trends in Sciences*, 22(4), 9476-9476.

- Raj, S., Jose, S., Sumod, U. S., & Sabitha, M. (2012). Nanotechnology in cosmetics: Opportunities and challenges. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 4(3), 186-193.
- Rastogi, A., Zivcak, M., Sytar, O., Kalaji, H. M., He, X., Mbarki, S., & Brestic, M. (2017). Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: a critical review. *Frontiers in chemistry*, 5, 78.
- Sharma, A., Mittal, R., Sharma, P., Pal, K., & Mona, S. (2023). Sustainable approach for adsorptive removal of cationic and anionic dyes by titanium oxide nanoparticles synthesized biogenically using algal extract of *Spirulina*. *Nanotechnology*, 34(48), 485301.
- Souto, E. B., Fernandes, A. R., Martins-Gomes, C., Coutinho, T. E., Durazzo, A., Lucarini, M., ... & Santini, A. (2020). Nanomaterials for skin delivery of cosmeceuticals and pharmaceuticals. *Applied Sciences*, 10(5), 1594.
- Ticoná, L. A., Sánchez-Corral, J. S., Martín, C. D. G., Jiménez, S. C., González, A. L., & Estrada, C. T. (2024). *Rubus urticifolius* Compounds with Antioxidant Activity, and Inhibition Potential against Tyrosinase, Melanin, Hyaluronidase, Elastase, and Collagenase. *Pharmaceuticals*, 17(7), 937.
- Uzair, B., Liaqat, A., Iqbal, H., Menaa, B., Razzaq, A., Thiripuranathar, G., ... & Menaa, F. (2020). Green and cost-effective synthesis of metallic nanoparticles by algae: Safe methods for translational medicine. *Bioengineering*, 7(4), 129.
- Wang, F., Shin, J. Y., Kang, E. S., Kim, J. H., Jang, S. I., & Cho, B. O. (2023). Kushenol C from *Sophora flavescens* protects against UVB-induced skin damage in mice through suppression of inflammation and oxidative stress. *Heliyon*, 9(12).
- Wang, H. M. D., Chen, C. C., Huynh, P., & Chang, J. S. (2015). Exploring the potential of using algae in cosmetics. *Bioresource technology*, 184, 355-362.
- Yang, C., Cavalcante, J., de Freitas, B. B., Lauersen, K. J., & Szekely, G. (2023). Crude algal biomass for the generation of thin-film composite solvent-resistant nanofiltration membranes. *Chemical Engineering Journal*, 470, 144153.
- Zhu, B., Liu, B., Qu, C., Zhang, H., Guo, W., Liang, Z., ... & Zou, R. (2018). Tailoring biomass-derived carbon for high-performance supercapacitors from controllably cultivated algae microspheres. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(4), 1523-1530.

3. Bölüm

Bal Arılarının *İn Vitro* Koşullarda Yetiştiriciliği

Görkem YANIK¹

Özet

Bal arıları dünyanın tarımsal üretimi ve biyolojik çeşitliliğin korunmasında oldukça önemli bir göreve sahip olmasına karşın, son yıllarda önemli düzeyde koloni kayıpları yaşanmaktadır. İlk olarak bal arılarının fizyolojisini ve ana arı-işçi arı arasındaki farklılaşmayı belirlemek amacıyla ortaya çıkan *in vitro* koşullarda bal arısı yetiştiriciliği, son yıllarda yaşanan koloni kayıplarının etkisiyle bal arıları üzerinde patolojik ve toksikolojisi konularının çalışılmasında önemli bir yöntem haline gelmiştir. Bal arılarının *in vitro* koşullarda yetiştiriciliği çalışmalarının tarihi son 90 yıla dayanmaktadır. Günümüze yakın tarihlerde *in vitro* yetiştirme koşullarının nasıl olması gerektiğini ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, konunun öneminin belirtilmesi, yöntemin uygulanabilmesi için gerekli olan güncel protokolün ve günümüze kadar ortaya koyan çalışmaların bir araya getirilerek okuyuculara sunulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Apis mellifera*, Bal arısı, *İn vitro* koşullarda yetiştiricilik

¹ Arş. Gör., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootehni Bölümü, Isparta, Türkiye, E-posta: gorkemyanik@isparta.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4616-1283

1. GİRİŞ

Bitkilerin meyve ve tohum üretiminde çok önemli bir süreç olan tozlaşma, abiyotik ve biyotik faktörler vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Biyotik faktörler içerisinde yer alan böcekler tarımsal ürünlerin % 75'inin tozlaşmasında rol oynamaktadır (Klein vd., 2007). Böcekler sınıfı içerisinde yer alan ve yaklaşık 70 bin türü barındıran Hymenoptera takımının sosyal arılar familyası içerisindeki 4 alt türden biri olan bal arıları (*Apis mellifera*) tarımsal üretiminin gerçekleşmesinde, doğal ekolojik dengenin ve biyolojik çeşitliliğin korunmasında kilit rol oynayan bir tozlaştırıcıdır (Klein vd., 2007; Potts vd., 2010). Bal arılarının tarımsal tozlaşma hizmetinin dünya çapında yıllık 153 milyar Avro ekonomik fayda sağladığı tahmin edilmektedir (Lautenbach vd., 2012). Buna karşın, özellikle 21. yüzyılın başından itibaren dünyanın birçok bölgesinde bal arısı kolonilerinde ciddi derecede kayıplar yaşanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde % 60'a, Avrupa'da ise % 25'e varan koloni kayıplarının yaşanmış olduğu, ülkemizde 2007 yılında bu oranın % 40'a kadar arttığı bildirilmiştir (Traynor vd., 2016; Hristov vd., 2020a). Arıcılık ve tarımsal üretim sektörünü olumsuz yönde etkileyen kayıplar karşısında ülkelerin yeni arıcılık modelleri oluşturması yönünde çalışmalar yapılmıştır (Moritz vd., 2010).

Bal arısı kolonilerinde kayıpların yaşanmasında, küresel iklim değişikliği sebebiyle bitkilerin fizyolojik faaliyetlerindeki olumsuzluklar ve habitat kayıpları, parazit ve patojenler, bakteriyel veya viral hastalıklar, yetiştiricilerin koloni yönetiminde yaptığı hatalı davranışlar, bitki koruma ürünlerinin yoğun kullanımı, çevredeki fiziksel ve kimyasal kirliliğin artışı olmak üzere birçok etmenin sebep olduğu bilinmektedir (Giray vd., 2010; Goulson vd., 2015; Genç ve Genç, 2019; Morawetz vd., 2019; Hristov vd., 2020b). Bahsedilen faktörlerin bir veya birçoğunun aynı anda ortaya çıkması büyük ölçüde koloni kayıplarının yaşanmasına sebep olmaktadır (Neumann ve Carreck, 2010; Van Engelsdorp ve Meixner, 2010). Bu faktörlerin arazi şartlarında koloni düzeyindeki potansiyel etkilerinin belirlenmesi flora kaynak durumunun farklı oluşu, iklim şartları, koloninin mevcut durumu ve koloni genetiği gibi birçok değişken sebebiyle kontrolü zor bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır (Hendriksma vd., 2011). Koloni düzeyinde yapılan çalışmaların bakım ve deney aşamalarındaki değişkenlerin kontrol altına alınması gerekliliği sebebiyle *in vitro* yetiştirme koşulları potansiyel faktörlerin sebep ve sonuçlarının ortaya konmasında ideal bir yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır (Wittmann ve Engels, 1981). *In vitro* şartlarda yetiştiricilik yapılması bal arılarında fizyolojik, immünolojik, patolojik, davranışsal ifadelerin ortaya konmasında ve bitki koruma ilaçlarının toksikolojik etkilerinin hem ergin arı hem de larva düzeyinde belirlenmesi, konak-parazit etkileşimleri ve parazit yönetim ürünleri konularında çalışmalar yapılmasına

olarak sağlamaktadır. Ayrıca *in vitro* şartlarda dil uzatma refleksi tekniği kullanılarak bal arılarında öğrenme ve hafıza çalışmaları da yapılabilmektedir.

2. BAL ARILARININ KOLONİ İÇİ GELİŞİMLERİ

Bal arılarının (*Apis mellifera*) koloni popülasyonu, normal şartlar altında sadece bir ana arı, sayıları mevsimlik olarak değişkenlik göstermekte olan 70-80 bin işçi arı, aynı şekilde sayıları 0 ile 2 bin arasında değişkenlik gösteren erkek arı'dan oluşmaktadır. Erkek arılar, ortalama 200 mg ağırlığa sahip olup çiftleşme görevlerini yerine getirdikten sonra ölmektedir. Koloni içerisindeki en ağır birey olan ana arının (150-300 mg) en hayati görevi, düzenli olarak yumurta bırakmak ve işçi arı davranışlarını büyük ölçüde etkileyecek feromonlar salgılayarak koloni içerisindeki düzeni sağlamaktır. Ana arı koloni içerisinde üreme fenotipi olup işçi arıların yumurtalık gelişimlerini baskılamak gibi fizyolojik görevleri de bulunmaktadır. İşçi arılar ise koloni içerisindeki en hafif birey iken morfolojik olarak son derece gelişmiştirler. Diğer bireylerden farklı olarak bal mideleri, polen sepetçikleri, bal mumu salgı bezleri, mandibular ve hipofarenjeal bezleri gelişmiş olup ana arı ve yavru besleme, petek örme, tarlacılık faaliyetlerini yerine getirme gibi koloni içerisinde sosyal rollere sahiptirler. İşçi arıların görevleri, günlük yaşlarına bağlı olarak değişmektedir (Güler, 2017). Koloni içerisindeki ergin bireyler arasında morfolojik, fizyolojik ve davranışsal olarak farklılık görülmesinin yanı sıra her birinin başkalaşım evreleri boyunca beslenme ve fizyolojik ihtiyaçları da birbirinden oldukça farklılık göstermektedir (Güler, 2017).

Bal arıları haplo-diploid üreme sistemine sahip olup, ana arı ve işçi arılar 2n kromozoma sahip olan aynı diploid yumurtalardan gelişirler. Ana arı tarafından yumurtanın bırakılması sonrasında, larva ve pupa olmak üzere 2 aşama yer almaktadır. Ana arının larva süreci ortalama 5 gün iken, işçi arı larvasının gelişim süreci ortalama olarak 6 gündür. Ergin birey olmak için tam başkalaşım geçiren bal arıları sadece larva evresinde beslenmektedir. Ana arı ve işçi arı arasındaki farklılıkların ortaya çıkışının temel sebebi bu aşamadır. Larvalar koloni içerisindeki 6-14 günlük yaştaki genç işçi arıların mandibular ve hipofarenjeal bez salgılarıyla günlük yaşlarına uygun olan yavru sütü veya arı sütü adı verilen salgı ile binlerce kez düzenli olarak beslenirler (Schmickl ve Crailsheim, 2002). İşçi arı larvalarının beslendiği salgı maddesi ile ana arı larvalarının beslendiği arı sütü karşılaştırdığında ortaya çıkan sonuçlar, ilk 3 güne kadar protein, şeker, yağ, vitamin içeriği olarak benzerlik gösterdiği yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konmuştur (Crailsheim vd., 2013). Ortalama olarak bir işçi arı larvasının gelişim süreci boyunca toplam 59,4 mg karbonhidrat, 25-37,5 mg protein tükettiği tahmin edilmektedir (Hrassnigg ve Crailsheim, 2005). Daha sonraki 2-3 günlük

beslenme sürecindeki besinler larvaların fizyolojik yaşlarına ve yer aldığı kast sınıfına göre farklılık göstermektedir (Kaftanoğlu vd., 2010).

Lewkowski vd., (2019), 4 günlük yaştan küçük larvaların beslenmesi için işçi arı salgısının % 39,2-53,3 protein kuru ağırlığından oluşmakta olup, bu yaştan sonra protein içeriğinin kuru ağırlığı % 15,7-26,1'e düştüğü, buna karşın şeker içeriğinin 4 günlük yaştan itibaren kuru ağırlık olarak % 7,8-19,6'dan % 32,2-64,6'ya arttığını bildirmiştir. İşçi arıların yavru besin salgısının fruktoz / glikoz oranı belirlenmiş ve larva yaşının artmasıyla birlikte şeker içeriğinin arttığı, ilaveten 4-5 günlük yaştaki işçi arı larvaları artan miktarda işlenmemiş polenle beslenmekte olduğu ifade edilmiştir (Crailsheim vd., 2013). Bu bulgulara ilave olarak, larva yaşının artmasıyla birlikte yaşla birlikte işçi arı larvalarının besinlerindeki lipid düzeyinin azaldığı yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (Aupinel vd., 2005). 6 günlük yaştan sonra ise larvaların beslenmesi durdurulur ve pupa evresine geçiş yapılır. Pupa evresinde, larva beslenmesi sırasında kazanılan besin elementleri anabolizma ve katabolizma için kullanılmaktadır. Metamorfozun gerçekleşmesi sırasında, özellikle glikojen ve lipidlerin metabolizması önemli bir rol oynamaktadır (Hrassnigg ve Crailsheim, 2005). Koloni içerisindeki larvaların sayısız aşamalı beslenmesinin yanı sıra, laboratuvarlarda larvalar yalnızca günlük olarak besleme yapılabilmiştir (Aupinel vd., 2005; Kaftanoğlu vd., 2010). Bu besleme farklılığının kesin olarak bilinmemesi *in vitro* yetiştiriciliğin ortaya çıkışına uzun süre engellemiştir (Crailsheim vd., 2013).

3. BAL ARILARININ *IN VITRO* KOŞULLARDA YETİŞTİRİCİLİĞİ

3.1. Konunun Önemi

Bal arıları (*Apis mellifera*), gerek ürünleri gerekse tarımsal bitkilerin önemli bir tozlayıcısı olarak insan hayatında önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda bal arısı kolonilerinin sayılarında parazit, patojen ve pestisit gibi stres faktörlerine maruz kalmaları sebebiyle büyük kayıplar yaşanmıştır. Koloni kayıplarının sebepleri birçok araştırmanın konusu haline gelmiştir (Gallai vd., 2009; Van Engelsdorp vd., 2007, 2008). Arazi koşullarında yapılan çalışmalar sırasında çevredeki kaynak durumunun farklılaşması, mevsim, iklim ve koloni genetiği gibi birçok kontrolsüz faktör ortaya çıkmaktadır (Li vd., 2018). Ayrıca koloni içerisinde kuluçka alanı dış etmenlerden etkilenmeye açık ve dolayısıyla kuluçka gelişimi sırasında yaşanan stres faktörünü değerlendirmek, genç işçi arıların sorun olan larvaları hızlı bir şekilde ortadan kaldırdıklarından dolayı oldukça zordur (Crailsheim vd., 2013). Arazi şartları birçok zorluğa gebe iken, kontrollü koşullarda gerçekleştirilecek olan çalışmalarda böyle bir durum söz konusu değildir. Kontrollü koşullarda yetiştirilen larvalar, bakıcı işçi arılar veya diğer

koloni bireyleriyle fiziksel, kimyasal etkileşim dahil olmak üzere tüm koloni içi etkileşimlere kapalıdır (Crailsheim vd., 2013; Schmehl vd., 2016). Bu sebepten dolayı *in vitro* koşullarda yetiştirme yöntemi bal arısı araştırmalarındaki potansiyel stres faktörlerinin belirlenmesi veya bal arılarının fizyolojisi ve patolojisindeki birçok uygulamada rutin bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

3.2. Tarihsel Gelişimi

In vitro yetiştirme tekniği ilk defa 1933'de bal arısı gelişimi ve kast farklılaşmasının incelenmesinde kullanılmıştır (Crailsheim vd., 2013; Buttstedt vd., 2016). Daha sonra Wittmann ve Engels (1981), pestisitlerin işçi arı larvaları üzerindeki toksisitesini belirlemek için *in vitro* yetiştirme protokollerinin kullanılmasını önermiştir. Fakat, larvaların ergin arılara dönüşümü sırasında hayatta kalan ergin arı oranı %70'in altında kalmıştır (Aupinel vd., 2005).

Günümüze kadar çeşitli *in vitro* yetiştirme protokolleri geliştirilmiştir (Vandenberg ve Shimanuki 1987; Peng vd., 1992; Aupinel vd., 2005; Crailsheim vd., 2013). Ancak, yapılan çalışmalarda tutarsız ölüm oranları *in vitro* çalışmalarının toksisite risk değerlendirmesi sonuçları üzerinde temel bir kanıya ulaşılmasına engel oluşturmuştur (Schmehl vd., 2016). Son yıllarda *in vitro* koşullarda bal arısı yetiştirme ve canlılık analizlerinin yapılması konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olup Schmehl vd., (2016) geliştirmiş olduğu % 95 ve üzerinde ergin arı çıkışı oranına sahip bir yetiştirme protokolü güncelliğini halen korumaktadır.

Bal arısı (*Apis mellifera*) kolonileri içerisinde sıcaklık değişimleri, polenin veya nektarın bulunduğu miktar gibi çevresel etmenler değişiklik gösterebilir. Morfolojik farklılıklar, bireyin içinde geliştiği ortamdaki sıcaklık ve beslenme durumundan etkilenmektedir (Cassidy vd., 2014; Scofield ve Mattila, 2015). Bir bal arısı kolonisi, sınırlı besin kaynakları, kötü hava koşulları gibi olumsuz dönemlerinde yetiştirilen larvaların sayısını azaltır (Schmickl ve Crailsheim 2002). Buna karşın, *in vitro* olarak yetiştirilen larvaların gelişim ortamı, beslenme ve fiziksel atmosfer açısından koloni içerisinde yetiştirilen larvalarınkinden çok farklıdır (Crailsheim ve ark. 2013). Bir koloni tarafından yetiştirilen işçi arılarla *in vitro* olarak yetiştirilen işçi arıların morfolojik gelişimindeki potansiyel farklılıklarının karşılaştırıldığı araştırmalar yapılmıştır (Brodschneider vd., 2009; Kaftanoğlu vd., 2010; Mortensen, 2017). Bu konu üzerinde yapılan çalışmalar *in vitro* olarak yetiştirilen arıların doğal ortamında yetişen arılar ile benzer uçuş performansına sahip olduğu fakat vücut ağırlıklarında ve ön kanat yüzey alanı ölçümlerinde artış olduğu saptanmıştır (Mortensen, 2017). Bu bulgular, yetiştirme ortamının yetişkin bal arısı morfolojisini ve fizyolojisini etkilediğini ortaya koymaktadır.

