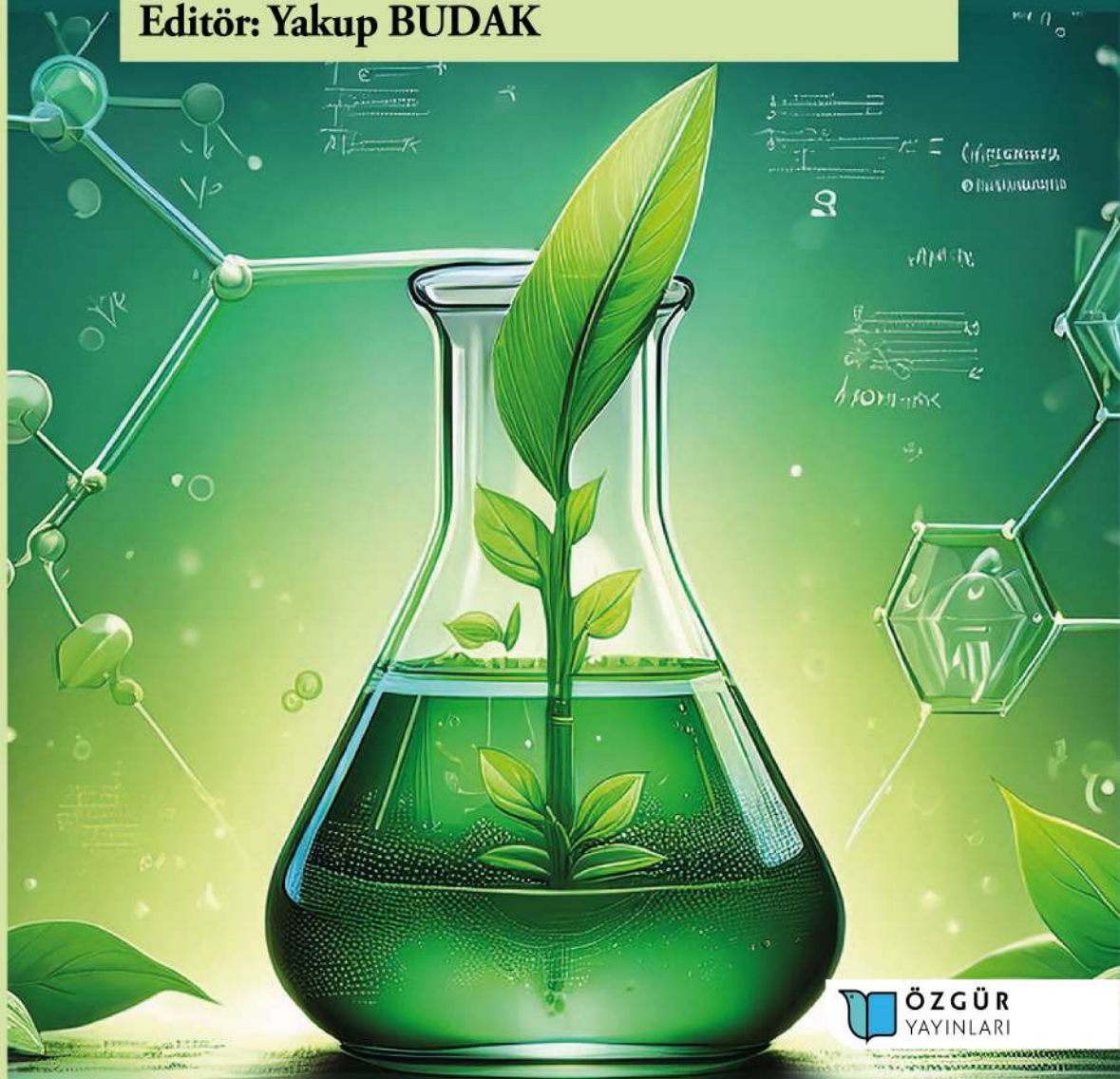


Yeşil Kimya ve Sağlık: Çevresel Dönüşümün Bilimsel Temelleri

Editör: Yakup BUDAK



ÖZGÜR
YAYINLARI

Yeşil Kimya ve Sağlık: Çevresel Dönüşümün Bilimsel Temelleri

Editör:

Yakup BUDAK



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şhitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgur yayinlari.com

✉ info@ozgur yayinlari.com

Yeşil Kimya ve Sağlık: Çevresel Dönüşümün Bilimsel Temelleri

Editör: Yakup BUDAK

Language: Turkish-English

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8562-17-0

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1141>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Budak, Y. (ed) (2025). *Yeşil Kimya ve Sağlık: Çevresel Dönüşümün Bilimsel Temelleri*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1141>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgur yayinlari.com/>



Ön Söz

Bu eser, modern kimya uygulamalarının çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini minimize etmeyi hedefleyen “Yeşil Kimya” disiplinini bütüncül bir perspektifle ele almaktadır. Endüstriyel süreçlerden laboratuvar ölçekli araştırmalara kadar, sürdürülebilir bir gelecek inşa etmenin bilimsel metodolojilerini sunan kitap; toksisiteyi azaltma, enerji verimliliğini artırma ve yenilenebilir kaynak kullanımı gibi temel ilkeleri sağlık ekseninde incelemektedir. Çevresel dönüşümün sadece teknik bir zorunluluk değil, aynı zamanda toplum sağlığını koruma noktasında stratejik bir öncelik olduğunu savunan bu çalışma; akademisyenler, araştırmacılar ve politika yapıcılar için bilimsel bir rehber niteliğindedir.

İçindekiler

Ön Söz

iii

Bölüm 1

Çevresel Kılcal Plastiklerin (Mikro ve Nanoplastikler) Kardiyovasküler Sistem Üzerindeki Etkileri ve Toksikolojik Mekanizmalar 1

Kayıhan Karaman

Bölüm 2

Toxin-Free Training: Chemical Pollution in Gyms and Green Hygiene Approaches 15

Mustafa Ceylan

Necip Zeki Budak

Elif Aktürk Bozdemir

Bölüm 3

From Invisible Risks to Visible Responsibilities: Manufacturing, Safety, Health Impacts, and Ethics in Cleaning and Cosmetic Products 25

Naciye Selcen Bayramcı

Buğra Keskin

Serap Akdeniz

Bölüm 4

Mikroplastik Toprak Kirletici Kaynaklarının İnsan ve Toprak Sağlığı Üzerine Etkisi 37

Meliha Burcu Gürdere

Ayşegül Nazlı Özcan

Bölüm 5

- Koroner Girişimlerde İlaç Kaplı Balonlar: Mekanizmalar, Klinik Kanıtlar ve Gelecek Perspektifler 57
Gökhan Cabri

Bölüm 6

- Türkiye’de Biyokütle Enerji Santrallerinin Yeşil Kimya, İSG ve Biyofiziksel Perspektifinden Değerlendirilmesi 73
Fatih Yaşar
Yüksel Sarıkaya
Yakup Budak

Bölüm 7

- İmmün Sistemi Üzerinde Etkili Bitkiler 101
Hasan Basri Karayel

Bölüm 8

- The Athlete’s Invisible Opponent: Synthetic Turf Risks in Sustainable Stadiums and Green Chemistry Solutions 119
Necip Zeki Budak
Yavuz Selim Ağaoğlu
Recep Bozdemir

Çevresel Kılcal Plastiklerin (Mikro ve Nanoplastikler) Kardiyovasküler Sistem Üzerindeki Etkileri ve Toksikolojik Mekanizmalar

Kayıhan Karaman¹

Özet

Endüstriyel faaliyetlerin yoğunlaşması ve plastik kullanımının küresel düzeyde hızla artması, mikro- ve nanoplastiklerin (MNP) çevresel ve biyolojik sistemlerde kalıcı bir kirlilik kaynağı hâline gelmesine yol açmıştır. Bu partiküllerin sadece solunan hava, içme suyu ve gıdalar ile vücuda alınmakla kalmayıp; aynı zamanda dolaşıma geçerek dokulara ulaşabildiği artık çok sayıda çalışma tarafından gösterilmektedir. Son yıllarda yayımlanan insan arter dokusu analizleri, MNP'lerin aterosklerotik plaklarda birikebildiğini ortaya koymuş ve kardiyovasküler hastalıklarla olası ilişkilerini gündeme taşımıştır.

Bu kitap bölümü, mikro- ve nanoplastik maruziyetinin kaynaklarını, biyolojik dağılımını, damarsal dokularda olası birikim mekanizmalarını, çevresel kirlilik ile ateroskleroz arasındaki ilişkiyi ve güncel klinik kanıtları geniş bir çerçevede ele almakta; aynı zamanda mevcut bilgilerin yorumlanmasına ve gelecekteki araştırma başlıklarına ışık tutmaktadır.

1. Giriş ve Arka Plan

1.1. Tanımlar ve Sınıflandırma

Plastik kirliliği, günümüzün en belirgin çevresel sorunlarından birisidir. Son yıllarda insan sağlığına yönelik artan potansiyel risklere sahiptir. Özellikle, çevrede yaygın olarak bulunan kılcal plastik atıklar - Mikroplastikler (MP) ve Nanoplastikler (NP) - toksikolojik araştırmaların odağına yerleşmiştir. MP ve NP, çevrede geniş ölçekte bulunmakla birlikte solunan hava, içme suyu, gıdalar

1 Doç. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Tıp Fakültesi, Kardiyoloji Anabilim Dalı, Tokat, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6915-2940; E-mail: kay55han@hotmail.com

ve temas edilen yüzeyler aracılığıyla insanlara ulaşarak dolaşım sistemine kadar erişebilmektedir (1,2).

Mikroplastikler, boyutu 1 μm (mikrometre) ile 5 mm arasında değişen polimerik partiküller (2) iken NP'ler ise, boyutu 1 μm 'nin altında, genellikle 1–100nm (nanometre) aralığında tanımlanan ultra-küçük parçacıklardır. NP'ler, düşük yüzey alanı, yüksek reaktiviteleri ve biyolojik bariyerleri aşma kapasiteleri nedeniyle, MP'lere kıyasla daha yüksek bir toksikolojik potansiyele sahiptir (3).

1.2. Çevresel Dağılım ve İnsan Maruziyeti

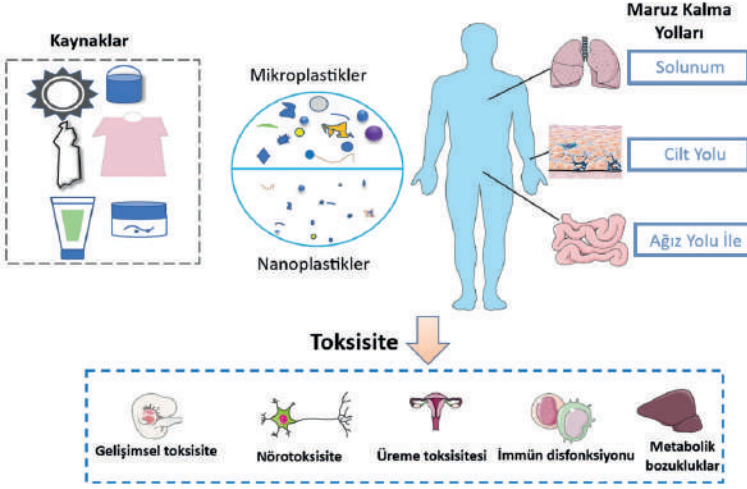
Kılcal plastikler, çevresel döngüde su ilişkili sistemlerden atmosfere kadar geniş bir dağılım göstermektedir. İnsan vücudu, kılcal plastiklere temel olarak üç yol üzerinden maruz kalır: solunum (inhalasyon), sindirim (ingestiyon) ve daha az oranda dermal temas (Şekil-1) (4).

- **Sindirim Yolu:** Ambalajlı su ve yiyecek tüketimi, deniz ürünleri (özellikle kabuklular), tuz ve diğer gıda maddeleri ile maruziyet.
- **Solunum Yolu:** Özellikle iç mekan tozları ve dış hava kaynaklı MP/ NP içeren aerosolleşmiş partiküllerin inhalasyonu.
- **Dermal Yol:** Kozmetik ve kişisel bakım ürünleri aracılığıyla sınırlı dermal maruziyet.

Tahmini günlük insan alım oranları polimer türüne, partikül boyutuna ve çevresel kirlilik seviyelerine bağlı olarak büyük değişkenlik gösterir. Bazı çalışmalar bireylerin haftalık yaklaşık 5 gram plastik yuttuğunu ileri sürmektedir. Bu şekilde NP boyutundaki partiküller, bağırsak epitelini ve akciğer bariyerini aşarak kan dolaşımına geçebilir. Güncel araştırmalarda çeşitli polimerlerin kan içeriğinde bulunduğu gösterilmiştir (5-7).

1.3. Kardiyovasküler Toksikolojinin Önemi

Kardiyovasküler (KV) risk faktörleri arasında sigara, diyabet, hiperlipidemi ve sedanter yaşam tarzı yer alırken, son epidemiyolojik ve toksikolojik çalışmalar çevresel kirlleticileri de bu listeye eklemiştir. Hava kirliliğindeki ultra ince partiküllerin KV olayları tetiklediği kanıtlanmıştır (8). Kılcal plastiklerin boyutu ve biyodinamikleri, bu hava kirleticilerine benzerlik göstermekte, bu da KV sisteme giriş ve birikim olasılığını kuvvetle düşündürmektedir. Bu bağlamda, MP ve NP'lerin damar sertliği (ateroskleroz) gelişimi, trombüs oluşumu ve diğer KV patolojilerdeki rolünün aydınlatılması, yeni bir halk sağlığı önceliği olarak ortaya çıkmaktadır (9).



Şekil-1: Mikro- ve Nanoplastiklerin İnsan vücuduna giriş yolları ve oluşturdukları organ toksisiteleeri

2. Kılcal Plastiklerin Biyodinamikleri ve Kardiyovasküler Dokulara Translokasyonu

2.1. Vücut İçi Dağılım ve Biyolojik Bariyerler

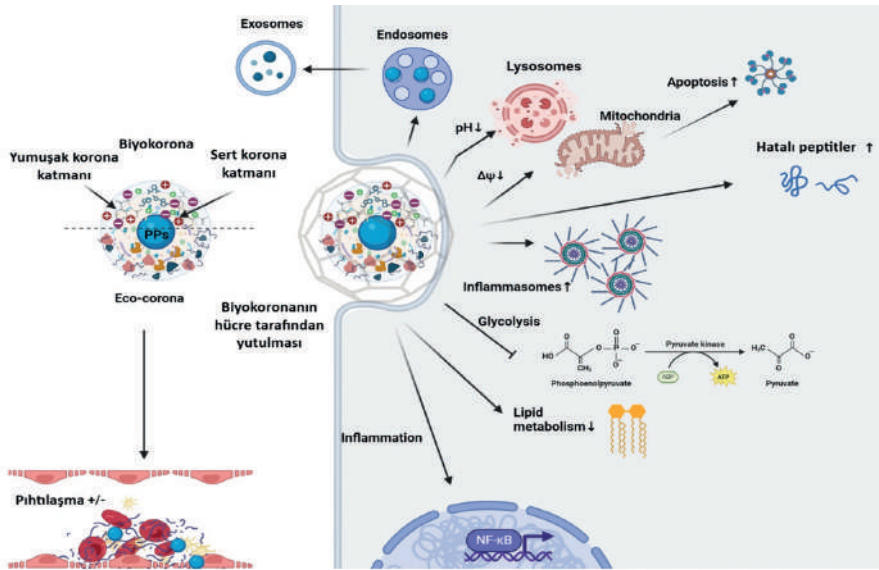
Vücuda giren kılcal plastiklerin akıbeti, partikülün fiziko-kimyasal özelliklerine (boyut, şekil, yüzey yükü, hidrofobisite) ve çevresindeki biyolojik ortamla etkileşimine bağlıdır. Kılcal plastiklerin en kritik özelliği, biyolojik bariyerleri aşabilme yeteneğidir (translokasyon). Bağırsak epiteli veya akciğer alveollerinden geçen NP'ler ($<1 \mu\text{m}$), lenfatik sisteme ve ardından sistemik kan dolaşımına karışır (10).

- **Gastrointestinal Absorbsiyon:** MP'lerin çoğu dışkı ile atılırken, daha küçük partiküllerin (özellikle NP'lerin) bağırsak epitelindeki M hücreleri ve enterositler aracılığıyla pasif veya aktif mekanizmalarla absorbe edildiği gösterilmiştir. Boyut küçüldükçe, sistemik dolaşıma geçiş yeteneği artar (11).
- **Pulmoner Absorbsiyon:** İn hale edilen NP'ler, akciğerlerin derin alveol bölgelerine ulaşabilir. Burada, ince alveol-kapiller bariyerini kolaylıkla aşarak hızla kan dolaşımına transloke olurlar (12).

2.2. Kan Dolaşımına Geçiş

Sistemik dolaşıma giren kılcal plastikler, hemen kan proteinleri, lipidler ve diğer biyomoleküllerle etkileşime girer. Bu etkileşim sonucunda partikül yüzeyini çevreleyen bir protein kılıf (biyokorona) oluşur (6).

- **Biyokorona Oluşumu:** Partikülün biyolojik kimliğini değiştiren biyokorona, hücre reseptörleri tarafından tanınmayı, doku dağılımını, sitotoksisiteyi ve immün hücrelerle etkileşimi doğrudan etkiler (Şekil-2). Özellikle, lipoproteinlerin bağlanması, partiküllerin hücre içine alınımını kolaylaştırabilir (13).
- **Taşıma ve Dolaşım Ömrü:** NP'ler, dolaşımda eritrositler (kırmızı kan hücreleri) ve lökositler (beyaz kan hücreleri) gibi kan hücreleri tarafından taşınabilir. Bu taşıma mekanizmaları, partiküllerin retiküloendotelyal sistemi (dalak, karaciğer) atlayarak hassas organlara, dolayısıyla KV sisteme ulaşmasını sağlar.



Şekil-2: Korona ile kaplanmış plastik parçalar, konak hücre homeostazını etkileyebilir ve çeşitli yollarla toksik etkiler gösterebilir

2.3. Kardiyovasküler Dokuda Birikim

Kılcal plastiklerin KV sistemde birikimi, teorik bir riskten klinik ve deneysel bir gerçekliğe dönüşmüştür.

2.3.1. Klinik Kanıtlar:

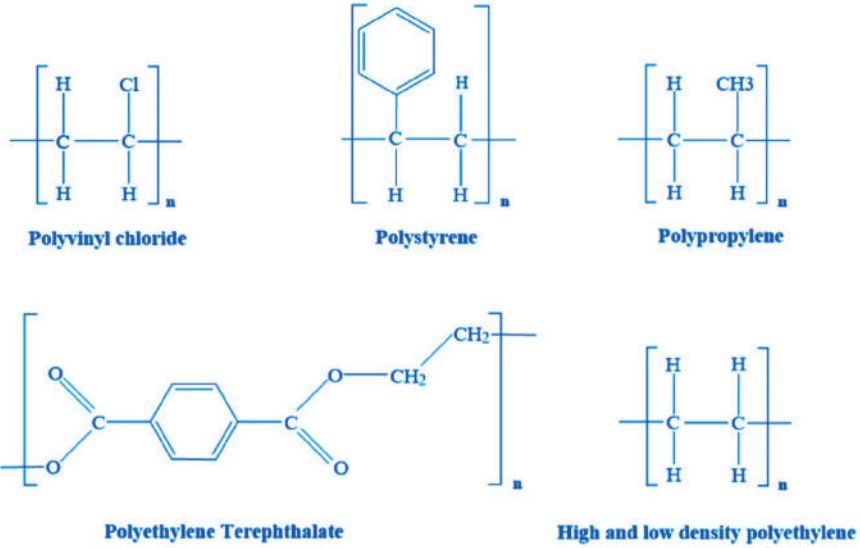
- **Aterosklerotik Plaklarda Tespiti:** Marfella ve arkadaşlarının prospektif çalışmasında, karotis endarterektomi uygulanan 304 hastanın plak materyallerinde Polietilen (PE), Polivinil Klorür (PVC) ve Polietilen Tereftalat (PET) gibi yaygın polimerler hem makrofajların içerisinde hem de plakların lipid çekirdeklerinde tespit edilmiştir (14). Analizler, bu partiküllerin genellikle 10–20µm boyut aralığında olduğunu göstermiştir (Şekil-3).

- **İlişkili Klinik Risk:** Bu plaklarda plastik partikül varlığı ile majör advers kardiyovasküler olaylar (MACE) ve inme riskinin artışı arasında güçlü bir korelasyon bildirilmiştir (15).

2.3.2. Deneysel Kanıtlar:

- **Doku Dağılımı:** Hayvan modelli çalışmalar, NP'lerin kan-kalp bariyerini aşarak kalp kasında birikebildiğini göstermiştir. Bu birikim, kalbin kasılma fonksiyonlarını ve elektriksel iletimini bozmaktadır (16).
- **Morfolojik Analiz:** Gelişmiş mikroskopi teknikleri (RAMAN spektroskopisi ve elektron mikroskobu), kalp kası hücreleri (kardiyomiyositler) ve damar endotel hücreleri içinde endozomal veziküllere hapsedilmiş veya sitoplazmada serbest halde bulunan NP'lerin varlığını ortaya koymuştur (17).

Bu birikim, partiküllerin sadece bir biyolojik atık değil, aynı zamanda lokal olarak iltihaplanma ve oksidatif stres başlatabilecek aktif biyolojik ajanlar olduğunu göstermektedir.



Şekil-3: En yaygın kullanılan polimerik plastik bileşiklerin moleküler yapısı

3. Toksikolojik Mekanizmalar ve Kardiyak Patofizyoloji

Kardiyovasküler sistemde biriken kılcal plastikler, doğrudan ve dolaylı yollarla hücre hasarını, inflamasyonu ve fonksiyonel bozuklukları tetikleyerek aterogenez ve tromboz süreçlerini hızlandırır (9). Bu etki, hem partiküllerin

kendisinden (yüzey reaktivitesi) hem de taşıdıkları kimyasal katkı maddelerinden (örn., BPA, ftalatlar) kaynaklanır.

3.1. İltihaplanma (İnflamasyon) ve İmmün Yanıt

Kılcal plastikler, vücut tarafından yabancı partiküller olarak tanınır ve güçlü bir immün yanıtı tetikler. Kronik düşük dereceli inflamasyon, aterosklerozun temel itici güçlerinden biridir.

- **Makrofaj Aktivasyonu ve Fagositoz:** NP'ler, damar duvarında bulunan makrofajlar ve köpük hücreleri tarafından fagositoz yoluyla hücre içine alınır (Şekil-2). Bunun sonucunda hücre içi stres artar.
- **NLRP3 İnflamatuvar Sinyal Yolu:** Partiküllerin lizozomlar içinde birikmesi ve lizozomal bütünlüğün bozulması, sitozolde patojen tanıma reseptörü olan NLRP3 inflamatuvarını (Nod-Like Receptor Protein 3) aktive eder (18). NLRP3 aktivasyonu, güçlü pro-inflamatuvar sitokinler olan İnterlökin (IL)-1Beta (IL-1 β) ve IL-6'nın üretimini ve salınımını artırır (19). Bu sitokinler, lokal damar duvarı inflamasyonunu sürdürür, lökosit salınımını artırır ve aterosklerotik lezyonların hızlı ilerlemesini destekler.
- **Sistemik İnflamasyon:** Partiküllerin neden olduğu sitokin salınımı, C-Reaktif Protein (CRP) ve Serum Amiloid A (SAA) gibi akut faz reaktanlarının sistemik dolaşımdaki seviyelerini yükselterek genel KV riskin artmasına katkıda bulunur.

3.2. Oksidatif Stres ve Endotel Disfonksiyonu

Damar duvarının iç yüzeyini döşeyen endotel tabakası, KV sağlığın korunmasında kilit rol oynar. Kılcal plastikler, endotel fonksiyonunu bozarak ateroskleroz sürecini başlatır.

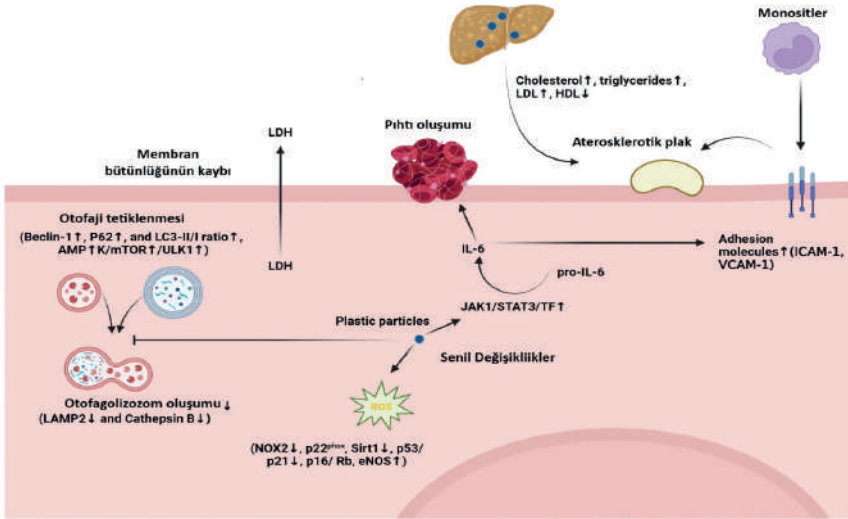
- **Reaktif Oksijen Türleri (ROS) Üretimi:** MP/NP'lerin hücrelere alınması veya yüzey etkileşimi, mitokondriyal disfonksiyonu tetikler ve Reaktif Oksijen Türlerinin (ROS) üretimini artırır (20). Bu durum, hücre içi oksidatif strese yol açar (Şekil-4).
- **Nitrik Oksit (NO) Biyoyararlanımının Azalması:** Oksidatif stres, vasküler sağlığın en önemli mediatörü olan Nitrik Oksit (NO)'i hızla inaktive eder (21). NO, vazodilatasyon (damar genişlemesi) ve anti-trombotik etkiler sağlar. NO biyoyararlanımındaki azalma, endotel disfonksiyonunun merkezidir.
- **Endotel Disfonksiyonu:** Endotel disfonksiyonu, damar geçirgenliğinin artmasına, lökositlerin damar duvarına yapışmasına

(adhezyon) ve LDL kolesterolün subendotelyal alana sızmasına neden olur. Bu, aterosklerotik plak oluşumunun başlangıç aşamasıdır (22).

3.3. Aterotromboz ve Plak Instabilitesi

Kılcal plastiklerin birikimi, sadece plak oluşumunu hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda plakların yırtılma ve hayatı tehdit eden tıkanıklıklara neden olma olasılığını da artırır.

- **Plağın Kırılganlığı:** Kronik inflamasyon ve makrofaj aktivasyonu, Matriks Metalloproteinaz (MMP) enzimlerinin aşırı salınımına yol açar. MMP'ler, plağın stabilize edici yapısı olan fibröz başlık içindeki kollajeni parçalar. Bu durum, plağın yırtılma ve rüptür riskini önemli ölçüde artırır (23).
- **Tromboz Potansiyeli (Aterotromboz):** Hem partiküllerin kendisi hem de yol açtığı endotel hasarı, pıhtılaşma (koagülasyon) kaskadını tetikler. Partiküller, trombositlerin yüzeyiyle doğrudan etkileşime girerek trombosit aktivasyonunu başlatabilir (24). Hasarlı endotelden salınan von Willebrand Faktörü ve diğer pro-trombotik faktörler, pıhtı oluşumunu teşvik eder (25). Aterosklerotik plak rüptürü sonrasında açığa çıkan doku faktörleri, kılcal plastiklerin pro-trombotik etkileriyle birleşerek akut koroner sendromlar ve iskemik inmelere yol açan tıkaçıcı tromboz oluşumunu destekler (Şekil-4).



Şekil-4: Plastik Parçacıkların damar endotel hücreleri üzerindeki zarar verici etkileri ve damar içi pıhtı oluşum mekanizması

4. Kardiyovasküler Sonuçlar ve Klinik İlişkiler

4.1. Kardiyovasküler Hastalık Riski

Kılcal plastiklerin KV morbidite ve mortalite üzerindeki etkileri, damar duvarında birikiminin tespit edilmesinin ardından büyük ilgi görmüştür. Klinik popülasyonlarda yapılan prospektif kohort çalışmaları, damar plaklarında MP/NP varlığının bağımsız bir risk faktörü olabileceğini düşündürmektedir.