In vitro çalışmalar ile kovan içi çalışmaları arasında larvaların gelişimi sırasında önemli farklılıklar bulunmakta ve bu gelişim aşamalarında meydana gelen farklılıklar larvanın yetişkin bir arı olduğundaki davranışlarını etkileyebilme ihtimali olduğu düşünülmektedir. *In vitro* koşullarda yetiştirilen bir bal arısının davranışlarının nasıl etkileyebileceğini değerlendirmek için günümüze kadar bir çalışmanın (Mortensen, 2017) sunumu yapılmıştır. Tautz vd., (2003), arıların pupa aşamasına geçiş yaptığı sıcaklığın, ortaya çıkan yetişkin arıların öğrenmesini ve hafızasını etkilediğini ifade etmiştir.

Son dönemde *in vitro* yetiştirme koşulları pestisitlerin, patojenlerin ve transgenik bitkilerin olgunlaşmamış bal arıları üzerindeki etkilerini incelemek için kullanılmaktadır (Dai vd., 2017; Yang vd., 2019).

3.3. *In vitro* Yetiştirme Protokolü

3.3.1. Ekipmanlar

In vitro yetiştirme yönteminin uygulanma aşamalarında olması gereken ekipmanlar, 4 çeşit plastik aşılama aracı, plastik larva hücre kapları, inkübatör, ana arı dışlama kafesi, larvaların beslenmesi için ve larva aşılama-bakım sırasında gerekli olan preparatlar olarak sıralanabilir. Ekipmanların kullanıma hazırlanışı sırasındaki en önemli detay nokta sterilizasyondur. Kontaminasyonu önlemek amacıyla materyaller ve sarf malzemeleri kullanımlarından önce mümkün olduğunca sterilize edilmesi gerekmektedir.

3.3.2. Larva diyetlerinin hazırlanışı

Bal arısı (*Apis mellifera*) larvaları, laboratuvar ortamına alındıktan sonraki altı günlük süre boyunca steril su, glikoz, fruktoz, maya ve arı sütü içeren bir diyetle beslenmektedir. Larva diyeti ile ilgili en önemli hususlar kaliteli bileşenlere sahip olup, her bir bileşenin yüzdesi uygun şekilde ayarlanmış olan arı sütü ve diğerlerinin karışımı olarak ifade edilebilir. Schmehl vd., (2016) protokolünde 3 farklı diyet içeriği bulunmaktadır (Tablo 1). Fakat, nceki protokollerde belirtilenlerle (Aupinel vd., 2005; Crailsheim vd., 2013) arasındaki temel farklardan birisi su içeriğindeki artış olmuştur. Literatürde belirtilen diyetlerin (Aupinel vd., 2005; Crailsheim vd., 2013) larvaların yetiştirildiği deneysel koşullarda kurumaya yatkın olduğunu saptanması sebebiyle, diyet içeriklerine eklenen su miktarını arttırmışlardır.

Arı sütü kaynağının larva yetiştirme başarısında kritik öneme sahip olduğu koloni içerisindeki çalışmalardan bilinmektedir. Fakat, standartlaştırılmış larva yetiştirme protokolüne arı sütü dahil etmede birtakım sıkıntılar bulunmaktadır. Bu zorluğun kaynağı ise, arı sütü bileşiminin kaynaklarının arasında değişiklik göstermesidir (Schmehl vd., 2016). Farklı şirketlerden elde edilen farklı parti arı

sütü kullanarak, olgunlaşmamış bal arılarından yetişkinlerin ortaya çıkmasına kadar yaşam oranlarının karşılaştırılması ve daha yüksek yaşam oranı veren arı sütünün larva diyetlerinde kullanılması oldukça önemlidir (Schmehl vd., 2016).

Tablo.1. Larva beslenmesinde kullanılan diyetlerinin içerik miktarları (gr)

Diyet içerikleri	Diyet içerik miktarları (gr)		
	Diyet 1	Diyet 2	Diyet 3
Arı sütü	4.43	4.30	25.00
Glikoz	0.53	0.64	4.50
Fruktoz	0.53	0.64	4.50
Maya ekstratı	0.09	0.13	1.00
Su	4.43	4.30	15.00
Toplam	10	10	50

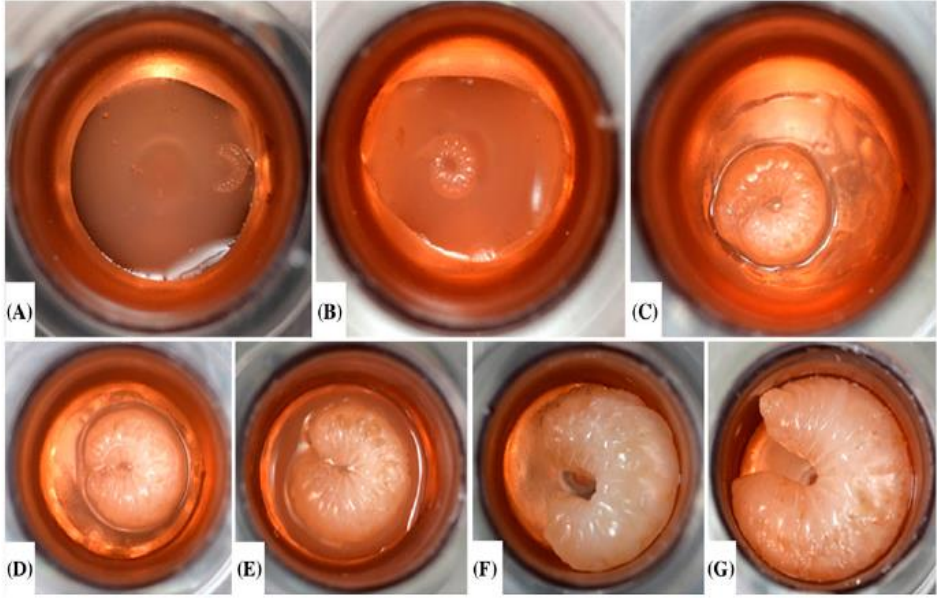
3.3.3. Larvaların toplanması

Ana arı dışlama kafesi kullanılarak yapılan larva toplama işlemi sırasıyla şu şekilde yapılmaktadır. Kovan içerisinde gözlemlenen ana arı, yakalanıp dışlama kafesi içerisine alınır ve kafes çerçevesinin ortasına sabitlenir. Ana arı kafes içerisinde 3 gün boyunca kalır, bu süre içerisinde boş olan gözlere yumurta bırakması istenir. Bu işlem sırasında ana arı, bakıcı arılar tarafından gerçekleştirilen beslenmesi herhangi bir aksaklığa uğramadan devam etmektedir. Ana arının yumurta bıraktığı gözlerden yaklaşık 75 saat sonra larvaların toplanma işlemi gerçekleştirilir ve laboratuvar ortamında hazır olarak bulunan inkübatörlere yerleştirilir. İnkübatörler larva transferi yapılmadan yaklaşık 30 dakika öncesinden % 75 nem ve 35 °C sıcaklığa ayarlanmış olması gerekmektedir.

3.3.4. Larva beslenmesi ve bakımı

Tablo 1’de belirtilmiş olan her üç diyet (1, 2 ve 3), günlük yaşlarına bağlı olarak larvalara verilir. Larvalara verilen diyet miktarı da aynı şekilde değişmektedir. Altı günlük bir dönemde toplam 5 besleme vardır ve yetiştirmenin ikinci gününde besleme yapılmamaktadır. Genç larvalar plastik aşılama aracı vasıtasıyla, sterilize edilip hazırlanmış olan plastik larva hücre kaplarına aktarılır. Diyet 1’i larva beslenmesinde kullanmadan önce yaklaşık 35°C olacak şekilde inkübatörde önceden ısıtılması gereklidir. Isıtılmaması durumunda 1 günlük yaştaki bal arısı larvası ani ısı değişiminden olumsuz etkilenecektir. Diyetin önceden ısıtılması, yaklaşık bir saat önce larvaları arılıktan laboratuvara nakletmeden önce aşılama ve kuluçka makinesine yerleştirilmelidir. Sterilize

edilmiş plastik larva kapları ve aşılama aletlerini nitril eldiven ve maske kullanarak larvaları daha önceden diyet 1'in damlatıldığı kaplara bırakılmaktadır.



Şekil 1. Larvanın gelişimi süreci (A, toplanma günü, 20 µl), birinci gün (B, 0 µl), ikinci gün (C, 20 µl), üçüncü gün (D, 30 µl), dördüncü gün (E, 40 µl), beşinci gün (F, 50 µl) ve altıncı gün (G)

Larvaların, gelişimlerini sürdürecekleri kaplara bırakılmasından sonraki günlerde ise diyet içerikleri ve miktarlarında değişiklikler olmaktadır (Şekil 1). 120 saat boyunca gelişimleri gözlemlenen larvalar 35 °C ve karanlıkta kalmaları gerekmektedir.

3.3.5. Pupa transferi ve bakımı

6 günlük yaşa ulaşan larvalar, ergin hale ulaşacakları plastik pupa kaplarına taşınırlar. Bu aşamada herhangi besleme işlemi olmamaktadır. Larvalar % 75 bağıl nemde tutulan bir inkübatör içerisinde NaCl tuz çözeltisi kullanarak kurutulur. Aşamanın kontrolü sırasında pupaya kesinlikle dokunulmaması gerekmektedir. Ergin arılar yaklaşık 21 gün (aşılama sonrası 18 gün) sonra ortaya çıkmaya başlayacaklardır. Ortaya çıkan yetişkin arılar günde en az bir kez kontrol edilmesi gereklidir, çünkü bazı yetişkin arıların ortaya çıkması çeşitli nedenlerle gecikebilmektedir. Gelişmekte olan yetişkinler, yapay bir biyo-analiz kafesinde polen ve % 50 şekerli su çözeltisi ile beslenerek idame ettirilebilir (Aupinel vd., 2005).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

İn vitro çalışmalar laboratuvar ortamında kontrollü şartlarda gerçekleştirildiğinden dolayı popüler risk değerlendirme çalışmalarında büyük bir öneme sahiptir. Alandaki çalışmaların yapılması endüstriye ve akademiye yeni bir gelişim alanı kazandırmıştır. Yapılan çalışmaların bal arılarının morfolojisini, fizyolojisini, davranışlarının nasıl etkilenebileceğini araştırılmıştır, *in vitro* koşulların sağlanması gereken protokoller hazırlanmıştır. *İn vitro* koşullarda elde edilen bal arılarının, koloni içerisinde gelişenlere kıyasla morfolojik, fizyolojik ve davranışsal olarak ne ölçüde farklılıkların ortaya çıkabileceğini ortaya koymak amacıyla az sayıda çalışma bulunmaktadır. Son zamanlarda yaşanan koloni kayıpları bu yetiştirme yöntemi üzerine daha fazla dikkat çekmekte olup bu yöntem vasıtasıyla toksikolojik çalışmalar yapılmaktadır. Ortaya konulan çalışmaların sonucunda, bal arılarının fizyolojik, patolojik yapılarının geliştirilebileceği vizyonu açılmakta olup gerçekleştirilmesi adına daha fazla çalışma yapılmasına gereksinim duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aupinel, P., Fortini, D., Dufour, H., Tasei, J. N., Michaud, B., Odoux, J. F. & Pham-Delegue, M. H. (2005). Improvement of artificial feeding in a standard *in vitro* method for rearing *Apis mellifera* larvae. *Bulletin of Insectology*, 58(2), 107-111.
- Buttstedt, A., Ihling, C. H., Pietzsch, M. & Moritz, R. F. A. (2016). Royalactin is not a royal making of a queen, *Nature*, 537:E10–E12.
- Brodschneider, R., Riessberger-Gallé, U. & Crailsheim, K. (2009). Flight performance of artificially reared honeybees (*Apis mellifera*), *Apidologie* 40(4), 441-449. doi: 10.1051/apido/2009006
- Cassidy, E. J., Bath, E., Chenoweth, S. F. & Bonduriansky, R. (2014). Sex-specific patterns of morphological diversification: evolution of reaction norms and static allometries in neriid flies. *Evolution*, 68(2), 368-383. doi: 10.1111/evo.12276
- Crailsheim, K., Brodschneider, R., Aupinel, P., Behrens, D., Genersch, E., Vollmann, J. & Riessberger-Galle, U. (2013). Standard methods for artificial rearing of *Apis mellifera* larvae, *Journal of Apicultural Research*, 52(1), 1-16. doi: 10.3896/IBRA.1.52.1.05
- Dai, P., Jack, C. J., Mortensen, A. N. & Ellis, J. D. (2017). Acute toxicity of five pesticides to *Apis mellifera* larvae reared *in vitro*, *Pest Management Science*, 73(11), 2282-2286. doi:10.1002/ps.4608
- Gallai, N., Salles, J. M., Settele, J. & Vaissière, B. E. (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological economics*, 68(3), 810-821.
- Genç, M. & Genç, F. (2019). Stress factors on Honey Bees (*Apis mellifera* L.) and the components of their defense system against diseases, parasites, and pests. *Mellifera*, 19(1), 7-20.
- Goulson, D., Nicholls, E., Botias, C. & Rotheray, E. L. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347, 1255957.
- Giray, T., Kence, M., Oskay, D., Doke, M. A. & Kence, A. (2010). Sci-entific note: colony losses survey in Turkey and causes of bee deaths. *Apidologie*, 41(4), 451-453.
- Güler, A. (2017). Besin Madde İhtiyaçları ve Beslenme. *Bal Arısı (Apis mellifera L) Yetiştiriciliği Hastalıkları ve Ürünleri*. (pp.120-121).
- Hendriksma, H.P., Härtel, S. & Steffan-Dewenter, I. (2011). Honey bee risk assessment: new approaches for *in vitro* larvae rearing and data analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(5), 509-517.

- Hrassnigg, N. & Crailsheim, K. (2005). Differences in drone and worker physiology in honeybees (*Apis mellifera*). *Apidologie*, 36(2), 255-277. doi: 10.1051/apido:2005015
- Hristov, P., Neov, B., Shumkova, R. & Palova, N.(2020a). Significance of Apoidea as main pollinators, ecological and economic impact and implications for human nutrition. *Diversity*, 12(28), 1-15. doi: 10.3390/d12070280
- Hristov, P., Neov, B., Shumkova, R. & Palova, N. (2020b). Factors associated with honey bee colony losses:a mini-review. *Veterinary Sciences*, 7(4), 166. doi:10.3390/vetsci7040166
- Kaftanoğlu, O., Linksvayer, T. A. & Page, R. E. (2010). Rearing honey bees (*Apis mellifera* L.) *in vitro*: effects of feeding intervals on survival and development. *Journal Apicultural Research*, 49(4), 311-317. doi: 10.3896/IBRA.1.49.4.03
- Klein, A. M., Vaissiere, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C. & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society of London B Biological Sciences*, 274(1608), 303-313.
- Lautenbach, S., Seppelt, R., Liebscher, J. & Dormann, C. F. (2012). Spatial and Temporal Trends of Global Pollination Benefit. *PloS one*, 7:e35954.
- Lewkowski, O., Mureşan, C. I., Dobritsch, D., Fuszard, M., & Erler, S. (2019). The effect of diet on the composition and stability of proteins secreted by honey bees in honey. *Insects*, 10(9), 282. doi: 10.3390/insects10090282
- Li, G. Zhao, H., Liu, Z., Wang, H., Xu, Band. & Guo, X. (2018) The wisdom of Honeybee defenses against environmental stresses. *Frontiers in Microbiology*, 9(722). doi: 10.3389/fmicb.2018.00722
- Morawetz, L., Köglberger, H., Griesbacher, A., Derakhshifar, Crailsheim, I., Brodschneider, K. R. & Moosbeckhofer, R.(2019). Health status of honey bee colonies (*Apis mellifera*) and disease-related risk factors for colony losses in Austria. *Plos one*, 14(7):e0219293.
- Moritz, R. F. A., Miranda, J. D., Fries, I., Conte, Y. L., Neumann, P. & Paxton, R. J. (2010). Research strategies to improve Honeybee health in Europe. *Apidologie*, 41(3), 227-242. doi: 10.105/Apido/2010010.
- Mortensen, A. N. (2017). Behavioral and morphological effects of *in vitro* larval rearing on adult honey bees, *Apis mellifera* L.(Doktora Tezi, University Of Florida)
- Mortensen, A. N. & Ellis, J. D. (2018). A honey bee (*Apis mellifera*) colony's brood survival rate predicts its *in vitro*-reared brood survival rate.

- Apidologie*, Springer Verlag, 49(5), 573-580. doi: 10.1007/s13592-018-0584-0
- Neumann, P. & Carreck, N. L. (2010). Honey bee colony losses. *Journal Of Apicultural Research*, 49(1), 1-6. doi: [Http://dx.doi.org/10.3896/IBRA.1.49.1.01](http://dx.doi.org/10.3896/IBRA.1.49.1.01)
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O. & Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(6), 345-353.
- Rembold, H. & Lackner, B. (1981). Rearing of honeybee larvae *in vitro* - effect of yeast extract on queen differentiation. *Journal Apiculture Research*, 20(3), 165-171.
- Peng, Y. S. C., Mussen, E., Fong, A., Montague, M. A. & Tyler, T. (1992). Effects of chlortetracycline of honey bee worker larvae reared *in vitro*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 60(2), 127-133. doi: 10.1016/0022-2011(92)90085-i
- Schmickl, T. & Crailsheim, K. (2002). How honeybees (*Apis mellifera* L.) change their broodcare behaviour in response to non-foraging conditions and poor pollen conditions. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 51(2), 415-425.
- Schmehl, D. R., Tome, H. V. V., Mortensen, A. N., Martins, G. F. & Ellis, J. D. (2016). Protocol for the *in vitro* rearing of honey bee (*Apis mellifera* L.) workers. *Journal of Apicultural Research*, 55(2), 113-129. doi: 10.1080/00218839.2016.1203530
- Scofield, H. N. & Mattila, H. R. (2015). Honey bee workers that are pollen stressed as larvae become poor foragers and waggle dancers as adults. *PLoS ONE* 10:e0121731. doi: 10.1371/journal.pone.0121731
- Traynor, K. S., Rennich, K., Forsgren, E., Rose, R., Pettis, J., Kunkel, G., Madella, S., Evans, J., Lopez, D. & van Engelsdorp, D. (2016). Multiyear survey targeting disease incidence in US honey bees. *Apidologie*, 47(3), 325-347.
- Tautz, J., Maier, S., Groh, C., Rossler, W. & Brockmann, A. (2003) Behavioral performance in adult honey bees is influenced by the temperature experienced during their pupal development. *Proceedings of the National Academy Sciences*, 100(12), 7343-7347. doi: 10.1073/pnas.1232346100
- Vandenberg, J. D. & Shimanuki, H. (1987). Technique for rearing worker honeybees in the laboratory. *Journal of Apicultural Research*, 26(2), 90-97. doi: 10.1080/00218839.1987.11100743.
- Van Engelsdorp, D. Underwood, R. Caron, D. & Hayes, J. Jr. (2007). An estimate of managed colony losses in the winter of 2006–2007: A report

- commissioned by the apiary inspectors of America. *American. Bee Journal*, 147(7), 599-603.
- Van Engelsdorp D., Hayes, J. Jr., Underwood, R. M. & Pettis J. (2008). A survey of honey bee colony losses in the U.S. Fall 2007 to Spring 2008, *Plos one* 3(12):e4071, doi:10.1371/journal.pone.0004071.
- Van Engelsdorp, D. & Meixner, M. D. (2010). A historical review of managed honey bee populations in Europe and the United States and the factors that may affect them. *Journal of Invertebrate Pathology*, 103(1), 80-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jip.2009.06.011>
- Williams, G. R., Alaux, C., Costa, C., Csaki, T., Doublet, V., Eisehardt, D., Fries, I., Kuhn, R., McMahon, D. P., Medrzycki, P., Murray, T. E., Natsopoulou, M. E., Neumann, P., Oliver, R., Paxton, R. J., Pernal, S. F., Shutler, D., Tanner, G., van der Steen, J. J. M. & Brodschneider, R. (2013). Standard methods for maintaining adult *Apis mellifera* in cages under *in vitro* laboratory conditions. *Journal of Apicultural Research*, 52(1), 1-36, doi: 10.3896/IBRA.1.52.1.04
- Wittmann, D. & Engels, W. (1981). Development of test procedures for insecticide-induced brood damage in honey bees. *Mitteilungen der deutschen gesellschaft für allgemeine und angewandte entomologie*, 3(1), 187-190.
- Yang, Y., Ma, S., Liu, F., Wang, Q., Wang, X., Hou, C., Wu, Y., Gao, J., Zhang, L., Liu, Y., Diao, Q. & Dai, P. (2019). Acute and chronic toxicity of acetamiprid, carbaryl, cypermethrin and deltamethrin to *Apis mellifera* larvae reared *in vitro*. *Pest Management Science*, 76(3), 978-985.doi: 10.1002/ps.5606

Koyunlarda Mitokondriyal DNA Temelli Filogenetik Çalışmalar

Mehmet SARAÇOĞLU¹

1. GİRİŞ

Evcil hayvanlar, insanlık tarihinin erken dönemlerinden itibaren tarımsal üretimin temelini oluşturmuş ve çeşitli türlerin evcilleştirilmesi hem ekonomik hem de kültürel açıdan önemli gelişmelere yol açmıştır. Bu bağlamda, çiftlik hayvanlarında gözlenen genetik çeşitlilik, hayvanların adaptasyonu, sağkalımı ve verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır (Zhong ve ark., 2020). Evcilleştirilen türlerin korunması, özellikle iklim değişikliği gibi çevresel tehditlere karşı direnç ve sürdürülebilirlik açısından stratejik önem taşımaktadır (Scherf, 2000; Ramljak ve ark., 2018).

Evcil koyun (*Ovis aries*), insan tarafından binlerce yıldır başta yapağı, süt, et ve deri üretimi için ıslah edilen önemli bir türdür. Arkeolojik, tarihî ve moleküler genetik çalışmalar koyunun, yaklaşık 10.500 yıl önce Bereketli Hilal (Fertile Crescent) bölgesinde evcilleştirildiğini göstermektedir (Alberto ve ark., 2018; Ben Sassi-Zaidy ve ark., 2022). Evcil koyunun atası olarak kabul edilen Asya yaban koyunu (*Ovis orientalis*, diğer adıyla *O. gmelinii*), bu türün genetik kökenlerine ışık tutmaktadır (Ciani ve ark., 2020; Portainer ve ark., 2022).

Başlangıçta, evcil koyunla aynı kromozom sayısına ($2n = 54$) sahip olan Avrupa yaban koyununun (*O. musimon*) da evcil koyunun atası olabileceği düşünülmüştür (Barbato ve ark., 2017; Taylor ve ark., 2021). Ancak arkeogenetik veriler, bu görüşün daha sınırlı olduğunu ve Avrupa yaban koyununun evcilleştirmeden sonra ortaya çıkan yabani popülasyonlar olabileceğini ortaya koymaktadır (Vigne, 1992; Pedrosa ve ark., 2005; Vigne ve ark., 2011).

Neolitik dönem sırasında, evcilleştirilmiş koyunların yaklaşık MÖ 10.000'de Akdeniz'in doğusundaki Kıbrıs adasına, daha sonra ise MÖ 6000–7000 civarında Korsika ve Sardinya'ya taşındığı ve burada Avrupa yaban koyunu popülasyonlarının oluştuğu kabul edilmektedir (Vigne, 1992; Pedrosa ve ark., 2005). Bu yayılım süreci, insan göçleri ve kültürel etkileşimlerle paralel gelişmiş, koyunların genetik çeşitliliğinin artmasına olanak sağlamıştır.

¹ Dr., ORCID: 0000-0002-5845-2099

Evcil hayvanlarda gözlenen mikroevolüsyon, vahşi atalara kıyasla önemli fenotipik ve genetik farklılıkların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Günümüzde, yüksek verimlilik kapasitesine sahip olan “dünya ırkları” yoğun olarak yetiştirilirken, yerli ırklar hem üretimden hem de toplum bilincinden giderek silinmektedir. Yerli ırkların genetik çeşitliliği, yüksek akraba eşleşmeleriyle oluşturulan kültür ırklarına göre daha zengin alel havuzları içerebilir ve bu durum onların hastalıklara karşı direnci ve çevresel değişikliklere adaptasyon yeteneklerini artırmaktadır. Ancak, uygun çiftleşme planlarının olmaması nedeniyle yerli ırkların genetik çeşitliliği hızla azalmakta ve genetik savunmasızlık artmaktadır.

Evcil çiftlik hayvanlarının evrimi, doğal ve insan kaynaklı seçim süreçlerinin birlikte etkisiyle şekillenmiştir. Doğal seçim, hayvanların çevresel koşullara uyum sağlamasını sağlarken, insan seçimi özellikle verimliliği artırmaya yönelik olmuştur. İlk evcilleştirilen gıda amaçlı hayvanlar arasında koyun (*Ovis aries*), keçi (*Capra hircus*), hörgüçsüz sığır (*Bos taurus*) ve domuz (*Sus scrofa*) yer almakta; atların ise ulaşım ve iş gücü amaçlı evcilleştirildiği bilinmektedir. Bu türlerin evcilleştirilme merkezinin, Bereketli Hilal bölgesi olduğu ve bu süreçlerin yaklaşık 10–15 bin yıl önce gerçekleştiği kabul edilmektedir (Peters ve ark., 2005). Zebular (*Bos indicus*) ise yaklaşık 8–10 bin yıl sonra, Neolitik dönemde Güney Asya’da evcilleştirilmiş, Doğu Asya domuzları ise genetik olarak Güneybatı Asya’daki yaban domuzlarından farklı olarak yerel popülasyonlardan türemiştir (Lv ve ark., 2015; Ganbold ve ark., 2019).

Koyunların evcilleştirme merkezinden yayılımı, Mezolitik’ten Neolitik döneme geçişte (yaklaşık 8000–9000 yıl önce) insan faaliyetleriyle hızlanmıştır. Chessa ve ark. (2009), koyun genomundaki endojen retrovirüsleri genetik belirteç olarak kullanarak kuzeybatı Avrupa’ya doğru iki büyük göç dalgası tespit etmişlerdir: ilk dalga Bereketli Hilal’den gelen “ilkel” koyunları, ikinci dalga ise yaklaşık 5000 yıl önce gerçekleşen gelişmiş koyunların göçünü temsil etmektedir (Olivieri ve ark., 2012).

Evcilleştirmenin başlamasından yaklaşık 1000 yıl sonra, Güneybatı Asya’da avcılık-toplayıcılığın yerini evcil hayvanlar ve tarım almış, bu canlılar Avrupa’ya Akdeniz ve Tuna Vadisi rotaları ile yayılmıştır. Lentivirüslerin filogenetik analizi bu yayılım modellerini desteklemektedir (Molae ve ark., 2020). Akdeniz rotası Kıbrıs’tan başlayıp Balkanlar, Apenin Yarımadası, Korsika, Sardinya ve daha sonra Kuzey İtalya ve Güney Fransa’ya ulaşırken, Tuna rotası Orta ve Kuzey Avrupa’ya uzanmıştır (Larsson ve ark., 2024). Olivieri ve ark. (2012), Tunç Çağı Avrupa koyunlarının mtDNA analizleriyle koyunların yaklaşık 5000 yıl önce Alplere ulaştığını ortaya koymuştur.

İber Yarımadası'ndaki Neolitik yerleşimler sırasıyla İspanya'da 7700–7600 yıl ve Portekiz'de 7400–7300 yıl öncesine tarihlenmiştir (Zeder, 2017; Chen ve ark., 2021). Öte yandan, *Ovis* cinsinin İber Yarımadası'na Afrika ve Orta Avrupa'dan tekrar tekrar giriş yaptığına dair farklı görüşler de mevcuttur. Kuzey Avrupa'ya doğru yerleşim ise Kafkasya ve Rusya üzerinden gerçekleşmiştir (Tapio ve ark., 2006; Niemi ve ark., 2013).

Asya'da koyunların kolonizasyonu, Orta Doğu'dan başlayarak Moğolistan Platosu ve Hint Alt Kıtası'na, oradan da Çin'in kuzeyi ve güneybatısına doğru yayılmıştır (Lv ve ark., 2015; Ganbold ve ark., 2016). Bu yayılımın da Avrupa'daki gibi farklı güzergâhlar üzerinden gerçekleşmiş olabileceği öne sürülmektedir (Singh ve ark., 2013).

Çiftlik hayvanlarının genetik çeşitliliği hem ekonomik verimlilik hem de çevresel streslere dayanıklılık açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle yerel ırkların korunması, iklim değişikliği senaryolarında insan ihtiyaçlarını karşılamada ve gelecekte ortaya çıkabilecek henüz bilinmeyen kullanımlar için genetik kaynak sağlama açısından kritik bir role sahiptir (Scherf, 2000; Ramljak ve ark., 2018).

Sonuç olarak, koyun genetiği üzerine yapılan araştırmalar; evcilleştirme tarihinin, seçim süreçlerinin, ırk çeşitliliğinin ve sürdürülebilir ırk koruma stratejilerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Genetik belirteçlerin etkin kullanımı, mevcut gen havuzunun korunmasına ve hayvancılık sektörünün ekonomik verimliliğinin artırılmasına hizmet etmektedir.

2. KOYUN MTDNA'SININ GENETİK YAPISI VE FİLOGENETİK ÖNEMİ

Mitokondriyal DNA (mtDNA), maternal kalıtımı, yüksek kopya sayısı, intron içermemesi, kısa genler arası bölgeleri ve hızlı mutasyon oranı nedeniyle hayvan türlerinde genetik çeşitliliğin, evrimsel geçmişin ve evcilleştirme süreçlerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir moleküler belirteçtir (Gyllensten vd., 1991; Hiendleder vd., 2002; Hanotte, 2007). Bu özellikleri sayesinde mtDNA, diğer moleküler belirteçlerle birlikte biyolojik sistematiğin, evrimsel biyolojiye kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (Abramson, 2013).

Bir koyunun mitokondriyal DNA'sı (mtDNA), yaklaşık 16.618 baz çifti uzunluğunda halkasal (sirküler) bir moleküldür ve diğer memelilerde olduğu gibi oldukça korunan bir genetik yapıya sahiptir (Hiendleder ve ark., 1998) (Şekil 1). Koyun mtDNA'sı toplam 37 gen içerir: bunlardan 13'ü solunum zincirinde görev yapan proteinleri (örneğin *ND1-ND6*, *COX1-COX3*, *ATP6*, *ATP8*, *CYTB*), 22'si tRNA'ları ve 2'si rRNA'ları (12S ve 16S) kodlar. Ayrıca, protein kodlayan

genlerin çoğu iç intron içermez ve genler arasındaki boşluklar oldukça kısadır. Bu genomda, protein kodlayan genlerin neredeyse tamamı ağır zincir (H-zincir) üzerinde yer alırken, sadece birkaçı hafif zincir (L-zincir) üzerinde bulunmaktadır. Genomun önemli bir bölgesi olan kontrol bölgesi (D-loop), protein kodlamaz ancak replikasyonun ve transkripsiyonun başlama noktalarını içerir. Bu bölge, yüksek mutasyon oranı nedeniyle filogenetik analizler ve populasyon genetiği çalışmaları için özellikle değerlidir. Koyun mtDNA'sının bu kompakt yapısı, onun evrimsel ve taksonomik çalışmalar için oldukça güvenilir ve güçlü bir moleküler araç olmasını sağlar (Hiendleder ve ark., 2002; Rezaei ve ark., 2010).

Şekil 1. Örnek bir koyun mtDNA şeması (Xu ve ark., 2023)

MtDNA'nın D-loop bölgesi ve sitokrom b (CytB) geni, özellikle anne hattı soylarının izlenmesinde ve filogenetik ilişkilerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ilmira ve ark., 2018; Kamalakkannan ve ark., 2021). Bu bağlamda, mtDNA polimorfizmi, hayvan popülasyonlarının genetik yapısının anlaşılmasında ve evrimsel süreçlerin izlenmesinde temel araçlardan biri haline

gelmiştir (Al-Arami ve ark., 2017; Dymova ve ark., 2017; Ibrahim ve ark., 2023; Mishra ve ark., 2023; Salim ve ark., 2023). MtDNA'nın analizi, yalnızca türler arası değil, aynı tür içerisindeki popülasyonlar arasındaki genetik farklılıkları da yüksek doğrulukla ortaya koyabilmektedir.

Popülasyon genetikçileri, hayvan türlerinin gerçek genetik yapısını ve popülasyonlar içindeki ilişkileri aydınlatmak amacıyla çeşitli DNA polimorfizmlerinden yararlanmıştır. Bu amaçla mikrosatellit belirteçleri (Menezes ve ark., 2020; Ocampo ve ark., 2021), tek nükleotid polimorfizmleri (SNP) (Chokoe ve ark., 2020; Monau ve ark., 2020) ve mtDNA yaygın olarak kullanılan genetik araçlardır. DNA çip teknolojisinin gelişmesi sayesinde binlerce SNP'nin aynı anda analiz edilmesi mümkün hale gelmiş, bu da evcil türler kadar akraba yabancı türlerin genetik incelenmesine de olanak tanımıştır (Tokarska ve ark., 2009; Kharzinova ve ark., 2018).

Özellikle mtDNA kontrol bölgesi (D-loop), düşük rekombinasyon oranı, maternal kalıtım özelliği (Dotsev ve ark., 2021), nükleer DNA'ya kıyasla daha yüksek substitüsyon oranı (Liu ve ark., 2016) ve dizileme kolaylığı sayesinde genetik çeşitliliğin araştırılmasında son derece kullanışlı bir belirteçtir. MtDNA D-loop dizilemesi kullanılarak çeşitli türlerin kökeni ve tarihçesi başarıyla ortaya konmuştur (Murunga ve ark., 2018; Araujo de Carvalho ve ark., 2020; Ngulama, 2021).

Günümüzde mtDNA'ya dayalı araştırmalar, özellikle tehlike altındaki yerli hayvan ırklarının korunmasında stratejik önem taşımaktadır. Çünkü bu belirteçler, türlerin yalnızca filogenetik kökenlerini değil, aynı zamanda genetik çeşitlilik düzeylerini de ortaya koyarak koruma programlarına yön verebilir.

Koyun ırklarının moleküler karakterizasyonunda geçmişte çeşitli teknikler kullanılmıştır. Bunlar arasında mikrosatellitler (SSR, STR), AFLP, RFLP, SNP ve mtDNA belirteçleri bulunmaktadır (Giovambattista ve ark., 2001). Bu moleküler araçlar, genetik varyasyonların belirlenmesinde yüksek çözünürlük sağlamakta ve türler arası ya da tür içi farklılıkların saptanmasında önemli katkılar sunmaktadır. MtDNA'nın özellikle oosit olgunlaşması sırasında yalnızca maternal olarak aktarılması, filogenetik yapıların ve atasal soy hatlarının izlenmesini mümkün kılmakta, bu da onu filogenetik analizlerde vazgeçilmez bir araç haline getirmektedir (Arain, 2022; Gyllensten vd., 1991).

Sonuç olarak, mitokondriyal DNA analizi, hayvan genetiği, evrimsel biyoloji, evcilleştirme süreçleri ve koruma genetiği gibi birçok alanda kritik bilgiler sunmakta ve bu bağlamda araştırmaların derinleşmesi, hayvancılıkta sürdürülebilirlik ve genetik kaynakların korunması açısından büyük önem arz etmektedir.

3. KOYUNLARDA MİTOKONDİRİYAL HAPLOGRUP ÇEŞİTLİLİĞİ VE EVRİMSEL YANSIMALARI

Mitokondriyal DNA (mtDNA), anneden yavruya geçen yapısıyla türlerin evrimsel geçmişinin izini sürebilmek açısından önemli bir moleküler araçtır. Koyunlarda (*Ovis aries*) yapılan mitokondriyal analizler, bu türün evcilleştirilme süreci ve coğrafi yayılımı hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Günümüzde hem tam mitokondriyal genom dizileri hem de D-loop ve sitokrom B (cytB) gibi özgül bölgelere ait veriler, koyunlarda beş ana mtDNA haplogrubunun (A, B, C, D ve E) varlığını ortaya koymuştur (Liu ve ark., 2016; Gáspárdy ve ark., 2021; Wanjala ve ark., 2021).