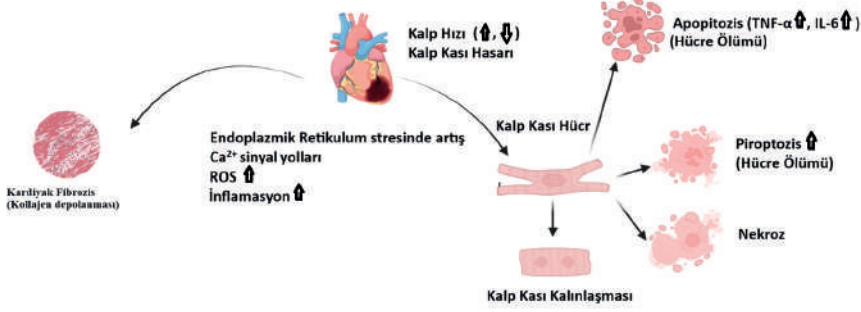
- **Epidemiyolojik Korelasyonlar:** Marfella'nın klinik insan çalışmasında, karotis endarterektomi plak dokusunda PE veya PVC partikülleri tespit edilen bireylerin, tespit edilmeyenlere göre izlem süresince MACE (KV ölüm, ölümcül olmayan miyokard enfarktüsü veya ölümcül olmayan inme) riskinin anlamlı ölçüde yüksek olduğu tespit edilmiştir (14). Bu sonuç, kılcal plastiklerin sadece bir biyobelirteç değil, aynı zamanda aterotrombozun ilerlemesinde doğrudan rol oynayan bir risk faktörü olduğunu öne sürmektedir.
- **Doz-Yanıt İlişkisi:** Dolaşımdaki ve dokudaki partikül konsantrasyonu ile biyobelirteçler (örn., CRP, IL-6) arasındaki ilişkinin incelenmesi devam eden çalışmaların güncel konusu olmayı sürdürmektedir. Hayvan modelleri, daha yüksek MP/NP maruziyetinin, daha belirgin sistemik inflamasyona ve artmış endotel disfonksiyonu belirteçlerine (ICAM-1, VCAM-1) yol açtığını göstermiştir (26). Bu bulgular, çevresel dozun KV sonuçların şiddetini belirleyebileceği hipotezini desteklemektedir.

4.2. Hipertansiyon ve Kardiyak Fonksiyon

MP/NP maruziyetinin KV sistem üzerindeki etkileri sadece ateroskleroz ile sınırlı değildir; kan basıncı regülasyonunu ve kalp kası fonksiyonunu da etkilediğine dair kanıtlar mevcuttur.

- **Vazokonstriksiyon ve Hipertansiyon:** Kılcal plastikler, Endotel Disfonksiyonu yoluyla vazokonstriktör (damar büzücü) ajanlara karşı damar tepkisini artırabilir ve vazodilatasyondan sorumlu NO bağımlı gevşemeyi azaltabilir (21). Kronik maruziyet, vasküler direnci artırarak ve endotelin-1 seviyelerini yükselterek (22) hipertansiyonun gelişimine veya mevcut hipertansiyonun kötüleşmesine katkıda bulunabilir.
- **Kardiyomiyosit Toksisitesi ve Aritmi:** NP'lerin, doğrudan kalp kası hücrelerine (kardiyomiyositler) girerek mitokondriyal hasara ve hücre içi Ca^{2+} dengesizliğine neden olabileceği deneysel olarak gösterilmiştir

(27). Ca^{2+} dengesindeki bu bozulma, kalp kasılma gücünü azaltma ve aritmi riskini artırma potansiyeline sahiptir. Uzun vadede bu durum, ilerleyen apoptoz ile kalp yetmezliği patogeneze katkıda bulunabilir (Şekil-5).



Şekil-5: Nanoplastiklerin kalp kası hücrelerinde oluşturduğu toksisite mekanizmaları

4.3. Risk Grupları

Kılcal plastik kaynaklı KV risk, farklı popülasyonlarda farklılık gösterebilir:

- **Önceden Hastalığı Olan Bireyler:** Mevcut ateroskleroz, diyabet, kronik böbrek hastalığı veya hipertansiyonu olan hastalar, kılcal plastiklerin tetiklediği inflamasyon ve oksidatif strese karşı daha hassastır (28). Bu bireylerde, MP ve NP birikimi, ikinci bir etki yaratarak hastalığın seyrini hızlandırabilir.
- **Yüksek Çevresel Maruziyete Sahip Popülasyonlar:** Plastik üretim tesislerinde çalışanlar, yoğun hava kirliliğine sahip kentsel bölgelerde yaşayanlar veya yüksek oranda deniz ürünleri tüketen popülasyonlar, artmış maruziyet nedeniyle daha yüksek risk altındadır. Solunum yoluyla alınan MP'ler ile hava kirliliğinin KV etkileri arasındaki sinerji, bu gruplar için özel bir endişe kaynağıdır.

5. Önleme, Risk Yönetimi ve Gelecek Perspektifleri

5.1. Maruziyeti Azaltma Stratejileri

Kılcal plastiklerin KV sisteme girişini önlemek, mevcut durumda birincil risk yönetimi stratejisidir. Önleyici adımlar hem kaynağı kontrol etmeyi hem de bireysel maruziyeti azaltmayı içermelidir.

- **Kaynak Kontrolü ve Düzenleme:** Tek kullanımlık plastiklerin üretim ve tüketiminin küresel çapta azaltılması ve biyolojik olarak parçalanabilir

veya kompostlanabilir polimerlere geçişin hızlandırılması esastır. Atık su arıtma tesislerinde MP yakalama teknolojilerinin (üçüncül arıtma ve membran filtrasyon) zorunlu kılınması, çevresel salınımı büyük ölçüde azaltabilir.

- **Bireysel Korunma:** Yüksek kaliteli su filtreleme sistemlerinin (Ters Ozmoz veya Aktif Karbon) kullanımı ve iç mekan hava temizleyicilerinin (HEPA filtrelili) kullanımı ile bireysel maruziyetin azaltılması önerilmektedir (29). Ayrıca, gıdaların plastik yerine cam veya metal kaplarda saklanması ve ısıtılması kritik öneme sahiptir.

5.2. Halk Sağlığı ve Yönetmelik İhtiyaçları

- **Biyoizleme:** Kılcal plastiklerin insan vücudundaki (kan, idrar, dışkı) konsantrasyonlarını güvenilir bir şekilde ölçebilen standart biyoizleme tekniklerinin geliştirilmesi ve onaylanması, maruziyet riskinin bireysel ve toplumsal düzeyde değerlendirilmesi için hayati önem taşımaktadır (29).
- **Regülasyonlar:** Dünya Sağlık Örgütü ve Ulusal Gıda Güvenliği otoriteleri, içme suyu ve paketlenmiş gıda standartlarına MP/NP limitlerinin eklenmesi konusunda acilen çalışmalıdır. Plastik kirliliğinin, hava kirliliği gibi yerleşik çevresel risk faktörleri ile birlikte yeni bir KV risk faktörü olarak tanınması, kaynak tahsisini hızlandıracaktır.

5.3. Araştırma Alanları

Gelecekteki araştırmalar, klinik riskleri daha kesin olarak tanımlamak için kritik öneme sahiptir:

- **Sinerjik Toksisite:** Partikül yüzeyine bağlanan kimyasal katkı maddelerinin (örn., BPA, ftalatlar) kardiyotoksisiteyi nasıl sinerjik olarak artırdığının incelenmesi kritiktir (30).
- **Uzun Vadeli Etkiler:** Düşük dozlu, kronik MP/NP maruziyetinin on yıllar boyunca KV sonuçlar üzerindeki prospektif etkilerinin araştırılması gerekmektedir.
- **Hedeflenmiş Tedaviler:** Kılcal plastik kaynaklı inflamasyonu veya oksidatif stresi spesifik olarak hedef alan farmakolojik müdahalelerin fizibilitesi araştırılmalıdır.

6. Sonuç ve Özet

Çevresel kılcal plastik atıklar, geleneksel KV risk faktörlerine ek olarak ortaya çıkan bir halk sağlığı tehdidini temsil etmektedir. Kanıtlar, MP ve NP'lerin dolaşım sistemine transloke olabildiğini ve damar içi plaklarda birikerek inflamasyon, oksidatif stres ve tromboz mekanizmalarını tetiklediğini göstermektedir. Plaklarında plastik partikül bulunan bireylerde MACE riskinin artması (15), kılcal plastiklerin potansiyel KV risk faktörleri olarak kabul edilmesini gerektirmektedir. Bu bulgular ışığında, plastik kirliliğinin azaltılması ve maruziyetin minimize edilmesi, KV sağlığın korunması açısından acil ve küresel bir zorunluluktur. Kılcal plastiklerin, tütün dumanı ve hava kirliliği gibi geleneksel çevresel toksinlerle benzer bir patofizyolojik yolağı paylaştığı anlaşılmaktadır. Bu tehdidin azaltılması, çevre koruma ve halk sağlığı politikalarının entegrasyonu ile mümkündür.

Referanslar

1. Hirt H, Meier F. Nanoplastic particles: The silent threat in cardiovascular toxicology. *Toxicol Sci.* 2023;191(4):455-68.
2. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv.* 2017;3(7): e1700782.
3. Kik K, Bukowska B, Sicińska P. Polystyrene nanoparticles: Sources, occurrence in the environment, distribution in tissues, accumulation and toxicity to various organisms. *Environ Pollut.* 2020; 262:114297.
4. Kuttralam-Muniasamy G, Shruti VC, Pérez-Guevara E, Roy PD. Microplastic diagnostics in humans: "The 3Ps" Progress, problems, and prospects. *Sci Total Environ.* 2023; 856:159164.
5. Collignon A, Hecq JH, Galgani E, Collard E, Goffart A. Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean-Corsica). *Mar Pollut Bull.* 2014; 79(1-2):293-8.
6. Lynch I, Dawson KA, Lin S. Protein-nanoparticle interactions: what does the cell see? *Nat Nanotechnol.* 2017; 12(11):1047-52.
7. Morreale M, La Mantia FP. Current Concerns about Microplastics and Nanoplastics: A Brief Overview. *Polymers (Basel).* 2024; 16(11):1525.
8. Newby DE, Williams MC, Mills NL. Microplastics: A novel cardiovascular risk factor? *Eur Heart J.* 2024; 45(10):810-2.
9. Zhu X, Wang C, Duan X, Liang B, Genbo Xu E, Huang Z. Micro- and nanoplastics: A new cardiovascular risk factor? *Environ Int.* 2023; 171:107662.
10. Fournier SB, D'Errico JN, Adler DS, Kollontzi S, Goedken MJ, Fabris L, et al. Nanopolystyrene translocation and fetal deposition after acute lung exposure during late-stage pregnancy. *Part Fibre Toxicol.* 2020; 17(1):55.
11. Stock V, Böhmert L, Lisicki E, Block R, Cara-Carmona J, Pack LK, et al. Uptake and effects of orally ingested polystyrene microplastic particles in vitro and in vivo. *Arch Toxicol.* 2019; 93(7):1817-33.
12. Enyoh CE, Verla AW, Verla EN, Ibe FC, Amaobi CE. Airborne microplastics: a review study on method for analysis, occurrence, movement and risks. *Environ Monit Assess.* 2019; 191(11):668.
13. Cao J, Yang Q, Jiang J, Dalu T, Kadushkin A, Singh J, et al. Coronas of micro/nano plastics: a key determinant in their risk assessments. *Part Fibre Toxicol.* 2022; 19(1):55.
14. Marfella R, Prattichizzo F, Sardu C, Fulgenzi G, Graciotti L, Spadoni T, et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med.* 2024; 390:900-10.
15. Rotterdam N, Amsterdam K. Plastic debris and cardiovascular events: A prospective cohort study of carotid endarterectomy patients. *N Engl J Med.* 2024; 390(15):1341-9.

16. Li X, Zhang Y, Wang X, Chen Y, Liu J, et al. Cardiac accumulation of nanoplastics in mice. *Chemosphere*. 2022; 301:134701.
17. Schymanski D, Goldbeck C, Humpf HU, Fürst P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Res*. 2018; 129:154-62.
18. Liu R, Wang C, Chen S. Microplastic exposure induces NLRP3 inflammatory activation in vascular endothelial cells. *Environ Int*. 2022;165:107315.
19. Kimmel M, Johnson S, Lee A. The role of IL-1 β in microplastic-induced atherogenesis. *J Am Coll Cardiol*. 2023;81(5):550-9.
20. Tanaka Y, Sato T. Oxidative stress induction by nanoplastics in human coronary artery endothelial cells. *Free Radic Biol Med*. 2021; 173:122-30.
21. Zhong Y, Li H. Microplastic impairs endothelial nitric oxide synthase function through sustained ROS production. *Cardiovasc Res*. 2023; 119(2):780-90.
22. Garcia I, Rodriguez P. Chronic low-level plastic exposure and vascular stiffening in rats. *Hypertension*. 2023; 80(6): 1340-50.
23. Harris E, Miller D. Matrix metalloproteinases and plaque instability: The microplastic connection. *Atherosclerosis*. 2024; 388:117387.
24. Peterson C, Baker J. Direct and indirect effects of nanoplastics on platelet activation and aggregation. *Blood*. 2023; 141(10): 1100-10.
25. Chen M, Weng S. Environmental nanoplastics enhance thrombus formation in a mouse model of deep vein thrombosis. *Toxicol Sci*. 2022; 188(1): 112-20.
26. Smith W, Jones B. Dose-dependent systemic inflammation in rats exposed to polyethylene microplastics. *Environ Pollut*. 2021; 285: 117387.
27. Lee K, Han J. Nanoplastic-induced mitochondrial damage and Ca²⁺ dysregulation in isolated cardiomyocytes. *Chemosphere*. 2022; 301: 134701.
28. Wilson S, Clark T. Susceptibility to environmental microplastics in individuals with pre-existing cardiometabolic disease. *Lancet Planet Health*. 2023; 7(12): e980–e990.
29. International Working Group. Standardized methodologies for microplastic detection and quantification in human biological matrices. *J Hazard Mater*. 2024; 465: 133207.
30. Adams P, Bailey R. Synergistic cardiotoxicity of phthalates and polyethylene nanoplastics: An in vitro study. *Environ Health Perspect*. 2023; 131(4): 047005.

Toxin-Free Training: Chemical Pollution in Gyms and Green Hygiene Approaches

Mustafa Ceylan¹

Necip Zeki Budak²

Elif Aktürk Bozdemir³

Abstract

Modern sports facilities are designed to promote health and performance, yet the cleaning and disinfection practices commonly employed may expose athletes to a substantial chemical burden. The intensive use of quaternary ammonium compounds and chlorine-based agents, combined with elevated levels of volatile organic compounds, particulate matter, disinfection byproducts, and CO₂, can compromise indoor air quality and adversely affect respiratory function, skin barrier integrity, cognitive performance, and overall athletic capacity. This chapter summarizes the main chemical agents used in gyms, outlines their behavior in enclosed environments, and discusses their potential health and performance implications for athletes. It then explores, within the framework of green chemistry principles, the role of enzymatic and probiotic cleaning approaches in reducing toxic load while maintaining hygiene standards. An integrated “Green Hygiene Strategy” tailored to sports facilities is proposed, along with practical recommendations for facility managers, cleaning staff, and athletes. The chapter concludes by emphasizing the need to move towards genuinely “toxin-free” training environments.

1. Introduction: The Hygiene Paradox in Modern Sports Facilities

Sports facilities, seen as symbols of health and fitness, expose their users to a serious chemical threat without them realizing it. Recent environmental toxicology data show that indoor air quality in these enclosed spaces can reach levels even more hazardous than those in high-traffic outdoor environments.

1 Tokat Gaziosmanpaşa University, mustafac.ceylan@gop.edu.tr , 0000-0002-9184-4385

2 Tokat Gaziosmanpaşa University, necipzekibudak@gmail.com , 0009-0002-3286-8448

3 Tokat Gaziosmanpaşa University, elif.akturkbozdemir@gop.edu.tr, 0009-0007-7760-8574

Aggressive disinfection protocols implemented to protect athletes from disease have, unfortunately, become the primary source of contamination, poisoning them.

The most striking findings on this subject come from the comprehensive analyses conducted by Peixoto and his team (2023) in health clubs. The study documents that concentrations of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}), carbon dioxide (CO₂), formaldehyde, and volatile organic compounds (VOCs) in gym atmospheres exceed threshold values considered safe for human health. Particularly in cardiovascular exercise areas, the intensity generated by exerting athletes and the inadequate ventilation capacity in studios transform this pollution picture into a public health problem.

This toxic atmosphere in gyms cannot be explained solely by dirty air seeping in from outside. The interaction between chemicals released into the air from cleaning products and human metabolic activities, such as perspiration and respiration, turns the environment into a complex chemical reactor. Salonen and colleagues' (2020) systematic review highlights that CO₂ and particulate matter are the most significant pollutants, particularly in fitness centers. It highlights that exposure to these pollutants can have adverse effects on respiratory function, skin barrier integrity, and overall well-being (Salonen et al., 2020).

More concerning, the Green Science Policy Institute (2024) highlights that these chemicals, mainly when used at high frequencies and without adequate contact time, may increase chemical exposure risks while only marginally improving disinfection efficacy. Various experimental and epidemiological studies indicate that these compounds have the potential to cause toxic effects on the skin, respiratory system, immune system, and reproductive system. These substances have been shown to have toxic effects on the skin, lungs, immune system, and reproductive system, in addition to triggering antibiotic resistance. In light of this data, abandoning traditional hygiene habits and adopting new strategies centered on "green chemistry" is an inevitable necessity for sustainable sports management (Budak, 2025; Budak & Aktürk Bozdemir, 2025; Budak & Keçeci Sarıkaya, 2024).

2. Current Situation Analysis: Chemical Load and Indoor Environment Dynamics

To accurately analyze the gym atmosphere, it is necessary to understand the structure of the agents used for hygiene and their behavior in closed environments.

2.1. Quaternary Ammonium Compounds (QACs): The Invisible Danger

QAC compounds such as benzalkonium chloride (BAC) and didecyldimethylammonium chloride (DDAC), which provide the characteristic “hygienic” smell in sports facilities, are indispensable in the industry due to their broad antimicrobial spectrum. However, the Green Science Policy Institute (2024) states that when these chemicals are misapplied, they do not provide effective disinfection but instead increase the risk of chemical exposure.

QACs interact with the cell membrane lipid layer, disrupting membrane integrity; unfortunately, this cytotoxic effect also applies to human cells. Dermal contact with residues

Left on surfaces can cause contact dermatitis and allergic reactions, while inhalation of evaporating chemicals can exacerbate asthma symptoms. Increased respiratory rate (tidal volume) during exercise causes athletes to draw this toxic load into the deepest parts of their lungs. VOC levels peak immediately after cleaning, leaving athletes exposed to chronic levels.

2.2. Chlorine-Based Agents and Disinfection Byproducts (DBPs)

Chlorine-based agents, such as sodium hypochlorite, which are primarily used in pool complexes, undergo toxic transformation when they react with organic matter (including sweat, urine, and skin flakes) in water and air. The most dangerous of the resulting “Disinfection Byproducts” (DBPs) is nitrogen trichloride (NCl_3). Salonen et al. (2020) emphasize that this compound, which causes eye irritation and shortness of breath at the poolside, is strongly associated with an increased risk of asthma in swimmers. Furthermore, some compounds formed as a result of these reactions, such as trihalomethanes, have been classified as possible carcinogens by the International Agency for Research on Cancer (IARC).

2.3. Complex Atmospheric Mixture: VOCs and Particulate Matter

Pollution is not limited to cleaning agents. Peixoto and colleagues (2023) found that carcinogenic VOCs such as formaldehyde, benzene, and toluene, emitted from building materials, equipment, and personal care products, are present in high concentrations in health clubs. When combined with particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) accumulating in the environment due to inadequate filtration systems, this creates an environment that can reach the alveoli of the lungs and trigger systemic inflammation. CO_2 levels above 1000 ppm in crowded rooms are a concrete indicator of inadequate

ventilation and are associated with decreased cognitive performance and feelings of fatigue.

3. Effects on Athlete Health and Performance

Chemical pollutants directly undermine performance by causing acute and chronic adaptation problems in athlete physiology.

3.1. Respiratory System: The “Athlete’s Asthma” Phenomenon

Chemical pollutants directly attack the respiratory tract epithelium, disrupting barrier integrity and paving the way for the phenomenon known as “athlete’s asthma.” As noted by Salonen et al. (2020), exposure to NCl_3 and epithelial damage may trigger the release of pro-inflammatory cytokines, making the airways hypersensitive and paving the way for exercise-related bronchial hyperreactivity. During exercise, minute ventilation increases up to 20 times, and mouth breathing becomes predominant, bypassing the nose’s natural filtration mechanism and allowing irritants to reach the lower respiratory tract directly.

3.2. Dermatological Effects and Microbiota Damage

The skin is the first line of defense against chemical agents. However, QACs disrupt the skin microbiota, leading to a state of “dysbiosis.” *Staphylococcus* and *Corynebacterium* species found on the skin are commensal microorganisms that play a crucial role in maintaining the skin’s barrier function. It is believed that aggressive chemical cleaning practices may have a suppressive effect on this protective flora, thereby facilitating the colonization of pathogens. Additionally, chlorine-induced oxidative damage breaks down skin proteins, thereby increasing the risk of chronic dryness and chemical dermatitis.

3.3. Performance Limits: VO_2max and Fatigue

Even the slightest impairment in respiratory function directly results in a decrease in aerobic capacity (VO_2max). As emphasized by Peixoto et al. (2023), high CO_2 levels stimulate the respiratory center, causing early fatigue. It is biologically plausible that systemic inflammation triggered by VOCs and particulate matter could have long-term adverse effects on muscle protein synthesis and recovery processes. However, studies demonstrating a direct relationship between gym exposure and performance parameters remain limited.

4. Solution: The Green Hygiene Revolution and Biological Cleaning

In response to the risks posed by traditional methods, Paul Anastas and John Warner's "Green Chemistry" principles offer a scientific and sustainable solution for sports facilities (Budak & Keçeci Sarıkaya, 2024).

4.1. Enzymatic Cleaners

Enzymatic cleaners utilize enzymes, such as proteases and lipases, to break down organic contaminants (including sweat, grease, and blood) through a process known as biocatalysis. Manufacturer technical bulletins indicate that enzymatic cleaners can effectively remove organic waste without leaving toxic residues, thereby supporting improved indoor air quality (Multi-Clean, 2019). These claims require more comprehensive evaluation through independent studies. However, it should be remembered that enzymes are not alive and can lose their activity (inhibition) when mixed with strong chemical disinfectants; therefore, application protocols must be carefully designed to prevent this loss of activity. Kato et al. (2015) demonstrated that, in the context of reprocessing medical devices, adding a disinfectant agent to enzymatic detergent formulations enhances disinfection power but reduces cleaning effectiveness. Therefore, they emphasize that a delicate balance between cleaning and disinfection is necessary in "dual-function" formulations (Kato et al., 2015).

4.2. Probiotic Hygiene and Biofilm Control

One of the most notable innovations in hygiene technology is the use of probiotic cleaning approaches, which utilize selected beneficial microorganisms, such as *Bacillus* species. In these products, spore-forming bacteria that can permanently colonize gym surfaces are applied to the environment together with the detergent matrix. The goal is to restructure the surface microbiome into a more resilient and less pathogenic equilibrium rather than merely reducing it temporarily.

Companies developing probiotic cleaning products (e.g., Genesis Biosciences, 2023; Ingenious Probiotics, n.d.) report that this approach works primarily on the principle of "competitive exclusion." According to this, beneficial microorganisms attach to the surface and compete with pathogenic microorganisms for food sources and attachment sites; over time, the pathogen load decreases, and a more stable and predictable microbial community forms on the surface. According to manufacturer data, one of the most critical advantages is their ability to contribute to the mechanical and biological breakdown of resistant biofilm layers commonly found on shower areas, floors,

and equipment surfaces (Genesis Biosciences, 2023; Ingenious Probiotics, n.d.). These claims are particularly noteworthy for gym environments, where organic loads and biofilms are dense; however, manufacturer claims need to be supported by independent, peer-reviewed studies.

Scientific evidence regarding microbiota-based cleaning approaches has begun to accumulate, particularly in healthcare settings. D'Accolti et al. (2019) demonstrated that probiotic cleaning systems implemented in hospital settings can reduce surface pathogen load more persistently than conventional chemical cleaning protocols and limit the spread of antimicrobial resistance genes. These studies reveal that probiotic cleaning strategies can modulate surface microflora over a more extended period, rather than merely creating an immediate disinfection effect. However, the number of studies directly evaluating probiotic cleaning applications in environments such as sports facilities and fitness centers is still limited; therefore, a more detailed examination of the risk profiles and activity levels specific to health clubs is required.

A key consideration in comparing probiotic and conventional chemical disinfection approaches is the duration of effect and potential side effects. Chlorine-based disinfectants and products containing QACs can provide a high level of microbial killing power when applied; however, their effects generally last only minutes to hours, while volatile organic compounds, disinfection by-products, and toxic residues can create additional burdens on human health and indoor air quality. Probiotic cleaning approaches, on the other hand, offer a potential “residual effect” that starts more slowly but continues as long as probiotic microorganisms are present on the surface. Current data suggest that this residual effect may be particularly meaningful in terms of bacterial and fungal load (D'Accolti et al., 2019), while indicating that the effects on enveloped viruses and other pathogen groups need to be evaluated separately for different formulations.

In the context of sports facilities, it is more appropriate to position probiotic cleaning products not as a direct “stand-alone disinfectant” but as a component of an integrated green hygiene strategy. First, mechanical cleaning and enzymatic cleaning should be used to remove organic load and coarse dirt; then, probiotic products should be used to shift the surface microbiome to a more balanced structure, especially on surfaces with high contact intensity but where chemical load needs to be reduced (floors, changing rooms, shower areas, outer surfaces of cardio equipment, etc.). This approach can reduce dependence on traditional high-toxicity disinfectants while contributing to the long-term control of resistant biofilms and pathogen load.

In conclusion, probiotic hygiene approaches are an innovative tool with the potential to reduce chemical pollution and manage surface microbiota in a more sustainable way in sports facilities. However, to fully realize this potential, there is a need for controlled field studies in health clubs, research comparing the safety and efficacy profiles of different probiotic formulations, and multidisciplinary studies evaluating user acceptance.

5. Conclusions and Recommendations

The “hygiene paradox” we face in modern sports facilities is a significant public health and environmental sustainability issue that warrants urgent attention, given the available scientific evidence. Evidence presented by Peixoto et al. (2023), Salonen et al. (2020), and the Green Science Policy Institute (2024) demonstrates that traditional quaternary ammonium compounds (QACs) and chlorine-based cleaning regimes need to be reevaluated in terms of both human health and environmental sustainability and replaced with risk-reducing alternatives wherever possible. The adverse effects of these chemicals on indoor air quality can lead to respiratory irritation, dermatological problems, and decreased cognitive function, all of which directly impact an athlete’s health and performance.

The solution to this problem lies in sports facility management adopting an integrated “Green Hygiene Strategy.” This strategy should be a multi-layered approach that aims not only to reduce chemical use but also to optimize indoor air quality and promote sustainable cleaning practices. Below are the key components of this strategy and recommendations for relevant stakeholders:

5.1. Recommendations for Facility Managers and Operators

1. Reviewing and Reducing the Chemical Inventory:

- o Gradually phasing out highly toxic cleaning and disinfection agents such as quaternary ammonium compounds (QACs), aldehydes, phenols, and high-concentration chlorine-based products from inventory.
- o Preferring products with low volatile organic compound (VOC) content, that are biodegradable, and have environmentally friendly certifications.

2. Prioritizing Mechanical Cleaning:

- o The use of adequate mechanical cleaning equipment, such as HEPA-filtered vacuum cleaners and microfiber cloths.

- o Implementation of regular and systematic cleaning programs to reduce dust and particulate matter accumulation.

3. Integration of Enzymatic and Probiotic Cleaning Systems:

- o Use of enzymatic detergents in the pre-cleaning stage to reduce organic dirt load.
- o Using probiotic cleaning products to achieve a more balanced surface microbiome, especially on surfaces with high contact intensity but where chemical exposure needs to be reduced (floors, changing rooms, shower areas, equipment exteriors).

4. Ventilation and Indoor Air Quality Monitoring:

- o Regular maintenance of mechanical ventilation systems and filter replacement.
- o Periodic monitoring of CO₂, particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), and total volatile organic compound (TVOC) levels, and installation of alarm systems above specified threshold values.
- o Optimizing ventilation rates according to the facility's usage intensity.

5. Staff Training:

- o Comprehensive training of cleaning personnel on green hygiene principles, proper use of new products, dosing, and application techniques.
- o Raising awareness about chemical exposure risks and the use of personal protective equipment.

5.2. Recommendations for Athletes

6. Increasing Personal Awareness:

- o Avoid training during peak hours after cleaning (especially the first few hours immediately after disinfection) or choose areas with adequate ventilation.
- o Pay attention to personal hygiene rules (hand washing, wiping equipment with a personal towel).

7. Skin Barrier Protection Measures:

- o Use pH-balanced cleansers that do not dry out the skin when showering after exercise.

- o Protect the skin with moisturizers that strengthen the skin barrier.

5.3. Recommendations for Policy Makers and Researchers

8. Development of Legal Regulations:

- o Revising indoor air quality standards and cleaning protocols for sports facilities based on current scientific data.
- o Promoting green hygiene products and restricting the use of toxic chemicals.