Bu haplogruplar içinde A ve B hem modern hem de antik koyun popülasyonlarında en yaygın olarak gözlemlenen gruplardır (Demirci ve ark., 2013; Rannamäe ve ark., 2016; Yurtman ve ark., 2021). A haplogrubu, özellikle Asya kökenli evcil koyunlarda baskın olarak görülmekte (Dymova ve ark., 2017; Schroeder ve ark., 2017), B haplogrubu ise Avrupa'daki koyun popülasyonlarına özgü bir dağılım sergilemektedir (Lancioni ve ark., 2013). Bu iki baskın haplogrubun geniş coğrafi dağılımı, evcilleştirme sürecinin tek bir merkezde değil, çok merkezli olarak gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Arkeolojik ve genetik veriler, koyunların yaklaşık 10.000 yıl önce Türkiye, İran ve Arap Yarımadası'nı kapsayan "Verimli Hilal" bölgesinde evcilleştirildiğini göstermektedir (Al-Araimi ve ark., 2017; Eydivandi ve ark., 2020). Bu bağlamda, A ve B haplogruplarının iki bağımsız evcilleştirme olayının sonucu olarak ortaya çıkmış olabileceği öne sürülmektedir (Pedrosa ve ark., 2005; Resende ve ark., 2016). Filogenetik analizler, haplogrup B'nin Avrupa muflonu (*Ovis aries musimon*), A'nın ise Asya muflonu (*Ovis orientalis*) ile ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Meadows ve ark., 2006; Resende ve ark., 2016). Bununla birlikte, bazı araştırmacılar, Sardinya ve Korsika'da yaşayan Avrupa muflonlarının aslında evcil koyunların yabani ataları değil, eski evcil koyun popülasyonlarının yabanileşmiş kalıntıları olabileceğini savunmaktadır (Pedrosa ve ark., 2005; Meadows ve ark., 2006).

Üçüncü büyük grup olan C haplogrubu, antik ve modern koyunlarda özellikle Orta Doğu'da tanımlanmıştır (Gabbianelli ve ark., 2015; Machová ve ark., 2022). Türkiye, bu haplogrubun en fazla tespit edildiği ülkelerden biri olup, İber Yarımadası (Pedrosa ve ark., 2007), Güney Balkanlar (Pariset ve ark., 2011), Çin (Li ve ark., 2023), Kuzey Kafkasya (Tapio ve ark., 2006) ve Asya'nın diğer bölgelerinde de düşük frekanslarla gözlemlenmiştir (Zhao ve ark., 2013). C haplogrubunun yüksek genetik çeşitlilik taşıdığı da rapor edilmiştir (Guo ve ark., 2005; Pedrosa ve ark., 2005).

Daha nadir görülen D ve E haplogrupları, sınırlı coğrafyalarda düşük frekanslarda tanımlanmıştır. D haplogrubu, yalnızca Kafkasya'daki modern koyunlarda rapor edilmiş (Tapio ve ark., 2006), E haplogrubu ise Orta Doğu, Tibet, Kafkasya ve Avrupa gibi bölgelerde hem antik hem de modern örneklerde sınırlı sayıda tespit edilmiştir (Meadows ve ark., 2007; Mariotti ve ark., 2013; Gáspárdy ve ark., 2021; Liu ve ark., 2016; Rafia ve Tarang, 2016). Bu haplogrupların varlığı, bazı koyun soylarının yerel olarak korunmuş olabileceğini veya daha az yayılma göstermiş olabileceğini düşündürmektedir.

Mitogenom analizleri sayesinde, koyunlarda yalnızca beş haplogrup (A–E) günümüzde modern ırklarda tespit edilebilmektedir. Ancak F ve G olarak adlandırılan iki eski haplogrubun varlığı, geçmişte daha geniş bir genetik çeşitliliğin bulunduğunu ve bu soyların günümüzde artık gözlemlenmediğini göstermektedir (Wood ve Phua, 1996). Örneğin, D haplogrubunun, Anadolu'da yaşamış bir muflon alt türü olan *O. gmelini anatolica* ile yakın akraba olduğu belirtilmiştir (Tapio ve ark., 2006; Demirci ve ark., 2013; Sanna ve ark., 2015).

Mitokondriyal kontrol bölgesine ait 399 dizi üzerinde yapılan analizlerde, Afrika yerli koyunlarının üç ana haplogrup (A, B ve C) içinde 272 farklı haplotip taşıdığı ve bu gruplar arasında B haplogrubunun baskın olduğu bildirilmiştir (Wanjala ve ark., 2021). Benzer şekilde, Li ve ark. (2023), koyunlarda yapısal varyasyonların kuyruk fenotipleri gibi karakteristikler üzerinde etkili olabileceğini ve bu varyasyonların pangenom yaklaşımıyla analiz edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Alnajm ve ark. (2021) ise, İran'a özgü dört yerli ırk arasında hem içsel hem de ırklar arası önemli düzeyde genetik çeşitlilik bulunduğunu ortaya koymuştur.

Haplogruplar arasındaki genetik ayrışma, yalnızca kökeni değil, aynı zamanda evcilleştirme sonrası seçim baskıları sonucu ortaya çıkan fenotipik çeşitliliği de yansıtabilir. Özellikle C, D ve E haplogruplarının, et verimi, yapağı tipi, kürk rengi, boynuz yapısı ve kuyruk şekli gibi üretimle ilişkili özelliklerde rol oynayabilecek seçim süreçlerinin izlerini taşıdığı düşünülmektedir (Meadows ve ark., 2006; Resende ve ark., 2016).

Tüm bu bulgular, koyunların mitokondriyal DNA'sının yalnızca evcilleştirme merkezlerini ve göç yollarını değil, aynı zamanda tür içi adaptasyon ve popülasyon yapısındaki farklılıkları anlamada da kritik bir araç olduğunu göstermektedir. Rezaei ve ark. (2010), mevcut haplogrupların yaklaşık 5.000 ila 35.000 yıl önce ortaya çıkmış olabileceğini öne sürerek bu evrimsel sürecin derinliğini vurgulamıştır.

Bununla birlikte, bugüne kadar yapılan çalışmaların büyük kısmı yalnızca D-loop (Barbato ve ark., 2022) veya cytB (Liu ve ark., 2020) gibi sınırlı mtDNA bölgelerine odaklanmış, tam mitokondriyal genomların sistematik olarak

karşılaştırıldığı araştırmalar sınırlı kalmıştır. Gelecekte tüm mitokondriyal genomların dizilendiği çalışmaların yaygınlaşması, koyunların yaşam döngüsü, adaptasyon kapasiteleri ve üretim potansiyelleri hakkında daha derinlemesine bilgiler elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

4. MTDNA KULLANILARAK YAPILAN FİLOGENETİK ÇALIŞMALAR

Radoslavov ve ark. (2025) yaptıkları bu çalışmada, mitochondrial D-loop bölgesinin bir kısmının dizileme analizi temel alınarak Bulgaristan'ın en popüler sekiz yerel koyun ırkının genetik çeşitliliği incelenmiştir. Yaklaşık tamamı mitochondrial DNA (mtDNA) D-loop bölgesi (1180 bp) çoğaltılmış ve dizilenmiştir. Elde edilen sonuçlar, üç ana haplogrupa ait 192 haplotipin varlığını göstermiştir. Örneklerin çoğunluğunda Avrupa haplogrubu B yüksek oranda (%89,6) bulunurken, bunu haplogrup A (%8,6) ve C (%1,8) izlemiştir. Diğer bildirilen mitochondrial haplogrurlara rastlanmamıştır. Farklı haplotip sayısı, nükleotid ve haplotip çeşitliliği yüksek bulunmuş (sırasıyla 192, 0.01286 ve 0.996), bu da tüm popülasyonlarda birden fazla maternal kökenin varlığına işaret etmektedir. Tüm çalışma popülasyonlarında Tajima D-testi değeri -1.774 ($p < 0.05$) olup, nadir allellerin bolluğunun muhtemelen yakın zamanda yaşanan bir daralma (bottleneck) sonrası nüfus genişlemesinden kaynaklandığını göstermektedir. İncelenen yerel koyun ırklarındaki yüksek mtDNA polimorfizmi, Bulgaristan'da keşfedilmeyi bekleyen önemli bir benzersiz genotip rezervinin varlığına işaret etmektedir.

Estrada ve ark. (2025) tarafından yapılan bu çalışma, beş Peru Kriolu koyun bireyinin (*Ovis aries*) tam mitokondriyal genomunu analiz ederek genetik varyabilitelerini ve filogenetik ilişkilerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Mitokondriyal genom 16.617 baz çiftinden (bp) oluşmakta olup, guanin-sitozin (GC) içeriği %39'dur ve 13 protein kodlayan gen, 22 transfer RNA geni ile iki ribozomal RNA genini içermektedir. Kodon kullanım eğilimi analizleri, özellikle Arjinin (Arg), Serin (Ser) ve Treonin (Thr) için belirgin bir tercih olduğunu göstermekte ve bu durumun mitokondriyal gen evriminde mutasyonel baskının etkisine işaret etmektedir. Filogenetik analizler, PCS bireylerini Rusya, Brezilya ve Yeni Zelanda'dan koyun ırklarıyla birlikte Üçüncü Klan (Clade III) içinde konumlandırmakta ancak bu bireyler monofiletik bir grup oluşturmamaktadır. Monofiliğin olmaması, birden fazla tarihsel girişim olayına ve farklı koyun popülasyonlarıyla gen akışına işaret etmekte olup, bu durum Akdeniz ve Afrika koyun ırklarındaki desenlerle paralellik göstermektedir. Peru Kriolu koyunlarının Brezilya ve Çin soylarıyla filogenetik ilişkisi, genetik arka planlarının

karmaşıklığını ortaya koymakta ve potansiyel karışım ile tarihsel introgresyonu işaret etmektedir. Bu bulgular, Peru Kriolu koyunlarının evrimsel tarihinin daha iyi anlaşılması ve zoogenetik kaynaklarının korunması için daha kapsamlı genomik araştırmalara ihtiyaç olduğunu vurgulamaktadır.

Ahmed ve ark. (2025) tarafından yapılan bu çalışma, Khyber Pakhtunkhwa bölgesinden 10 yerel koyun ırkının genetik çeşitliliğini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada 159 dişi bireyden alınan örneklerin mitokondriyal D-loop bölgesi analiz edilmiştir. mtDNA D-loop dizileme sonuçlarında 106 farklı haplotip belirlenmiş ve haplotip çeşitliliği 0.9854 ± 0.0041 olarak hesaplanmıştır. Mitokondriyal D-loop analizleri üç farklı haplogrup (HapA, HapB ve HapC) ortaya koymuştur. 159 diziden 125'i (%77,99) HapA, 30'u (%18,87) HapB, ve 5'i (%3,14) HapC grubunda yer almaktadır. HapA ve HapB dünya genelindeki koyun ırklarına yayginken, HapC grubuna ait 5 dizinin tespiti beklenmedik olmuştur. Bu haplogrup Afgani, Australian, Gauder ve Waziri ırklarında görülmüştür. Özellikle Pakistan kökenli iki ırk olan, Waziristan'ın güneyinden Waziri koyunları ve melez bir ırk olan Gauder'in HapC haplogrupunda yer alması dikkat çekicidir. Bu durum, Khyber Pakhtunkhwa koyun ırklarının üç farklı filogenetik soydan geldiğini ve muhtemel olarak güneybatıdan kuzeydoğuya doğru bir gen akışının olduğunu göstermektedir.

Adhena ve ark. (2024) tarafından yapılan bu çalışma, Kuzey Etiyopya'nın Tigray ve Afar bölgelerindeki dört koyun popülasyonunun maternal kökeni ve haplotip varyantlarını araştırmıştır. Bunlar; Abergelle, Elle, Begait ve Tigray Highland varyantlarıdır. Araştırmada 1088 baz çiftlik (bp) mtDNA kontrol bölgesi amplifiye edilerek 24 örnek dizilenmiş ve haplotip çeşitliliği ile maternal kökenler incelenmiştir. Maternal kökenler, mtDNA d-loop bölgesinden 517 bp kullanılarak belirlenmiş ve bu diziler dünya genelinde tanımlanmış referans dizilerle karşılaştırılmıştır. AMOVA analizleri dört popülasyon arasında %29,78 varyasyon olduğunu göstermiş ve 13 mutasyonel bölge haplogruplar A ve B arasında ayrım yapmıştır. Bu yerli koyun popülasyonlarındaki çeşitli maternal kökenlerin varlığı, gelecekteki koruma ve ıslah çalışmaları için oldukça önemlidir. Yerli koyun kaynaklarının genetik potansiyelini tam anlamak için, Etiyopya'nın kuzeyindeki Tigray bölgesindeki koyunların tüm genom haritasının çözülmesi gerektiği bildirilmiştir.

Yang ve ark. (2024) tarafından yapılan bu çalışmada, koyunların maternal göç tarihlerini ve Avrasya iletişim yollarını araştırmak amacıyla, MÖ 4429–3100 yıllarına tarihlendirilen Çin'deki 6 ve Özbekistan'daki 1 siteden elde edilen 17 koyun kalıntısının mitokondriyal genomları (mitogenomları) analiz edilmiştir. Kuzeybatı Çin'in Altay bölgesindeki Xinjiang'da bulunan Tongtian Mağarası'ndan (MÖ 4429–3556) elde edilen mitogenomlar, Xinjiang'da

haplogrup C koyunlarının MÖ 4429–3556 yıllarında ortaya çıktığını desteklemektedir. Mevcut antik ve modern koyun mitogenomları ile yapılan birleşik filogenetik analizler, Özbekistan-Altay bölgesinin Doğu Asya'daki erken koyun göçleri için bir geçiş noktası olabileceğini göstermektedir. Koyunların Avrasya'yı geçerek Çin'e en az iki göç olayıyla ulaştığı, birincisinin yaklaşık MÖ 4000 Özbekistan ve Kuzeybatı Çin üzerinden Sarı Nehir'in orta ve alt kısımlarına; ikincisinin ise MÖ 4429'dan 2500'e kadar Altay bölgesinden Orta İç Moğolistan'a doğru gerçekleştiği belirlenmiştir. Genel olarak, bu çalışma Doğu Asya'da erken koyun kullanımına ve göç modellerine dair ek kanıtlar sunmaktadır.

Koshkina ve ark. (2023) tarafından yapılan bu çalışmada, farklı coğrafi bölgelerde yaşayan Rusya kökenli koyun ırklarının çeşitliliği ve filogenisi, mitokondriyal genomların (mtDNA) tam dizi analizine dayanarak tanımlanmıştır. İncelenen koyunlara ait tam mtDNA dizileri, yeni nesil dizileme teknolojisi (NGS) kullanılarak elde edilmiştir. Araştırmaya konu olan tüm coğrafi koyun grupları, yüksek haplotip çeşitliliği ($H_d = 0.9992$) ve nükleotid çeşitliliği ($\pi = 0.00378$) ile karakterize edilmiştir. AMOVA (Moleküler Varyans Analizi) sonuçlarının değerlendirilmesi, genetik çeşitliliğin büyük ölçüde popülasyon içi farklılıklardan (%77,87) kaynaklandığını ortaya koymuştur. İncelenen tüm koyunlarda toplam 128 haplotip tanımlanmıştır. Bu haplotipler şu haplogrurlara ait bulunmuştur: B (%64,8), A (%28,9), C (%5,5) ve D (%0,8). B haplogrubu, Rusya'nın batı kesiminde baskın olarak tespit edilmiştir. Yerel koyun gruplarında gözlemlenen yüksek düzeydeki mtDNA polimorfizmi, Rusya'da henüz yeterince araştırılmamış önemli bir özgün genotip rezervinin varlığına işaret etmektedir.

Kalaydzhiev ve ark. (2023) tarafından yapılan bu çalışmada, mitokondriyal D-loop bölgesinin bir kısmının dizileme analizi temel alınarak en popüler sekiz Bulgar yerli koyun ırkının genetik çeşitliliği incelenmiştir. Neredeyse tamamı olan mitokondriyal DNA (mtDNA) D-loop bölgesi (1180 baz çifti) çoğaltılmış ve dizilenmiştir. Elde edilen sonuçlar, iki ana haplogrupla ilişkili 225 farklı haplotipin varlığını göstermiştir. Örneklerin çoğunluğunda Avrupa haplogrubu B (%95,2) baskınken, kalan bireyler haplogrup A'ya (%4,8) ait olarak belirlenmiştir. Diğer bildirilen mitokondriyal haplogrurlardan hiçbiri gözlemlenmemiştir. Polimorfik lokus sayısı, nükleotid ve haplotip çeşitliliği yüksektir (sırasıyla 240, 0,01237 ve 0,9968), bu durum tüm popülasyonlarda çoklu maternal kökenlerin varlığına işaret etmektedir. Tüm çalışma popülasyonlarında Tajima D testi değeri $-1,905$ ($p < 0,05$) olarak bulunmuş ve bu, nadir allellerin bolluğunun muhtemelen yakın zamanda gerçekleşen bir daralma (bottleneck) sonrası popülasyon genişlemesinden kaynaklandığını göstermektedir. Median joining ağı, haplogrup B'ye ait neredeyse tüm haplotiplerin yıldız benzeri bir ağ oluşturduğunu ortaya

koymuş; bu durum Bulgar yerli ırkları arasında zayıf genetik farklılaşma ve geniş gen akışı olduğunu göstermektedir.

Noreen ve ark. (2023) tarafından yapılan bu araştırmanın temel amacı, mitokondriyal Sitokrom b ve Sitokrom Oksidaz Alt Birimi I (COI) genlerinin dizilenmesi yoluyla Mundri koyunlarının (*Ovis aries*) moleküler filogenisini belirlemek ve karakterize etmektir. Bu koyun ırkı, Pakistan'daki diğer yerel koyun ırklarından morfolojik olarak farklı görünmektedir. Çalışma, Mundri koyununun diğer ırklardan farklı bir ırk olup olmadığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Mundri koyunlarının kan örnekleri, Punjab eyaletindeki Rajanpur ilçesinde bulunan Hayvancılık Deneme İstasyonu'ndan (Livestock Experiment Station, LES) toplanmıştır. DNA izole edilerek, uygun primerler kullanılarak Sitokrom b ve COI genlerinin amplifikasyonu için Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) yapılmıştır. PCR ürünleri dizilenmiş ve MEGA X yazılımı ile analiz edilmiştir. Filogenetik analizler, *Ovis aries*'i Mundri koyunları dahil olmak üzere Sitokrom b için üç, COI için ise iki gruba ayırmıştır. Analizler, Mundri koyunlarını ayrı bir grup olarak göstermiş ve böylece diğer yerel koyun ırklarından farklı bir ırk olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, çalışma Sitokrom b ve COI genlerine dayalı olarak Mundri koyununun yerel diğer koyun ırklarından belirgin şekilde farklı bir ırk olduğunu doğrulamaktadır.

Salim ve ark. (2023) tarafından yapılan bu çalışmada, Sudan çöl koyunu (Sudan Desert Sheep, SDS) Hamary, Kabashi ve bunların melezleri (Hamary x Kabashi) olmak üzere toplam 120 hayvandan tam mitokondriyal DNA kontrol bölgesi dizilerek, maternal kalıtımla geçen genetik çeşitlilikleri ve demografik tarihleri incelenmiş ve bu veriler Afrika'daki koyun pastoralizminin tarihi ile ilişkilendirilmiştir. Sonuçlar, çeşitlilik gösteren ve baskın olan D-loop haplogrup B'yi ($n = 102$, %85) ortaya koymuş, geri kalan tüm diziler haplogrup A'ya aittir. Maternal genetik varyasyonun çoğu haplogruplar arasında (%76,3) dağılırken, haplogrup içinde %23,7 olarak tespit edilmiştir. Ancak, iki ırk ve melezleri arasında çok az genetik farklılık gözlenmiş olup, melezlerde maternal kökenin Hamary olduğu desteklenmiştir. Bayesyen koalesan tabanlı analiz, iki haplogrup, iki ırk ve melezleri arasında belirgin farklı demografik geçmişler ortaya koymuştur. Haplogrupların karşılaştırmasında, haplogrup B'nin haplogrup A'dan daha erken bir genişleme yaşadığı görülmüştür. Irklar bazında karşılaştırmada ise her iki ırkın genişlemesi yaklaşık 6500 yıl önce benzer zamanlarda başlamış olup, Kabashi'nin biraz daha büyük etkili popülasyon büyüklüğüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Sudan çöl koyunlarının maternal atalarının Afrika kıtasına girmeden önce ayrılmış olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışma, Sudan çöl koyununun iki ana ırkı ve melezlerinin erken tarihine dair yeni bilgiler sağlamaktadır.

Wanjala ve ark. (2021) tarafından koyun yetiştiriciliğini geliştirmek ve genetik kaynakların korunmasını sağlamak amacıyla, daha önce yayımlanmış araştırma makalelerinden elde edilen 399 Afrika yerli koyun ırkına ait mitokondriyal DNA kontrol bölgesi (mtDNA CR) dizisi meta-analiz yöntemiyle incelenmiş; bu ırkların filogenetik ilişkileri, genetik çeşitliliği ve demografik geçmişi aydınlatılmaya çalışılmıştır. Toplamda 272 haplotip tespit edilmiş, bunların 207'si benzersiz olup mtDNA CR'de yüksek düzeyde değişkenlik gözlemlenmiştir. Genel olarak, polimorfik bölge sayısı, nükleotid çeşitliliği ve haplotip çeşitliliği sırasıyla 284, 0.254 ± 0.012 ve 0.993 ± 0.002 olarak bulunmuş ve yüksek değerler göstermiştir. Haplotiplerin orta-bağlantı (median-joining, MJ) ağı üç ana haplogrupa (A, B ve C) ayrılmış, haplogrup B baskın olarak belirlenmiştir. Popülasyonların karışık yapısı, ortak bir maternal kökeni ve zayıf veya mevcut olmayan bir filocoğrafik yapıyı işaret etmektedir. Uyuşmazlık (mismatch) analizi, Kuzey Afrika ırklarının yakın geçmişte genişlediğini, buna karşın Doğu Afrika ve kıtasal popülasyonların adaptasyona yönelik seçim baskılarına maruz kaldığını ortaya koymuştur. Yağlı kuyruklu ve ince kuyruklu koyun ırkları arasında ise hafif düzeyde tarihsel genetik farklılık gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abramson, N. I. (2013). Molecular and conventional phylogenetics. Towards the common ground. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*, 317, 2.
- Adhena, M. H., Johansson, A. M., & Tarekegn, G. M. (2024). Genetic diversity and maternal origins of indigenous sheep populations in north Ethiopia. *Small Ruminant Research*, 239, 107342.
- Ahmed, S., Nadeem, M. S., Johansson, A. M., Jonas, E., Muhammad, K., & Mehmood, S. A. (2025). Molecular diversity and phylogenetic analysis of ten sheep breeds from Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan, based on mitochondrial D-loop sequences. *Mammalian Genome*, 36(1), 129-139.
- Al-Araimi, N. A., Al-Atiyat, R. M., Gaafar, O. M., Vasconcelos, R., Luzuriaga-Neira, A., Eisa, M. O., ... & Beja-Pereira, A. (2017). Maternal genetic diversity and phylogeography of native Arabian goats. *Livestock Science*, 206, 88-94.
- Alberto, F. J., Boyer, F., Orozco-terWengel, P., Streeter, I., Servin, B., De Villemereuil, P., ... & Pompanon, F. (2018). Convergent genomic signatures of domestication in sheep and goats. *Nature communications*, 9(1), 813.
- Alnajm, H., Alijani, S., Javanmard, A., Rafat, S. A., & Hasanpur, K. (2021). Genetic diversity analysis of four sheep breeds of Iran: Towards genetic maintenance and conservation decision. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 11(3), 527-538.
- Arain, M. B. (2022). Genetic Variation Analysis among different sheep Breeds of Balochistan by Utilizing Cytochrome b Gene of Mitochondrial DNA. *Pakistan Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 3(2), 23-32.
- Araujo de Carvalho, D., Martínez Martínez, A., Carolino, I., Barros, M. C., Camacho Vallejo, M. E., Santos-Silva, F., ... & Sarmento, J. L. R. (2020). Diversity and genetic relationship of free-range chickens from the northeast region of Brazil. *Animals*, 10(10), 1857.
- Barbato, M., Hailer, F., Orozco-terWengel, P., Kijas, J., Mereu, P., Cabras, P., ... & Bruford, M. W. (2017). Genomic signatures of adaptive introgression from European mouflon into domestic sheep. *Scientific Reports*, 7(1), 7623.
- Barbato, M., Masseti, M., Pirastru, M., Columbano, N., Scali, M., Vignani, R., & Mereu, P. (2022). Islands as time capsules for genetic diversity conservation: the case of the Giglio Island Mouflon. *Diversity*, 14(8), 609.
- Ben Sassi-Zaidy, Y., Mohamed-Brahmi, A., Chaouch, M., Maretto, F., Cendron, F., Charfi-Cheikhrouha, F., ... & Cassandro, M. (2022). Historical westward migration phases of *Ovis aries* inferred from the population structure and the phylogeography of occidental Mediterranean native sheep breeds. *Genes*, 13(8), 1421.

- Chen, Z. H., Xu, Y. X., Xie, X. L., Wang, D. F., Aguilar-Gómez, D., Liu, G. J., ... & Li, M. H. (2021). Whole-genome sequence analysis unveils different origins of European and Asiatic mouflon and domestication-related genes in sheep. *Communications Biology*, 4(1), 1307.
- Chessa, B., Pereira, F., Arnaud, F., Amorim, A., Goyache, F., Mainland, I., ... & Palmarini, M. (2009). Revealing the history of sheep domestication using retrovirus integrations. *Science*, 324(5926), 532-536.
- Chokoe, T. C., Mdladla-Hadebe, K., Muchadeyi, F., Dzomba, E., Matelele, T., Mphahlele, T., ... & Mtileni, B. (2020). Genetic diversity of South African indigenous goat population from four provinces using genome-wide SNP data. *Sustainability*, 12(24), 10361.
- Ciani, E., Mastrangelo, S., Da Silva, A., Marroni, F., Ferenčaković, M., Ajmone-Marsan, P., ... & Lenstra, J. A. (2020). On the origin of European sheep as revealed by the diversity of the Balkan breeds and by optimizing population-genetic analysis tools. *Genetics Selection Evolution*, 52, 1-14.
- Demirci, S., Koban Baştanlar, E., Dağtaş, N. D., Pişkin, E., Engin, A., Özer, F., ... & Togan, I. (2013). Mitochondrial DNA diversity of modern, ancient and wild sheep (*Ovis gmelinii anatolica*) from Turkey: new insights on the evolutionary history of sheep. *PloS one*, 8(12), e81952.
- Dotsev, A. V., Kunz, E., Kharzinova, V. R., Okhlopkov, I. M., Lv, F. H., Li, M. H., ... & Zinovieva, N. A. (2021). Mitochondrial DNA analysis clarifies taxonomic status of the Northernmost Snow sheep (*Ovis nivicola*) population. *Life*, 11(3), 252.
- Dymova, M. A., Zadorozhny, A. V., Mishukova, O. V., Khrapov, E. A., Druzhkova, A. S., Trifonov, V. A., ... & Filipenko, M. L. (2017). Mitochondrial DNA analysis of ancient sheep from Altai. *Animal genetics*, 48(5), 615-618.
- Estrada, R., Romero, Y., Figueroa, D., Corredor, F. A., Yalli-Huamani, T. B., Coila, P., ... & Arbizu, C. I. (2025). Comparative mitochondrial genomics of the Peruvian Creole sheep (*Ovis aries*).
- Ganbold, O., Lee, S. H., Paek, W. K., Munkhbayar, M., Seo, D., Manjula, P., ... & Lee, J. H. (2019). Mitochondrial DNA variation and phylogeography of native Mongolian goats. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 33(6), 902.
- Gáspárdy, A., Berger, B., Zabavnik-Piano, J., Kovács, E., Annus, K., Zenke, P., ... & Maróti-Agóts, Á. (2021). Comparison of mtDNA control region among descendant breeds of the extinct Zaupe sheep revealed haplogroup C and D in Central Europe. *Veterinary medicine and science*, 7(6), 2330-2338.
- Giovambattista, G., Ripoli, M. V., Peral-Garcia, P., & Bouzat, J. L. (2001). Indigenous domestic breeds as reservoirs of genetic diversity: the Argentinean Creole cattle. *Animal genetics*, 32(5), 240-247.

- Gyllensten, U., Wharton, D., Josefsson, A., & Wilson, A. C. (1991). Paternal inheritance of mitochondrial DNA in mice. *Nature*, 352(6332), 255-257.
- Hanotte O (2007) Origin and history of livestock diversity. In B. Richkowsky & D. Pilling (Eds.), Section A. The State of the World's Animal Genetic Resources for Food and Agriculture Rome: F.A.O. pp. 5–19
- Hiendleder, S., Kaupe, B., Wassmuth, R., & Janke, A. (2002). Molecular analysis of wild and domestic sheep questions current nomenclature and provides evidence for domestication from two different subspecies. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 269(1494), 893-904.
- Hiendleder, S., Mainz, K., Plante, Y., & Lewalski, H. (1998). Analysis of mitochondrial DNA indicates that domestic sheep are derived from two different ancestral maternal sources: no evidence for contributions from urial and argali sheep. *Journal of Heredity*, 89(2), 113-120.
- Ibrahim, A., Baliarti, E., Budisatria, I. G. S., Artama, W. T., Widayanti, R., Maharani, D., ... & Margawati, E. T. (2023). Genetic diversity and relationship among Indonesian local sheep breeds on Java Island based on mitochondrial cytochrome b gene sequences. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 21(1), 34.
- Ilmira, M. S., Islamov, Y., Shauyenov, S., Ibrayev, D., Atavliyeva, S., & Tarlykov, P. (2018). Genetic characterization of Kazakh native sheep breeds using mitochondrial DNA. *OnLine Journal of Biological Sciences*, 18(3), 341-348.
- Kalaydzhiev, G., Palova, N., Dundarova, H., Lozanova, L., Mehandjyiski, I., Radoslavov, G., & Hristov, P. (2023). Mitochondrial Diversity and Phylogenetic Relationship of Eight Native Bulgarian Sheep Breeds. *Animals*, 13(23), 3655.
- Kamalakkannan, R., Kumar, S., Bhavana, K., Prabhu, V. R., Machado, C. B., Singha, H. S., ... & Nagarajan, M. (2021). Evidence for independent domestication of sheep mtDNA lineage A in India and introduction of lineage B through Arabian sea route. *Scientific reports*, 11(1), 19733.
- Kharzinova, V. R., Dotsev, A. V., Deniskova, T. E., Solovieva, A. D., Fedorov, V. I., Layshev, K. A., ... & Zinovieva, N. A. (2018). Genetic diversity and population structure of domestic and wild reindeer (*Rangifer tarandus* L. 1758): A novel approach using BovineHD BeadChip. *PLoS One*, 13(11), e0207944.
- Koshkina, O., Deniskova, T., Dotsev, A., Kunz, E., Selionova, M., Medugorac, I., & Zinovieva, N. (2023). Phylogenetic analysis of Russian native sheep breeds based on mtDNA sequences. *Genes*, 14(9), 1701.
- Larsson, M. N., Morell Miranda, P., Pan, L., Başak Vural, K., Kaptan, D., Rodrigues Soares, A. E., ... & Günther, T. (2024). Ancient sheep genomes reveal four

- Millennia of North European short-tailed sheep in the Baltic Sea region. *Genome Biology and Evolution*, 16(6), evae114.
- Li, R., Gong, M., Zhang, X., Wang, F., Liu, Z., Zhang, L., ... & Jiang, Y. (2023). A sheep pangenome reveals the spectrum of structural variations and their effects on tail phenotypes. *Genome Research*, 33(3), 463-477.
- Liu, J., Ding, X., Zeng, Y., Yue, Y., Guo, X., Guo, T., ... & Yuan, C. (2016). Genetic diversity and phylogenetic evolution of Tibetan sheep based on mtDNA D-Loop sequences. *PloS one*, 11(7), e0159308.
- Liu, J., Lu, Z., Yuan, C., Wang, F., & Yang, B. (2020). Phylogeography and phylogenetic evolution in Tibetan sheep based on MT-CYB sequences. *Animals*, 10(7), 1177.
- Ly, F. H., Peng, W. F., Yang, J., Zhao, Y. X., Li, W. R., Liu, M. J., ... & Li, M. H. (2015). Mitogenomic meta-analysis identifies two phases of migration in the history of eastern Eurasian sheep. *Molecular biology and evolution*, 32(10), 2515-2533.
- Mariotti, M., Valentini, A., Marsan, P. A., & Pariset, L. (2013). Mitochondrial DNA of seven Italian sheep breeds shows faint signatures of domestication and suggests recent breed formation. *Mitochondrial DNA*, 24(5), 577-583.
- Meadows, J. R. S., Hanotte, O., Drögemüller, C., Calvo, J., Godfrey, R., Coltman, D., ... & Kijas, J. W. (2006). Globally dispersed Y chromosomal haplotypes in wild and domestic sheep. *Animal Genetics*, 37(5), 444-453.
- Meadows, J. R., Cemal, I., Karaca, O., Gootwine, E., & Kijas, J. W. (2007). Five ovine mitochondrial lineages identified from sheep breeds of the near East. *Genetics*, 175(3), 1371-1379.
- Menezes, M. P. C., Martinez, A. M., Pimenta Filho, E. C., Vega-Pla, J. L., Delgado, J. V., Arandas, J. K. G., ... & Ribeiro, M. N. (2020). Diversity analysis and genetic relationships among local Brazilian goat breeds using SSR markers. *Animals*, 10(10), 1842.
- Mishra, A. K., Ahlawat, S., Sharma, R., Arora, R., Singh, S., & Jain, A. (2023). Assessment of genetic diversity of the fat-tailed Dumba sheep of India by mitochondrial and microsatellite markers. *Animal Biotechnology*, 34(8), 3545-3554.
- Molaei, V., Bazzucchi, M., De Mia, G. M., Otarod, V., Abdollahi, D., Rosati, S., & Lühken, G. (2020). Phylogenetic analysis of small ruminant lentiviruses in Germany and Iran suggests their expansion with domestic sheep. *Scientific reports*, 10(1), 2243.
- Monau, P. I., Visser, C., Muchadeyi, F. C., Okpeku, M., Nsoso, S. J., & Van Marle-Köster, E. (2020). Population structure of indigenous southern African goats based on the Illumina Goat50K SNP panel. *Tropical Animal Health and Production*, 52, 1795-1802.

- Murunga, P., Kennedy, G. M., Imboma, T., Malaki, P., Kariuki, D., Ndiema, E., ... & Ommeh, S. C. (2018). Mitochondrial DNA D-Loop Diversity of the Helmeted Guinea Fowls in Kenya and Its Implications on HSP70 Gene Functional Polymorphism. *BioMed Research International*, 2018(1), 7314038.
- Nguluma, A. Mitochondrial DNA D-Loop Sequence Variability Reveals High Haplotype Diversity and Multiple Maternal Origins in Twelve Indigenous Goat Populations from Tanzania. 2021. Available online: <https://www.authorea.com/users/399326/articles/511867-mitochondrial-dna-d-loop-sequence-variability-reveals-high-haplotype-diversity-and-multiple-maternal-origins-in-twelve-indigenous-goat-populations-from-tanzania>
- Niemi, M., Bläuer, A., Iso-Touru, T., Nyström, V., Harjula, J., Taavitsainen, J. P., ... & Kantanen, J. (2013). Mitochondrial DNA and Y-chromosomal diversity in ancient populations of domestic sheep (*Ovis aries*) in Finland: comparison with contemporary sheep breeds. *Genetics Selection Evolution*, 45, 1-14.
- Noreen, T., Hussain, T., Mansha, M., Mansoor, Z., Wajid, A., Ashraf, M. R., ... & Marikar, F. M. (2023). Molecular phylogeny and characterization of mundri sheep (*ovis aries*) of Pakistan through sequencing of mitochondrial cytochrome b and cytochrome oxidase subunit i. *Veterinarska stanica*, 54(6), 673-692.
- Ocampo, R. J., Martínez, J. F., & Martínez, R. (2021). Assessment of genetic diversity and population structure of Colombian Creole cattle using microsatellites. *Tropical Animal Health and Production*, 53(1), 122.
- Olivieri, C., Ermini, L., Rizzi, E., Corti, G., Luciani, S., Marota, I., ... & Rollo, F. (2012). Phylogenetic position of a copper age sheep (*Ovis aries*) mitochondrial DNA. *PLoS One*, 7(3), e33792.
- Pedrosa, S., Uzun, M., Arranz, J. J., Gutiérrez-Gil, B., San Primitivo, F., & Bayón, Y. (2005). Evidence of three maternal lineages in Near Eastern sheep supporting multiple domestication events. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1577), 2211-2217.
- Peters, J.; von den Driesch, A.; Helmer, D. The upper Euphrates-Tigris Basin: Cradle of agro-pastoralism? In *The First Steps of Animal Domestication. New Archaeological Approaches*; Vigne, J.D., Peters, J., Helmer, D., Eds.; Oxbow Books: Oxford, UK, 2005; pp. 96–124.
- Portanier, E., Chevret, P., Gélín, P., Benedetti, P., Sanchis, F., Barbanera, F., ... & Garel, M. (2022). New insights into the past and recent evolutionary history of the Corsican mouflon (*Ovis gmelini musimon*) to inform its conservation. *Conservation Genetics*, 1-17.
- Radoslavov, G., Kalaydzhiev, G., Yordanov, G., Pavlova, N., Salkova, D., & Hristov, P. (2025). Genetic diversity of native Bulgarian sheep breeds based on the mitochondrial D-loop sequence analysis. *Small Ruminant Research*, 107527.