9. Supporting Multidisciplinary Research:

- o Conducting controlled field studies comparing the effects of different cleaning approaches (chemical, enzymatic, probiotic) in sports facilities on indoor air quality, surface microbiome, athlete health, and performance.
- o Supporting epidemiological studies examining the effects of long-term exposure on chronic health outcomes.

The sports facilities of the future must be “non-toxic” spaces where not only physical capacity but also environmental health is optimized. This transformation is not only a scientific necessity but also an ethical responsibility towards the health of athletes and the planet’s sustainability.

7. Conclusion

The transition from chemically intensive disinfection to a “Green Hygiene” paradigm is no longer a discretionary choice but a physiological necessity for the modern sports industry. As detailed throughout this chapter, the respiratory and dermatological burdens imposed by traditional quaternary ammonium compounds and chlorine-based agents create a paradox in which the need for hygiene maintenance compromises the pursuit of health. The adoption of Green Chemistry principles—specifically through the integration of enzymatic and probiotic technologies—offers a scientifically viable pathway to mitigate these toxic exposures without sacrificing microbial safety. By shifting the focus from “sterile destruction” to “microbial balance,” facility managers can optimize indoor air quality and protect the biological integrity of athletes. Ultimately, realizing the vision of “toxin-free training” requires a holistic commitment to sustainable practices, ensuring that sports environments support, rather than undermine, human performance and environmental well-being.

References

- Budak, Y. (2025). Climate law: Necessity or opportunity for Türkiye? Sustainable environmental vision with green chemistry. *International Journal of Energy Studies*, 10(3), 1229-1258. <https://doi.org/10.58559/ijes.1685452>
- Budak, Y., & Aktürk Bozdemir, E. (2025). Sustainable transformation with green chemistry: Innovative deep eutectic solvents for levulinic acid production from pine sawdust. *Subsequent Research*, 2(3), Article 100706.
- Budak, Y., & Keçeci Sarıkaya, M. (2024). Zero waste and green transformation: Environmentally friendly cosmetic and cleaning products for Turkey's future. *Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research*, 13(3), 145-155.
- D'Accolti, M., Soffritti, I., Mazzacane, S., & Caselli, E. (2019). Fighting AMR in the Healthcare Environment: Microbiome-Based Sanitation Approaches and Monitoring Tools. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(7), 1535.
- Genesis Biosciences. (2023). *Probiotic cleaners vs enzymatic cleaners: What is the difference?*
- Genesis Biosciences Blog.
- Green Science Policy Institute. (2024). *Quaternary ammonium compounds (QACs): Health concerns and safer alternatives*. Green Science Policy Institute Report.
- Ingenious Probiotics. (n.d.). *Probiotic cleaning: The future of sustainable hygiene*. Ingenious Probiotics Educational Resources.
- Kato Y, Toga Y, Oda Y, Kawamukai E, Hirata Y. *Study of enzymatic detergents with both cleaning efficacy and disinfecting action for medical devices*. *Antimicrobial Resistance and Infection Control*. 2015;4(Suppl 1):P37.
- Multi-Clean. (2019). *Bio-enzyme products: Harnessing naturally occurring microbes for effective cleaning*. Multi-Clean Technical Bulletin.
- Peixoto, C., Pereira, M. do C., Morais, S., & Slezakova, K. (2023). Assessment of indoor air quality in health clubs: insights into (ultra)fine and coarse particles and gaseous pollutants. *Frontiers in Public Health*, 11, 1310215.
- Salonen, H., Salthammer, T., & Morawska, L. (2020). Human Exposure to Air Contaminants in Sports Environments. *Indoor Air*, 30(6), 1109-1129.

From Invisible Risks to Visible Responsibilities: Manufacturing, Safety, Health Impacts, and Ethics in Cleaning and Cosmetic Products

Naciye Selcen Bayramcı¹

Buğra Keskin²

Serap Akdeniz³

Abstract

Cleaning agents and cosmetic products are widely used consumer commodities, associated with continuous and heterogeneous human exposure in diverse settings. Ensuring their safety requires a comprehensive approach that integrates formulation design, raw material qualification, Good Manufacturing Practices (GMP), physicochemical and microbiological quality control, stability testing, and accurate labeling. In Türkiye, cosmetic products are regulated under the Cosmetic Products Regulation, which is fully harmonized with European Union Regulation (EC) No. 1223/2009. This regulatory framework establishes core obligations, including pre-market notification and maintenance of a Product Information File (PIF). In contrast, household cleaning products follow distinct regulatory pathways depending on their intended use. Products with biocidal claims (e.g., disinfectants) require authorization under the Biocidal Products Regulation. This chapter provides a structured, evidence-based overview of GMP-driven manufacturing, critical safety and performance testing strategies, key human health endpoints—particularly dermal sensitization and respiratory effects—and ethical aspects of production, including non-animal testing approaches, transparency, and sustainability.

1 Asst. Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa University, selcen.bayramci@gop.edu.tr, 0000-0002-4785-3874

2 Tokat Gaziosmanpaşa University, bugra.keskin0023@gop.edu.tr, 0009-0004-0918-8043

3 Tokat Gaziosmanpaşa University, serapkaradenizkimya@gmail.com, 0009-0008-8673-2136

1. Introduction

Cosmetic and cleaning products constitute a significant class of consumer goods that generate low-dose, cumulative exposure throughout daily life via repeated contact with the skin, hair, mucous membranes, and the respiratory tract. Product safety, therefore, extends beyond simplistic assertions of “harmlessness”. Instead, it involves the systematic identification, evaluation, and management of potential risks, including skin and eye irritation, sensitization, inhalation-related toxicity, and long-term cumulative effects under reasonably foreseeable conditions of use. Accordingly, manufacturing processes cannot be considered in isolation; they must be integrated within a comprehensive framework encompassing Quality Assurance (QA), Quality Control (QC), full traceability, cosmetovigilance systems, and effective recall mechanisms to ensure sustained consumer safety and regulatory compliance (Turkish Official Gazette, 2023).

Current evidence suggests that contact allergens, particularly certain preservatives and fragrance constituents, are significant contributors to Allergic Contact Dermatitis (ACD) in both consumer and occupational settings (Aerts et al., 2017; Alinaghi et al., 2019). Additionally, exposure to chemical aerosols and volatile organic compounds (VOCs) generated during cleaning activities has been linked to a long-term decline in respiratory function (Svanes et al., 2018). Within this framework, safety assessment and ethical responsibility necessitate a shift beyond mere regulatory compliance toward the adoption of a precautionary design principle.

2. Regulatory Framework and Market Access for Cosmetic and Cleaning Products in Türkiye

2.1. Cosmetic Products: Legislative Requirements, Notification Procedures, and the Product Information File (PIF)

The Cosmetic Products Regulation in Türkiye has been enacted in complete alignment with European Union Regulation (EC) No 1223/2009 (Turkish Official Gazette, 2023). This regulatory framework clearly delineates the legal responsibilities of the Responsible Person, defines the methodology for assessing the safety of cosmetic products, establishes the minimum requirements for placing products on the market, and outlines mandatory labeling provisions.

In practical terms, regulatory compliance is ensured through product notification via the national electronic database, the Product Tracking System (Ürün Takip Sistemi, ÜTS), and the preparation and maintenance

of a comprehensive Product Information File (PIF). The PIF serves as an auditable technical dossier containing detailed information on product formulation and composition, raw material specifications, manufacturing processes, documentation of compliance with Good Manufacturing Practices (GMP), microbiological quality and stability data, packaging compatibility and conformity, records of undesirable effects, and the Cosmetic Product Safety Report (CPSR).

2.2. Distinguishing Cleaning Products from Biocidal Products

From a regulatory perspective, cleaning products do not constitute a homogeneous category; instead, their legal classification is determined primarily by the product's intended purpose and the claims made by the manufacturer. Products that explicitly claim to prevent, control, or eliminate microorganisms—such as those intended for disinfection or antiseptic use—are classified as biocidal products and fall under the scope of the Biocidal Products Regulation. These products are therefore subject to rigorous authorization, registration, and efficacy evaluation requirements prior to market placement (Legislation Information System, 2009; Turkish Medicines and Medical Devices Agency [TİTCK], n.d.).

By contrast, cleaning agents intended solely for the physical removal of dirt, grease, or residues, and that do not carry biocidal or antimicrobial claims, are regulated within the general product safety framework and, where relevant, under specific detergent legislation. Within the biocidal regulatory regime, products are assessed according to a product-type-based classification system, including, for example, Product Type 1 (human hygiene) and Product Type 2 (disinfection of surfaces).

3. Manufacturing Processes: GMP-Driven Design and Operational Control

In the cosmetics sector, Good Manufacturing Practices (GMP) are governed by ISO 22716, a standard published by the International Organization for Standardization (ISO). The overarching objective of GMP is to ensure that cosmetic products are consistently manufactured and controlled in accordance with predefined quality requirements, thereby minimizing the risks of contamination, mix-ups, and deviations, while maintaining full traceability throughout the entire production lifecycle (ISO 22716:2007).

Within a GMP-based manufacturing framework, several critical control elements can be identified:

- **Raw Material and Supplier Management:** Verification of raw material identity, purity profiles, impurity limits, including heavy metals, and microbiological quality against established specifications, together with supplier qualification and continuous performance monitoring.
- **Process Control and Hygiene:** Implementation of validated equipment cleaning and sanitization procedures, including Clean-in-Place (CIP) and Sterilize-in-Place (SIP) principles; comprehensive batch documentation; line clearance procedures; systematic assessment of cross-contamination risks; and routine environmental monitoring, encompassing water quality and air hygiene.
- **Filling and Packaging Control:** Evaluation of packaging material compatibility, assessment of potential migration and interaction risks, verification of container–closure integrity, confirmation of fill volume and dosage accuracy, and controlled application of batch numbering and expiration date labeling.
- **Product Release Criteria:** Final product release based on the evaluation of Quality Control (QC) test results, structured handling of Out-of-Specification (OOS) findings, and implementation of appropriate Corrective and Preventive Actions (CAPA).

4. Testing Strategies for Safety and Quality

4.1. Physicochemical Testing and pH Management

pH is a critical quality parameter, particularly for topical products, as it directly influences the potential for irritation and the functional integrity of the skin barrier. Although the physiological pH of the skin surface is slightly acidic, typically ranging from 4.5 to 5.5, product mildness cannot be evaluated solely based on pH. Instead, it should be assessed in conjunction with the surfactant system, solvent composition, overall formulation matrix, and the intended mode of application (Abels & Angelova-Fischer, 2018).

By contrast, household cleaning products may be formulated at extreme pH values to meet specific performance requirements, such as alkaline formulations for grease removal or acidic products for scale dissolution. In these cases, safety is achieved not through physiological compatibility but through defined concentration limits, clear and restrictive instructions for use, and appropriate hazard classification and labeling.

4.2. Microbiological Quality and Preservative Efficacy

Microbiological contamination represents a significant risk to both product integrity and consumer health, particularly for products intended for application in the periocular region or on mucous membranes. To mitigate these risks, several international standards provide the methodological and regulatory framework for the assessment of microbiological quality in cosmetic products:

- **ISO 17516:2014**, which establishes acceptable microbiological limits for finished cosmetic products;
- **ISO 11930:2019**, which specifies the methodology for preservative efficacy testing (PET), commonly referred to as the challenge test;
- **ISO 29621:2017**, which guides microbiological risk assessment and the identification of products considered to present a low microbiological risk.

Although many household cleaning products possess intrinsic inhibitory factors, such as extreme pH values or low water activity, water-based formulations may still support microbial survival or become contaminated during use. Consequently, appropriate preservation strategies remain essential to ensure microbiological stability and shelf life throughout the intended period of use.

4.3. Stability, Shelf Life, and Packaging Compatibility

Stability testing is designed to evaluate the physical and chemical integrity of products over time. Physical stability assessments typically address parameters such as viscosity drift, phase separation, and changes in color or odor. In contrast, chemical stability focuses on the degradation of active ingredients and pH drift. Additionally, potential interactions between the formulation and its packaging, including adsorption, migration, and permeability, must be systematically evaluated, as these factors can directly impact product performance and safety.

ISO/TR 18811:2018 provides comprehensive guidance on the design, conduct, and interpretation of stability studies for cosmetic products. For cleaning products, particular attention must be paid to the stability of oxidative agents, such as hypochlorite and peroxides, since their degradation may compromise both product efficacy and the reliability of the assigned shelf life.

4.4. Dermatological Safety: Differentiating Irritation and Sensitization

Cutaneous adverse reactions associated with cosmetic and cleaning products are generally classified according to two primary pathogenic mechanisms. Irritant Contact Dermatitis (ICD) arises from direct damage to the skin barrier and subsequent non-specific inflammatory responses, most commonly linked to high surfactant concentrations, organic solvents, or formulations with extreme pH values. In contrast, Allergic Contact Dermatitis (ACD) represents an immunologically mediated response elicited by specific sensitizing substances, with preservatives—particularly isothiazolinones—and fragrance allergens identified as the predominant risk factors.

Systematic reviews have established that contact allergy constitutes a significant and widespread public health concern (Alinaghi et al., 2019). Among sensitizers, isothiazolinone derivatives, such as methylisothiazolinone (MI), are of particular concern due to their high potential for sensitization in both industrial and cosmetic contexts (Aerts et al., 2017; Wilford & de Gannes, 2017). Consequently, dermatological safety assessments must incorporate quantitative risk characterization, including the calculation of the Margin of Safety (MoS), based on realistic aggregate exposure scenarios.

5. Safety and Performance Requirements by Product Type

Table 1. Comparative analysis of quality and safety requirements across product categories

Area of Assessment	Cosmetic & Personal Hygiene Products	Household Cleaning Products	Biocidal Products (Disinfectants)
Regulatory Approach	Product notification, Product Information File (PIF), and cosmetic safety assessment in accordance with national regulations (TITCK, 2023).	Dependent on claims; subject to chemical safety and labeling regulations (CLP/SEA).	Licensing and registration; assessment based on product type and demonstrated efficacy (Legislation Information System, 2009).
pH Suitability	Physiological compatibility is the primary objective; pH alone is insufficient to ensure safety (Abels & Angelova-Fischer, 2018).	Wide pH ranges are permitted to achieve performance objectives; effective risk communication is essential.	Formulation-dependent; skin tolerability is critical for Product Type 1 (human hygiene) products.
Microbiological Quality	Compliance with the limits defined in ISO 17516.	Spoilage risk management is required for water-based formulations.	Microbial contamination may compromise both efficacy and safety.

Preservation	Verified through preservative efficacy testing (Challenge Test; ISO 11930).	The preservative system is verified where necessary.	Stability of the active substance is the primary concern.
Stability	Accelerated and real-time stability testing, including packaging compatibility (ISO/TR 18811).	Degradation of active substances and integrity of the packaging barrier are critical.	Efficacy and safety claims must remain valid throughout the declared shelf life of the product.
Dermal Safety	Strong emphasis on the management of contact allergy (ACD) (Alinaghi et al., 2019).	Risk of irritation in concentrated formulations; personal protective equipment (PPE) instructions are required.	Evaluation of irritation and sensitization potential is mandatory.
Respiratory Exposure	Inhalation toxicity is considered for spray and aerosol formulations.	High risk is associated with volatile compounds; long-term declines in lung function have been reported (Svanes et al., 2018).	Inhalation and ocular exposure represent significant risks associated with spray disinfectants.
Labeling	INCI list, instructions for use, warnings, and traceability information.	Hazard pictograms, dilution instructions, and child safety warnings.	Instructions must strictly correspond to authorized claims and risk mitigation measures.

6. Human Health Impacts: Evidence-Based Risk Areas

6.1. Dermal Effects: Irritation and Allergy

Cosmetic and cleaning formulations often contain surfactants and functional additives that can compromise the skin's integrity. Irritant effects are typically dose-dependent and closely linked to the frequency and duration of exposure, whereas allergic responses are substance-specific and mediated via immunological mechanisms. The high prevalence of contact allergy in the general population highlights the crucial importance of meticulous ingredient selection and transparent labeling practices. These measures should be considered not merely as regulatory obligations but as essential public health imperatives (Alinaghi et al., 2019).

6.2. Respiratory System: Long-term Outcomes of Cleaning

Cleaning activities generate a variety of reaction products, aerosols, and volatile organic compounds (VOCs), including chloramines. Evidence from longitudinal cohort studies has demonstrated a significant association between regular cleaning activities—both domestic and occupational—and accelerated decline in lung function, with effects reported to be particularly pronounced in women (Svanes et al., 2018). These findings suggest that spray-based formulations and inadequately ventilated environments require prioritized risk communication, alongside the implementation of targeted respiratory protection programs.

7. Labeling, Claim Management, and Transparency

Labeling serves as the primary interface for risk communication between manufacturers and end users. In cosmetic products, labeling requirements include the complete ingredient list (INCI), instructions for use, and identification details of the responsible person. For household cleaning products, labeling must clearly and unambiguously convey critical safety information, including dilution instructions, emergency procedures for eye or skin contact, and explicit warnings against mixing incompatible chemical agents, such as bleach and acidic substances.

Product claims—such as “hypoallergenic,” “dermatologically tested,” or “antibacterial”—may be misleading if not substantiated by robust scientific evidence. Consequently, ethical claim management should be considered an integral component of product stewardship, extending beyond regulatory compliance to encompass consumer protection and public trust.

8. Occupational Health and Safety (OHS)

Occupational health and safety in production and laboratory environments should be managed according to the hierarchy of controls, including substitution, engineering controls, administrative measures, and the use of personal protective equipment (PPE). Core preventive measures encompass adequate general ventilation and localized exhaust systems for the management of volatile solvents; the use of chemical-resistant PPE, such as gloves, goggles, and face shields, when handling acids, alkalis, and oxidizing agents; the establishment of comprehensive chemical spill response procedures; and strict adherence to Safety Data Sheets (SDS).

Moreover, the respiratory risks associated with aerosolized substances necessitate the implementation of targeted respiratory protection programs

for workers engaged in filling, packaging, and production operations (Svanes et al., 2018).

9. Ethical Dimensions and Sustainability

Ethical production extends beyond mere regulatory compliance to include the proactive mitigation of foreseeable harm and a commitment to long-term sustainability. Within this framework, several key pillars underpin responsible product stewardship.

Non-animal testing strategies are a cornerstone of contemporary cosmetic safety science, with the increasing adoption of validated *in vitro* and *in silico* methodologies, complemented by weight-of-evidence (WoE) approaches, which enable hazard assessment while upholding ethical imperatives. Safer ingredient selection represents a parallel priority, achieved through the substitution of potent sensitizers, reduction of excessive fragrance loads, and formulation strategies specifically designed for sensitive or vulnerable populations, thereby contributing to a decreased burden of allergic contact dermatitis (ACD).

Environmental responsibility also entails minimizing the product life-cycle footprint through the use of concentrated formulations, biodegradable raw materials, and sustainable packaging solutions. Finally, corporate accountability is reinforced by the establishment of robust post-market surveillance systems and the capacity for rapid and effective product recall, ensuring continued protection of both consumers and the environment (Turkish Official Gazette, 2023).

10. Conclusion

The safe manufacture of cosmetic and cleaning products is achieved through the integration of GMP-based operational excellence, comprehensive safety assessment, and transparent risk communication. In Türkiye, the alignment of the Cosmetic Products Regulation with European Union standards provides a structured and systematic framework, particularly through the implementation of the Product Information File (PIF) and the clearly defined legal responsibilities of the Responsible Person.

Simultaneously, products bearing biocidal claims are subject to the stringent licensing and authorization requirements of the Biocidal Products Regulation, ensuring that efficacy, safety, and labeling accuracy are all addressed concurrently. Collectively, these regulatory pathways reflect a risk-based approach to market access grounded in scientific evidence and public health considerations.

Given the growing body of scientific evidence demonstrating the clinical burden of contact allergy and the respiratory risks associated with long-term exposure to cleaning agents, manufacturers should regard regulatory compliance not as an endpoint but as the minimum foundation for robust scientific risk management. Ultimately, an ethical and sustainable production paradigm requires proactive formulation design that minimizes latent and cumulative risks while ensuring that responsibilities are transparent to regulators, professionals, and consumers alike.

References

- Abels, C., & Angelova-Fischer, I. (2018). The relation of pH and skin cleansing. *Current Problems in Dermatology*, 54, 132–142. <https://doi.org/10.1159/000489527>
- Aerts, O., Goossens, A., Lambert, J., & Lepoittevin, J. P. (2017). Contact allergy caused by isothiazolinone derivatives: An overview of non-cosmetic and unusual cosmetic sources. *European Journal of Dermatology*, 27(2), 115–122. <https://doi.org/10.1684/ejd.2016.2957>
- Alinaghi, F., Bennike, N. H., Egeberg, A., Thyssen, J. P., & Johansen, J. D. (2019). Prevalence of contact allergy in the general population: A systematic review and meta-analysis. *Contact Dermatitis*, 80(2), 77–85. <https://doi.org/10.1111/cod.13119>
- International Organization for Standardization (ISO). (2007). *Cosmetics—Good Manufacturing Practices (GMP): Guidelines on Good Manufacturing Practices* (ISO 22716:2007).
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). *Cosmetics—Microbiology: Microbiological limits* (ISO 17516:2014).
- International Organization for Standardization (ISO). (2017). *Cosmetics—Microbiology: Guidelines for the risk assessment and identification of microbiologically low-risk products* (ISO 29621:2017).
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). *Cosmetics—Guidelines on the stability testing of cosmetic products* (ISO/TR 18811:2018).
- International Organization for Standardization (ISO). (2019). *Cosmetics—Microbiology: Evaluation of the antimicrobial protection of a cosmetic product* (ISO 11930:2019).
- Legislation Information System. (2009). *Biocidal Products Regulation*. Official Gazette No. 27449 (4th repeated issue). Retrieved from <https://www.mevzuat.gov.tr>
- Svanes, Ø., Bertelsen, R. J., Lygre, S. H. L., Carsin, A. E., Antó, J. M., Forsberg, B., ... Svanes, C. (2018). Cleaning at home and at work in relation to lung function decline and airway obstruction. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 197(9), 1157–1163. <https://doi.org/10.1164/rccm.201706-1311OC>
- Turkish Medicines and Medical Devices Agency (TİTCK). (n.d.). *Biocidal legislation*. Retrieved from <https://titck.gov.tr/faaliyetalanlari/biyosidal/mevzuat>
- Turkish Medicines and Medical Devices Agency (TİTCK). (2023). *Announcement for cosmetic companies*. Retrieved from <https://titck.gov.tr>
- Turkish Official Gazette. (2023). *Cosmetic Products Regulation*. Issue No. 32184. Retrieved from <https://www.resmigazete.gov.tr>

Wilford, J. E., & de Gannes, G. C. (2017). Methylisothiazolinone contact allergy prevalence in Western Canada: Increased detection with 2000 ppm patch test allergen. *Journal of Cutaneous Medicine and Surgery*, 21(3), 207–210. <https://doi.org/10.1177/1203475416685084>

Mikroplastik Toprak Kirleticisi Kaynaklarının İnsan ve Toprak Sağlığı Üzerine Etkisi

Meliha Burcu Gürdere¹

Ayşegül Nazlı Özcan²

Özet

Plastik kirliliği, 21. yüzyılın en büyük çevresel sorunlarından biridir. Özellikle pandemi döneminde kontrolsüz kullanılan eldiven, maske gibi biyomedikal plastik ürünler uygun şekilde bertaraf edilmedikleri için su ve karasal ekosistemlere karışarak ciddi çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Son yıllarda artan nüfus artışına bağlı olarak plastiklerin aşırı miktarda kullanılması karasal ve su ekosistemlerinde mikroplastik kirliliğine sebep olmaktadır. Mikroplastik kirlilik; toprak, su ve böcek ekosistemlerini etkileyen kritik bir küresel çevre sorunu olarak ortaya çıkmıştır. Mikroplastiklerin yaygın varlığı, tarım topraklarına sızarak gıda güvenliğini ve insan sağlığını tehdit etmesi nedeniyle, küresel ölçekte acil bir çevre sorunu olarak ortaya çıkmaktadır. Olağanüstü dayanıklılıkları ve biyolojik bozulmaya karşı dirençleri, tarımsal topraklarda sürekli olarak bulunmalarına katkı sağlar. Topraktaki mikroplastikler, toksik katkı maddelerini toprağa salarak mikrobiyal toplulukları bozabilir. Besin döngüsü gibi temel toprak işlevlerini de bozarak insan sağlığı için fizyolojik ve/veya mekanik hasara neden olabilir. Ayrıca, mikroplastikler bitkiler içinde birikip taşınma potansiyeline sahiptir ve bitkinin büyümesini de önemli ölçüde etkileyebilir. Bu çalışmada; günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan plastiklerin parçalanarak mikroplastığa dönüşmesi sürecinde; mikroplastik kirlilik kaynakları, bunların ekosisteme, tarım toprağı ve besin zinciri üzerinden insan sağlığı üzerine etkisi incelenerek mikroplastik kirliliği önlemeye yönelik etkili öneriler sunulmuştur. Tarım topraklarında mikroplastik kalıntıların önlemek için; olabildiğince plastik malzeme kullanımının azaltılması, biyolojik parçalanabilir ve çevre dostu alternatiflerin

- 1 Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, burcugurdere@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4285-5528
- 2 Ünvan, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, aysegulnozcan05@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-4716-5263

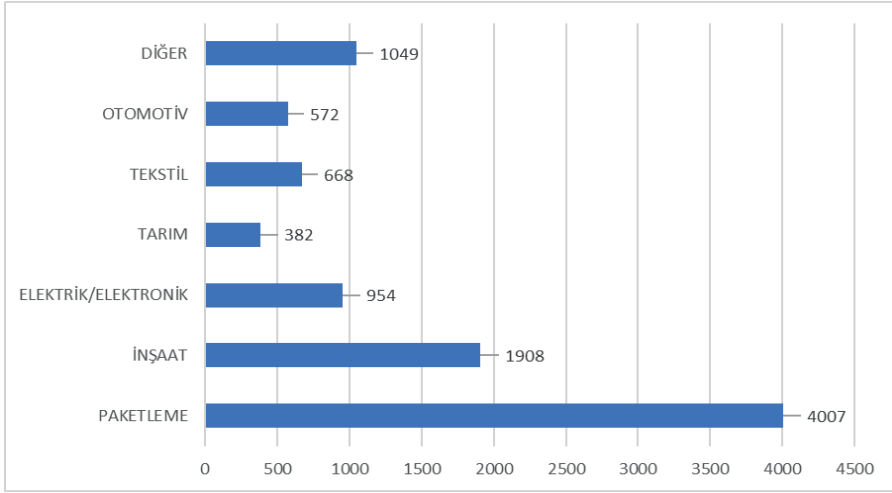
teşvik edilmesi, halkın bilinçlendirilerek atık yönetiminin iyileştirilmesi, geri dönüşüm sürecinin desteklenmesi, sürdürülebilir tarım uygulamalarının benimsenmesi ve toprak iyileştirme tekniklerinin uygulanmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Çevrede mikroplastik oluşumunu ve varlığını azaltmak için uygun düzenlemelerin önerilmesi ve uygulanması hayati önem taşımaktadır.

1. Giriş

1.1. Plastikler

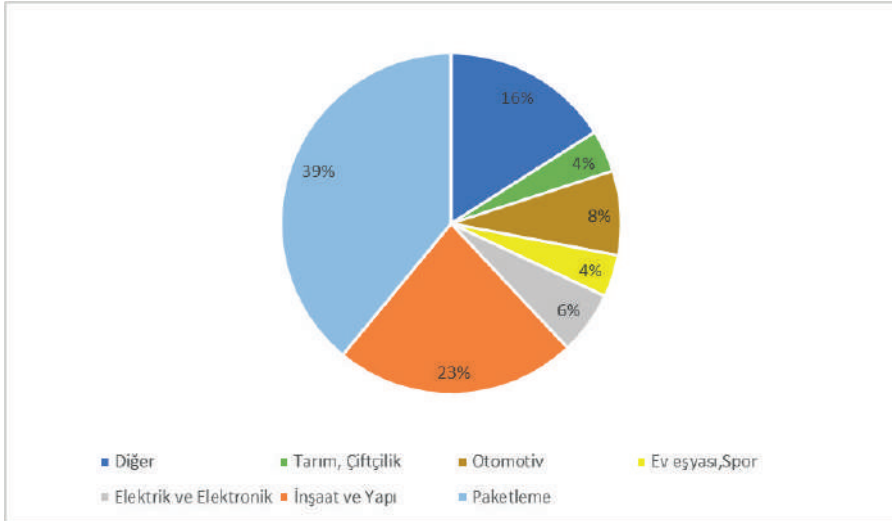
Çeşitli sentetik polimer malzemelerin bir grubunu oluşturan plastikler, yapay atıkların ve çevre kirliliğinin önemli bir göstergesi haline gelmiştir [1]. Plastik, hafifliği ve dayanıklı olması sebebiyle çeşitli kullanım alanlarında tercih edilmesiyle birlikte çevrede mikroplastiklerin yaygınlaşmasında önemli bir rol oynamıştır [2]. 2020 yılında pandemi döneminde, COVID-19 salgını nedeniyle kişisel koruyucu ekipmanların yanlış yönetimi küresel plastik kirliliğini arttırdı ve aylık yaklaşık olarak 129 milyar yüz maskesi ve 65 milyar eldiven kullanıldı [3]. Küresel plastik üretimi 2018 yılında 359 milyon tona ulaştı ve 2050 yılına kadar da 33 milyar metrik tona çıkacağı tahmin ediliyor [4]. Karasal ekosistemlerdeki plastik birikim miktarının, su ekosistemlerinden 4 ila 23 kat daha fazla olduğunun bildirilmesiyle giderek artan bir çevre sorunu haline gelmektedir [5].