- Rafia, P., & Tarang, A. (2016). Sequence variations of mitochondrial DNA displacement-loop in Iranian indigenous sheep breeds. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 6(2), 363-368.
- Ramljak, J., Bunevski, G., Bytyqi, H., Marković, B., Brka, M., Ivanković, A., ... & Medugorac, I. (2018). Conservation of a domestic metapopulation structured into related and partly admixed strains. *Molecular ecology*, 27(7), 1633-1650.
- Rannamäe, E., Lõugas, L., Niemi, M., Kantanen, J., Maldre, L., Kadõrova, N., & Saarma, U. (2016). Maternal and paternal genetic diversity of ancient sheep in Estonia from the Late Bronze Age to the post-medieval period and comparison with other regions in Eurasia. *Animal genetics*, 47(2), 208-218.
- Resende, A., Gonçalves, J., Muigai, A. W., & Pereira, F. (2016). Mitochondrial DNA variation of domestic sheep (*Ovis aries*) in Kenya. *Animal genetics*, 47(3), 377-381.
- Rezaei, H. R., Naderi, S., Chintauan-Marquier, I. C., Taberlet, P., Virk, A. T., Naghash, H. R., ... & Pompanon, F. (2010). Evolution and taxonomy of the wild species of the genus *Ovis* (Mammalia, Artiodactyla, Bovidae). *Molecular phylogenetics and evolution*, 54(2), 315-326.
- Salim, B., Alasmari, S., Mohamed, N. S., Ahmed, M. K. A., Nakao, R., & Hanotte, O. (2023). Genetic variation and demographic history of Sudan desert sheep reveal two diversified lineages. *BMC genomics*, 24(1), 118.
- Sanna, D., Barbato, M., Hadjisterkotis, E., Cossu, P., Decandia, L., Trova, S., ... & Mereu, P. (2015). The first mitogenome of the Cyprus mouflon (*Ovis gmelini* ophion): new insights into the phylogeny of the genus *Ovis*. *PloS one*, 10(12), e0144257.
- Scherf, B.D. *World Watch List for Domestic Animal Diversity*, 3rd ed.; FAO: Rome, Italy, 2000; pp. 7–13.
- Schroeder, O., Benecke, N., Frölich, K., Peng, Z., Kaniuth, K., Sverchkov, L., ... & Ludwig, A. (2017). Endogenous retroviral insertions indicate a secondary introduction of domestic sheep lineages to the Caucasus and Central Asia between the Bronze and Iron Age. *Genes*, 8(6), 165.
- Singh, S., Kumar Jr, S., Kolte, A. P., & Kumar, S. (2013). Extensive variation and sub-structuring in lineage A mtDNA in Indian sheep: genetic evidence for domestication of sheep in India. *PLoS One*, 8(11), e77858.
- Tapio, M., Marzanov, N., Ozerov, M., Činkulov, M., Gonzarenko, G., Kiselyova, T., ... & Kantanen, J. (2006). Sheep mitochondrial DNA variation in European, Caucasian, and Central Asian areas. *Molecular biology and evolution*, 23(9), 1776-1783.

- Taylor, W. T., Pruvost, M., Posth, C., Rendu, W., Krajcarz, M. T., Abdykanova, A., ... & Shnaider, S. (2021). Evidence for early dispersal of domestic sheep into Central Asia. *Nature Human Behaviour*, 5(9), 1169-1179.
- Tokarska, M., Marshall, T., Kowalczyk, R., Wójcik, J. M., Pertoldi, C., Kristensen, T. N., ... & Bendixen, C. (2009). Effectiveness of microsatellite and SNP markers for parentage and identity analysis in species with low genetic diversity: the case of European bison. *Heredity*, 103(4), 326-332.
- VIGNE, J. D. (1992). Zooarchaeology and the biogeographical history of the mammals of Corsica and Sardinia since the last ice age. *Mammal Review*, 22(2), 87-96.
- Vigne, J. D., Carrere, I., Briois, F., & Guilaine, J. (2011). The early process of mammal domestication in the Near East: New evidence from the Pre-Neolithic and Pre-Pottery Neolithic in Cyprus. *Current Anthropology*, 52(S4), S255-S271.
- Wanjala, G., Bagi, Z., & Kusza, S. (2021). Meta-analysis of mitochondrial DNA Control Region Diversity to Shed Light on phylogenetic relationship and demographic history of African Sheep (*Ovis aries*) breeds. *Biology*, 10(8), 762.
- Wood, N. J., & Phua, S. H. (1996). Variation in the control region sequence of the sheep mitochondrial genome. *Animal genetics*, 27(1), 25-33.
- Yang, L., Zhang, X., Hu, Y., Zhu, P., Li, H., Peng, Z., ... & Zhao, X. (2024). Ancient mitochondrial genome depicts sheep maternal dispersal and migration in eastern Asia. *Journal of Genetics and Genomics*, 51(1), 87-95.
- Yurtman, E., Özer, O., Yüncü, E., Dağtaş, N. D., Koptekin, D., Çakan, Y. G., ... & Özer, F. (2021). Archaeogenetic analysis of Neolithic sheep from Anatolia suggests a complex demographic history since domestication. *Communications biology*, 4(1), 1279.
- Zeder, M. A. (2017). Domestication as a model system for the extended evolutionary synthesis. *Interface Focus*, 7(5), 20160133.
- Zhong, Y., Tang, Z., Huang, L., Wang, D., & Lu, Z. (2020). Genetic diversity of *Procambarus clarkii* populations based on mitochondrial DNA and microsatellite markers in different areas of Guangxi, China. *Mitochondrial DNA Part A*, 31(2), 48-56.

5. Bölüm

Pestisit Uygulamalarında İnsansız Hava Araçlarının Kullanımı ve Geleceği

Süleyman Safa ARSLAN¹, ERGİN DURSUN²

1. Giriş

Dünya nüfusunun sürekli artması gıda ihtiyacının da hızla artmasına neden olmaktadır. Bu durum tarımsal üretimde daha etkin, daha hızlı ve çevresel etkileri azaltan yöntemlerin kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu ihtiyaç doğrultusunda tarım sektöründe dijital dönüşüm ve teknolojik gelişmeler büyük bir hızla devam etmekte ve çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Dünyada teknolojik gelişmelerin her geçen gün hızla artması, insanların günlük işlerini kolaylaştırdığı gibi yapılan işlerde verimliliği de artırmaktadır. Tarımsal üretimde modern tarım makinalarının ve teknolojilerinin kullanımının yanı sıra bazı otonom tarım makinalarının kullanımı da işletmelerin ekonomik güçlerinin izin verdiği ölçüde her geçen gün artmaktadır.

Son yıllarda tarımda yenilikçi çözümler olarak öne çıkan insansız hava araçları (İHA) veya drone teknolojisi, tarımsal faaliyetlerde kullanım açısından büyük bir potansiyele sahiptir. İHA teknolojisi, geniş tarım arazilerinin hızlı bir şekilde izlenmesi, hassas ilaçlama yapılması ve kaynakların verimli kullanılmasını sağlamak gibi birçok avantaj sunmaktadır. Tarımsal faaliyetlerde İHA'ların özellikle pestisit uygulamaları alanında sunduğu katkılar hem tarımsal verimlilik hem de sürdürülebilirlik açısından dikkate değerdir (Güzel ve Okatan, 2022).

İlk olarak askeri ve sivil gözetim ile keşif görevlerinde kullanılan insansız hava araçlarının (Dron) tarımda kullanımı 1980'li yıllarda başlamıştır. Bu yıllardan itibaren günümüze kadar İHA'lar hızlı bir evrim geçirmiştir. Özellikle 2000'li yıllardan itibaren dijital teknolojiler ve gelişmiş sensörlerle donatılmış olan İHA'lar tarım sektörüne daha geniş bir şekilde entegre olmuşlardır. Günümüzde kullanılan İHA'lar, ürün sağlığı, kaynak yönetimi ve girdi optimizasyonuna yönelik hassas veri toplama yetenekleri ile hassas tarımın vazgeçilmez araçları haline gelmişlerdir.

¹ Ziraat Y. Mühendisi, Ankara Tarım ve Orman İl Müdürlüğü, Bitkisel Üretim ve Bitki Sağlığı Şube Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, Orcid: 0009-0003-9785-8651; e-posta:suleymansaafaarslan@gmail.com

² Prof.Dr., Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, Orcid: 0000-0001-5109-6071; e-posta:edursun@agri.ankara.edu.tr

İnsansız hava araçlarının tarımda kullanımı gün geçtikçe kendisine daha fazla yer bulmaktadır (Mazur, 2016; Baraniuk, 2018). Örneğin günümüzde üretilen tarımsal amaçlı insansız hava araçlarına farklı aparatlar takılmak suretiyle ekim ve gübreleme işlemleri yapılabilmektedir. Ayrıca, insansız hava araçlarının uygulama alanları arasında toprak analizi, tarla analizi, haritalama ve hayvan tespiti olduğu belirtmiştir İHA teknolojisi, tarımsal üretimin birçok alanında olduğu gibi ilaçlama uygulamalarında da kullanılabilmekte, tarımsal üretimde hem verimliliğin artırılması hem de ürün kalitesinin iyileştirilmesi için İHA teknolojisine yatırım yapılması önerilmektedir (Dutta ve Goswami, 2020).

Dünya İHA pazarının 2030 yılında 18,22 milyar dolarlık bir hacme ulaşması beklenmektedir (Ozkan, 2023). Piyasa hacminin genişlemesi, tarımsal üretimde insansız hava araçlarının etkilerinin her geçen gün arttığını göstermektedir. Özellikle bazı Uzakdoğu Asya ülkelerinde tarımda İHA kullanımının son yıllarda artmaya başladığı görülmektedir. Japonya’da çeltik üretim sahalarının ve Güney Kore’de tarımsal alanda uygulanan tarım ilaçlarının %30’unun İHA’larla yapıldığı bildirilmektedir. Çin, birçok alanda teknolojik gelişmeleri ileri taşıdığı gibi İHA üretimi ve kullanımı alanında da hızla büyümektedir. 2009 yılından bu yana çok rotorlu İHA üretimi giderek artmış ve günümüzde 120.000’den fazla İHA kullanılarak 70 milyon hektar alanda ilaçlama uygulamaları gerçekleştirmektedir (Dursun vd., 2025)

İHA’lar; toprak ve saha analizi, toprak kalitesinin değerlendirilmesi ve doğal afetlerden kaynaklanan ürün kayıplarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bölgesel olarak toprak kalitesi ve yapısındaki farklılıklar sebebiyle hükümetler toprak sağlığı için yerel düzeyde prototipler yerleştirmektedirler. Bu prototiplerin yerleştirilmesindeki amaç, gelecekte büyük ölçekli tarımsal uygulamalar için uydularla izleme ve uydu entegrasyonudur (Chakravarty, 2019). İHA haritalama teknolojilerinin 0,5 cm/piksel çözünürlükte haritalar üretmesi sayesinde sahadaki değişkenler hassas bir şekilde analiz edilebilmektedir. Örneğin, bağlarda RGB ve multispektral görüntüleme tekniği ile ürün verimliliği ve ürünün farklı evrelerinin doğru bir şekilde ilerleyip ilerlemediği kontrol edilebilmektedir. Yapay zekâ ve ileri görüntü işleme sayesinde yabancı otlar %95’e yakın oranlarda tespit edilebilmektedir (Zhao vd., 2023; Dursun vd., 2025).

Ülkemizde insansız hava araçları çeltik ekim sahalarında kullanılmaktadır. İnsansız hava araçları üzerlerine konulan depo vasıtasıyla çeltik sahalarında ekim, gübreleme ve ilaçlama gibi işlemler insan iş gücüne ihtiyaç duyulmaksızın yapılabilmektedir.

Günümüz modern tarımında verimliliğin artırılması ve ürün kalitesinin iyileştirilmesinde, ürün durumunun izlenmesi ve gerekli bakımların zamanında

yapılması önemli bir rol oynamaktadır. Takibi sağlanmayan ve bakılmayan ürünlerin verim ve kalitesinde düşüşler olması kaçınılmazdır. Kameralı İHA'lar ile belirli uygulamalar kullanılarak farklı izleme ve veri setleri elde edilebilmektedir. İHA kameraları ile ürünlerdeki hastalık, zararlı ve bitki besin elementleri eksiklikleri tespit edilebilmektedir. Tespit edilen duruma göre, ürüne gübre veya pestisit uygulaması sağlanmaktadır (Devi vd., 2020). Bu noktada insansız hava araçları çiftçilerin bilinçli karar verme ve kaynakları doğru kullanması açısından başarı sağlamaktadır. Işığın farklı dalga boylarının görülmesini sağlayan multispektral görüntüleme tekniği ile insan gözünün algılayamadığı bitki besin elementlerinin noksanlığı ile zararlı istilaları bitkiye zarar vermeden önce tespit edilerek önlenmektedir. Yapay zekâ eğitimi ile İHA görüntü analizi yaparak hastalıkları ve bitki sağlığını tespit edebilmektedir. Yapay zekâ eğitilerek kameralar ve sensörler ile tanımladığı hastalık veya eksiklikleri tespit ederek verim kayıplarının önüne geçebilmektedir. Multispektral sensörlere sahip İHA'lar, yabancı otların ve zararlı organizmaların ürün üzerindeki etkisini erken aşamalarda %93 oranında tespit edebilmektedir. Yapay zekâ eğitildiğinde üzerine koyarak ilerlediği için ilerleyen yıllarda doğruluk oranının daha fazla yükseleceği, üreticilerin bir numaralı yardımcısı olacağı vurgulanmaktadır (Gaşparovi'c vd., 2020; Koganti vd., 2021; Zhao vd., 2023, Dursun vd., 2025). İnsansız hava araçları taradıkları alan içerisinde hassas haritalama yaparak sadece problem olan alanlara ilaç ve gübre uygulaması yapılmasını sağlarlar. Böylece, ilaç ve gübre kullanımını azaltarak maliyetleri düşürürler ve çevreye olan etkiyi minimize ederler (Zhou vd., 2024; Wang vd., 2024; Dursun vd. 2025).

Tarımda İHA kullanımı geleneksel yöntemlere göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Konvansiyonel tarımda büyük alanlarda yapılan uygulamalar İHA uygulamaları ile karşılaştırıldıklarında yavaş ve verimsiz olmaktadır. İHA kullanımı anlık veri toplama, hastalıkların erken teşhisi ve hızlı müdahale ile ürün kayıplarının önüne geçmektedir. İHA kullanımı ile yüksek ağırlığa sahip makinelerin tarlaya sokulmaması sağlanmakta ve toprak sıkışması önlenmektedir. Düzensiz, engebeli alanlarda tarımsal faaliyetlerin devamlılığı daha kolay sağlanmakta ve verimlilik artırılmaktadır. İHA'ların yaygınlaşması veya tercih edilmesindeki başlıca nedenler arasında, traktör gibi geleneksel ekipmanların kullanımının zor veya imkânsız olduğu alanlarda etkili çözümler sunmasıdır. Ülkemizde Doğu Karadeniz bölgesinde çay alanlarında, ilaç uygulamaları için İHA kullanımı yaygınlaşmaktadır. Böylece, geleneksel olarak el pülverizatörü ile yapılan ilaçlamada operatörün ilaca maruz kalması önlenerek sağlık risklerini düşürmektedir (Dursun vd., 2025).

2. İnsansız Hava Araçlarıyla Pestisit Uygulamaları

Tarımsal üretimde hastalık, zararlı ve yabancı otları kontrol altına alarak ürün verimliliğini artırmak ve ürün kalitesini yükseltmek için en yaygın kullanılan yöntem pestisitler (kimyasal maddeler) kullanılarak yapılan kimyasal savaştır. Bu kimyasal maddeler tarımsal üretimde birçok fayda sağlamasına rağmen, çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Pestisitlerin bilinçsiz ve kontrolsüz kullanımı toprağın doğal yapısını bozmakta, toprağın ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Pestisit kalıntıları, yağmur suları ile yeraltı ve yüzey sularına karışarak ekosisteme zarar verebilmekte ve ekosistem üzerinde geri döndürülemez zararlar yol açabilmektedir. Özellikle içme suyu kaynaklarında bulunan pestisit kalıntıları, insan sağlığını tehdit eden unsurlar arasında yer almaktadır. Pestisit kullanımının bir diğer önemli etkisi de biyoçeşitliliğe olan zararlarıdır (Tarakcı ve Türel, 2009). Pestisitler, zararlı organizmalarla birlikte faydalı organizmaları da etkileyebilmektedir. Örneğin, polinatör böcekler, pestisitlerden zarar görebilir ve bu durum bitki çeşitliliğinin azalmasına yol açabilir. Polinatörlerin azalması ise uzun vadede tarımsal ürün verimliliğini olumsuz etkileyebilir ve ekosistemde geri dönülmez kayıplara yol açabilir. Pestisitlerin en önemli zararlarından biri ise insan sağlığına olan olumsuz etkileridir. Pestisit uygulamaları sırasında pestisitlere maruz kalan tarım işçileri için akut veya kronik düzeyde ciddi sağlık riskleri ortaya çıkmaktadır. Özellikle uzun süreli pestisit maruziyetine bağlı olarak gelişebilen bu sağlık riskleri; solunum yolu hastalıkları, cilt sorunları ve bazı kanser türleri şeklinde sıralanabilir (Özdemir ve Kiraz, 2022).

Tarımsal üretimde geleneksel yöntemlerle pestisit uygulamalarında karşılaşılan aşırı pestisit kullanımı, sürüklenme nedeniyle hedef dışı alanların kirlenmesi ve iş gücü maliyetlerinin yüksek olması gibi sorunlar sürdürülebilir tarım uygulamalarını engellemektedir. Traktöre asılır veya çekilir tip pülverizatörlerle yerden veya uçak ve helikopterlerle havadan yapılan pestisit uygulamalarında hedef yüzeylerde toplanan ilaç miktarı düşük olmakta, homojen ilaç dağılımı sağlanamamakta, sürüklenme yoluyla toprağa ve havaya ilaç kayıpları artmakta, dolayısıyla çevre kirliliği artmaktadır. Hedef yüzeylerde toplanan ilaç miktarının düşük olması ve homojen ilaç dağılımının sağlanamaması biyolojik etkinliğin düşmesine ve ürün kayıplarına yol açmaktadır. Ayrıca, geleneksel yöntemlerin yüksek iş gücü maliyetleri ve operasyonel zorlukları, özellikle geniş arazilerde tarımsal verimliliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Özellikle son yıllarda tarımda daha fazla kullanılmaya başlanan İHA teknolojisi, tarımsal ilaçlama süreçlerinde hassasiyet, hız ve hedef doğruluğu gibi önemli avantajlar sunabilmektedir.