Toplam 9,5 milyon ton üretimle Türkiye, Avrupa' nın en büyük plastik üreticilerinden biridir ve 2020 yılına ait sektörlere göre plastik üretimi (Şekil 1)' de verilmiştir. 7 milyon tonun üzerindeki değeriyle ambalaj sektörü, toplam plastik üretiminde en büyük paya sahiptir [6].



Şekil 1. 2020 yılında alt sektörlere göre plastik üretimi (1000 ton) (Çevik ve ark, 2022)

Son yetmiş yılda plastik üretimindeki artış, bu malzemeye olan bağımlılığımızı vurgulamaktadır. Plastiklerin yaygın kullanımı özellikle tarım, inşaat, elektronik, mobilya, tüketici ürünleri, tıbbi cihazlar, ambalaj ve ulaşım gibi kilit sektörlerde yaygındır. Şekil 2’de plastiklerin uygulama alanlarına göre 2022 yılı için yüzde tüketim miktarları gösterilmektedir [7]. 2020 yılında olduğu gibi ambalaj ve inşaat sürekli olarak plastik tüketiminin en büyük payını oluşturmaktadır.

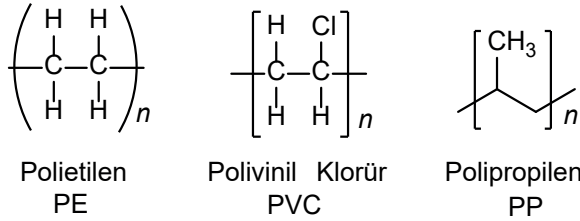


Şekil 2. 2022 yılına göre plastiklerin uygulama alanlarına göre yüzde kullanım miktarları (Haba ve ark, 2025)

1.2. Mikroplastikler

Mikroplastikler, kişisel bakım ürünlerinde bulunan mikro boncuklar gibi büyük plastik parçaların veya küçük plastik parçacıkların ultraviyole, radyasyon, tarımsal faaliyetler ve hava koşulları gibi bir dizi çevresel değişkenin etkisiyle parçalanması sonucu ortaya çıkan, tipik boyutu 5 mm' den küçük plastik parçacık olarak tanımlanırlar ve mikroplastikler (MP' ler) hem kara (karasal) hem de su (sucul) ekosistemlerinde potansiyel kirleticisi kaynaklardır [5,8].

Tarımsal topraklardaki polietilen (PE), polivinil klorür (PVC) ve polipropilen (PP) gibi mikroplastik kirliliği; toprak sağlığı, azot döngüsü ve mahsul verimliliği üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle önemli bir çevresel sorun olarak ortaya çıkmaktadır [9]. Çevre kirleticisi olarak yeni tanınan mikroplastikler; ekolojik toksisiteyi büyük ölçüde artırabilecek çeşitli katkı maddeleri içermesinden dolayı, biyolojik çeşitlilik kaybı ve insan sağlığı ve faaliyetleri için potansiyel bir tehdit olarak kabul edilmektedir [10].



Şekil 3. Polietilen, Polivinil klorür ve Polipropilen' in Yapıları

1.3. Mikroplastiklerin Ekosisteme Olan etkisi

Toprakta bulunan çeşitli bileşenler arasında, bakteriler, mantarlar ve arkeaları içeren mikroflora, toprak sağlığının ve ekosistem işlevselliğinin korunmasında çok önemli bir rol oynar. Bu mikroorganizmalar, besin döngüsü, organik madde ayrışması ve toprak yapısının korunmasından sorumludur ve plastiklerin, özellikle de mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin toprağa girmesi, bu kritik mikrobiyal topluluklar için önemli bir tehdit oluşturarak toprak sağlığı, tarımsal verimlilik ve ekosistem direnci üzerinde geniş kapsamlı sonuçlar doğurmaktadır [11].



Resim 1. Fotoğraf tarafımdan çekilmiştir.

Mikroplastikler toprak havalanmasını, su tutma kapasitesini ve geçirgenliğini değiştirerek normal toprak işlevini bozarlar. Polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi çeşitli plastik parçacık türleri, toprak parçacıklarının kohezyonunu etkileyerek toprak yapısının gevşemesine veya sıkışmasına ve su tutma kapasitesinin zayıflamasına neden olabilir. Bu değişiklikler, bitki köklerinin büyümesini doğrudan etkileyerek etkili su ve besin alımını engeller ve böylece genel bitki büyümesi ve verimini etkileyebilir. [12]. Bu bozulmalar toprak ekosisteminde zincirleme reaksiyonlara yol açarak, besin döngüsünü, bitki köklerinin etkileşimlerini ve genel toprak sağlığını değiştirerek tarımsal verimliliği etkiler [13]. Ek olarak, mikroplastiklerin yüksek karbon içeriği, topraktaki biyolojik olarak kullanılabilir karbon seviyesini etkileyen gizli bir karbon kaynağıdır ve geniş bir spesifik yüzey alanına sahiptir, bu nedenle bakteriler için bir karbon kaynağı ve taşıyıcı görevi görür, bu da toprak mikrobiyal topluluklarının yapısını ve işlevini değiştirerek jeokimyasal döngüyü etkileyebilir [14].

Mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin toprak ekosistemine geçmesiyle birlikte bitkiler tarafından emilip insan gıda zincirine geçerek gıda güvenliği

ve insan sağlığı üzerine ciddi riskleri de söz konusudur. Uzun vadede sağlık etkileri hala tam olarak bilinmese de mikroplastiklerin yaygın kullanımının, ekolojik ve sağlık üzerindeki etkilerini azaltmak için kapsamlı araştırma ve yönetim yaklaşımı gerekmektedir [15].

2. Tarımsal Topraklarda Mikroplastik Kirlilik

Son yıllarda, plastik malzemenin üretimi ve kullanımı, çok sayıda sosyoekonomik avantajı, hafiflik, stabilite ve esneklik gibi arzu edilen özellikleri sayesinde eşi benzeri görülmemiş seviyelere ulaşmıştır; bu özellikler, plastik malzemeyi çeşitli endüstriler için uygun hale getirmektedir [16]. Mikroplastikler deniz, tatlı su, atmosferik ve karasal ekosistemlerde yaygın olarak dağılmıştır. Özellikle karasal ekosistemler plastik kirliliği için önemli bir depo görevi görür [17].

Plastiklerin tarıma entegrasyonu, polyester, polivinil klorür (PVC) ve polipropilen (PP) gibi çeşitli polimerlerin tanımlanmasının ardından önemli bir ivme kazandı. Bu polimerler; borular, bağlantı parçaları, gübre uygulama aletleri ve koruyucu örtüler dahil olmak üzere çeşitli tarımsal bileşenlerde uygulama alanı buldu [18].

Son yıllarda, tarımsal plastik malç filmlerinden kaynaklanan mikroplastikler, acil bir çevresel sorun haline gelmiştir. Plastik malç filmleri, toprak özelliklerini, flora ve fauna mikrobiyal fonksiyonlarını etkileyen mikroplastikler üretir [19]. Malç filmleri özellikle tarımsal üretimin önemli ölçüde kısıtlandığı kurak ve yarı kurak bölgelerde, dünya çapında yaygın olarak tanıtılmış ve ürün üretiminde kullanılmıştır [20].

Plastik ürünlerin yaygın kullanımı ve yoğun sera yetiştiriciliği, toprak ortamında mikroplastik birikimine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Buna ek olarak, atık su ile sulama, organik gübre uygulaması ve ambalaj poşetleri tesis tarımı ve geleneksel tarım arazilerinde mikroplastiklerin potansiyel kaynakları olarak belirlenmiştir [21].

Toprağın mikroplastiklerle kirlenmesi, mahsuller üzerinde istenmeyen sonuçlar doğurabilir ve etkiler farklı mahsuller arasında değişiklik gösterebilir. Farklı tip ve şekillerdeki mikroplastiklere maruz kalan taze soğanlarda biyokütle, hücre bileşimi, kök sağlığı ve ilgili toprak mikrobiyal aktivitelerinde değişiklikler gözlemlenmiştir [22].

Tarımsal topraklardaki mikroplastik kirliliği ile ilgili ilk makalelerden biri 2018 yılında Nature dergisinde yayınlanmıştır [23]. Tarımsal alanlarda mikroplastiklerin yaygınlığını belirlemek için Almanya' nın güneydoğusundaki Orta Frankonya' daki tarım arazisinden toprak

numunesi alınarak incelendi. Çiftçiler, yalnızca standart tarım yöntemlerini kullandıklarını ve mikroplastikleri toprağa sokma potansiyeli olan herhangi bir plastik veya gübre gibi organik toprak katkı maddesi kullanmadıklarını bildirdiler. Çiftçilerin plastik kullanımı açıkça görülmese de araştırmacılar üst toprak örneklerinde kg başına $0,34 \pm 0,36$ mikroplastik parçacık buldular. Mikroplastik miktarının yüksek olması yeni bilimsel endişelere yol açtı ve araştırmacılar, tarım alanlarında temel mikroplastik kirlilik seviyesi belirlenmesi önerisinde bulundular [24].

Çoğu atıksu arıtma tesisinde, küçük plastik parçacıkların uzaklaştırılmasının düşük verimliliği nedeniyle, büyük miktarda mikroplastik kanalizasyon çamurunda ve atık sularda tutulmaktadır. alışmalar, büyük miktarda mikroparacığın atık sudan salındığını ve sulama yoluyla tarım alanlarına girdiğini göstermiştir. İşpanya' nın doğusunda yer alan ve kanalizasyon çamuru uygulanan sekiz tarım alanından toplanan toprak örneklerinden elde edilen verilere göre, hafif ve ağır yoğunluklu mikroplastiklerin miktarı sırasıyla 2130 ± 950 adet/kg ve 3060 ± 1680 adet/ kg' a ulaşmıştır; bu değerler, çamur uygulaması yapılmayan topraklara göre önemli ölçüde daha yüksektir. Tarım alanlarının yanı sıra, sonuçlar ayrıca, atık su ile sulama nedeniyle sebze toprağındaki mikroplastiklerin tampon topraktakinden daha fazla mikroplastik miktarına sahip olduğunu da doğrulamıştır [25].

Ayrıca, mikroplastiklerin toprak mikrobiyal topluluklarının çeşitliliği üzerinde çok az etkisi olduğuna dair kanıtlar da mevcuttur. Bu, mikroplastiklerin toprak mikroorganizmaları ve enzimleri üzerindeki etkisinin oldukça değişken olduğunu göstermektedir; dolayısıyla, mikroorganizmaların farklı koşullar altında mikroplastiklere verdiği tepki göz ardı edilemez [26]. Toprak mikrobiyal biyotasının temel bileşenleri olan bakteri ve mantar toplulukları, ekosistem fonksiyonlarının ve toprak biyokimyasının düzenlenmesinde önemli roller oynar. Hem bakteriler hem de mantarlar organik maddeyi paralayabilse de bakteriler genellikle topraklardaki hızlı karbon döngüsü yollarının önemli düzenleyicileri olarak kabul edilirken, mantarlar esas olarak dirençli organik maddenin parçalanmasından sorumludur. Bakteriler ve mantarlar toprak fonksiyonlarında farklı roller oynasalar da toprak biyokimyasal süreçlerine birlikte hakimdirler ve birbirleriyle yakından ilişkilidirler. Mikroplastiklerin toprak mikroortamını değiştirdiği bilinmektedir ve aynı ortamda mantarların ve bakterilerin mikroplastiklere farklı tepkiler verebileceği tahmin edilebilir. [27].

2.1. Tarım Topraklarında Mikroplastik Kirlilik Kaynakları

2.1.1. Tarımsal Malç filmleri

Mikroplastiklerin toprağa sızabileceği birçok yol vardır ve dünya çapında yapılan birçok çalışma, plastikten yapılmış malç filmlerinin en yaygın kaynak olduğunu göstermiştir. Malç filmleri gelişmiş ülkelerde genellikle toprak sıcaklığını düzenlemek, mahsul verimini artırmak, yabancı otların büyümesini engellemek ve su ve gübreyi tutmak için kullanılır [28].

Malç filmleri doğada parçalanamayan düşük ve yüksek yoğunluklu polietilenden (PE)' den üretilir ve genellikle 6-8 μm olan düşük kalınlıkları ve %60' ın altındaki geri kazanım oranları nedeniyle sonraki mahsullerde yeniden kullanılması zordur. Bu nedenle, hasat mevsiminden sonra yaygın kullanımı nedeniyle önemli miktarda film kalıntısı oluşur. Oluşan kalıntıların giderilmesi, zaman alıcı olması ve yüksek işçilik maliyeti nedeniyle zordur. [29].

Malç filmlerinin UV kaynaklı bozunma gibi çevresel bileşenlere uzun süre maruz kalması sonucunda yüzey aşınması ve parçalanması nedeniyle toprakta mikroplastik kalıntılarının artmasına neden olmaktadır [30]. Toprakta mikroplastik artışı solucanlar gibi canlı organizmaları da olumsuz etkileyerek, mahsul büyümesini azaltır ve toprak kalitesini bozar. Ayrıca; toprak dokusu, mahsul yetiştirmek için arazi kullanım süresi ve sulama sistemi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklı toprak katmanlarında değişiklik gösterebilir [31].

2.1.2. Gübreler

Organik gübreler, Bunlar arasında günlük evsel atıklar, belediye atıkları ve kanalizasyon çamuru gibi kentsel kaynakların yanı sıra gübre ve saman gibi tarımsal girdiler ile gıda işleme atıkları gibi endüstriyel yan ürünleri de içeren ağırlıklı olarak insan faaliyetlerinden kaynaklanan katı organik atıklardan elde edilir [32]. Organik atıkların kompostlama veya fermentasyon yoluyla geri dönüştürülmesi ve ardından tarım arazilerine uygulanması, temel olarak besin maddelerini, eser elementleri ve humusu toprağa geri kazandırmak için çevreye duyarlı bir uygulamadır. Ancak, evsel ve kentsel biyolojik atıkların çoğu plastik malzemelerle temas ederek kirlenmektedir. Eleme ve eleme işlemleri bu kirleticileri önemli ölçüde azaltabilir, fakat tamamen ortadan kaldıramaz, bu da toprakta mikroplastik oluşumuna sebep olur [33].

Yavaş ve kontrollü salınımlı inorganik gübrelerde kullanılmak üzere tasarlanmış biyolojik olarak parçalanamayan polimerler, mikroplastik parçacıkların doğrudan kaynağıdır. Öte yandan hayvan dışkısı, yemler,

plastik aletler, ekipmanlar ve ambalaj malzemeleri hem inorganik gübrelerin hem de çiftlik gübresinin dolaylı olarak mikroplastik kaynağı olabilir [34].

2.1.3. Sulama

Yapılan çalışmalarda, nehir suyu ile sulama, derin topraklarda mikroplastik kirliliğini artırarak mikroplastiklerin çevreye ikincil olarak yayılmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bu, sulanan tarım alanlarında mahslleri sulamak için kullanılan suyun, plastik parçacıklarıyla kirlenmiş nehirler, gller veya yeraltı suları gibi çeşitli kaynaklardan gelen mikroplastikleri içerebileceğı anlamına gelir [28]. Aynı zamanda yüzey sulama, damla sulama ve damla sulama ile yağımlama sulamanın sırasıyla 437 ila 4148, 836 ila 2013 ve 310 ila 1747 parça/kg arasında değışen toprak mikroplastik birikimine katkıda bulunduğı bildirilmiştir [35].

Mikroplastiklerin suyla çok yavaş ve etkisiz bir şekilde taşınarak ve toprağın üst 10 cm'lik kısmında kaldığı, sadece toprak matrislerinde değıl, aynı zamanda toprağın akışı ileten kırık bölgelerinde de kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, mikroplastikler sığ topraklarda ve kök bölgelerinde birikmeye meyillidir, bu da kara ekosistemleri ve tarım üzerinde olası olumsuz etkilerin en üst düzeye çıkmasına neden olabilir [36]. Aynı zamanda mikroplastiklerin tarım topraklarında birikmesi, toprak neminin buharlaşmasını %25,9–30,2 oranında artırarak tarım topraklarındaki su kıtlığını daha da şiddetlendirir [35].

Yeraltı suyu akiferleri, tarım arazilerinin toprağından mikroplastiklerin dikey taşınmasından etkilenebilir ve bu durum akifer mikroorganizmaları ve yeraltı suyu içenler için zararlı olabilir ve potansiyel sağık riskleri oluşturabilir [37].

2.1.4. Plastik İpler

Plastik ipler çoğunlukla polipropilenden (PP) yapılır ve tarımda birçok amaçla kullanılır. Polipropilen ipler domates, tatlı biber gibi başlıca mahsllerde bitkileri kazıklara bağlamak için ve muz üretiminde bitkilerin devrilmesini önlemek için birbirlerine bağlanmasında kullanılır [24]. Tarımsal topraklarda polipropilen parçacıkları ve polyester lifleri de muhtemelen sulama yoluyla topraklara girdiğı tahmin edilmektedir, bu da sulama suyunun mikroplastiklerin kaynağı ve dağılımında önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir [38].

2.1.5. Plastik borular

Polivinil klorür (PVC); sera filmleri, sulama boruları ve malç malzemelerinde bulunması sebebiyle tarımda, özellikle de tesis tarımında yaygın olarak kullanılmaktadır ve bunların tümü topraklardaki mikroplastik kirliliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ayrıca polivinil klorür (PVC); polietilen (PE) gibi yaygın diğer polimerlerle kıyaslandığında, daha yüksek yoğunluk ve klor atomlarının varlığı gibi belirgin kimyasal özelliklere sahip olmasından dolayı çevresel davranışını ve kirleticilerle etkileşimlerini önemli ölçüde etkiler [39].

Türkiye’deki tarım toprakları üzerinde yapılan bir çalışmada, tespit edilen mikroplastiklerin %13’üne kadarının tek kullanımlık damla sulama borularından (çoğunlukla polivinil klorür PVC) kaynaklandığı tespit edilmiş ve sulama altyapısının toprak mikroplastik kirliliğine katkısındaki önemli rolü vurgulanmıştır. Biyolojik olarak parçalanamayan ve çevrede yıllarca kalabilen bir plastik olan Polivinil Klorür (PVC), dünya çapındaki toplam plastik üretiminin yaklaşık %46’ını oluşturan ilk üç plastikten biridir [39, 40].

Yapılan çalışmalar, tarım toprağında bulunan mikroplastiklerin varlığı toprak mikroorganizmalarının bileşimini ve metabolik aktivitesini etkileyebileceğini göstermiştir. %5 polivinil klorür (PVC) mikroplastikler, toprak bakteri topluluğunun zenginliğini ve çeşitliliğini azalttığı ve Burkholderiaceae familyası gibi birçok bakteri grubunun bolluğunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir [41].

3. Mikroplastiklerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkisi

İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan mikroplastikler, insan yaşam ortamının bütünlüğü için önemli bir risk oluşturmaktadır [42]. Mikroplastikler besin zinciri yoluyla toprak kirliliğini artırarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olur. Besin zinciri, bir ekosistemde enerji veya besin maddelerinin birincil üreticilerden temel tüketicilere ve oradan da ayrıştırıcılara aktarıldığı sıralı adımlardır; besin zinciri, yaşamın sürdürülmesi için hayatı öneme sahiptir [43].

Mikroplastikler, çeşitli organizmalarda, hayvanlarda ve insan vücudunun birçok yerinde tespit edilmiştir. Plastikler; monomerler, katkı maddeleri, işleme maddeleri ve kasıtsız olarak eklenen maddeler dahil olmak üzere binlerce kimyasal madde içerir. Bunlar arasında bilinen kalıcı organik kirleticiler, endokrin bozucular, insan kanserojenleri ve nörotoksik maddeler bulunmaktadır. Bu zararlı kimyasallar, plastiklerin insan sağlığı ve atmosfer üzerindeki zararlı etkilerine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. İnsanlar,

çeşitli pasif yollarla istemeden mikroplastikleri yutabilir veya taşıyabilir ve bu mikroplastikler metabolizma, fizyolojik fonksiyonlar ve genel sağlık üzerinde bir dizi zararlı etkiye sebep olabilir [32].

Mikroplastikler, vücuda emildiğinde üreme ve endokrin sistemlerini etkileyen çeşitli hastalıklara neden olabilen bisfenol A gibi çevresel toksinlerin taşıyıcısı olabilir, bu da insan sağlığı için tehlike oluşturur [44].

İnsan plasentasında mikroplastiklerin varlığı, bunların insan vücudu üzerinde nesiller arası potansiyel etkisi ve gelişmekte olan fetus üzerinde olası ciddi etkileri söz konusudur. Sonuç olarak, erken maruziyetin bebekler ve embriyoların erken gelişimi üzerindeki potansiyel etkisi göz ardı edilemez [45].

Mikroplastikler, mikroorganizmaları barındırır ve antibiyotik dirençli genlerin transferini teşvik edebilir. Yapılan araştırmalarda, bazı patojenlerin mikroplastiklere yapıştığını ve insanların bu kontamine gıdaları tükettiğinde enfeksiyon olasılığını artırdığını göstermiştir.

Mikroplastiklerin yutulması, solunması ve ciltle teması yoluyla kronik maruz kalma, birçok sağlık riskini de beraberinde getirir. Mikroplastikler insan vücuduna girdikten sonra organlarda birikir ve metabolik bozukluklara, iltihaplanmaya ve endokrin bozukluklara yol açar. [46].

Mikroplastik parçacıklar solunabilecek kadar küçüktür. Yapılan araştırmalarda akciğer ve kan örneklerinde mikroplastikler tespit edilmiştir; bu da solunum sistemine nüfuz edebilme ve potansiyel olarak vücutta dolaşabilme yeteneklerini göstermektedir. Solunması çeşitli potansiyel sağlık riskleri taşır. Çünkü, akciğerlerin epitel bariyerini geçerek, kan dolaşımına ve lenfatik sisteme girmesi potansiyel olarak diğer organ ve dokulara ulaşabileceğinin göstergesidir [47].

Hayvan çalışmaları, mikroplastiklerin biyolojik bariyerleri geçebildiğini göstermiştir. Bu bulgular endişe vericidir, çünkü mikroplastiklere kronik maruz kalmanın insanlarda nörolojik hasara yol açabileceği olasılığını göstermektedir. Yapılan çalışma, mikroplastiklerin beyinde birikebileceğini ve nöroinflamasyona neden olarak uzun vadeli bilişsel ve motor bozukluklara yol açabileceğini göstermiştir [48].

Ftalat esterleri, plastiklerde esnekliği ve dayanıklılığı artırmak için plastikleştirici olarak kullanılır ve ayrıca polivinil klorür (PVC) polimerlerin üretiminde de kullanılır. Ftalat esterlerine maruz kalındığında potansiyel olarak zararlıdır ve anormal cinsel gelişime ve doğum kusurlarına neden olabilir. Ek olarak, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından bütül

benzil ftalat (BBP) ve di-2-etilheksil ftalat (DEHP) muhtemel ve olası insan kanserojenleri olarak sınıflandırıldı [49].

Mikroplastik maruziyetinden kaynaklanan kanser riski, mikroplastik türü, boyutu, maruz kalma süresi ve bireysel duyarlılık gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Mikroplastikler, akciğer, deri ve sindirim sistemi kanserleriyle ilişkilendirilmiştir; çünkü bu bölgeler, bu kirleticilerin vücuda en sık girdiği yerlerdir.

Düzensiz şekilli mikroplastik parçacıklar, özellikle 5 mm'den küçük olanlar, hücresel hasarı artırabilir ve nihayetinde DNA mutasyonlarına ve potansiyel olarak kanser gelişimine yol açabilir. Mikroplastikler, mekanik stres ve hücre zarlarının delinmesi yoluyla hücrelere fiziksel hasar vererek programlanmış hücre ölümü olan apoptoz veya nekroza, doku iltihabına ve reaktif oksijen türlerinin salınımına yol açar. Hücreler içinde reaktif oksijen türlerinin birikmesi oksidatif strese yol açarak DNA hasarına, baz modifikasyonlarına, zincir kırılmalarına ve çapraz bağlanmalara neden olur ve bu da kansere yatkınlığı artırır. Dahası mikroplastikler, kanserojenler olarak bilinen ağır metaller ve kalıcı organik kirleticiler gibi toksik kimyasalları taşıyıcı olarak da davranır [50].

Mikroplastiklerin kanserojen olma potansiyeli, fiziksel özellikleri, kimyasal yapısı ve diğer çevresel toksinleri taşıma kapasitesi gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalarda, dokularda mikroplastiklerin farklı düzeylerde birikimiyle oksidatif stres, inflamasyon ve genetik materyale doğrudan zarar verme gibi çeşitli mekanizmalar yoluyla akciğer, kolorektal, karaciğer, böbrek, meme, yumurtalık ve prostat kanserleri de dahil olmak üzere birçok kanser türüne sebep olabileceği gösterilmiştir [51].

4. Sonuç

Hafif yapıları, dayanıklılıkları, uygun fiyatlı olmaları, yüksek güç-ağırlık oranları ve düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle, plastiklerin günlük yaşamda yaygın kullanımı son 50 yılda önemli ölçüde artmıştır. Kullanılan plastik miktarının artmasıyla da her gün, çevreye çok büyük miktarda karbon ve diğer zehirli kimyasallar salınmaktadır.

Zararlı etkilerine dair çok sayıda literatür bulunmasına rağmen, plastik endüstrisi ekonomik büyümeye katkıda bulunmaktadır. Küresel plastik pazarı büyüklüğü 2016 yılında yaklaşık 502 milyar dolar olan miktarının, 2028 yılına kadar yaklaşık 750,1 milyar dolara çıkması beklenmektedir [52].

Şu anda plastik atıkların yaklaşık %9' u geri dönüştürülüyor, %12' si yakılıyor ve kalan %79' u ise çöplüklerde birikiyor veya doğal yaşam alanlarına dağılıyor [53].

Mikroplastikler, plastik kaynaklı kalıcı kirleticiler olarak kabul edilmekte ve su, kara ve toprak ekosistemlerindeki kirliliğe sebep olan maddelerdir. Plastik malç filmleri, evsel ve endüstriyel atıklar, yağışlar, damla sulama sistemleri, polivinil klorür (PVC) borular, polietilen (PE) ipler ve kompost bazlı gübreleme gibi çeşitli insan faaliyetleri, karasal ortamlarda mikroplastik kirliliğine katkıda bulunan önemli kaynaklardır. Mikroplastikler, toprak sistemlerinde tarımsal faaliyetler sonucu taşınarak toprak ekosistemini özelliklerini ciddi şekilde etkileyerek, canlılarda doğrudan sindirim veya birikim ve toprak özelliklerinin dolaylı olarak değişmesi gibi çeşitli etkiler gösterir. Mikroplastikler toprak ekosistemleri için çok ciddi risk oluştururlar.

Topraktaki küçük mikroplastik parçacıklar bitkiler ve hayvanlar tarafından absorplanabilir. Bu nedenle, toprakta bulunan mikroplastikler gıda zincirine girme potansiyeline sahiptir ve bu da insanların doğrudan maruz kalma riskini artırır. Tarımsal ürünler ve hayvancılık ürünleri insanlar için hayati gıda kaynakları olduğundan, mikroplastiklerin ürünler üzerinde ciddi etkileri söz konusudur.

Mikroplastiklerin toksik etkileri, sentetik veya doğal olmalarına bağlı olarak özelliklerine ve üretim kaynaklarına göre değişir. Elyaf gibi sentetik plastikler yavaş bozunur ve çevreye ve insan sağlığına zarar veren organik kirleticiler olarak kalırlar.

Toprak mikroplastik kirliliğinin etkili bir şekilde yönetilmesi için, plastik malç filmlerinin kullanımında tasarruf sağlamak, sürdürülebilir sulama yapmak ve toprak mikroplastik kirliliğini kaynağında kontrol etmek gibi seçeneklerin belirlenerek öncelikle toprağı kirleten mikroplastik kaynaklarının bilinmesi gerekmektedir.