İHA'larla yapılan pestisit uygulamaları, ilaçlama işlemini daha hedef odaklı ve istenilen alanlarla sınırlı tutarak çevresel etkileri minimize ederken aynı zamanda pestisit kullanımını optimize edebilmektedir. Bu durum, tarımsal üretimde hem kaynakların verimli kullanımı açısından hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından ideal bir çözüm sunmaktadır. Tarımsal üretimde İHA teknolojisinin kullanımı, özellikle geniş arazilerde hızlı ve etkili bir şekilde pestisit uygulama imkânı sağlarken, kimyasal madde kullanımını da optimize etme potansiyeline sahiptir.

İnsansız hava araçlarının tarımsal üretimde kullanımından önce üreticiler küçük alanlarda genellikle elde veya sırtta taşınan pülverizatörlerle, büyük bahçelerde ve tarlalarda ise traktöre asılır ve çekilir pülverizatörler veya kendi yürür pülverizatörlerle ilaçlamayı tercih ediyorlardı. Günümüzde insansız hava araçları sayesinde ilaçlama maliyetlerinin düştüğü ve tercih sebebi haline geldiği bildirilmektedir (Chakravarty, 2019). İHA'lar, ilaçlama yapılacak alanı tarayarak alandaki değişkenliklere göre ilacı hem hızla hem de büyük bir hassasiyetle uygulayabilmektedir. İHA'larla, konvansiyonel pülverizatörlerle gerçekleştirilen ilaçlama uygulamalarına göre beş kat daha hızlı ilaçlama yapılabilmektedir.

İnsansız hava araçları (İHA) ile yapılan ilaçlamalarda, memelerden püskürtülen ilacın hedef yüzeylerde olabildiğince yüksek oranda birikmesi, damlaların bu yüzeylere homojen yani tekdüze bir şekilde dağılması büyük önem taşımaktadır. Geleneksel ilaçlama yöntemlerinde, ilacın hedefte tutunma oranını ve dağılım düzgünlüğünü etkileyen faktörler; uygulama hacmi, meme tipi ve büyüklüğü, ilerleme hızı, meme ile hedef arasındaki mesafe (meme yüksekliği), rüzgâr, nem ve sıcaklık gibi meteorolojik koşullar şeklinde sıralanabilir. İHA'lar kullanılarak yapılan ilaçlamalarda ise bu faktörlere ek olarak uçuş yüksekliği, kalkış ağırlığı, rotor tipi, rotorların yerleşimi ve sayısı, çalışma genişliği ve uçuş hızı gibi parametreler devreye girmekte olup, bu parametreler İHA'larla yapılan ilaçlama uygulamalarının verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Martin vd., 2019; Zhang vd., 2020; Önler vd., 2023; Dursun vd., 2025). İHA'lar ile pestisit uygulamalarına yönelik olarak dünyada çok sayıda çalışma yürütülmüş ve bu çalışmalar özellikle son yıllarda giderek daha da yoğunlaşmıştır. Bunun yanında ülkemizde de bazı çalışmalar yapılmaktadır.

Chen vd. (2021), yaptıkları çalışmada İHA üzerine Yolo v3 ile çalışan nvidia TX2 grafik modüllü bir bilgisayar yerleştirmişler ve T. Papillosa (Pamuk Zararlısı) popülasyonunu belirlemişlerdir. Yolo v3, temel olarak üç farklı boyutta nesne algılama için geliştirilmiş bir programdır (Anonim, 2025a). Belirlenen pamuk zararlılarının yerleri haritada işaretlenmiş ve İHA (APD-

616X tipi) ile pestisit uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Yan vd. (2021), operatörün maruz kaldığı ilaç miktarını belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada bürölcede İHA ve elle yapılan ilaçlama uygulamalarını karşılaştırmışlardır. Bu uygulamalarda, konik hüzmeli meme ve 300 kPa basınca sahip elektrikli sırt pülverizatörü ile GNSS RTK navigasyona sahip DJI T16 İHA kullanılmıştır. İHA'nın püskürtme sisteminde 8 adet hidrolik meme bulunmaktadır. Bu çalışmada uygulanan biyopestisit ise Sipinetoram'dır. Çalışma sonunda İHA tarafından uygulanan biyopestisit etkinliğinin sırt pülverizatörüne göre daha yüksek olduğu açıklanmıştır. İlaçlamadan sonra 5. günde yapılan değerlendirmelerde sırt pülverizatörüyle sağlanan biyolojik etkinlik değerinin %65.23 olduğu, bu değer İHA ile yapılan uygulamada %73.68 olarak gerçekleştiği bildirilmiştir. Diğer yandan sırt pülverizatörüyle Allura Red uygulamasında operatörün toplam birim maruziyetinin 1952.02 mg/kg olarak gerçekleştiği, bu değer İHA operatörünün maruz kaldığı 134.51 mg/kg değerine göre oldukça yüksek gerçekleştiği, kısaca İHA ile pestisit uygulamasında operatörün ilaca olan maruziyetinin en aza indirilebileceği vurgulanmıştır.

Armut ağaçlarında İHA, İKA (İnsansız Kara Aracı) ve konvansiyonel yöntemlerle yapılan denemelerde pestisit uygulama etkinliği ile beraber ekolojik çevre koruma ve insan sağlığının korunması yönünden değerlendirmeler yapılmıştır.

Araştırma sonunda yapraklar üzerinde sağlanan ilaç kaplama oranları açısından en düşük değer %3.4 ile İHA'da elde edildiği, buna karşılık İKA ve konvansiyonel yöntemle yapılan denemelerde kaplama oranı değerinin sırasıyla %60.3 ve %34.9 oranlarında gerçekleştiği açıklanmıştır. Bu oranların daha önce yapılan çalışmalarla paralellik gösterdiği ve yaprakların üst kısmının alt kısmına göre daha iyi kaplandığı bildirilmiştir (Grella vd., 2020; Salcedo vd., 2020). İHA ile yapılan uygulamada ilaç dağılımına ait varyasyon katsayısının %66,2 olarak diğer uygulamalara göre daha yüksek bulunduğu, genel olarak yüksek konsantrasyonlu uygulama yapan İHA'larla %1' in üzerinde kaplama oranının elde edilmesi durumunda zararlı mücadelesinde yeterli olduğu bildirilmektedir (Wang vd., 2022). Ancak, İHA ile meyve ağaçlarına yapılan ilaçlamalarda etkinlik değerinin değişkenlik göstermesi, çiftçilerin bu teknolojiyi kabulünü zorlaştıracak bir durumdur. Li vd. (2021) tarafından daha önce yapılan çalışmada da benzer şekilde İHA ile yapılan pestisit uygulamalarının performansının düşük bulunduğu açıklanmıştır. İKA ile yerden yapılan uygulamalarda aşağıdan yukarıya doğru ilaçlama yapılması sayesinde İHA'ya göre daha düşük bir varyasyon katsayısı

(%37,1) elde edildiği, konvansiyonel uygulamada ise varyasyon katsayısının %42.2 olarak gerçekleştiği ve tatmin edici bir performans sağlandığı bildirilmiştir. Meyve bahçelerine pestisit uygulamalarında

%30-70 arasındaki kaplama oranı değerlerinin normal kabul edildiği ve yüksek hacimli uygulamalarda %100'e kadar yaklaşabildiği belirtilmiştir (Wang vd., 2022). Çalışma kapsamında çevre kirliliği açısından yapılan değerlendirmelere göre Konvansiyonel Uygulama>İKA>İHA olarak gerçekleştiği, su tasarrufu değerlendirmesinde ise İHA<İKA<Konvansiyonel Uygulama şeklinde olduğu açıklanmıştır. İHA'lar ile pestisit uygulamalarında ilaç dağılım düzgünlüğü ve bitki içerisine penetrasyon konusunda iyileşme sağlanabilirse, hastalık ve zararlı kontrolünde daha iyi performans sağlayabileceği değerlendirilmiştir (Jiang vd., 2022).

Özyurt ve Çelen (2022), İHA ile yapılan pestisit uygulamalarında farklı püskürtme memelerinin damla dağılımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, farklı uçuş hızları ve dört farklı püskürtme memesi kullanılarak, etkin iş genişliği belirlenmiş ve damla dağılım homojenliğinin belirlenmesine yönelik analizler yapılmıştır.

Butler-Ellis vd. (2025), İHA ve tarla pülverizatörü kullanarak yaptıkları pestisit uygulamalarında yere ve havaya olan ilaç sürüklenmesini belirlemeye çalışmışlardır. Yere olan ilaç sürüklenmesini ölçmek için rüzgâr yönünde 50 metre mesafeye kadar kalıntı örnekleme yapılmıştır. Havaya sürüklenen ilaç kalıntı miktarlarını belirlemek için ise 5 ve 10 metre yüksekliklerde örnekleme yapılmıştır. Çalışma sonunda, İHA ile yere ve havaya sürüklenen kalıntı miktarı değerlerinin tarla pülverizatörleriyle yapılan ilaçlamalara göre daha düşük seviyede gerçekleştiği belirtilmiştir. Meyve bahçelerinde ise yer (zemin) üzerinde ölçülen ilaç kalıntıları açısından, İHA ve yardımcı hava akımlı pülverizatörle yapılan denemelerden elde edilen sonuçların benzerlik gösterdiği açıklanmıştır.

İHA ile ilaçlama esnasında ilerleme hızı, uçuş yüksekliği ve uygulama hacmi gibi parametreler uygulama etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Uçuş hızı ve yüksekliği arttıkça damla çapı küçülmekte, hedef dışına sürüklenme miktarı artmakta, hedef yüzeylerde toplanan ilaç miktarı azalmakta ve ilaç dağılım düzgünlüğü bozulmaktadır. Bu nedenlerle ilaçlama parametrelerinin oldukça hassas bir şekilde ayarlanması önemlidir. Özellikle orta büyüklükteki damlalarla (220 mikron) ve 9-10 L/da uygulama hacminde hedeflenen kaplama oranlarının sağlanabileceği bildirilmektedir (Matthews, 2018).

İHA'larda döner diskli memeler kullanılması durumunda küçük ve oldukça homojen damlalar oluşturulurken, sürüklenme riski artmaktadır. Konvansiyonel hidrolik memeler ise farklı uygulama hacmi ve damla

büyüklüğü sağlamaktadırlar. Memelerin rotorların altında konumlandırılmasıyla rotor pervanelerinin oluşturduğu hava hareketi yardımıyla damlacıkların hedefe daha iyi ulaşması sağlanmaktadır. Özellikle bağ ve meyve bahçelerinde İHA ve yardımcı hava akımlı pülverizatörlerle yapılan uygulamalardan benzer sonuçlar elde edildiği ortaya konulmuştur.

Dünya’da ve Türkiye’de yapılan çalışmalar, İHA’ların pestisit uygulamalarına adaptasyonu ve konvansiyonel yöntemlerin karşılaştırılması üzerine odaklanmıştır. Yapılan çalışmalar, kullanılan her İHA tipi ve meme tipi için farklı uçuş parametrelerinin gerekli olduğunu göstermektedir. İHA’larla yapılan insektisit, fungusit ve herbisit uygulamalarında karşılaşılan sorunlar; hedef yüzeylerde sağlanan kaplama oranının yetersiz olması, sürüklenme yoluyla hedef dışına giden damlacıklar, kanopi yoğunluğu yüksek olan bitkilerde düşük penetrasyon ve homojen olmayan ilaç dağılımı şeklinde sıralanabilir (Pranasvi vd., 2022; Wang vd., 2022; Jeevan vd., 2023; Wu vd., 2023; Shanmugam vd., 2024; Dursun vd., 2025).

İHA ve sırt atomizörünü karşılaştırmak amacıyla yapılan bazı çalışmalarda İHA ile daha az pestisit kullanarak daha etkin bir uygulama yapılabildiği açıklanmıştır (Paranasvi vd., 2022; Madhusree vd., 2023; Wu vd., 2023). Bazı çalışmalarda ise yabancı ot kontrol etkinliği açısından benzer sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir (Jeevan vd., 2023; Hiremath vd., 2023). Buna karşın, İHA ile yapılan uygulamalarda sürüklenme riskinin arttığı (Paranasvi vd., 2022) ve yoğun kanaopili bitkilerde düşük ilaç birikimi ve kaplama oranı (Jeevan vd., 2023; Wu vd., 2023) elde edildiği belirtilmiştir. Kısaca, İHA’larla yapılan insektisit, fungusit ve herbisit uygulamalarını konvansiyonel uygulamalarla karşılaştırmak amacıyla yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, İHA ve konvansiyonel uygulamaların hemen hemen benzer performans gösterdiklerini, ancak bu başarının elde edilebilmesi için, kullanılan İHA tipine göre farklı uçuş ve uygulama parametrelerinin ortaya konulması gerektiğini göstermiştir. Bununla birlikte İHA’larla pestisit uygulamalarında sürüklenme, yoğun kanopide yetersiz penetrasyon, kaplama oranının düşük olması ve damla dağılımının yeterli yoğunlukta olmaması gibi olumsuzluklarla karşılaşılabilirdiği bildirilmektedir. İHA’larla pestisit uygulamalarının etkinliğini artırmak ve karşılaşılan olumsuzlukları en aza indirmek için uçuş hızı, uçuş yüksekliği, meme tipi, taşıma yükü ve İHA tipi gibi operasyonel parametrelerin ilaçlama durumuna göre optimize edilmesi gerekliliği bulunmaktadır.

3. Pestisit Uygulamalarında Kullanılan İnsansız Hava Araçlarının Gelişimleri ve Teknik Özellikleri

Pestisit uygulamalarında kullanılmak üzere dünyada geliştirilen ilk İHA 1986 yılında Japon Yamaha firması tarafından geliştirilmiş olan R-50 Aero Robot isimli bir RCASS (Remote Control Aerial Spraying System) uzaktan kontrollü ilaçlama sistemidir. L09 kodlu ilk modelin geliştirilmesi 1987 yılında tamamlanmış olup bu model 1991 yılında Japonya Tarım Orman Su Ürünleri Bakanlığınca lisanslanarak kullanılmaya başlamıştır (Anonim, 2025b). Firma, 1997 yılında ise R-Max modelini üretmiş ve piyasaya sunmuştur. R-MAX modelinin en önemli üstünlüğü, küçük ölçekli Japon çiftliklerinde uygun maliyet ve düşük riskli bir alternatif sunmasıdır (Anonim, 2025c). Piyasaya 1997 yılında sürülen R-Max modeli, benzinli motora sahip olup üzerinde 20 litrelik ilaç deposu ve 4 adet püskürtme memesi bulunmaktaydı. Sonraki yıllarda ise elektrikle çalışan, üzerinde bir batarya ve her kanada tahrik veren elektrikli rotorlar bulunan İHA'lar piyasaya sürülmüştür.

Günümüzde 4, 6 ve 8 rotora sahip İHA'lar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İHA'ların ilk versiyonlarında konvensiyonel yelpaze hüzmeli püskürtme memeleri daha fazla kullanılmaktaydı. Ancak, farklı hava koşulları, uçuş parametreleri ve pestisit tipleri için damlacık boyutlarının ayarlanabilmesi amacıyla son çıkan İHA modellerinde döner diskli memeler tercih edilmeye başlanmıştır. Günümüzde İHA'ları birbirinden ayıran başlıca özellikler; rotor sayısı, rotorların konumları, meme sayısı, meme tipleri ve konumları, memeler arası mesafe, rotor ve meme arası dikey uzaklık, kalkış ağırlığı ve tank (depo) kapasitesi şeklinde sıralanabilir (Özyurt vd., 2024).

Ülkemizde pestisit uygulamalarında farklı firmalara ait İHA modelleri kullanılmakla beraber DJI firmasının AGRAS T10-T50 modellerine sıkça rastlanılmaktadır. Bunun dışında “Smartfarm Web” modeli ile araziler tanımlanarak yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edebilmekte, yükselti ayrıntısına sahip haritalar çıkarılarak 3 boyutlu rota belirlenebilmekte, kimyasal yabancı ot kontrolü ve gübreleme işlemleri gerçekleştirebilmektedir. Farklı bir model olan MAVIC 3M modeli ile RGB ve Multispektral görüntü analizleri yapılabilmektedir. Firma, İHA kullanarak 500 bin hektar tarım alanındaki ilgili işleri gerçekleştirdiklerini, ayrıca ilaç sürüklenme testlerini ve yabancı ot ilaçlamalarını raporlamıştır (Anonim, 2025d).

Tarımda kullanılan İHA'lar boyut, menzil, kabiliyet ve ağırlıklarına göre sınıflandırılabilirler. İHA'ların sabit kanatlı İHA ve rotorlu İHA olmak üzere iki ana tipi bulunmaktadır. Rotorlu İHA'lar ise tek veya çok rotorlu olabilirler. Sabit kanatlı bir İHA'nın sert aerodinamik kanat yapısı hareket ettikçe kaldırma kuvveti

oluşturur ve pilotsuz normal görünen bir uçak gibidir. Bir veya iki içten yanmalı motordan veya elektrik motorundan güç alarak ileri itiş gücü sağlarlar. İHA kanatları, ön kısmından sonuna kadar hava basınç farkı yaratan özel bir kanat profili ile üretilmektedir. Kanatların arka alt kısımlarında bulunan kanatçıklar vasıtasıyla dümenleme ile yükseklik ayarlaması yapabilirler. Bu İHA'lar uzun mesafelere uçabildikleri, yüksek irtifalara ulaşabildikleri ve sessiz çalışabildikleri için avantajlıdır ve gözlem amaçlı kullanılmaktadırlar. Pervaneli İHA'lar tek veya çok rotora sahip olabilirler. Tek rotorlu olanlar helikoptere benzemektedirler. Çok rotorlu İHA'lar piyasadaki en yaygın ve en çok satılan türdür. Çok rotorlu İHA bir uçuş kontrolörü yardımıyla tek tek rotor hızını değiştirerek hız ve manevra yapabilir ve işi gerçekleştirir. 4 rotorlu İHA'lar "quadcopter" olarak isimlendirilmişlerdir. Gerçek zamanlı izleme, gözetim, haritalama, ilaçlama vb. alanlarda yaygın olarak kullanılırlar (Borikar vd., 2022).