Plastik malç filmlerinin aşınması ve bozunması sonucunda toprakta mikroplastik kalıntıları oluşmaktadır. Bu sebeple mikroplastik kalıntısını önlemek ve sürdürülebilir tarıma etkin bir şekilde katkıda bulunmak için biyolojik olarak parçalanabilen polimerler üzerine yoğun araştırmalar yapılmıştır. Doğada parçalanabilen polimerler mikroplastik atık üretmeden hızla ayrılan malçların geliştirilmesini kolaylaştırmıştır. Bu malzemeler, amaçlanan kullanım süreleri boyunca mekanik bütünlüklerini ve performanslarını korumak için sürekli olarak optimize edilmektedir. Ancak, yüksek üretim maliyetleri ve performans sorunları nedeniyle, uygulamaları ve yaygınlaştırılmaları bazı zorluklar ortaya çıkarmıştır. Düşük maliyetli,

biyolojik olarak parçalanabilir malç filmlerinin geliştirilmesi ve biyolojik olarak parçalanabilir plastik malç filmlerin kontrol edilebilirliğini ve stabilitesini daha da iyileştirmek için düşük maliyetli bozulmayı hızlandırıcı katkı maddelerinin geliştirilmesi gerekmektedir; böylece malç filmlerinin toprakta doğal bozunma süresi etkili bir şekilde kısaltılabilir ve plastik film kalıntılarının ekolojik ve çevresel etkisi azaltılabilir. Ayrıca, biyolojik olarak parçalanabilir malç filmlerinin geniş ölçekli kullanımından sonra, atıkların geri dönüşümü ve bunun tarım ekosistemleri üzerindeki etkisi konusunda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Toprak ekosistemindeki mikroplastik kirliliğini ele almak için, çevre dostu çözümler arasında biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerin teşvik edilmesi, atık yönetiminin iyileştirilmesi, sürdürülebilir tarım uygulamalarının benimsenmesi ve toprak iyileştirme tekniklerinin uygulanması yer almaktadır. Ek olarak, kamuoyunu bilinçlendirmek, destekleyici politikalar uygulamak ve araştırma ve yeniliği teşvik etmek, mikroplastik kirliliğini azaltmak çevre ve insan sağlığını iyileştirmek için çok önemlidir. Bu nedenle, bu çevre dostu çözümlerin uygulanması, toprak ekosistemlerindeki mikroplastik kirliliğini önemli ölçüde azaltarak daha sağlıklı çevreye ve insan sağlığının iyileşmesine katkı sağlar.

Plastik tüketimini azaltmak, mikroplastik kirliliğini önlemenin en etkili yoludur. Bu, tek kullanımlık plastikler yerine yeniden kullanılabilir alışveriş çantaları, su şişeleri ve gıda kapları kullanılarak başarılabılır. Ayrıca ekolojik dengeyi sağlamak için, aşırı plastik ambalajlı ürünler satın almaktan kaçınabilir ve doğal malzemelerden yapılmış çevre dostu ürünleri tercih edebiliriz.

Yeniden kullanım ve geri dönüşüm, plastik kirliliğini önlemede en etkili araçlardandır. Plastik ürünlerin geri dönüşümü, çöplüklere giden ve nihayetinde okyanusa karışan atık miktarını azaltmaya yardımcı olabilir.

Biyolojik olarak parçalanabilir ve geri dönüştürülebilir polimerlerin geliştirilmesi gibi yeşil kimyadaki yenilikler, plastiklerin çevredeki kalıcılığını azaltmak için umut vadeden bir yol sunmaktadır. Ayrıca, plastiklerin enzimatik ve mikrobiyal bozunumu üzerine devam eden araştırmalar, plastikleri daha verimli ve güvenli bir şekilde parçalayabilen biyolojik temelli çözümlerin önünü açabilir.

Sonuç olarak, mikroplastik kirliliğiyle mücadele, uzun vadeli çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için bilimsel ilerlemeleri ve teknolojik yenilikleri entegre eden çok disiplinli bir yaklaşım gerektirmektedir.

Plastik, mikroplastik ve nanoplastik kirliliğini azaltmaya yönelik öneriler şunlardır:

- Mümkün olduğunca plastik ambalaj malzemeleri yerine biyolojik olarak parçalanabilen ambalajlar, bambu ürünler ve bitki bazlı alternatifler kullanılmalıdır.
- Atık sınıflandırması, plastik atıkların geri dönüşümü ve kullanımını gerçekleştirmek için gerekli bir yöntemdir; farklı türdeki plastik atıkların makul ve bilimsel bir şekilde sınıflandırılması ile depolama sırasında tarım ekosistemlerine giren plastik miktarı önlenebilir veya azaltılabilir.
- Plastikler, bertaraf edilirken diğer atıklardan ayrı tutulmalı ve uygun şekilde işlenmelidir.
- Geri dönüştürülmüş plastik ürünlerin tümü için kalite şartları oluşturulmalı ve uygulanmalıdır.
- Plastik atıkların yönetimi için yerel ve zgn czmler geliştirilmelidir.
- Plastik atık yönetimi politikaları geliştirilirken ve uygulanırken, toplumun her düzeyinin ihtiyaçları dikkate alınmalıdır. İlkokuldan başlayarak eğitim sistemimizin her aşamasında, plastik atık yönetimine ilişkin sosyal sorumluluk aşılanmalıdır.
- Mevcut en iyi teknoloji ve teknikler hakkında sürekli bilgi paylaşımı yapılmalıdır.
- Standart veya biyolojik olarak parçalanamayan malzemeler, nişasta gibi yüksek oranda biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerle değiştirilmelidir.
- Sanayiden kaynaklanan plastik atıklar ya geri dönüştürülmeli ya da yeniden değerlendirilmelidir.
- Atıksu arıtma tesisleri, atıksudan plastik parçacıklarını uzaklaştırarak mikroplastik kirliliğinin önlenmesinde ck önemli bir rol oynayabilir. Ekosistemdeki mikroplastik miktarını azaltmak için bu tesislerin kapasitesini ve verimliliğini artırmaya yönelik calışmalar yapılabilir.
- İşletmeleri sürdürülebilir uygulamaları benimsemeye ve plastik kullanımını azaltmaya teşvik etmek, mikroplastik kirliliğini en aza indirmenin etkili bir yolu olabilir.

Kaynaklar

- [1] Weber, C. J., & Opp, C. (2020). Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes. *Environmental Pollution*, 267, 115390.
- [2] Dindar, E. (2024). The effect of N mineralization, nitrification and ammonification rates in soils contaminated with microplastics. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(11), 699.
- [3] Debrah, J. K., Vidal, D. G., & Dinis, M. A. P. (2021). Innovative use of plastic for a clean and sustainable environmental management: Learning cases from Ghana, Africa. *Urban Science*, 5(1), 12.
- [4] Rathikannu, S., Gautam, S., Joshi, S. K., Katharine, P., Mithra, K. E., Banusaranya, P., ... & Ho, C. H. (2025). FTIR based assessment of microplastic contamination in soil water and insect ecosystems reveals environmental and ecological risks. *Scientific Reports*, 15(1), 28615.
- [5] Liu, Z., Li, Y., Xu, G., & Yu, Y. (2025). Effects of microplastics on black soil health: A global meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 490, 137850.
- [6] Çevik, C., Kideys, A. E., Tavşanoğlu, Ü. N., Kankılıç, G. B., & Gündoğdu, S. (2022). A review of plastic pollution in aquatic ecosystems of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 26230-26249.
- [7] Haba, B., Djellali, S., Abdelouahed, Y., Boudjelida, S., Faleschini, F., & Carraro, M. (2025). Transforming plastic waste into value: A review of management strategies and innovative applications in sustainable construction. *Polymers*, 17(7), 881.
- [8] Bhattacharjee, U., Baruah, K. N., & Shah, M. P. (2025). Exploring sustainable strategies for mitigating microplastic contamination in soil, water, and the food chain: A comprehensive analysis. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*.
- [9] Sarfraz, U., Qian, Y. S., Yu, Q., Cao, Y., Jiang, X., Mahreen, N., ... & Zhu, X. (2025). Microplastic effects on soil nitrogen storage, nitrogen emissions, and ammonia volatilization in relation to soil health and crop productivity: mechanism and future consideration. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1621542.
- [10] Xia, H., Shen, J., Riaz, M., Ran, F., Cheng, T., Wang, X., ... & Jiang, C. (2025). Effects of agricultural plastic films on crop growth and soil health in tobacco fields: A comparative study. *Applied Soil Ecology*, 206, 105795.
- [11] Das, D., Deb, D., & Paul, P. (2025). Plastic Pollution Impacting Soil Microflora: A Study Toward Agricultural Productivity. In *Micro-Nano Plastics Exposure, Environmental Degradation and Public Health Crisis: Perspectives and Concerns for Sustainable Development* (pp. 281-300). Singapore: Springer Nature Singapore.

- [12] Gao, S., Mu, X., Li, W., Wen, Y., Ma, Z., Liu, K., & Zhang, C. (2025). Invisible threats in soil: Microplastic pollution and its effects on soil health and plant growth. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(5), 158.
- [13] Sakin, E., Dilekoğlu, M. F., & Yanardağ, İ. H. (2025). Unseen threat: The devastating impact of microplastics on soil health in agricultural lands. *Catena*, 253, 108904.
- [14] Liu, S., Chen, B., Wang, K., Wang, J., Wang, K., Suo, Y., ... & Liu, Y. (2025). Unveiling the impact of biodegradable polylactic acid microplastics on meadow soil health. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(2), 45.
- [15] Hasan, M. M., & Tarannum, M. N. (2025). Adverse impacts of microplastics on soil physicochemical properties and crop health in agricultural systems. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, 100528.
- [16] Gökaya, A., & İzmirli, Ş. G. (2025). Microplastic contamination in some herbal teas and human risk assessment: Türkiye. *Food and Chemical Toxicology*, 205, 115718.
- [17] Liu, Y., Wang, X., Duo, J., Pei, L., Wang, S., Rehemanjiang, W., & Li, W. (2025). Microplastic contamination in cotton soils following long-term mulching: A field study for the Xinjiang Production and Construction Corps in China. *Results in Engineering*, 108028.
- [18] Sahai, H., del Real, A. M. A., Alcayde, A., Bueno, M. M., Wang, C., Hernando, M. D., & Fernández-Alba, A. R. (2025). Key insights into microplastic pollution in agricultural soils: A comprehensive review of worldwide trends, sources, distribution, characteristics and analytical approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 185, 118176.
- [19] Wang, K., Flury, M., Kuzyakov, Y., Zhang, H., Zhu, W., & Jiang, R. (2025). Aluminum and microplastic release from reflective agricultural films disrupt microbial communities and functions in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 491, 137891.
- [20] Wang, K., Liu, X., Chadwick, D. R., Yan, C., Reay, M., Ge, T., ... & Jones, D. L. (2025). The agricultural plastic paradox: Feeding more, harming more?. *Environment International*, 198, 109416.
- [21] Wang, X., Feng, Q., Yang, L., Li, M., Zhao, F., Tang, J., ... & Chen, L. (2025). Effect of land use on occurrence and spatial variability of soil microplastics in agricultural watershed. *Ecological Frontiers*, 45(2), 497-506.
- [22] Tang, K. H. D. (2023). Microplastics in agricultural soils in China: Sources, impacts and solutions. *Environmental Pollution*, 322, 121235.
- [23] Piehl, S., Leibner, A., Löder, M. G., Dris, R., Bogner, C., & Laforsch, C. (2018). Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific reports*, 8(1), 17950.

- [24] Lwanga, E. H., Beriot, N., Corradini, E., Silva, V., Yang, X., Baartman, J., ... & Geissen, V. (2022). Review of microplastic sources, transport pathways and correlations with other soil stressors: a journey from agricultural sites into the environment. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 20.
- [25] Tian, L., Jinjin, C., Ji, R., Ma, Y., & Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311.
- [26] Zhang, X., Li, Y., Ouyang, D., Lei, J., Tan, Q., Xie, L., ... & Yan, W. (2021). Systematical review of interactions between microplastics and microorganisms in the soil environment. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126288.
- [27] Fan, P., Tan, W., & Yu, H. (2022). Effects of different concentrations and types of microplastics on bacteria and fungi in alkaline soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 229, 113045.
- [28] Bello, F. A., Folorunsho, A. B., Chia, R. W., Lee, J. Y., & Fasusi, S. A. (2025). Microplastics in agricultural soils: sources, impacts on soil organisms, plants, and humans. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(4), 448.
- [29] Sattar, B., Liu, G., Yousaf, B., Arif, M., Gulzar, M. Z., Haider, M. I. S., ... & Aziz, K. (2025). Microplastic contamination in agricultural soils from mulch films and organic amendments: transformation mechanism, soil-biota toxicity, and future perspectives. *Waste Management*, 205, 115032.
- [30] Salama, K., & Geyer, M. (2023). Plastic mulch films in agriculture: Their use, environmental problems, recycling and alternatives. *Environments*, 10(10), 179.
- [31] Boonsong, P., Ussawarujikulchai, A., Prapagdee, B., & Pansak, W. (2025). Contamination of microplastics in greenhouse soil subjected to plastic mulching. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103991.
- [32] Hoang, V. H., Nguyen, M. K., Hoang, T. D., Ha, M. C., Huyen, N. T. T., Bui, V. K. H., ... & Nguyen, D. D. (2024). Sources, environmental fate, and impacts of microplastic contamination in agricultural soils: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 950, 175276.
- [33] Weithmann, N., Möller, J. N., Löder, M. G., Piehl, S., Laforsch, C., & Freitag, R. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science advances*, 4(4), eaap8060.
- [34] Cusworth, S. J., Davies, W. J., McAinsh, M. R., Gregory, A. S., Storkey, J., & Stevens, C. J. (2024). Agricultural fertilisers contribute substantially to microplastic concentrations in UK soils. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 7.

- [35] Guo, S., Zhang, J., Liu, J., Guo, N., Zhang, L., Wang, S., ... & Chen, Y. (2023). Organic fertilizer and irrigation water are the primary sources of microplastics in the facility soil, Beijing. *Science of the total environment*, 895, 165005.
- [36] Yang, X., Chen, R., & Tang, D. W. (2025). Minimal preferential transport of microplastics through macropores in irrigated disturbed and undisturbed soil columns. *Agricultural Water Management*, 318, 109751.
- [37] Rana, M. M., Haque, M. R., Tasnim, S. S., & Rahman, M. M. (2023). The potential contribution of microplastic pollution by organic fertilizers in agricultural soils of Bangladesh: quantification, characterization, and risk appraisals. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1205603..
- [38] Jiang, J. J., Hanun, J. N., Chen, K. Y., Hassan, F., Liu, K. T., Hung, Y. H., & Chang, T. W. (2023). Current levels and composition profiles of microplastics in irrigation water. *Environmental Pollution*, 318, 120858.
- [39] Li, A., Zhou, X., Zhang, X., Wang, Y., Li, X., Gao, S., ... & Xing, B. (2025). Effect of PVC microplastics on pesticide sorption behavior in soil: Key roles of particle size and aging. *Science of The Total Environment*, 1000, 180422.
- [40] Khalid, A. R., Shah, T., Asad, M., Ali, A., Samee, E., Adnan, F., ... & Haider, G. (2023). Biochar alleviated the toxic effects of PVC microplastic in a soil-plant system by upregulating soil enzyme activities and microbial abundance. *Environmental Pollution*, 332, 121810.
- [41] Yan, Y., Chen, Z., Zhu, F., Zhu, C., Wang, C., & Gu, C. (2021). Effect of polyvinyl chloride microplastics on bacterial community and nutrient status in two agricultural soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(4), 602-609.
- [42] Chang, X., Fang, Y., Wang, Y., Wang, F., Shang, L., & Zhong, R. (2022). Microplastic pollution in soils, plants, and animals: a review of distributions, effects and potential mechanisms. *Science of the Total Environment*, 850, 157857.
- [43] Okeke, E. S., Okoye, C. O., Atakpa, E. O., Ita, R. E., Nyaruaba, R., Mgbekhidinma, C. L., & Akan, O. D. (2022). Microplastics in agroecosystems-impacts on ecosystem functions and food chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105961.
- [44] Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International journal of environmental research and public health*, 17(4), 1212.
- [45] Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G., & Song, M. (2023). Potential health impact of microplastics: a review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects. *Environment & Health*, 1(4), 249-257.

- [46] Wolff Leal, T., Tochetto, G., Lima, S. V. D. M., de Oliveira, P. V., Schossler, H. J., de Oliveira, C. R. S., & da Silva Júnior, A. H. (2025). Nanoplastics and microplastics in agricultural systems: Effects on plants and implications for human consumption. *Microplastics*, 4(2), 16.
- [47] Mahajan, M., Singh, A. K., Singh, R. P., Gupta, P. K., Singh, S., & Prap, M. (2025). Preventing Microplastic Pollution in Surface Waters: Legal Frameworks and Strategic Actions. *Environmental Quality Management*, 35(1), e70116.
- [48] Jin, H., Yang, C., Jiang, C., Li, L., Pan, M., Li, D., ... & Ding, J. (2022). Evaluation of neurotoxicity in BALB/c mice following chronic exposure to polystyrene microplastics. *Environmental health perspectives*, 130(10), 107002.
- [49] Karbalaei, S., Hanachi, P., Walker, T. R., & Cole, M. (2018). Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental science and pollution research*, 25(36), 36046-36063.
- [50] Kumar, N., Lamba, M., Pachar, A. K., Yadav, S., & Acharya, A. (2024). Microplastics—a growing concern as carcinogens in cancer etiology: emphasis on biochemical and molecular mechanisms. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 82(4), 3109-3121.
- [51] Joseph, M. M., Nair, J. B., & Joseph, A. M. (2025). Microscopic Menace: Exploring the Link Between Microplastics and Cancer Pathogenesis. *Environmental Science: Processes & Impacts*.
- [52] Massoud, T., & Dsilva, J. (2025). Closing the PET plastic recycling loop: A sustainable transformation from plastic to fiber. *Next Sustainability*, 6, 100095.
- [53] Guo, Z., Wu, J., & Wang, J. (2025). Chemical degradation and recycling of polyethylene terephthalate (PET): a review. *RSC Sustainability*, 3(5), 2111-2133.

Koroner Girişimlerde İlaç Kaplı Balonlar: Mekanizmalar, Klinik Kanıtlar ve Gelecek Perspektifler

Gökhan Cabrı¹

Özet

Koroner arter hastalığının (KAH) tedavisinde perkütan koroner girişimler, balon anjiyoplastiden ilaç salınımlı stentlere (DES) uzanan önemli bir evrim süreci geçirmiştir. DES'ler restenoz oranlarını anlamlı ölçüde azaltmış olsa da orta ve uzun dönemde in-stent restenoz (ISR), stent trombozu ve uzamış çiftli antiplatelet tedavi (DAPT) gereksinimi gibi sorunlar devam etmektedir. Bu bağlamda, kalıcı bir intravasküler implant bırakmadan lokal antiproliferatif ilaç iletimini mümkün kılan ilaç kaplı balonlar (drug-coated balloons, DCB), alternatif bir revaskülarizasyon stratejisi olarak geliştirilmiştir.

DCB'ler, başta paklitaksel ve son yıllarda sirolimus olmak üzere antiproliferatif ajanları balon şişirilmesi sırasında doğrudan damar duvarına aktararak neointimal hiperplaziyi baskılamayı hedeflemektedirler. Bu yaklaşım, “leave nothing behind” felsefesi doğrultusunda vasküler iyileşmeyi desteklerken metal iskeleyle bağlı geç komplikasyonları ve uzun süreli DAPT ihtiyacını azaltma potansiyeli sunmaktadır. Klinik kanıtlar, DCB'lerin özellikle ISR tedavisinde düz balon anjiyoplastiye üstün, DES ile ise karşılaştırılabilir etkinlik ve güvenlik profiline sahip olduğunu göstermektedir. On yıla varan uzun dönem takip verileri, uygun hasta ve lezyon seçimi yapıldığında DCB yaklaşımının sürdürülebilir klinik sonuçlar sağlayabildiğini ortaya koymuştur.

ISR dışında, DCB'lerin küçük damar hastalığı, bifurkasyon lezyonları, uzun difüz lezyonlar ve yüksek kanama riski taşıyan hasta gruplarında potansiyel kullanım alanları giderek genişlemektedir. Bununla birlikte, özellikle büyük damar de novo lezyonları ve kompleks anatomilerde etkinlik ve güvenliğin net olarak tanımlanabilmesi için daha büyük, randomize ve uzun dönem takipli çalışmalara ihtiyaç devam etmektedir. Bu bölümde, DCB teknolojisinin mekanizmalarını, mevcut klinik kanıtları ve gelecekteki olası uygulama alanlarını ele almaktayız.

1 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Kardiyoloji Anabilimdalı, gokhancabri@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1120-4216

1. Genel Bilgiler

Koroner arter hastalığının (KAH) tedavisinde katetere dayalı revaskülarizasyon yaklaşımları, 1970'lerin sonlarında balon anjiyoplastinin (plain old balloon angioplasty, POBA) klinik uygulamaya girmesinden bu yana önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Ancak, POBA'nın ani tıkanma ve erken restenoz gibi doğal sınırlamaları ve çıplak metal stentlerin (bare-metal stent, BMS) yüksek in-stent restenoz (ISR) oranları, ilaç salınımlı stentlerin (drug-eluting stent, DES) geliştirilmesine yol açmıştır [1, 2].

DES'lerin neointimal hiperplaziyi baskılayarak restenozu azaltmadaki yüksek etkinliğine rağmen, DES kullanımında dahi orta ve uzun dönemde ISR ve stent trombozu gibi stent başarısızlıkları hala görülmektedir. Mevcut veriler, ABD'de gerçekleştirilen perkütan koroner girişim (PKG) işlemlerinin %10'undan fazlasının ISR tedavisini içerdiğini göstermektedir [3, 4]. Bu klinik yük, kalıcı metal iskele bırakmadan damar açıklığını sürdürülebilmesini hedefleyen alternatif revaskülarizasyon stratejilerine ilgiyi artırmıştır.

Bu terapötik ihtiyaca yanıt olarak, ilaç kaplı balonlar (drug-coated balloon, DCB) geliştirilmiştir. DCB'ler, PKG sırasında antiproliferatif ajanları (çoğunlukla paklitaksel veya sirolimus) damar duvarına lokal olarak aktarımını sağlayan özel koroner cihazlardır [5]. DCB'lerin temel ilkesi, kalıcı bir metal protez bırakmadan yeterli lümen kazanımı ve vasküler iyileşmenin desteklenmesi, metal iskeleye bağlı trombotik risklerin ve uzatılmış çiftli antiplatelet tedavi (dual antiplatelet therapy, DAPT) gereksinimlerini en aza indiren "leave nothing behind" stratejisini sunmaktır [5].

DCB'lerin kullanımına ilişkin en güçlü kanıtlar, PKG'nin en sık ve klinik açıdan sorunlu tablolarından biri olan ISR tedavisi alanında toplanmıştır [6]. Yapılan çalışmalar, DCB'lerin standart balon anjiyoplastiye kıyasla ISR tedavisinde üstün olduğunu ve geç lümen kaybını ve hedef lezyon revaskülarizasyonu (target lesion revascularization, TLR) ihtiyacını azalttığını göstermektedir [6]. Ayrıca, DCB ile müdale edilen ISR olgularında, on yıla varan uzun dönem izlem verilerinde dahi, DES implantasyonu ile karşılaştırılabilir etkinlik ve güvenlik profiline sahip olabileceği bildirilmiştir [7].

ISR'nin ötesinde, DCB'ler de novo lezyonlar, küçük damar hastalığı, bifurkasyon lezyonları ve uzun difüz lezyonlar gibi teknik olarak zorlu anatomilerin yönetiminde tamamlayıcı bir seçenek olarak değerlendirilmektedir [5]. Bifurkasyon lezyonları, PKG sırasında teknik zorluklar ortaya çıkartmaktadır. Bu bağlamda DCB'lerin, özellikle provizyonel stentleme stratejisinde sırasında risk altındaki yan dalın (side

branch, SB) tedavisinde düz balon anjiyoplastiye (balloon angioplasty, BA) kıyasla hedef damar miyokard enfarktüsü (MI) riskini azaltabildiği gösteren çalışmalar mevcuttur [8]. Ayrıca, DCB'ler, kalıcı metal iskele bırakmaması ve DAPT süresinin kısaltılabilmesi olasılığı nedeniyle, yüksek kanama riski taşıyan hastalarda DCB yaklaşımı teorik ve pratik avantajlar sunabilir [9].

Bununla birlikte, DCB'lerin ISR dışındaki geniş endikasyon alanlarında etkinlik ve güvenliğinin net biçimde tanımlanabilmesi için; standardize yöntemlere sahip, daha büyük örneklemli ve uzun süreli takip içeren ilave randomize klinik çalışmalara ihtiyaç devam etmektedir. Bu bölüm, DCB'lerin KAH tedavisindeki gelişimini ve etki mekanizmalarını ele almakta; özellikle ISR yönetimindeki kanıta dayalı rolünü merkeze alarak, mevcut literatür ışığında gelecekteki potansiyel uygulamaları ve mevcut zorlukları tartışmayı amaçlamaktadır.

2. Tanım ve Temel Prensip

DCB'ler, PKG sırasında antiproliferatif ajanların lokal olarak damar duvarına iletilmesini sağlamak üzere geliştirilmiş özel koroner cihazlardır. Bu cihazlar, kalıcı bir intravasküler implant bırakmadan, düz kas proliferasyonunu baskılayarak restenoz gelişimini önlemeyi amaçlamaktadır [10].

2.1 Yapı ve Bileşenler

DCB'ler, genellikle yarı uyumlu poliüretan veya naylon balonlardan oluşur ve bu balonların yüzeyi antiproliferatif ilaçlarla kaplanmıştır. Söz konusu ilaçlar çoğunlukla biyouyumlu ve lipofilik polimer bir matriks içerisinde taşınarak balon yüzeyine bağlanır ve balonun şişirilmesi sırasında damar duvarına transfer edilir [11].

DCB teknolojisinin temel bileşenleri şunlardır:

2.1.1 Balon Kateteri:

Balon kateteri: ilaç kaplı balon sisteminde antiproliferatif ilacın taşınması ve hedef lezyona ulaştırılmasını sağlayan, sistemin iskeletini oluşturan temel bileşendir.

2.1.2 Aktif Antiproliferatif Ajan:

İlk kullanılan aktif farmakolojik ajan paklitakseldir. Paklitaksel, hidrofobik ve lipofilik özellikleri sayesinde balon şişirilmesini takiben dokuya etkin şekilde penetre olur ve damar duvarına yüksek ilaç tutulmasını sağlar [12]. Paklitaksel etki mekanizması, mikrotübüllere geri dönüşümsüz olarak

bağlanmasıyla, mitoz sırasında hücre proliferasyonunun inhibisyonudur [13].

Son yıllarda sirolimus (rapamisin), birolimus ve everolimus gibi alternatif antiproliferatif ajanların kullanımı da gündeme gelmiştir. Sirolimus, güçlü antiproliferatif ve immünoşüpresan özelliklere sahip olup, memeli rapamisin hedefi (mammalian target of rapamycin, mTOR) yolaklarını geri dönüşümlü olarak inhibe eder. Bu etki, hücre döngüsünün G1/S geçişinde ilerlemenin durmasına yol açarak neointimal proliferasyonu baskılar [14].

2.1.3. Taşıyıcı ve Yardımcı Maddeler (Eksipiyanlar):

Aktif farmakolojik ajan ve ek yardımcı maddeleri içeren polimer matris, ilacın çözünürlüğünü artırarak damar duvarına etkin transferini kolaylaştırır ve ilacın hızla eliminasyonunu (wash-off) azaltır [10]. Klinik etkinliği kanıtlanmış taşıyıcı maddeler arasında, düşük osmolaliteli bir kontrast ajanı olan iopromid ile endojen bir metabolit olan üre yer almaktadır [5].

2.2 Temel Prensip ve Etki Mekanizması

DCB'lerin temel yaklaşımı, kalıcı bir metal iskele bırakmaksızın damar açıklığını korunmasını hedefleyen ve literatürde “leave nothing behind” olarak tanımlanan stratejiye dayanmaktadır. Bu strateji, kalıcı metal protezlerin varlığına bağlı olarak uzun süreli kullanılan DAPT süresini kısaltmayı, trombotik riskleri ve artan kanama riskini en aza indirmeyi amaçlamaktadır [5].

DCB'lerin etki mekanizması, balonun hedef lezyon bölgesinde şişirilmesiyle başlar, bu süreçte balon yüzeyindeki ilaç kaplaması doğrudan damar duvarına transfer edilmektedir. İlaç iletimi hem uygulanan basınca hem de balonun şişirilme süresine bağlıdır. Bu nedenle, ilaç transferini optimize etmek amacıyla balonun nominal basınçta en az 60 saniye süreyle şişirilmesi önerilmektedir [5].