Pestisit uygulamalarında kullanılan İHA'ların temel bileşenleri; hortumlar, filtreler, depo, pompa, akış ölçer, memeler, otonom ayar ve konum sensörleri (GPS, GNSS ve RTK gibi), mesafe ve engel sensörleri (RADAR, LİDAR ve ultrasonik sensörler) şeklinde sıralanabilir. İHA'larda kullanılan uydu ve navigasyon sistemleri hassas tarım uygulamaları için santimetre seviyesinde doğruluk sağlamaktadırlar. İHA' larda bulunan eylemsizlik ölçüm birimi (IMU), İHA'nın uçuşunu dengede tutmak ve hassas dümenleme sağlayabilmek için GPS verileriyle birleştirilmektedir. Ayrıca, tarım alanlarında ağaç, direk gibi çeşitli engeller bulunabildiği için, otonom uçuş sırasında güvenliği sağlamak amacıyla LİDAR veya stereoskopik kameralar kullanılarak engel algılama sistemleri entegre edilmiştir. İHA kontrolü ve gerçek zamanlı veri aktarımı için 2.4 GHz ve 5.8 GHz gibi frekanslar kullanılarak kısa ve uzun mesafeli veri bağlantıları sağlanmaktadır. Görüş hattı ötesi (BVLOS) operasyonlar için 4G/5G ağlarının entegrasyonu, menzili ve etkinliği artırmaktadır. BVLOS operasyonlar, bir İHA'nın operatörün doğrudan görüş alanı dışında kontrol edilmesi anlamına gelmektedir. İHA'lar, yer kontrol istasyonları (GCS) olarak güçlü bilgisayarlar, yüksek çözünürlüklü ekranlar ve kullanıcı dostu kontrol arayüz ile donatılmıştır. İHA'larda kullanılan görev planlama yazılımları, uçuş rotalarının optimize edilmesini, hava durumu verilerinin entegrasyonunu ve düzenleyici kısıtlamaların yönetilmesini sağlarlar (Dursun vd., 2025).

Günümüzde tarımda İHA'ların kullanımını sınırlayan en büyük problem pil süresinin yetersiz olması veya batarya fiyatlarının yüksek olmasıdır. Uygulamaları gerçekleştirenler genellikle birden fazla pil bulundurma mecburiyetinde oldukları için maliyet artmaktadır. İHA'ların havada şarj edilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir (Özgüven vd., 2022).

4. Ülkemizde Tarımda İHA Kullanımının Zorlukları ve Karşılaşılabilecek Engeller

Pestisit uygulamalarında İHA kullanımının bazı zorlukları bulunmaktadır. İHA'ların kalibrasyonunun doğru bir şekilde yapılması, pestisitlerin hedef alanlara doğru dozlarda uygulanması açısından oldukça önemlidir. Kalibrasyonun yanlış yapılması, pestisit israfına yol açabileceği gibi ürünlere de zarar verebilir. Bu nedenle, İHA'ları kullanacak olan operatörlere uygulamalardan önce gerekli eğitimlerin verilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu teknolojinin doğru ve bilinçli bir şekilde kullanılması hem ilaçlama maliyetinin düşürülmesi hem de verimliliğin artırılması için önemlidir. (Özgüven vd., 2022). İHA'ların etkin bir şekilde kullanımı için gerekli olan yazılım ve donanım sistemlerinin, çiftçiler ve tarım çalışanları tarafından doğru bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Ancak İHA'ların yazılım ve donanım sistemlerinin hem karmaşık olması hem de teknolojinin sürekli gelişmesi, kullanıcıların öğrenme süreçlerini zorlaştırmaktadır. Kısaca, İHA ile pestisit uygulamalarının başarısı için çiftçilerin ve tarım uzmanlarının, bu teknolojiyi etkili bir biçimde kullanabilmeleri için kapsamlı eğitim programlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Eğitim programlarının içeriği, İHA'ların operatörlüğünden, bakımına ve yazılım kullanımı gibi konulardan oluşmalıdır. Böylece, teknik zorlukların üstesinden gelinmesi ve teknolojinin benimsenmesi sağlanabilir (Çelik, 2023).

İHA ile pestisit uygulamalarının dezavantajları arasında yasal ve etik sorunlar da bulunmaktadır. İHA'ların kullanımına ilişkin yasal düzenlemeler açısından ülkeden ülkeye farklılıklar görülebilmektedir. Ülkemizde dronların tarımsal kullanımına ilişkin düzenlemeler belirsizdir. İlaçlama dronlarının ruhsatlandırılması, kullanım izinleri ve operasyon standartları gibi konular hala tam olarak netleşmemiştir (Özyurt vd., 2024). Bu nedenle tarımda İHA kullanımında izlenecek yasal süreçlerin karmaşık olması, dikkat edilmesi gereken hususlardan birisidir. Tarımsal alanlarda İHA kullanımının zorluklarından birisi de, hava koşullarının değişkenlik göstermektedir. Rüzgârlı veya yağışlı havalar İHA'ların çalışmasını güçleştirmekte, doğru ve etkili uygulamalar yapılmasına engel teşkil edebilmektedir (Özgüven vd., 2022). Dronların tarımda kullanımını sınırlayan faktörlerden birisi de ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Ülkemizdeki işletmelerin büyük çoğunluğunun küçük ölçekli olması, bu teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlandıran en önemli faktörlerden birisidir. Ayrıca, kırsal alanlarda internet erişimi altyapısındaki eksiklikler, dronların etkin bir şekilde kullanılmasının önünde bir engel oluşturmaktadır.

İHA'ların yaygın ve etkin kullanımının önünde engel oluşturan bu sorunlar kamu kurumları, üniversiteler ve özel sektörün iş birliği yapmasıyla çözülebilir. Türkiye'de İHA kullanımının yaygınlaşabilmesi için, özellikle İHA kullanımına yönelik eğitim programlarının artırılması ve bu teknolojinin çiftçilere daha uygun fiyatlarla sunulması gerekmektedir (Dursun vd., 2025). Ülkemizde İHA teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak yerli ve milli İHA modellerinin üretilmesi, maliyetlerin düşmesini sağlayarak çiftçilerimizin bu teknolojiye daha kolay ulaşabilmesini ve kullanabilmesini sağlayabilecektir.

5. Sonuç

Günümüz modern tarımında hastalık, zararlı ve yabancı otlar nedeniyle meydana gelen ürün kayıplarının önlenmesi ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi için pestisitlerle yapılan kimyasal savaş yöntemi dünyada olduğu gibi ülkemizde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Pestisit kullanımının sağladığı avantajlarla birlikte çevre ve insan sağlığı açısından oluşturduğu riskler göz önüne alındığında, pestisit uygulamalarının bilinçli ve dikkatli bir şekilde yapılmasını, en etkili uygulamalar yapılmasını sağlayacak teknolojilerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de pestisit uygulamaları konvansiyonel pülverizatörlerle yapılmaktadır. Ancak 1980' li yıllardan itibaren İHA'ların tarım sektöründe kullanılmaya başlamasıyla birlikte üretim süreçlerinde devrim niteliğinde bir dönüşüm meydana gelmiş, çevre dostu ve sürdürülebilir bir tarımsal üretim için bu teknoloji vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Dünyada pestisit uygulamalarında İHA kullanımı her geçen gün artmakta, etkin kullanımına yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Tarımsal üretim açısından stratejik bir konuma sahip ülkemizde de, İHA teknolojisinin yaygın ve etkili kullanımı hem ekonomik kazançlar sağlayabilir, hem de çevrenin ve ekosistemin korunmasına faydalar sağlayabilir. Araştırma sonuçları, konvansiyonel yöntemlerle karşılaştırıldığında, tarımsal işlerin daha hızlı yapılmasını sağladığını ve iş gücünden sağladığı tasarrufla maliyetleri düşürdüğünü, tarımsal uygulamalarda verimliliği ve sürdürülebilirliği önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Yapay zekâ ve derin öğrenme algoritmalarının İHA'lara entegrasyonu ile bu sistemlerin daha etkili ve erişilebilir hale gelmesi beklenmektedir. Teknolojik gelişmelerin sürekliliği ve yapay zekanın sürekli gelişimi sayesinde İHA'larla otonom operasyonların insanlardan kaynaklı hata oranlarını düşürebileceği belirtilmektedir. Ancak İHA teknolojisinin ülkemizde daha yaygın ve etkin bir şekilde kullanılabilmesi için satın alma maliyeti, teknik bilgi, yasal düzenlemeler ve altyapı kısıtları gibi konuların çözülmesi gerekmektedir.

Konusunda uzman olmayan kişilerce İHA kullanımının bilinçsizce yapılması uygulanan kimyasalların çevresel ve ekonomik olumsuzluklara yol açmasına neden olabilmekte ve İHA'lara olan güveni zedeleyebilmektedir. Bu nedenle tarımda İHA kullanımının etkin ve güvenli olabilmesi için kullanım şartları, standartlar ve yasal düzenlemeler gibi konuların uzman kişilerce oluşturulması oldukça önemlidir. İHA kullanımının uzman eğitimi almış ve lisans süreçlerini başarıyla gerçekleştirmiş kişilerce gerçekleştirilmesi, İHA'ların avantajlarını en üst düzeye çıkarırken, ortaya çıkabilecek olumsuzlukları minimum seviyeye indirir. Sonuç olarak, tarım sektöründe sürdürülebilir ve verimli bir tarımsal üretim için İHA'ların potansiyelinden sonuna kadar yararlanılmalıdır (Dursun vd., 2025).

Kaynaklar

- Anonim (2025a). <https://docs.ultralytics.com/tr/models/yolov3/> (Erişim Tarihi: Anonim (2025b) <https://global.yamaha-motor.com/stories/history/stories/0028.html> (Erişim Tarihi: Anonim (2025c). <https://agtecher.com/tr/urun/yamaha-helikopterleri/> (Erişim Tarihi: Anonim (2025d). <https://ag.dji.com/newsroom/ag-news--en-white-paper-2023> (Erişim Tarihi: Baraniuk, C. (2018). The Crop-Spraying Drones that Go where Tractors Can't. BBC, pp. 3–8, 2018. Available at: <https://www.bbc.com/news/business-45020853>. (Erişim Tarihi: 6 Mart 2025). Borikar, G. P., Gharat, C., & Deshmukh, S. R. (2022). Application of drone systems for spraying pesticides in advanced agriculture: A review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1259, No. 1, p. 012015). IOP Publishing. Butler-Ellis, M. C., Lane, A. G., O'Sullivan, C. M., Wheeler, H. C., & Harwood, J. J. (2025). Field measurement of spray drift from a spray application by UAV. Pest Management Science. Chakravarty S., 2019. Applications of Drone in the Agriculture Industry <https://www.marketresearchreports.com/blog/2019/11/22/leading-players- agriculture-drone-market> (Erişim Tarihi: 6 Mart 2025). Chen, C. J., Huang, Y. Y., Li, Y. S., Chen, Y. C., Chang, C. Y., & Huang, Y. M. (2021). Identification of fruit tree pests with deep learning on embedded drone to achieve accurate pesticide spraying. Ieee Access, 9, 21986-21997. Devi, G., Sowmiya, N., Yasoda, K., Muthulakshmi, K., & Balasubramanian, K. (2020). Review on application of drones for crop health monitoring and spraying pesticides and fertilizer. J. Crit. Rev, 7(6), 667-672. Dursun, E., Urkan, E., Güler, H., Caner, Ö., Çelen, İ.H. ve Özyurt, H.B. (2025). Pestisit Uygulama Teknolojilerindeki Gelişmeler. Türkiye Ziraat Mühendisliği X. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı-1, s.187-206, 13-17 Ocak 2025, Ankara. Dutta, G., & Goswami, P. (2020). Application of drone in agriculture: A review. International Journal of Chemical Studies, 8(5), 181-187. Gašparovi'c, M., Zrinjski, M., Barkovi'c, Đ., Radočaj, D., 2020. An automatic method for weed mapping in oat fields based on UAV imagery. Comput. Electron. Agric., 173, 105385. Grella, M., Miranda-Fuentes, A., Marucco, P. and Balsari, P. (2020). Field

- assessment of a newly-designed pneumatic spout to contain spray drift in vineyards: evaluation of canopy distribution and off-target losses. *Pest Manag. Sci.* 76, 4173–4191. doi: 10.1002/ps.5975
- Güzel, B. ve Okatan, E. (2022). Tarım ve yapay zekâ. *Yapay Zekânın Değiştirdiği Dinamikler*, 199.
- Hiremath, C., Khatri, N., & Jagtap, M. P. (2023). Comparative studies of knapsack, boom, and drone sprayers for weed management in soybean (*Glycine max* L.). *Environmental Research*, 240, 117480.
- Jeevan, N., Pazhanivelan, S., Kumaraperumal, R., Ragunath, K., Arthanari, P. M., Sritharan, N. and Manikandan, S. (2023). Effect of different herbicide spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Applied and Natural Science*, 15(3), 972-977.
- Jiang, Y., He, X., Song, J., Liu, Y., Wang, C., Li, T. & Chen, F. (2022). Comprehensive assessment of intelligent unmanned vehicle techniques in pesticide application: A case study in pear orchard. *Frontiers in Plant Science*, 13, 959429.
- Koganti, T., Ghane, E., Martinez, L.R., Iversen, B.V. and Allred, B.J. (2021). Mapping of Agricultural Subsurface Drainage Systems Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery and Ground Penetrating Radar. *Sensors*, 21, 2800.
- Li, X., Giles, D. K., Niederholzer, F. J., Andaloro, J. T., Lang, E. B. and Watson, L. J. (2021). Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection. *Pest Manag. Sci.* 77, 527–537.
- Madhusree, S., Ramesh, T., Rathika, S., Meena, S., & Raja, K. (2023). Effect of Drone Application of Pendimethalin on Microbial Population, Nodulation, Weed Control and Yield of Green Gram (*Vigna radiata* L.). *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(22), 157-164.
- Martin, D. E., Woldt, W. E., Latheef, M. A. (2019). Effect of application height and ground speed on spray pattern and droplet spectra from remotely piloted aerial application systems. *Drones*, 3(4), 1-21.
- Matthews, G.A., Bateman, R. and Miller, P. (2018). *Pesticide Application Methods*. 4th Edition, Longman Scientific and Technical, England, 544 s.
- Mazur, M., 2016. Six Ways Drones Are Revolutionizing Agriculture. MIT Technology Review. Available at: <https://www.technologyreview.com/s/601935/six-ways-drones-are-revolutionizing-agriculture/>. (Erişim Tarihi: 6 Mart 2025).

- Ozkan, H.E., Paul, P.A., Derksen, R.C. and Zhu, H. (2012). Influence of Application Equipment on Deposition of Spray Droplets in Wheat Canopy. *Aspects of Applied Biology*, Vol. 114: 317324.
- Önler, E., Özyurt, H. B., Şener, M., Arat S., Eker, B., Çelen, İ. H. (2023). Spray characterization of an unmanned aerial vehicle for agricultural spraying. *The Philippine Agricultural Scientist*, 106(1), 39-46.
- Özdemir, T. ve Kiraz, E.D.E. (2022). Pestisitlerin çevre sağlığı üzerindeki etkisi. *City Health Journal*, 3(2), 18-23.
- Özyurt, H. B. ve Çelen, İ. H. (2022). İnsansız hava araçları ile yapılan pestisit uygulamalarında farklı meme tiplerinin damla dağılımına etkisinin incelenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 18(3), 157-172.
- Özyurt, H. B., Çelen, İ. H., Dursun, E. (2022). Tarımda Dronlar ve Geleceği. *Biyosistem Mühendisliğinde Yeni Gelişmeler. BİDGE Yayınları*, s.37-66.
- Pranaswi, D., Jagtap, M. P., Asewar, B. V., Gokhale, D. N., Shinde, G. U. (2022). Weed control efficiency with herbicide application by the combination of Drone and Knapsack sprayer in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pharma Innov*, 11, 741- 744.
- Salcedo, R., Zhu, H., Zhang, Z., Wei, Z., Chen, L., Ozkan, E. (2020). Foliar deposition and coverage on young apple trees with PWM-controlled spray systems. *Comput. Electron. Agric.* 178:105794. doi: 10.1016/j.compag.2020.105794.
- Shanmugam, P. S., Srinivasan, T., Baskaran, V., Suganthi, A., Vinothkumar, B., Arulkumar, G., Kavitha, R. (2024). Comparative analysis of unmanned aerial vehicle and conventional spray systems for the maize fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera; Noctuidae) management. *Plant Protection Science*, 60(2).
- Tarakcı, Ü. ve Türel, İ. (2009). Halk sağlığı amaçlı kullanılan pestisitlerin (Biyosidal) güvenilirlik standartlarının karşılaştırılması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 20(1), 11-18.
- Wu, J.T., Yu Tu, J. (2023). Compare Efficacy Between Knapsack Sprayer And Uav Sprayer Application In Chemical Spraying: A Case Study Of Garland Chrysanthemum. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 9(3), 342-380.
- Wang, C. L., Liu, Y., Zhang, Z. H., Han, L., Li, Y. F., Zhang, H. (2022). Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. *Pest Manag. Sci.* 78, 2449–2466.

- Wang, P., He, M., Li, M., Yang, Y., Li, H., Xi, W., Zhang, T. (2024). Optimization of Application Parameters for UAV-Based Liquid Pollination in Pear Orchards: A Yield and Cost Perspective. *Agronomy*, 14, 2033.
- Yan, X., Zhou, Y., Liu, X., Yang, D., & Yuan, H. (2021). Minimizing occupational exposure to pesticide and increasing control efficacy of pests by unmanned aerial vehicle application on cowpea. *Applied Sciences*, 11(20), 9579.
- Zhang, X. Q., Song, X. P., Liang, Y. J., Qin, Z. Q., Zhang, B. Q., Wei, J. J., Li, Y. R., Wu, J. M. (2020). Effects of Spray Parameters of Drone on the Droplet Deposition in Sugarcane Canopy. *Sugar Tech*, 22(4), 583-588.
- Zhao, J., Berge, T.W.,; Geipel, J. (2023). Transformer in UAV Image-Based Weed Mapping. *Remote Sens.*, 15, 5165.
- Zhou H., Yao W. , Su D., Guo S., Zheng Z. , Yu Z., Gao D., Li H., Chen C. (2024). Application of a centrifugal disc fertilizer spreading system for UAVs in rice fields. *Heliyon* 10 (2024).