Optimal koşullarda bile, balonda bulunan ilacın yalnızca yaklaşık %15'i damar duvarına iletilir. Ancak bu lokal yüksek doz maruziyet, arter düz kas proliferasyonunu engelleyen uzun süreli bir antiproliferatif etki yaratmak için yeterlidir [10].

DCB'ler tarafından sağlanan lokal ilaç iletimi, sistemik uygulama ile elde edebilecek düzeylerin yüzlerce kat üzerinde ilaç konsantrasyonlarının damar duvarında oluşmasına olanak tanımaktadır. Bu lokalize antiproliferatif etki, düz kas hücrelerinin aşırı proliferasyonunu baskılayarak neointimal

hiperplazinin gelişimini önleyerek vasküler açıklığın korunmasını sağlar [15].

DCB'lerin davranışı içerdikleri ilaca göre değişebilir. Örneğin paklitaksel, hızlı ve yoğun doku penetrasyonu ile kısa temas süresinde etkinlik sağlarken; sirolimus bazlı balonlar daha kontrollü hücre döngüsü inhibisyonu ve potansiyel olarak daha fizyolojik iyileşme profili sunmayı hedeflemektedir [16].

3. İlaç kaplı Balonun Teknolojisinin Evrimi Ve Tarihsel Gelişimi

KAH'nın tedavisinde kullanılan kateter temelli girişimler, 1929 yılında Alman hekim Werner Forssman'ın kendi üzerinde gerçekleştirdiği sağ kalp kateterizasyonunu ile başlayan uzun soluklu bir gelişim sürecidir [17]. Bu alandaki temel adımlar, 1963 yılında Dr. Charles Dotter'ın daralmış sağ iliak artere uyguladığı translüminal anjiyoplasti olup, oklüzif arteriyel hastalıkların kateter aracılığıyla tedavisinin temelini oluşturmuştur [1].

Kardiyovasküler alanda en başarılı terapötik müdahaleler arasında yer alan girişimsel teknikler, Dr. Andreas Grüntzig'in 1974 yılında aterosklerotik plağı damar duvarına komprese ederek lümen açıklığını arttırmayı amaçlayan "Grüntzig balon kateter prensibini" tanımlaması ve 1977'de insanlar üzerinde ilk koroner balon dilatasyonunu gerçekleştirmesiyle bir ivme kazanmıştır [1].

Bununla birlikte, saf balon anjiyoplastiye dayanan yaklaşımın (POBA) ani lümen tıkanması ve erken restenoz gibi sınırlamaları nedeniyle, 1964'te Dotter tarafından tanımlanan endovasküler "splint" konseptinin hızla gelişmesine zemin hazırlamıştır [18]. Bu doğrultuda 1986 yılında ilk koroner stent Dr. Jacques Puel tarafından implante edilmiş ve BMS balon anjiyoplastinin kısıtlılıklarını aşmak amacıyla klinik kullanıma girmiştir [19]. Ancak, BMS uygulamalarında gözlemlenen yüksek ISR oranları, neointimal proliferasyonu baskılayan ajanların damar duvarına lokal olarak iletilmesini sağlayan DES geliştirilmesine yol açmıştır [20].

DES'lerin neointimal hiperplaziyi baskılayarak restenoz oranlarını anlamlı ölçüde azaltmasına karşın, ikinci nesil DES'lerde bile stent trombozu, neointimal hiperplazi ya da neoateroskleroz gibi mekanizmalarla ilişkili ISR başta olmak üzere orta ve uzun vadeli stent başarısızlıkları devam etmiştir [21]. ABD'deki güncel veriler PKG prosedürlerinin %10'undan fazlasının halen bir ISR tedavisini içermesi, kalıcı bir metal iskele bırakmadan damar açıklığını sürdürebilecek yeni revaskülarizasyon yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır [3].

DCB teknolojisinin temelleri, 1990'lı yılların sonlarında Almanya'nın Tübingen kentinde yürütülen deneysel çalışmalarla atılmıştır [12]. Bu araştırmalarda, paklitakselin arter duvarı üzerindeki etkileri incelenmiş ve ilaca maruziyetin neointimal oluşumu doz bağımlı bir şekilde baskıladığı gösterilmiştir [22]. Paralel olarak, Dr. Ulrich Speck ve Dr. Bruno Scheller, düşük osmolaliteli kontrast maddelerinin paklitaksel için taşıyıcı görevi görerek ilacın damar duvarına transferini kolaylaştırdığını kanıtlamıştır [23]. Bu öncü deneysel ve translasyonel çalışmalar, kalıcı bir intravasküler implant bırakmaksızın antiproliferatif ajanların lokal olarak iletilmesini temel alan DCB teknolojisinin geliştirilmesine ve klinik uygulamaya taşınmasına zemin hazırlamıştır [24].

DCB'lerin ilk geliştirilen ve onaylanan versiyonları, hidrofobik ve lipofilik özellikleri sayesinde kısa şişirme sürelerinden sonra bile dokuda tutulabilen bir ajan olan paklitakseli kullanmıştır [25]. Takip eden dönemde, sirolimus, birolimus ve everolimus gibi alternatif antiproliferatif ajanları içeren yeni balon teknolojileri geliştirilmiştir [26, 27]. İlacın damar duvarına transferini arttırmak ve hızlı eliminasyonu (wash-off) azaltmak amacıyla iopromid ve üre gibi taşıyıcı maddeler ile çeşitli yardımcı maddeler (eksipiyanlar) balon tasarımının temel bileşeni haline gelmiştir [10].

DCB'lerin klinik kullanımı, başlangıçta DES'lerin baskınlığı nedeniyle yavaş olsa da, koroner alanda kullanımları son on yılda yeniden ilgi görmüştür. DCB'lerin kullanımını destekleyen en güçlü kanıtlar, en yaygın ve zorlu PKG sorunlarından biri olan ISR alanında toplanmıştır [28].

Mevcut klinik çalışmalar, DCB'lerin POBA'ya kıyasla ISR tedavisinde üstün klinik sonuçlar sağladığı, geç dönem lümen kaybı ve hedef lezyon revaskülarizasyon ihtiyacını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir [29]. Bu bağlamda, 2013 yılında yayımlanan *ISAR-DESIRE 3* çalışmasının 10 yıllık takip sonuçları, paklitaksel kaplı balonların ve paklitaksel salınımlı stentlerin ISR tedavisinde benzer etkinlik ve güvenliğe sahip olduğunu göstermiştir [7].

İlaç kaplı balonların tarihi evrimi, kısaca, balon anjiyoplastinin sınırlamalarını aşma çabasıyla başlayıp, stentlerin restenoz sorununa verdiği yanıtın kalıcı implant bırakma zorluğunu DCB'lerin “*leave nothing behind*” felsefesiyle çözme arayışına dönüşmesini temsil etmektedir.

4. Koroner Anatomiye Göre İlaç Kaplı Balon Kullanım Alanları

4.1 Stent İçi Restenoz (ISR)

ISR, DCB'lerin kullanımını destekleyen en güçlü ve kapsamlı klinik kanıtların bulunduğu birincil endikasyondur ve bu alanda birinci basamak tedavi olarak kabul edilmektedir [14]. Mevcut epidemiyolojik veriler, Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleştirilen perkütan koroner girişimlerin %10'undan fazlasının ISR tedavisini kapsadığını göstermektedir [3, 29].

4.1.1 Çıplak Metal Stent Restenozu (BMS-ISR):

BMS-ISR'nin baskın patofizyolojik mekanizması neointimal hiperplazidir ve bu süreç DCB'lerdeki antiproliferatif ajanlara iyi yanıt vermektedir. Klinik çalışmalar, BMS-ISR tedavisinde ilaç kaplı balonların, ek bir metal stent katmanı yerleştirilmesine gerek kalmaksızın, ilaç salınımlı stentler (DES) ile karşılaştırılabilir düzeyde etkinlik sağladığını göstermiştir [30, 31].

4.1.2 İlaç Salınımlı Stent Restenozu (DES-ISR):

DES-ISR, neointimal hiperplazinin yanı sıra neoateroskleroz gibi daha heterojen doku bileşenleriyle karakterize olduğundan, klinik olarak daha karmaşık bir tablo sergilemektedir. ISAR-DESIRE 3 randomize çalışmasının 10 yıllık sonuçları, DCB anjiyoplasti ve paklitaksel salınımlı stent implantasyonunun DES-ISR tedavisinde birincil ve majör ikincil sonlanım noktaları açısından anlamlı bir fark bulunmadığını göstermiştir [7, 32].

Her iki tedavi stratejisinde, düz balon anjiyoplastiye kıyasla TLR oranlarını önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir. Ancak, nüks eden veya çok katmanlı stentlerin bulunduğu zorlu anatomik senaryolarda, ilave metal implantasyon yapılması riskini arttırabileceğinden DCB tercih edilen bir seçenek olmaya devam etmektedir [7].

Genel olarak DCB'ların. ISR tedavisinde olan etkinliği; POBA'ya kıyasla üstün klinik sonuçlar sağladığı ve geç dönem lümen kaybını ve TLR gereksinimini önemli ölçüde azaltması olarak özetlenebilir [33].

4.2 Bifurkasyon Lezyonları

Koroner bifurkasyon lezyonları, PKG prosedürlerinin yaklaşık %15-20'sini oluşturur ve teknik açıdan zorlayıcı bir klinik senaryodur [34]. Bifurkasyon lezyonlarının tedavisinde güncel ve tercih edilen yaklaşım, ana dalın geçici stentlenmesi sonrasında, yalnızca klinik veya anjiyografik olarak risk altına giren yan dalın tedavi edilmesidir. Konvansiyonel balon anjiyoplasti, yan dalda diseksiyon veya obstrüksiyon gibi komplikasyonlara

yol açabilir ve bu durum ikinci bir stent implantasyonunu zorunlu hale gerektirebilir [35].

DCB kullanımı, geçici stentleme stratejisi sırasında risk altındaki yan dalların tedavisinde, düz balon anjiyoplastiye kıyasla MI riskinde anlamlı bir azalma ile ilişkilendirilmiştir (Risk Oranı [RR] = 0.56) [8].

Yapılan meta-analizlerde, DCB uygulanmasının yan dal geç lümen kaybını, TLR'yi, Majör Olumsuz Kardiyovasküler Olayları (major adverse cardiovascular events, MACE) ve tüm nedenlere bağlı mortalite açısından balon anjiyoplastiye kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturmadığı bildirilmiştir. Ayriyeten DCB'ler, yan dal açıklığının korunmasında düz balona göre daha iyi sonuçlar gösterebilmektedir [8, 36].

4.3 De Novo Koroner Lezyonlar

DCB'ler, kalıcı bir metal iskeleden kaçınan “leave nothing behind” stratejisi nedeniyle *de novo* (yeni oluşmuş) lezyonların tedavisinde de ilgi görmektedir.

4.3.1 Küçük Damar Hastalığı (Referans Damar Çapı < 3.0 mm)

Küçük çaplı koroner damarlar, stent implantasyonu sonrasında daha yüksek ISR oranları ile ilişkili olduğundan, DCB'ler bu alanda umut vaat etmektedir [37].

Birçok randomize klinik çalışma (BASKET-SMALL 2, PICCOLETO II ve RESTORE SVD), DCB'lerin, *de novo* küçük damar lezyonlarının tedavisinde DES'e karşı klinik ve anjiyografik sonuçlar açısından non-inferior sonuçlar gösterdiğini ortaya koymuştur [38-40].

BELLO çalışması gibi bazı veriler, DCB uygulamasının geç lümen kaybını azaltma açısından paklitaksel salınımlı stentlere göre daha üstün olduğunu ve uzun dönem klinik fayda sağlayabileceğini göstermiştir [41].

Başarılı DCB uygulamaları, yetersiz lezyon hazırlığı, rezidüel stenoz gibi teknik faktörlerden olumsuz etkilenebilmektedir. Bu nedenle, tutarlı ve optimal klinik sonuçların elde edilebilmesi için işlem öncesinde optimal lezyon hazırlığının kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır [39].

4.3.2 Büyük Damar Hastalığı (Referans Damar Çapı ≥ 3.0 mm)

Büyük çaplı koroner damarlardaki *de novo* lezyonların tedavisinde DCB kullanımına ilişkin klinik kanıtlar, küçük damar hastalığına kıyasla çok daha sınırlıdır. *DEBUT* ve *PEPCAD-NSTEMI* çalışmaları, yüksek kanama riski taşıyan NSTEMI hastalarında DCB kullanımının BMS veya DES ile benzer

klinik ve anjiyografik sonuçlar sonuçlar verdiğini göstermiştir [39,40]. Bu hasta gruplarında DCB, kalıcı metal iskele bırakmaması, daha kısa süreli DAPT potansiyeli uygulanabilmesine olanak tanır [42, 43].

Bununla birlikte, büyük damar de novo lezyonlarında DCB'lerin, güncel altın standart olarak kabul edilen DES implantasyonu ile karşılaştırıldığında etkinlik ve güvenlik açısından üstünlüğünü veya eşdeğerliğini kesin biçimde ortaya koyacak, yeterli örneklem büyüklüğüne sahip randomize kontrollü klinik çalışmalar halen yetersizdir.

4.4 Diffüz Uzun Lezyonlar

Uzun ve difüz koroner lezyonlar, sıklıkla uzun stent segmentleri veya üst üste binen stent implantasyonlarını gerektirmeleri nedeniyle artmış ISR riski ile ilişkilidir. Bu nedenle DCB'ler, söz konusu lezyonlarda toplam stent yükünü ve stent uzunluğunu azaltmak amacıyla tek başına strateji veya hibrid yaklaşım (DES ve DCB kombinasyonu) olarak araştırılmaktadır. Mevcut klinik veriler, hibrid yaklaşımın (DES + DCB), medyan stent uzunluğunda azalma sağlamasının yanı sıra hedef lezyon başarısızlığını ve TLR'yi azalttığı gözlemlenmiştir [44].

DCB bazı yaklaşımlar (tek başına veya hibrid), uzun lezyonlarda DES'e kıyasla benzer TLR oranları gösterirken, DCB uygulanan gruplarda stent trombozu olgularının bildirilmediği rapor edilmiştir [45].

Kavramsal açıdan DCB teknolojisi, kalıcı bir mekanik iskele yerleştirmek yerine damar duvarına doğrudan farmakolojik bir etki sağlayarak iyileşmeyi destekleyen bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu özellik, özellikle uzun segmentli, hassas veya daha önce tedavi edilmiş (ISR) damar yapılarında, kalıcı intravasküler implantların beraberinde getirebileceği yapısal kısıtlamaları ve uzun dönem riskleri azaltma potansiyeli sunmaktadır.

5. Güvenlik Ve Komplikasyonlar

DCB teknolojisi, sunduğu önemli klinik avantajlarına rağmen, klinik uygulamalarında dikkate alınması gereken güvenlik sonuçları, potansiyel komplikasyonlar ve teknolojik sınırlamalar mevcuttur. Bu nedenle DCB'lerin güvenlik profili, uygulandığı koroner anatomiye ve karşılaştırıldığı tedavi yöntemine göre değerlendirilmektedir.

5.1 Stent İçi Restenoz (ISR) Tedavisinde Güvenlik

On yıllık takip sonuçları bulunan ISAR-DESIRE 3 çalışması, ilaç salınımlı stent kaynaklı in-stent restenoz tedavisi için Paclitaxel Kaplı Balon

ile Paclitaxel Salınlı Stent arasındaki uzun vadeli güvenliği karşılaştırmıştır [7].

5.1.1 Sekonder Sonlanım Noktası: 10 yıl sonunda, kardiyak ölüm, hedef damar miyokard enfarktüsü (MI) veya hedef lezyon trombozunu içeren majör sekonder güvenlik sonlanım noktası açısından Paclitaxel Kaplı Balon (%34.0) ve Paclitaxel Salınlı Stent (%40.0) gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir ($P=0.564$).

5.1.2 Mortalite Endişesi: Konvansiyonel analizde Paclitaxel Kaplı Balon ve Paclitaxel Salınlı Stent arasında 10 yıllık tüm nedenlere bağlı ölüm ve kardiyak ölüm oranlarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır. Daha ayrıntılı alt grup ve duyarlılık analizleri, uzun dönem mortaliteye ilişkin bazı potansiyel güvenlik endişelerini gündeme getirmiştir.

5.1.3 Erken Mortalite Fazlalığı: İşlemden sonraki ilk 5 yıl içinde Paclitaxel Salınlı Stent uygulanan hastalarda toplam mortalite ve kardiyak mortalite oranlarında sayısal bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu artış istatistiksel olarak anlamlılık göstermemekle birlikte, klinik açıdan dikkat çekici bulunmuştur.

5.1.4 Competing Risk Analizi: Competing eden risk regresyonunda, Paclitaxel Salınlı Stent implantasyonunun ile Paclitaxel Kaplı Balon anjiyoplastiye ile karşılaştırıldığında mortalite riski ile ilişkili olduğu ve bu riskin anlamlı düzeyde arttığı saptanmıştır (HR 1.99, 95% CI 1.18–3.34)7. Bu bulgular yoruma açık olsa da, DES-ISR için tekrar Paclitaxel Salınlı Stent implantasyonunun uzun vadeli güvenliği konusunda ek analizlere ihtiyaç duyulmaktadır.

5.1.5 Genel Güvenlik: Mevcut veriler ışığında, Paclitaxel Kaplı Balon anjiyoplastinin kardiyak ölüm, hedef damar MI, hedef lezyon trombozu ve bireysel iskemik sonlanım noktaları açısından belirgin bir uzun dönem güvenlik sorunuyla ilişkili olmadığı sonucuna varılmıştır.

5.2 Bifurkasyon Lezyonlarında Güvenlik

Koroner bifurkasyon lezyonlarında yan dal tedavisinde DCB ile konvansiyonel balon anjiyoplastiyi karşılaştıran randomize kontrollü çalışmaların meta-analizinde, DCB'ler:

DCB'lerin Majör Olumsuz Kardiyovasküler Olaylar (MACE) (RR = 0.70, $P = 0.070$), TLR (RR = 1.19, $P = 0.720$) ve tüm nedenlere bağlı mortalite (RR = 2.35, $P = 0.210$) açısından balon anjiyoplastiye kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir fark göstermemiştir.

DCB, balon anjioplasti ile karşılaştırıldığında hedef damar MI riskini anlamlı ölçüde azaltmıştır (RR = 0.56, P = 0.010). Bu koruyucu etki özellikle işlemten 48 saat sonra gelişen spontan miyokard enfarktüsleri açısından daha belirgin olduğu görülmüştür [36, 46-48].

5.3 Koroner Diseksiyon

DCB uygulamalarında karşılaşılabilecek potansiyel komplikasyonlardan biri koroner diseksiyondur. Bununla birlikte, bildirilen olguların büyük çoğunluğunda DCB ile ilişkili diseksiyonların akım kısıtlayıcı nitelikte olmadığı ve konservatif tıbbi tedavi ile yönetilebildiği belirtilmiştir. Diseksiyon gelişme riski, özellikle balon–damar çapı oranının yüksek olduğu durumlarda ve nominal basıncın üzerinde balon şişirilmesi uygulandığında artış göstermektedir [49].

5.4. Paklitakselle İlişkili Geç Güvenlik Endişeleri

KAH tedavisinde DCB'lerin uzun dönem güvenlik profili genel olarak olumlu görülse de, periferik arter hastalığı tedavisinde Paclitaxel Kaplı Balon kullanımının uzun vadeli sağkalımı azalttığına dair daha önce endişeler ortaya çıkmıştır [50]. Ancak, KAH için yapılan büyük meta-analizler ve ISAR-DESIRE 3'ün 10 yıllık takibi, PCB'nin koroner alanda artmış uzun vadeli mortalite ile ilişkili olmadığını göstermiştir [7].

6. Sınırlılıklar Ve Gelecekteki Zorluklar

DCB teknolojisinin yaygınlaşmasını sınırlayan ve gelecekteki araştırmaların odaklanması gereken başlıca zorluklar aşağıda özetlenmiştir.

6.1. Optimal Lezyon Hazırlığının Zorunluluğu

DCB anjiyoplastinin klinik başarısı, yeterli lezyon hazırlığına son derece bağlıdır. Yetersiz lezyon hazırlığı, antiproliferatif ajanın damar duvarına homojen ve etkin biçimde dağılamaz bu da tedavi etkinliğini olumsuz yönde etkiler [51].

Optimal lezyon hazırlığı, damar içi görüntüleme intravasküler ultrason (IVUS) veya optik koherens tomografi (OCT) rehberliğinde agresif predilatasyon, kesici balonların kullanılmasını, belirgin kalsifik lezyonlarda kalsiyum modifikasyonu amaçlayan tekniklerin (rotasyonel atarektomi veya intrakoronar litotripsi) uygulanmasını içerebilir [52].

6.2 Sınıf Etkisinin Olmaması

DCB'ler, kullanılan aktif farmakolojik ajanın türü (çoğunlukla paklitaksel veya sirolimus), yardımcı maddeler (eksipyanlar), ilaç formülasyonu ve ilacın damar duvarına transfer kinetiğindeki farklılıklar nedeniyle homojen bir sınıf sergilememektedir. Bu durum, belirli bir platformunda gözlenen klinik etkinlik ve güvenlik sonuçların, farklı bir aktif ajan veya alternatif bir taşıyıcı sistem kullanan başka bir cihaz için doğrudan genellenemeyeceğini düşündürmektedir [53].

6.3 Kanıt Yetersizliği ve Çalışma Kısıtlılıkları

DCB'lerin genişleyen endikasyon alanlarındaki potansiyel rolleri umut verici olmakla birlikte, bazı klinik senaryolarda etkinlik ve güvenliğin kesin olarak ortaya konabilmesi için mevcut kanıtlar halen sınırlıdır. Özellikle aşağıdaki alanlarda bilgi boşlukları dikkat çekmektedir:

6.3.1 Büyük Damar De Novo Lezyonları: DES'in altın standart kabul edildiği bu hasta grubunda, DCB'nin etkinlik ve güvenlik profillerini doğrudan DES ile doğrudan karşılaştıran, yeterli örneklem büyüklüğüne sahip randomize kontrollü klinik çalışmaların eksikliği sürmektedir [43].

6.3.2 Kompleks Lezyonlar: Mevcut çalışmalar, DCB kullanımını çoğunlukla karmaşık durumlar yerine, nispeten basit bifurkasyon lezyonları ile sınırlı tutmakta, ileri derecede kalsifik, uzun segmentli veya çok kompleks lezyonlarda DCB performansına ilişkin kanıtlar yetersiz kalmaktadır. Bu durum, elde edilen sonuçların daha karmaşık vakalara genellemesini sınırlamaktadır [8].

6.3.3 Standartlaştırılmış Veri İhtiyacı: DCB'lerin daha geniş klinik kullanım alanlarında güvenlik ve etkinliğinin net biçimde doğrulanabilmesi için, standartlaştırılmış prosedürel protokollere sahip, daha büyük ölçekli ve uzun dönem takip sürelerini içeren ilave randomize kontrollü çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır [8].

DCB teknolojisinin sınırlılıklarından biri de antiproliferatif etkinin optimal düzeyde sağlanabilmesi için lezyonun önceden uygun şekilde hazırlanmasıdır. Bu durum kritik öneme sahiptir, aksi hâlde en etkili farmakolojik ajan dahi yetersiz klinik sonuçlara yol açabilir [40].

Kaynakça

1. Barton, M., et al., *Balloon Angioplasty - The Legacy of Andreas Gruntzig, M.D. (1939-1985)*. Front Cardiovasc Med, 2014. 1: p. 15.
2. Bonaa, K.H., et al., *Drug-Eluting or Bare-Metal Stents for Coronary Artery Disease*. N Engl J Med, 2016. 375(13): p. 1242–52.
3. Adriaenssens, T., et al., *Optical Coherence Tomography Findings in Patients With Coronary Stent Thrombosis: A Report of the PRESTIGE Consortium (Prevention of Late Stent Thrombosis by an Interdisciplinary Global European Effort)*. Circulation, 2017. 136(11): p. 1007–1021.
4. Madhavan, M.V., et al., *Long-Term Outcomes After Revascularization for Stable Ischemic Heart Disease: An Individual Patient-Level Pooled Analysis of 19 Randomized Coronary Stent Trials*. Circ Cardiovasc Interv, 2020. 13(4): p. e008565.
5. Patel, A.H., M.W. Abdelnour, and A.H. Frangieh, *Drug-Coated Balloons for Coronary Interventions: A Focused Review*. Methodist Debaquey Cardiovasc J, 2025. 21(4): p. 37–53.
6. Giacoppo, D., et al., *Treatment strategies for coronary in-stent restenosis: systematic review and hierarchical Bayesian network meta-analysis of 24 randomised trials and 4880 patients*. BMJ, 2015. 351: p. h5392.
7. Giacoppo, D., et al., *Coronary artery restenosis treatment with plain balloon, drug-coated balloon, or drug-eluting stent: 10-year outcomes of the ISAR-DESIRE 3 trial*. Eur Heart J, 2023. 44(15): p. 1343–1357.
8. Ozbay, M.B., et al., *Drug-Coated Balloons vs. Plain Balloon Angioplasty for Side Branch Management in Coronary Bifurcation Lesions: A Systematic Review and Meta-Analysis*. Anatol J Cardiol, 2025. 29(6): p. 272–9.
9. Capodanno, D., et al., *ACC/AHA Versus ESC Guidelines on Dual Antiplatelet Therapy: JACC Guideline Comparison*. J Am Coll Cardiol, 2018. 72(23 Pt A): p. 2915–2931.
10. Waksman, R. and R. Pakala, *Drug-eluting balloon: the comeback kid?* Circ Cardiovasc Interv, 2009. 2(4): p. 352–8.
11. Bukka, M., P.J. Rednam, and M. Sinha, *Drug-eluting balloon: design, technology and clinical aspects*. Biomed Mater, 2018. 13(3): p. 032001.
12. Axel, D.I., et al., *Paclitaxel inhibits arterial smooth muscle cell proliferation and migration in vitro and in vivo using local drug delivery*. Circulation, 1997. 96(2): p. 636–45.
13. Kleber, F.X., et al., *Local paclitaxel induces late lumen enlargement in coronary arteries after balloon angioplasty*. Clin Res Cardiol, 2015. 104(3): p. 217–25.
14. Poon, M., et al., *Rapamycin inhibits vascular smooth muscle cell migration*. J Clin Invest, 1996. 98(10): p. 2277–83.

15. Oberhoff, M., et al., *Inhibition of smooth muscle cell proliferation after local drug delivery of the antimetabolic drug paclitaxel using a porous balloon catheter*. Basic Res Cardiol, 2001. **96**(3): p. 275–82.
16. Sehgal, S.N., *Sirolimus: its discovery, biological properties, and mechanism of action*. Transplant Proc, 2003. **35**(3 Suppl): p. 7S–14S.
17. Meyer, J.A., *Werner Forssmann and catheterization of the heart, 1929*. Ann Thorac Surg, 1990. **49**(3): p. 497–9.
18. Giacoppo, D., J. Saucedo, and B. Scheller, *Coronary Drug-Coated Balloons for De Novo and In-Stent Restenosis Indications*. J Soc Cardiovasc Angiogr Interv, 2023. **2**(3): p. 100625.
19. Puel, J., et al., *[Self-expanding coronary endoprosthesis in the prevention of restenosis following transluminal angioplasty. Preliminary clinical study]*. Arch Mal Coeur Vaiss, 1987. **80**(8): p. 1311–2.
20. Stone, G.W., et al., *A polymer-based, paclitaxel-eluting stent in patients with coronary artery disease*. N Engl J Med, 2004. **350**(3): p. 221–31.
21. Hildick-Smith, D., et al., *The EBC TWO Study (European Bifurcation Coronary TWO): A Randomized Comparison of Provisional T-Stenting Versus a Systematic 2 Stent Culotte Strategy in Large Caliber True Bifurcations*. Circ Cardiovasc Interv, 2016. **9**(9).
22. Herdeg, C., et al., *Local paclitaxel delivery for the prevention of restenosis: biological effects and efficacy in vivo*. J Am Coll Cardiol, 2000. **35**(7): p. 1969–76.
23. Speck, U., et al., *Inhibition of restenosis in stented porcine coronary arteries: uptake of Paclitaxel from angiographic contrast media*. Invest Radiol, 2004. **39**(3): p. 182–6.
24. Scheller, B., et al., *Paclitaxel balloon coating, a novel method for prevention and therapy of restenosis*. Circulation, 2004. **110**(7): p. 810–4.
25. Levin, A.D., et al., *Specific binding to intracellular proteins determines arterial transport properties for rapamycin and paclitaxel*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2004. **101**(25): p. 9463–7.
26. Ali, R.M., et al., *Treatment of Coronary Drug-Eluting Stent Restenosis by a Sirolimus- or Paclitaxel-Coated Balloon*. JACC Cardiovasc Interv, 2019. **12**(6): p. 558–566.
27. Xu, K., et al., *Sirolimus-Coated Balloon in Small-Vessel Coronary Artery Disease: The BIO-RISE CHINA Study*. JACC Cardiovasc Interv, 2022. **15**(12): p. 1219–1226.
28. Korjian, S., et al., *Drug-Coated Balloons in the Management of Coronary Artery Disease*. Circ Cardiovasc Interv, 2024. **17**(5): p. e013302.
29. Scheller, B., et al., *Treatment of coronary in-stent restenosis with a paclitaxel-coated balloon catheter*. N Engl J Med, 2006. **355**(20): p. 2113–24.

30. Unverdorben, M., et al., *Paclitaxel-coated balloon catheter versus paclitaxel-coated stent for the treatment of coronary in-stent restenosis*. *Circulation*, 2009. **119**(23): p. 2986–94.
31. Alfonso, F., et al., *A randomized comparison of drug-eluting balloon versus everolimus-eluting stent in patients with bare-metal stent-in-stent restenosis: the RIBS V Clinical Trial (Restenosis Intra-stent of Bare Metal Stents: paclitaxel-eluting balloon vs. everolimus-eluting stent)*. *J Am Coll Cardiol*, 2014. **63**(14): p. 1378–86.
32. Alfonso, F., et al., *3-Year Clinical Follow-Up of the RIBS IV Clinical Trial: A Prospective Randomized Study of Drug-Eluting Balloons Versus Everolimus-Eluting Stents in Patients With In-Stent Restenosis in Coronary Arteries Previously Treated With Drug-Eluting Stents*. *JACC Cardiovasc Interv*, 2018. **11**(10): p. 981–991.
33. Yeh, R.W., et al., *Paclitaxel-Coated Balloon vs Uncoated Balloon for Coronary In-Stent Restenosis: The AGENT IDE Randomized Clinical Trial*. *JAMA*, 2024. **331**(12): p. 1015–1024.
34. Hildick-Smith, D., et al., *The European bifurcation club Left Main Coronary Stent study: a randomized comparison of stepwise provisional vs. systematic dual stenting strategies (EBC MAIN)*. *Eur Heart J*, 2021. **42**(37): p. 3829–3839.
35. Chen, S.L., et al., *Impact of the complexity of bifurcation lesions treated with drug-eluting stents: the DEFINITION study (Definitions and impact of complEx biFurcation lesIons on clinical outcomes after percutaneOus coronary intervenTIOn using drug-eluting steNts)*. *JACC Cardiovasc Interv*, 2014. **7**(11): p. 1266–76.
36. Kleber, F.X., et al., *Drug eluting balloons as stand alone procedure for coronary bifurcational lesions: results of the randomized multicenter PEPCAD-BIF trial*. *Clin Res Cardiol*, 2016. **105**(7): p. 613–21.
37. Biondi-Zoccai, G., et al., *Percutaneous coronary intervention for small vessel coronary artery disease*. *Cardiovasc Revasc Med*, 2010. **11**(3): p. 189–98.
38. Wohrle, J., et al., *Impact of Diabetes on Outcome With Drug-Coated Balloons Versus Drug-Eluting Stents: The BASKET-SMALL 2 Trial*. *JACC Cardiovasc Interv*, 2021. **14**(16): p. 1789–1798.
39. Cortese, B., et al., *Paclitaxel-coated balloon versus drug-eluting stent during PCI of small coronary vessels, a prospective randomised clinical trial. The PICOLETO study*. *Heart*, 2010. **96**(16): p. 1291–6.
40. Tang, Y., et al., *Drug-Coated Balloon Versus Drug-Eluting Stent for Small-Vessel Disease: The RESTORE SVD China Randomized Trial*. *JACC Cardiovasc Interv*, 2018. **11**(23): p. 2381–2392.
41. Latib, A., et al., *A randomized multicenter study comparing a paclitaxel drug-eluting balloon with a paclitaxel-eluting stent in small coronary vessels: the BELLO (Balloon Elution and Late Loss Optimization) study*. *J Am Coll Cardiol*, 2012. **60**(24): p. 2473–80.

42. Scheller, B., et al., *Bare metal or drug-eluting stent versus drug-coated balloon in non-ST-elevation myocardial infarction: the randomised PEPCAD NS-TEMI trial*. EuroIntervention, 2020. **15**(17): p. 1527–1533.
43. Rissanen, T.T., et al., *Drug-coated balloon for treatment of de-novo coronary artery lesions in patients with high bleeding risk (DEBUT): a single-blind, randomised, non-inferiority trial*. Lancet, 2019. **394**(10194): p. 230–239.
44. Gitto, M., et al., *Drug-Coated Balloon Angioplasty for De Novo Lesions on the Left Anterior Descending Artery*. Circ Cardiovasc Interv, 2023. **16**(12): p. e013232.
45. Yang, X., et al., *Long-term outcomes of drug-coated balloons in patients with diffuse coronary lesions*. Front Cardiovasc Med, 2022. **9**: p. 935263.
46. Jing, Q.M., et al., *A drug-eluting Balloon for the treatment of coronary bifurcation lesions in the side branch: a prospective multicenter randomized (BEYOND) clinical trial in China*. Chin Med J (Engl), 2020. **133**(8): p. 899–908.
47. Stella, P.R., et al., *A multicenter randomized comparison of drug-eluting balloon plus bare-metal stent versus bare-metal stent versus drug-eluting stent in bifurcation lesions treated with a single-stenting technique: six-month angiographic and 12-month clinical results of the drug-eluting balloon in bifurcations trial*. Catheter Cardiovasc Interv, 2012. **80**(7): p. 1138–46.
48. Lopez Minguez, J.R., et al., *A prospective randomised study of the paclitaxel-coated balloon catheter in bifurcated coronary lesions (BABILON trial): 24-month clinical and angiographic results*. EuroIntervention, 2014. **10**(1): p. 50–7.
49. Yu, X., et al., *Treatment of large de novo coronary lesions with paclitaxel-coated balloon only: results from a Chinese institute*. Clin Res Cardiol, 2019. **108**(3): p. 234–243.
50. Katsanos, K., et al., *Risk of Death Following Application of Paclitaxel-Coated Balloons and Stents in the Femoropopliteal Artery of the Leg: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials*. J Am Heart Assoc, 2018. **7**(24): p. e011245.
51. Kufner, S., et al., *Neointimal Modification With Scoring Balloon and Efficacy of Drug-Coated Balloon Therapy in Patients With Restenosis in Drug-Eluting Coronary Stents: A Randomized Controlled Trial*. JACC Cardiovasc Interv, 2017. **10**(13): p. 1332–1340.
52. Yin, D., et al., *In-stent restenosis characteristics and repeat stenting underexpansion: insights from optical coherence tomography*. EuroIntervention, 2020. **16**(4): p. e335–e343.
53. Ninomiya, K., et al., *A Prospective Randomized Trial Comparing Sirolimus-Coated Balloon With Paclitaxel-Coated Balloon in De Novo Small Vessels*. JACC Cardiovasc Interv, 2023. **16**(23): p. 2884–2896.

Türkiye’de Biyokütle Enerji Santrallerinin Yeşil Kimya, İSG ve Biyofiziksel Perspektifinden Değerlendirilmesi 8

Fatih Yaşar¹

Yüksel Sarıkaya²

Yakup Budak³

Özet

Yeşil kimya, çevre dostu süreçler ve malzemeler geliştirerek kimyasal üretimde çevresel etkiyi azaltmayı amaçlamaktadır. Plastik yakıtlar, atık plastikleri biyokütle veya diğer yenilenebilir kaynaklarla birleştirerek enerji üretiminde kullanılabilir hale getirmektedir. Biyokütle enerji santrallerinde bu tür yakıtların kullanımı, hem atık yönetimini destekler hem de fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmaktadır. Plastik yakıtlar, piroliz veya gazlaştırma gibi yeşil kimya teknolojileriyle biyokütleden elde edilen yakıtlarla harmanlanabilir. Bu yakıtların içten yanmalı motorlarda veya enerji santrallerinde kullanımı, yanma verimliliği ve emisyon kontrolü açısından optimize edilmelidir. Ancak, bu süreçlerde kullanılan ekipmanlar (örneğin, yakıt besleme sistemleri, reaktörler, filtreler, yüksek sıcaklık ve basınç armatürleri vb.) kimyasal maddelere, yüksek sıcaklıklara ve potansiyel toksik gazlara maruz kalabilir. İSG açısından, bu ekipmanların tasarımı, ergonomisi, bakım prosedürleri ve çalışanların maruz kalabileceği risklerin (kimyasal sızıntılar, yangın, patlama) önlenmesi kritik önemdedir. Orman ve tarımsal atıklar ile kanalizasyon atık çamurunun bertarafında sıklıkla kullanılan biyokütle santralleri, yüksek sıcaklık ve basınçta çalışan kapların bulunduğu tesislerdir. Bu tesislerde boğucu/ tahriş edici/yanıcı toz ve/ veya kimyasal maruziyeti yanında kontrolsüz yanma ve patlama hem çevre hem de insan sağlığı açısından olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

- 1 Doktor, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, fatih.yasar@gop.edu.tr, 0000-0001-6005-2257
- 2 Yüksek Mühendis, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği ABD, yuksel2982@hotmail.com, 000-0002-2182-8574
- 3 Profesör Doktor, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, yakup.budak@gop.edu.tr, 0000-0001-7108-5548

Yanma sonucu elde edilen enerjinin elektrik enerjine dönüşüm süreçlerinde karşılaşılabilecek elektrik çarpması ve şokları yanı sıra yüksek frekans ve şiddette titreşim ve/veya sese maruz kalma gibi insanlarda geçici veya kalıcı engellilik durumu oluşturabilmektedir. Yeşil kimya prensiplerinin güvenli şekilde biyokütle enerji santrallerinde kullanımını ele alan bu bölümde, yanma ve enerji üretim süreçlerinde kullanılan ekipmanların çevresel ve sağlık risklerini azaltacak şekilde nasıl tasarlanıp optimize edilebileceğini, İSG standartlarına uygunluğunu ve çalışan güvenliğini sağlama yöntemlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Mevcut uygulamalar üzerinden harekete geçerek biyokütle enerji santrallerinde karşılaşılan risklerin, İSG yönetim sistemlerinin hem işveren hem işçi hem de çevresel faktörler açısından bir değerlendirme sunulmuştur.

1. GİRİŞ

1.1. Biyokütle Nedir?

Biyokütle yakıtlar, doğada hızlı bir şekilde yenilenebilen kaynaklardan, yani bitkisel materyaller, orman artıkları, hayvan gübreleri, kentsel atıklar ve gıda endüstrisi atıklarından elde edilen enerjiye dönüştürülebilen maddelerdir [1].

Biyokütle enerjisi, yenilenebilir enerji türlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu enerji, biyokütle yakıtlarının yakılmasıyla ortaya çıkan ısı enerjisinden elde edilir. Bu ısı, endüstriyel yüksek basınçlı kazanlarda kullanılarak buhara dönüştürülür ve bu buhar, türbin aracılığıyla elektrik enerjisi üretimini sağlar.

Dünya nüfusunun hızla artması, enerji talebinde büyük bir yükselişe neden olmuştur. Gelişen dünyada enerji ihtiyacının büyük kısmı fosil yakıtlardan karşılanırken, son yıllarda bu yakıtların çevreye verdiği zararlar, yenilenemez olmaları, geri dönüşü olmayan çevresel etkiler ve iklim değişikliği gibi sorunlar, ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Bu bağlamda, biyokütle enerji kaynaklarının kullanımı da önemli ölçüde artmıştır [2]. Biyokütle yakıtlarının yanma özellikleri dikkate alınarak, biyokütle enerji santrallerinde yanma odalarının tasarımı gerçekleştirilir. Ülkeler, enerji ihtiyaçlarını giderek daha fazla yenilenebilir kaynaklardan karşılamak için yatırımlarını artırmaktadır. Bu nedenle biyokütle yakıtlarıyla enerji üretimi, enerji sektöründe giderek daha fazla önem kazanmaktadır [1].

Zamanla biyokütle enerji üretiminin artması ve yeni tesislerin kurulmasıyla fosil yakıtlara olan bağımlılık azalacak, bu da çevre kirliliğinin önlenmesinde önemli bir rol oynayacaktır [3]. Biyokütle enerji santrallerinde üretim sürecinde, mal kabul işlemleri, yakıt besleme sistemleri, su temini, yüksek basınçlı buhar kazanlarında kullanılan ekipman ve armatürler,

yangın önleme sistemleri, havalandırma birimleri, türbin bölümü ve elektrik sistemleri gibi tüm ekipmanların iş sağlığı ve güvenliği açısından detaylı bir şekilde incelenmesi gerekir. Bu kapsamda, tesislerde kullanılan ekipman ve armatürlerin teknik özellikleri, tanımları, bu ekipmanların yol açabileceği potansiyel iş kazaları ve bu kazaları önlemek için alınabilecek önlemler ile teknik personelin mesleki yeterlilikleri değerlendirilmelidir [4]. Amaç, enerji santrallerinde çalışan personelin kullandığı ekipman ve armatürleri açık ve anlaşılır bir şekilde tanıması, bu ekipmanların prodesteki önemini kavraması, olası kazalar hakkında bilgi edinmesi, arızaların nedenlerini tespit edebilmesi ve iş kazaları ile meslek hastalıklarını önleyecek çözümler sunabilmesidir. Böylece daha güvenli bir çalışma ortamı oluşturulması, gelecekte tesislerde çalışacak personelin elinde yazılı bir rehber bulunması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi hedeflerine ulaşılmış olur.

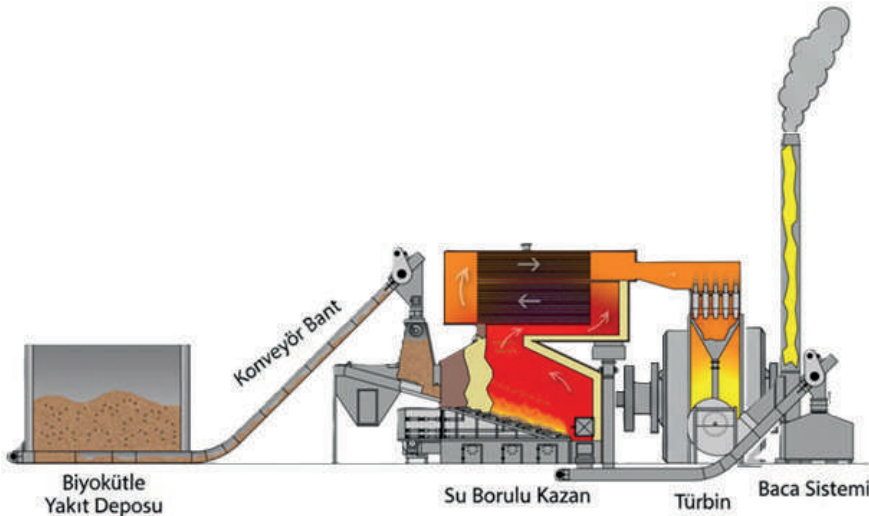
1.2. Biyokütle Enerji Santrali Nedir?

Biyokütle enerji santralleri, orman artıkları, evsel atıklar, gıda artıkları, tarımsal atıklar ve hayvan gübreleri gibi organik materyallerin yüksek basınçlı buhar kazanlarının yanma odalarında yakılmasıyla ortaya çıkan ısı enerjisini kızgın buhara dönüştürerek, bu buharın yüksek basınç altında türbin aracılığıyla elektrik enerjisi üreten tesislerdir [4]. Son yıllarda ülkemizde biyokütle enerji santrallerinin sayısı artmış ve enerji arzındaki payları geçmiş yıllara kıyasla yükselmiştir. Ancak, bu tesislerin kurulum ve üretim süreçlerinde çeşitli iş kazalarıyla karşılaşmaktadır. Bu kazaların azaltılması veya en aza indirilmesi için, tesiste görev alacak personelin mesleki yeterlilik belgelerine sahip olması, işe başlamadan önce kapsamlı iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinden geçmesi şarttır. Ayrıca, tesislerin kurulumundan üretim aşamasına kadar iş güvenliği uzmanlarının denetiminde ilerlemesi büyük önem taşır; aksi halde ciddi iş kazaları meydana gelebilir. Biyokütle tesislerinde elektrik enerjisi üretimi için mal kabul süreçleri, yakıt besleme sistemleri, tesisin ihtiyacı olan suyun iletkenlik ve sertlik değerlerinin düşürülerek hazırlanması, buhar kazanında buhar üretimi için gerekli ekipman ve armatürler ile türbin bölümündeki donanımlar, enerji üretim sürecinin birbirine bağlı halkaları olarak işlev görür. Bu ekipman ve armatürlerin, iş sağlığı ve güvenliğini riske atmayacak şekilde tasarlanması ve montajının yapılması gerekmektedir.

Biyokütle enerji santralleri gibi elektrik üretim tesisleri, çok sayıda ekipman, armatür ve mekanik bileşenin bir araya gelmesiyle oluşturulur. Bu ekipman ve armatürlerin her biri, tesisin işleyişinde kritik roller üstlenir. Bu nedenle, bu bileşenlerin işlevlerinin detaylı bir şekilde öğrenilmesi ve anlaşılması büyük önem taşır. Şekil 1'de, su borulu bir biyokütle enerji santralinin genel donanımlarını gösteren örnek bir akış şeması sunulmuştur.

Bu tür akış şemalarının, operatörlerin bulunduğu kumanda odalarında yer alması, tesisin işleyişinin bütünsel olarak kavranması açısından oldukça değerlidir.

Biyokütle enerji santralleri, orman atıkları, tarımsal artıklar ve kanalizasyon atıkları gibi organik materyallerin yakılmasıyla enerji üreten tesislerdir. Bu tesislerde çalışan personelin sağlığı, operasyonel süreçlerdeki çevresel ve teknik riskler nedeniyle özel bir dikkat gerektirir. Yanma işlemleri, kimyasal maddeler, yüksek sıcaklık ve basınç gibi faktörler, çalışanların fiziksel ve solunum sağlığını tehdit edebilecek çeşitli riskler oluşturur. Bu bölümde, biyokütle enerji santrallerinde çalışan personelin sağlığı açısından karşılaşılan riskler ve alınması gereken önlemler değerlendirilmektedir.



Şekil 1. Biyokütle enerji santrali yakıt deposu, konveyör bant, su borulu kazan, türbin ve baca sistemi şeması

1.2.1. Çalışan Sağlığını Tehdit Eden Riskler

1.2.1.1. Zehirli Gazlara Maruz Kalma

Biyokütle santrallerinde yakıtların yanması sırasında karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x) ve partikül maddeler gibi zararlı gazlar ve tozlar açığa çıkar [5]. Bu emisyonlara uzun süre maruz kalan çalışanlar, solunum yolu hastalıkları (örneğin, astım, bronşit), akciğer fonksiyonlarında azalma ve hatta uzun vadede kanser gibi ciddi sağlık sorunlarıyla karşı karşıya kalabilir [6, 7]. Özellikle baca gazı sızıntıları veya yetersiz havalandırma, bu riskleri artırır [8].

1.2.1.2. Yüksek Sıcaklık ve Basınçla İlgili Riskler

Buhar kazanları, kızgın buhar hatları ve kondensstop sistemleri gibi yüksek sıcaklık ve basınç içeren ekipmanlar yoluyla yanık, haşlanma veya patlama riski oluşabilmektedir [9]. Örneğin, kondensstoplardan çıkan sıcak kondenslerin yetersiz izolasyonu, çalışanların cilt teması yoluyla ciddi yaralanmalara maruz kalmasına neden olabilir [10]. Ayrıca, basınç düşürücü vanaların veya emniyet vanalarının arızalanması, degazör tankı patlamaları gibi ölümcül kazalara yol açabilir.

1.2.1.3. Mekanik ve Fiziksel Tehlikeler

Hava kilitleri, pompalar, vakum transmitterleri ve diğer mekanik ekipmanlarla çalışırken el sıkışması, uzuv kaybı veya mekanik arızalardan kaynaklanan kaza riskleri bulunmaktadır [4]. Özellikle hava kilitlerinin içinde yanmaya devam eden sıcak cürufarla temas, ciddi yanıklara neden olabilir. Ayrıca, yüksekte bulunan buhar sayaçlarına merdivenle erişim gibi güvenli olmayan uygulamalar, düşme riskini artırır.

1.2.1.4. Toz ve Kimyasal Maddelere Maruziyet

Biyokütle tesislerinde yakıt besleme üniteleri ve bunkerlerden kaynaklanan toz birikimleri, solunum yoluyla alındığında sağlık sorunlarına yol açabilir. Bu tozlar, yüksek sıcaklıkta tutuşarak yangın riski oluştururken, aynı zamanda solunum yolu tahrişine ve alerjik reaksiyonlara neden olabilir [11]. Ayrıca, su arıtma ve yumuşatma süreçlerinde kullanılan kimyasallar, deri teması veya solunum yoluyla çalışanların sağlığını olumsuz etkileyebilir.

1.2.1.5. Gürültü ve Titreşim

Pompalar, fanlar ve diğer ekipmanların ürettiği gürültü ve titreşim, uzun süreli maruziyet durumunda işitme kaybı, stres ve konsantrasyon bozukluklarına yol açabilir [12].

1.3. Yeşil Kimya Açısından Biyokütle Enerji Santralleri

Biyokütle enerji santralleri, atıkların bertaraf edilmesi ve enerji üretiminde yenilenebilir bir kaynak olarak değerlendirilmesi açısından önemli bir rol oynasa da, yeşil kimya ilkeleri çerçevesinde çevresel etkileri, insan, bitki ve hayvan sağlığı üzerindeki sonuçları dikkatle incelenmelidir.

Yakıtların kullanımı ve bertaraf süreci açısından değerlendirildiğinde biyokütle santrallerinde kullanılan yakıtlar, genellikle organik atıklardan oluşur ve bu atıkların yakılması, hem enerji üretimini sağlar hem de atık hacmini azaltır. Ancak, bu bertaraf işlemi sırasında önemli çevresel sorunlar

ortaya çıkabilir. Yakıt olarak kullanılan materyallerin toplanması, taşınması ve işlenmesi, yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının yoğun bir şekilde tüketilmesine yol açar. Ayrıca, bu süreçlerde kullanılan kimyasallar, su kaynaklarının kirlenmesine neden olabilir. Örneğin, kanalizasyon atıklarının işlenmesi sırasında açığa çıkan kimyasal maddeler, yerüstü ve yeraltı sularına sızarak ekosistemde ciddi tahribatlara yol açabilir.

Çevresel etkiler açısından değerlendirildiğinde biyokütle santrallerinin yanma süreçleri, baca gazı emisyonları aracılığıyla çevreye zararlı gazların salınımına neden olur. Karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x) ve partikül maddeler gibi emisyonlar, hava kirliliğine katkıda bulunur [13]. Bu gazlar, yağmur yoluyla asit yağmurlarına dönüşerek tarımsal alanlarda toprağın kimyasal yapısını bozup bitki örtüsüne zarar verebilir. Asit yağmurları, tarım ürünlerinin verimini düşürebilir ve gıda zincirini olumsuz etkileyerek hem bitki hem de hayvan sağlığını tehdit edebilir. Ayrıca, bu emisyonlar yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının asitleşmesine neden olarak su ekosistemlerini ve bu kaynaklara bağımlı olan canlıları riske atar.

İnsan sağlığı üzerindeki etkiler bakımından değerlendirildiğinde biyokütle santrallerinden yayılan zararlı gazlar, özellikle solunum yoluyla insan sağlığını olumsuz etkileyebilir. Baca gazındaki partikül maddeler ve zehirli gazlar, solunum yolu hastalıklarının (örneğin, astım, kronik obstrüktif akciğer hastalığı) yanı sıra kardiyovasküler rahatsızlıklar ve hatta kanser gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir [7]. Tesislerin yakınında yaşayan topluluklar, bu emisyonlara uzun süreli maruz kalma nedeniyle daha yüksek risk altındadır. Ayrıca, santrallerde kullanılan kimyasalların su kaynaklarına karışması, içme suyu yoluyla insan sağlığını dolaylı olarak tehdit edebilir.

Bitki ve hayvan sağlığı üzerindeki etkilerine bakıldığında biyokütle santrallerinin çevresel etkileri, bitki ve hayvan sağlığı üzerinde de önemli sonuçlar doğurur. Asit yağmurları, toprağın besin dengesini bozarak bitkilerin büyümesini engelleyebilir ve orman ekosistemlerinde biyoçeşitliliğin azalmasına yol açabilir. Hayvanlar, kirlenmiş su kaynaklarından veya zehirli gazların biriktiği alanlardan doğrudan ya da dolaylı olarak etkilenebilir [14]. Örneğin, su kaynaklarındaki kimyasal kirlilik, balıklar ve diğer sucul canlılar üzerinde toksik etkiler yaratabilir; bu da besin zincirinde bir domino etkisiyle diğer hayvan türlerini ve dolaylı olarak insanları etkileyebilir.

Yeşil kimya ilkeleri, çevresel etkileri en aza indiren, sürdürülebilir ve çevre dostu süreçler geliştirmeyi hedefler. Biyokütle enerji santrallerinde bu ilkeleri uygulamak için aşağıdaki adımlar önerilebilir:

1.3.1. Emisyon Kontrol Sistemlerinin İyileştirilmesi

Biyokütle enerji santrallerinde, yakıtların yanması sırasında açığa çıkan karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x), partikül maddeler ve diğer zararlı gazlar, hem çevresel hem de insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturur [13]. Bu emisyonların kontrol altına alınması, tesislerin çevresel ayak izini azaltmak, çevre ve insan sağlığını korumak ve yasal düzenlemelere uyum sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Yeşil kimya ilkeleri doğrultusunda, emisyon kontrol sistemlerinin iyileştirilmesi, biyokütle santrallerinin sürdürülebilirliğini artıran ve çevresel etkilerini en aza indiren temel bir adımdır. Bu kesimde, emisyon kontrol sistemlerinin iyileştirilmesi için uygulanabilecek stratejiler ve teknolojiler ele alınmaktadır.

1.3.1.1. Emisyon Ölçüm ve İzleme Sistemlerinin Kurulumu

Emisyon kontrolünün ilk adımı, baca gazı emisyonlarının sürekli ve doğru bir şekilde ölçülmesi ve izlenmesidir. Baca gazı analizörleri ve emisyon ölçüm cihazları, karbon monoksit, kükürt dioksit, azot oksitler, oksijen, karbondioksit, partikül madde ve baca gazı sıcaklığı gibi parametreleri ölçerek yanma verimliliğini değerlendirir. Bu cihazlar, tesisin yanma sürecinin optimize edilmesine olanak tanır ve çevresel standartlara uygunluğu sağlar. Örneğin:

İdeal Değerlerin Takibi: Katı yakıtlı sistemlerde karbon monoksit seviyesinin 100 ppm, oksijen oranının %5-6 ve karbondioksit oranının %14 civarında tutulması hedeflenir [15]. Baca gazı sıcaklıklarının ise 130-175 °C aralığında olması idealdir.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition: Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi) Entegrasyonu: Emisyon verilerinin SCADA sistemleri üzerinden gerçek zamanlı olarak izlenmesi, anormal durumlarda hızlı müdahale imkânı sağlar. Bu, hem yanma verimliliğini artırır hem de zararlı emisyonların atmosfere salınımını azaltır [16].

Eski Tesislerde Güncelleme: Yeni kurulan tesislerde emisyon ölçüm cihazları genellikle standart olarak bulunurken, eski tesislerde bu cihazların sonradan eklenmesi veya dışarıdan ölçüm hizmetleri alınması yaygın bir uygulamadır. Ancak, sürekli izleme için tesis içi cihazların kullanımı daha etkili ve güvenilirdir.

1.3.1.2. Gelişmiş Filtreleme ve Temizleme Teknolojilerinin Kullanımı

Biyokütle santrallerinde, baca gazındaki partikül maddelerin ve zararlı gazların azaltılması için ileri filtreleme ve temizleme teknolojileri kullanılmalıdır [17]:

Multisiklon ve Siklon Sistemleri: Bu sistemler, baca gazındaki katı partikülleri ayırmak için kullanılır. Yüksek verimli multisiklonlar, toz ve kül gibi partiküllerin büyük bir kısmını tutarak atmosfere salınımını önler [18].

Torbalı Filtreler: İnce partikül maddeleri yakalamada etkili olan bu filtreleme sistemi biyokütle santrallerinde sıkça tercih edilir. Düzenli bakım ve temizlik, bu filtrelerin etkinliğini artırır [18].

Elektrostatik Filtreler: Elektrik yüküyle partikülleri toplayarak baca gazını temizler. Bu sistemler, özellikle yüksek hacimli toz emisyonlarının kontrolünde etkilidir.

Kimyasal Gaz Temizleme (Scrubber) Sistemleri: Kükürt dioksit ve diğer asidik gazların nötralize edilmesi için ıslak veya kuru scrubber sistemleri kullanılabilir. Bu sistemler, asit yağmuru oluşumunu engelleyerek çevresel etkileri azaltır [19].

1.3.1.3. Yanma Sürecinin Optimizasyonu

Emisyon kontrolü, yalnızca filtreleme sistemleriyle değil, aynı zamanda yanma sürecinin optimize edilmesiyle de sağlanabilir:

Yakıt-Hava Oranının Dengelenmesi: Vakum transmitterleri ve hava kilitleri gibi cihazlar, yanma odasındaki hava- yakıt oranını optimize ederek verimli bir yanma sağlar [20]. Yüksek oksijen seviyeleri, ısının dışarı atıldığını; yüksek karbon monoksit seviyeleri ise verimsiz yanmayı işaret eder. Bu nedenle, yanma odasındaki hava dengesinin sürekli kontrol edilmesi gerekir.

Yakıt Kalitesinin İyileştirilmesi: Daha az kükürt ve kül içeren, ön işleme tabi tutulmuş biyokütle yakıtlarının kullanılması, zararlı emisyonları azaltır. Yakıtın nem içeriğinin kontrol edilmesi de yanma verimini artırır.

Otomatik Kontrol Sistemleri: PLC ve SCADA sistemleriyle entegre edilen otomatik kontrol mekanizmaları, yanma parametrelerini gerçek zamanlı olarak ayarlayarak emisyonları minimuma indirir.

1.3.1.4. Düzenli Bakım ve Denetim

Emisyon kontrol sistemlerinin etkinliğini sürdürebilmesi için düzenli bakım ve denetim yapılması gerekmektedir. Bu amaçla aşağıdaki basamaklar yapılabilir:

Filtre Temizliği: Multisiklon, torbalı filtre ve elektrostatik filtrelerin düzenli olarak temizlenmesi, partikül tutma kapasitesini korur ve tıkanıklık kaynaklı emisyon artışlarını önler.

Hava Kilitlerinin Kontrolü: Hava kilitleri, yanma odasına istenmeyen hava girişini engelleyerek alev püskürmesi ve zehirli gaz sızıntılarını önler. Bu cihazların düzenli bakımı, hem emisyon kontrolünü hem de çalışan güvenliğini artırır.

Kalibrasyon ve Test: Baca gazı analizörleri ve emisyon ölçüm cihazlarının düzenli kalibrasyonu, doğru veri sağlanmasını garanti eder. Ayrıca, tesislerin emisyon değerlerinin yerel ve uluslararası standartlara uygunluğu düzenli olarak denetlenmelidir.

1.3.1.5. Çevresel ve Yasal Uyumluluk

Biyokütle santralleri, çevresel düzenlemelere uyum sağlamak zorundadır. Avrupa Birliği'nin Hava Kalitesi Direktifleri veya Türkiye'de Çevre Kanunu gibi düzenlemeler, emisyon sınırlarını belirler [21]. Bu nedenle:

Tesisler, emisyon sınır değerlerine uygunluğu sürekli olarak belgelemeli ve raporlamalıdır. Çevresel etki değerlendirme (ÇED) raporları, tesislerin kurulum ve işletme aşamalarında emisyon kontrol sistemlerinin yeterliliğini değerlendirmek için kullanılmalıdır. Yenilenebilir enerji teşvikleri, emisyon kontrol teknolojilerine yatırım yapan tesisler için ek bir motivasyon sağlayabilir.

1.3.1.6. Çalışan ve Toplum Sağlığı İçin Önlemler

Emisyon kontrol sistemlerinin iyileştirilmesi, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çalışan ve çevredeki toplulukların sağlığını korur:

Çalışan Sağlığı: Tesis içinde zehirli gazlara maruziyeti azaltmak için uygun havalandırma sistemleri kurulmalı ve kişisel koruyucu donanımlar (solunum maskeleri, gözlükler) sağlanmalıdır.

Toplum Sağlığı: Emisyonların azaltılması, tesis çevresinde yaşayan toplulukların solunum yolu hastalıkları ve diğer sağlık sorunları riskini düşürür. Ayrıca, asit yağmuru gibi çevresel etkilerin önlenmesi, tarım alanlarını ve su kaynaklarını koruyarak toplum sağlığına dolaylı katkıda bulunur.

Biyokütle enerji santrallerinde emisyon kontrol sistemlerinin iyileştirilmesi, çevresel sürdürülebilirlik, insan sağlığı ve tesis verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Baca gazı analizörlerinin kullanımı, ileri filtreleme teknolojilerinin entegrasyonu, yanma süreçlerinin optimizasyonu ve düzenli bakım uygulamaları, zararlı emisyonların azaltılmasında etkili yöntemlerdir. Bu sistemlerin etkin bir şekilde uygulanması, hem çevresel

düzenlemelere uyumu sağlar hem de çalışanların ve çevredeki toplulukların sağlığını korur. Yeşil kimya ilkeleri doğrultusunda, emisyon kontrolüne yönelik yatırımlar, biyokütle santrallerinin uzun vadeli sürdürülebilirliğini ve toplumsal kabulünü artıracaktır [22].

1.3.2. Su Kaynaklarının Korunması

Biyokütle enerji santralleri, enerji üretim süreçlerinde yoğun su kullanımı gerektiren tesislerdir. Ham suyun kazan besisi suyu olarak hazırlanmasından, soğutma sistemlerine ve atıkların bertarafına kadar birçok aşamada yeraltı ve yerüstü su kaynakları tüketilmektedir. Ancak, bu süreçlerde kullanılan kimyasallar ve atık suların uygun şekilde yönetilmemesi, su kaynaklarının kirlenmesine yol açarak çevresel ekosistemler, insan, bitki ve hayvan sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilir. Yeşil kimya ilkeleri çerçevesinde, su kaynaklarının korunması, biyokütle santrallerinin çevresel sürdürülebilirliğini artırmak ve ekosistem dengesini korumak için kritik bir önceliktir [23]. Bu kesimde, su kaynaklarının korunması için uygulanabilecek stratejiler, teknolojiler ve yönetim yaklaşımları ele alınmaktadır.

1.3.2.1. Su Kullanımının Optimizasyonu

Biyokütle enerji santrallerinde su, kazan besisi suyu hazırlanması, buhar üretimi, soğutma sistemleri ve kimyasal arıtma süreçlerinde kullanılır. Su tüketimini azaltmak ve kaynakların sürdürülebilir kullanımını sağlamak için aşağıdaki yaklaşımlar benimsenmelidir:

Geri Dönüşüm Sistemleri: Atık suyun arıtılarak yeniden kullanılması, su tüketimini önemli ölçüde azaltır. Örneğin, kondensatlardan çıkan kondens suyunun izolasyonlu borularla toplanarak degazör tankına geri döndürülmesi, su kaybını en aza indirir.

Kapalı Devre Soğutma Sistemleri: Açık soğutma sistemleri yerine kapalı devre sistemlerin kullanılması, suyun buharlaşma yoluyla kaybını önler ve su tüketimini azaltır.

Su Kullanım Verimliliği Analizleri: Tesislerde su tüketiminin düzenli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi, gereksiz su kullanımını tespit ederek optimizasyon sağlar. Su sayaçları ve debimetreler, bu süreçte kritik bir rol oynar.

1.3.2.2. Atık Su Arıtımı ve Kimyasal Kirliliğin Önlenmesi

Biyokütle santrallerinde kullanılan kimyasallar (örneğin, su yumuşatma ve arıtma süreçlerinde kullanılan maddeler) atık su yoluyla yeraltı ve yerüstü

su kaynaklarına karışabilir. Bu kirliliği önlemek için ileri arıtma teknolojileri ve yönetim stratejileri uygulanmalıdır:

İleri Arıtma Teknolojileri: Atık suyun biyolojik, kimyasal ve fiziksel arıtma yöntemleriyle temizlenmesi, su kaynaklarına karışan toksik maddelerin miktarını azaltır. Membran filtrasyon, ters osmoz ve aktif karbon filtreleme gibi teknolojiler, kimyasal kirleticilerin uzaklaştırılmasında etkilidir.

Kimyasal Kullanımının Azaltılması: Yeşil kimya ilkelerine uygun olarak, toksik olmayan veya daha az zararlı kimyasalların kullanımı teşvik edilmelidir. Örneğin, biyolojik olarak parçalanabilen arıtma kimyasalları tercih edilmelidir.

Atık Su Depolama ve Kontrolü: Atık suyun kontrollü bir şekilde depolanması ve düzenli analizlerle kirlenme seviyelerinin izlenmesi, su kaynaklarına sızıntı riskini azaltır. Ayrıca, atık suyun doğrudan çevreye deşarj edilmesi yerine arıtma tesislerine yönlendirilmesi sağlanmalıdır.

1.3.2.3. Besi Suyu Kalitesinin İyileştirilmesi

Kazan besisi suyunun kalitesi, hem kazan verimliliği hem de su kaynaklarının korunması açısından kritik öneme sahiptir. Kalitesiz besisi suyu, kazan içinde kireçlenme, çamurlaşma ve boru tıkanıklıklarına yol açarak su tüketimini artırabilir ve atık su üretimini çoğaltabilir [24]:

Su Yumuşatma ve Arıtma Sistemleri: Ham sudaki kalsiyum, magnezyum ve diğer minerallerin uzaklaştırılması için su yumuşatma sistemleri kullanılmalıdır. İyon değiştirme reçineleri veya kimyasal arıtma yöntemleri, besisi suyunun kalitesini artırır.

Blöf Sistemlerinin Etkin Kullanımı: Yüzey ve dip blöf sistemleri, kazan içinde biriken çözünmemiş maddelerin ve çamurun atılmasını sağlayarak suyun iletkenlik değerlerini kontrol altında tutar. Otomatik motorlu blöf vanaları, bu süreci daha verimli hale getirir.

Kimyasal Yıkama: Kazanın düzenli olarak kimyasal maddelerle temizlenmesi, kireçlenme ve birikim sorunlarını önler. Ancak, bu işlemde kullanılan kimyasalların çevre dostu olması ve atık suların uygun şekilde arıtılması önemlidir.

1.3.2.4. Su Kaynaklarının Kirlenmesini Önleyici Tedbirler

Biyokütle santrallerinden kaynaklanan kirlilik, su ekosistemlerini ve dolaylı olarak insan, bitki ve hayvan sağlığını tehdit edebilir. Bu nedenle, aşağıdaki önlemler alınmalıdır:

Sızıntı Önleme: Tesislerdeki kimyasal depolama alanları, boru hatları ve atık su tankları düzenli olarak kontrol edilmeli, sızıntı riskine karşı sızdırmazlık önlemleri alınmalıdır. Örneğin, pislik tutucuların ve boru hatlarının düzenli temizliği, kimyasal birikimlerin su kaynaklarına ulaşmasını engeller.

Asit Yağmuru Kontrolü: Baca gazındaki kükürt dioksit ve azot oksitler, su buharıyla birleşerek asit yağmuruna neden olabilir. Bu durum, su kaynaklarının asitleşmesine ve ekosistemlerin zarar görmesine yol açar. Emisyon kontrol sistemlerinin (örneğin, scrubber sistemleri) kullanımı, asit yağmuru riskini azaltır.

Numune Alma ve Analiz: Tesislerden alınan su numunelerinin düzenli olarak laboratuvar ortamında analiz edilmesi, su kirliliği seviyesinin izlenmesini sağlar. Bu veriler, kirlilik kaynaklarının tespitinde ve önleyicilerin alınmasında rehber olur.

1.3.2.5. Çalışan ve Toplum Sağlığı İçin Su Kalitesinin Önemi

Kirlenmiş su kaynakları, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda insan sağlığı açısından da ciddi riskler oluşturur. Tesis çalışanlarının ve çevredeki toplulukların içme suyu veya tarım suyu yoluyla kimyasal maddelere maruz kalması, deri hastalıkları, sindirim sistemi rahatsızlıkları ve uzun vadeli toksik etkilere yol açabilir. Bu nedenle:

Çalışan Eğitimi: Personel, su arıtma ve kimyasal kullanım süreçleri hakkında eğitilmeli, kimyasal maddelerle çalışırken uygun kişisel koruyucu donanımlar (eldiven, maske, tulum) kullanılmalıdır.

Toplum Sağlığı: Tesislerin çevresindeki su kaynaklarının düzenli olarak test edilmesi ve kirlilik durumunda toplulukların bilgilendirilmesi, sağlık risklerini azaltır. Ayrıca, tesislerin su arıtma sistemlerine yaptığı yatırımlar, yerel toplulukların temiz suya erişimini destekleyebilir.

1.3.2.6. Yasal ve Çevresel Uyumluluk

Su kaynaklarının korunması, yerel ve uluslararası çevresel düzenlemelere uyum gerektirir. Türkiye’de Çevre Kanunu ve ilgili yönetmelikler, su kirliliği kontrolü için belirli standartlar belirlemektedir. Avrupa Birliği’nin Su Çerçeve Direktifi (Water Framework Directive) gibi uluslararası düzenlemeler de su kaynaklarının korunmasını teşvik eder. Bu bağlamda:

Tesisler, atık su deşarj limitlerine uymalı ve düzenli raporlama yapmalıdır.

Çevresel etki değerlendirme (ÇED) raporları, su kullanımı ve kirlilik önleme planlarını da içermelidir.

Su tasarrufu ve kirlilik önleme teknolojilerine yatırım yapan tesisler, çevresel teşviklerden faydalanabilir.

Özetle; biyokütle enerji santrallerinde su kaynaklarının korunması, çevresel sürdürülebilirlik, ekosistem dengesi ve insan sağlığı açısından hayati bir öneme sahiptir. Su tüketiminin optimize edilmesi, ileri arıtma teknolojilerinin kullanımı, besi suyu kalitesinin iyileştirilmesi ve kirlilik önleyici tedbirler, su kaynaklarının korunmasında temel stratejilerdir. Bu önlemler, hem çevresel düzenlemelere uyumu sağlar hem de tesislerin uzun vadeli verimliliğini artırır. Yeşil kimya ilkeleri doğrultusunda, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, biyokütle santrallerinin çevresel etkilerini azaltarak daha güvenli ve sağlıklı bir işletme ortamı yaratır.

1.3.3. Yakıt Kalitesinin İyileştirilmesi

Biyokütle enerji santralleri, orman atıkları, tarımsal artıklar, kanalizasyon çamurları ve diğer organik materyaller gibi biyokütle yakıtlarını kullanarak enerji üretir. Yakıt kalitesi, yanma verimliliği, emisyon seviyeleri, tesis ekipmanlarının ömrü ve çevresel etkiler üzerinde doğrudan bir rol oynar. Düşük kaliteli yakıtlar, yüksek kükürt, kül veya nem içeriği nedeniyle verimsiz yanmaya, artan emisyonlara ve ekipman hasarlarına yol açabilir [25]. Yeşil kimya ilkeleri çerçevesinde, yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, biyokütle santrallerinin çevresel ayak izini azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve insan, bitki ve hayvan sağlığını korumak için kritik bir öneme sahiptir. Bu bölümde, yakıt kalitesini iyileştirmek için uygulanabilecek stratejiler, teknolojiler ve yönetim yaklaşımları detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.

1.3.3.1. Yakıt Seçimi ve Ön İşleme

Biyokütle yakıtlarının kalitesi, içeriğindeki nem, kül, kükürt ve diğer kirleticilere bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Yakıt kalitesini iyileştirmek için aşağıdaki yaklaşımlar benimsenmelidir:

Yakıt Türlerinin Seçimi: Düşük kükürt ve kül içeriğine sahip biyokütle materyalleri (örneğin, temiz tarımsal artıklar veya sertifikalı odun peletleri) tercih edilmelidir. Kanalizasyon çamuru gibi yüksek kimyasal içeriğe sahip yakıtlar, yalnızca uygun ön işlemten geçirildikten sonra kullanılmalıdır.

Nem İçeriğinin Azaltılması: Yüksek nem içeriği, yanma verimliliğini düşürür ve daha fazla enerji kaybına yol açar. Yakıtın kurutulması için doğal kurutma (güneş veya hava ile) veya endüstriyel kurutma sistemleri (örneğin, döner tamburlu kurutucular) kullanılabilir. İdeal olarak, biyokütle yakıtlarının nem içeriği %10-20 aralığında olmalıdır.

Ön İşleme Teknolojileri: Yakıtların öğütülmesi, peletlenmesi veya briketlenmesi, homojen bir yapı sağlar ve yanma sürecini optimize eder. Ayrıca, biyokütlenin kimyasal içeriğini analiz ederek toksik maddelerin (örneğin, ağır metaller) uzaklaştırılması için kimyasal yıkama veya filtrasyon gibi yöntemler uygulanabilir.

Sınıflandırma ve Ayırma: Yakıtın içindeki taş, metal veya diğer yabancı maddeler, pislik tutucular ve manyetik ayırıcılar kullanılarak ayrıştırılmalıdır. Bu, hem yanma verimini artırır hem de ekipman hasarlarını önler.

1.3.3.2. Yanma Verimliliğini Artırmak

Yüksek kaliteli yakıtlar, daha verimli bir yanma sağlar ve zararlı emisyonları azaltır. Yakıt kalitesinin yanma sürecine etkisini optimize etmek için şu adımlar atılabilir:

Homojen Yakıt Karışımı: Farklı biyokütle türlerinin karıştırılması, yanma özelliklerini iyileştirebilir. Örneğin, yüksek nem içeren tarımsal atıklar, düşük nemli odun talaşı ile karıştırılarak daha stabil bir yanma sağlanabilir.

Yakıt Besleme Sistemlerinin İyileştirilmesi: Yakıt besleme ünitelerinin (örneğin, bunkerler) sızdırmazlık ve düzenli temizlik işlemleri, yakıtın tozlanmasını ve kirlenmesini önler. Ayrıca, otomatik besleme sistemleri, yakıtın yanma odasına düzenli ve kontrollü bir şekilde ulaşmasını sağlar.

Yanma Parametrelerinin İzlenmesi: Baca gazı analizörleri ve vakum transmitterleri, yakıtın yanma verimliliğini izlemek için kullanılmalıdır. Örneğin, karbon monoksit seviyesinin 100 ppm, oksijen oranının %5-6 ve karbondioksit oranının %14 civarında olması, verimli bir yanmayı işaret eder [15]. Düşük kaliteli yakıtlar, bu değerlerin dışına çıkarak verimsiz yanmaya neden olabilir.

1.3.3.3. Zararlı Emisyonların Azaltılması

Yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, çevresel emisyonların azaltılmasında doğrudan etkilidir:

Düşük Kükürtlü Yakıtlar: Kükürt içeriği yüksek yakıtlar, yanma sırasında kükürt dioksit (SO_2) emisyonlarına yol açar ve bu, asit yağmuru oluşumuna katkıda bulunur. Düşük kükürtlü biyokütle materyallerinin kullanımı, bu emisyonları azaltır.

Kül İçeriğinin Kontrolü: Yüksek kül içeriği, baca gazındaki partikül madde miktarını artırır ve filtre sistemlerinin daha sık tıkanmasına neden olur. Kül içeriği düşük yakıtların seçilmesi, hem emisyonları azaltır hem de filtre sistemlerinin bakım maliyetlerini düşürür.

Ağır Metal ve Toksik Madde Kontrolü: Özellikle kanalizasyon çamuru gibi atıklarda bulunan ağır metaller, yanma sırasında toksik emisyonlara yol açabilir. Yakıtın kimyasal analizi ve uygun ön işlemler, bu tür kirleticilerin çevreye salınımını önler.

1.3.3.4. Ekipman Ömrü ve İşletme Verimliliği

Düşük kaliteli yakıtlar, kazan ve diğer ekipmanlarda kireçlenme, korozyon ve tıkanıklık gibi sorunlara yol açarak bakım maliyetlerini artırır ve tesisin ömrünü kısaltır. Yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, bu sorunları azaltır:

Korozyon Önleme: Yüksek kükürt veya klor içeren yakıtlar, kazan borularında ve diğer metal yüzeylerde korozyona neden olabilir. Düşük kükürt ve klor içeriğine sahip yakıtların kullanımı, ekipmanların dayanıklılığını artırır.

Blöf Sistemlerinin Etkinliği: Yüksek kaliteli yakıtlar, kazan içinde daha az çözünmemiş madde birikimine yol açar. Bu, yüzey ve dip blöf sistemlerinin daha az sıklıkla kullanılmasına olanak tanır ve su tüketimini azaltır.

Enerji Verimliliği: Daha homojen ve düşük nem içeriğine sahip yakıtlar, daha yüksek kalorifik değer sunar ve enerji üretiminde verimliliği artırır. Bu, tesislerin yakıt sarfiyatını ve işletme maliyetlerini düşürür.

1.3.3.5. Çevresel ve Yasal Uyumluluk

Yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, çevresel düzenlemelere uyumu kolaylaştırır ve tesislerin çevresel etkilerini azaltır:

Emisyon Sınırlarına Uyum: Türkiye’de Çevre Kanunu ve uluslararası standartlar (örneğin, AB Hava Kalitesi Direktifleri), emisyon sınırlarını belirler. Yüksek kaliteli yakıtlar, bu sınırlara uyumu kolaylaştırır ve cezai yaptırımlardan kaçınmayı sağlar.

Sürdürülebilirlik Sertifikaları: Biyokütle yakıtlarının sürdürülebilir kaynaklardan temin edilmesi ve uygun şekilde işlenmesi, tesislerin çevresel sertifikalar (örneğin, FSC veya PEFC) almasını destekler.

Atık Yönetimi: Kanalizasyon çamuru gibi atıkların yakıt olarak kullanılması, atık yönetimini iyileştirir, ancak bu yakıtların toksik maddelerden arındırılması için ön işlem şarttır.

1.3.3.6. Çalışan ve Toplum Sağlığı İçin Önemi

Yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, çalışanların ve çevredeki toplulukların sağlığını korumada önemli bir rol oynar:

Çalışan Sağlığı: Düşük kaliteli yakıtların yanması sırasında açığa çıkan toz ve toksik gazlar, çalışanların solunum yolu hastalıkları ve cilt tahrişleri gibi sağlık sorunlarıyla karşılaşma riskini artırır. Yüksek kaliteli yakıtlar, bu riskleri azaltır ve daha güvenli bir çalışma ortamı sağlar.

Toplum Sağlığı: Emisyonların azalması, tesis çevresinde yaşayan toplulukların maruz kaldığı hava kirliliği ve asit yağmuru gibi riskleri düşürür. Ayrıca, toksik maddelerden arındırılmış yakıtlar, su ve toprak kirliliğini önleyerek toplum sağlığına katkıda bulunur.

1.3.3.7. Uygulama ve Yönetim Stratejileri

Yakıt kalitesini iyileştirmek için tesislerin aşağıdaki yönetim stratejilerini benimsemesi önerilir:

Yakıt Analizi ve Sertifikasyonu: Yakıtların kimyasal ve fiziksel özelliklerinin düzenli olarak analiz edilmesi, kalite standartlarına uygunluğunu garanti eder. Sertifikalı yakıt tedarikçileriyle çalışmak, bu süreci kolaylaştırır.

Tedarik Zinciri Yönetimi: Sürdürülebilir ve çevre dostu yakıt kaynaklarının seçilmesi, yerel biyokütle kaynaklarının kullanımını teşvik eder ve karbon ayak izini azaltır.

Eğitim ve Farkındalık: Tesis çalışanlarına yakıt kalitesinin önemi ve ön işlem yöntemleri hakkında eğitim verilmeli, yakıt depolama ve işleme süreçlerinde standart prosedürler uygulanmalıdır.

Biyokütle enerji santrallerinde yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, yanma verimliliğini artırmak, zararlı emisyonları azaltmak, ekipman ömrünü uzatmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için temel bir gerekliliktir. Nem içeriğinin azaltılması, toksik maddelerin ön işleme uzaklaştırılması, uygun yakıt seçimi ve yanma süreçlerinin optimizasyonu gibi stratejiler, hem tesis verimliliğini artırır hem de çevresel sürdürülebilirliği destekler. Yeşil kimya ilkeleri doğrultusunda, yüksek kaliteli yakıtların kullanımı, biyokütle santrallerinin çevresel ve toplumsal sorumluluklarını yerine getirmesine olanak tanır, aynı zamanda çalışan ve toplum sağlığını koruyarak daha güvenli bir işletme ortamı yaratır.

1.3.4. Düzenli Denetim ve Bakım

Biyokütle enerji santralleri, karmaşık sistemler ve yüksek riskli ekipmanlarla çalışır; bu nedenle düzenli denetim ve bakım, tesislerin güvenli, verimli ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Bu süreçler, ekipman arızalarını önler, emisyon seviyelerini kontrol altında tutar, iş kazalarını azaltır ve su kaynaklarının korunmasına

katkıda bulunur [26]. Yeşil kimya ilkeleri çerçevesinde, düzenli denetim ve bakım, çevresel etkileri en aza indirirken tesislerin uzun ömürlü olmasını ve enerji üretiminde verimliliği artırmasını sağlar. Bu bölümde, biyokütle enerji santrallerinde düzenli denetim ve bakım süreçlerinin önemi, uygulanacak stratejiler ve bu süreçlerin çevre, çalışan sağlığı ve tesis performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.

1.3.4.1. Ekipman Denetimi ve Bakım Planlaması

Biyokütle santrallerinde kullanılan kazanlar, pompalar, vanalar, filtre sistemleri, hava kilitleri, vakum transmitterleri ve emisyon ölçüm cihazları gibi ekipmanların düzenli denetimi ve bakımı, tesisin sorunsuz çalışmasını sağlar. Bu süreçler için şu adımlar önerilir:

Periyodik Denetim Programları: Tesislerde haftalık, aylık ve yıllık bakım planları oluşturulmalı, her ekipmanın kullanım kılavuzlarına uygun denetim aralıkları belirlenmelidir. Örneğin, pislik tutucuların süzgeçleri haftalık olarak kontrol edilmeli, blöf vanaları ve emisyon cihazları ise aylık olarak kalibre edilmelidir.

Durum Bazlı Bakım (Condition-Based Maintenance): Sensörler ve SCADA sistemleri aracılığıyla ekipmanların performansı gerçek zamanlı olarak izlenmeli, anormal durumlar (örneğin, pompa kavitasyonu veya filtre tıkanıklığı) tespit edildiğinde hedefe yönelik bakım yapılmalıdır.

Önleyici Bakım (Preventive Maintenance): Potansiyel arızaların önüne geçmek için düzenli bakım yapılmalı; örneğin, kazan borularında kireçlenme veya korozyon oluşumunu önlemek için kimyasal yıkama işlemleri gerçekleştirilmelidir.

Kayıt ve Raporlama: Her denetim ve bakım işlemi detaylı bir şekilde kaydedilmeli, bakım geçmişine dayalı analizlerle gelecekteki bakım ihtiyaçları öngörülmelidir.

1.3.4.2. Emisyon Kontrol Sistemlerinin Bakımı

Emisyon kontrol sistemleri, biyokütle santrallerinin çevresel etkilerini azaltmada kritik bir rol oynar. Bu sistemlerin düzenli bakımı, hem çevresel standartlara uyumu sağlar hem de çalışan ve toplum sağlığını korur:

Baca Gazı Analizörleri ve Emisyon Cihazları: Bu cihazların düzenli kalibrasyonu, karbon monoksit (100 ppm), oksijen (%5-6) ve karbondioksit (%14) gibi ideal emisyon değerlerinin doğru ölçülmesini garanti eder. Kalibrasyon yapılmayan cihazlar, yanlış veriler sunarak verimsiz yanmaya veya çevresel kirliliğe yol açabilir.

Filtre Sistemlerinin Temizliği: Multisiklonlar, torbalı filtreler ve elektrostatik filtreler, baca gazındaki partikül maddeleri tutar. Bu filtrelerin düzenli temizliği ve değiştirilmesi, tıkanıklıkları önler ve emisyonları azaltır. Örneğin, torbalı filtrelerin haftalık kontrolü ve temizliği, partikül emisyonlarını minimumda tutar.

Scrubber Sistemleri: Kükürt dioksit ve diğer asidik gazları nötralize eden scrubber sistemlerinin kimyasal maddeleri düzenli olarak yenilenmeli ve sistemin verimliliği test edilmelidir.

1.3.4.3. Su ve Atık Su Sistemlerinin Bakımı

Su kaynaklarının korunması ve kazan verimliliğinin sürdürülmesi için su ve atık su sistemlerinin düzenli bakımı şarttır:

Besi Suyu Sistemleri: Kazan besi suyu hazırlanmasında kullanılan su yumuşatma ve arıtma sistemleri düzenli olarak kontrol edilmeli, iyon değiştirme reçineleri veya filtreler yenilenmelidir. Bu, kazan içinde kireçlenme ve çamurlaşmayı önler.

Blöf Sistemleri: Yüzey ve dip blöf vanalarının düzenli kontrolü, kazan içinde biriken çözünmemiş maddelerin ve çamurun atılmasını sağlar. Otomatik motorlu blöf vanalarının çalışır durumda olduğundan emin olunmalı, aksi takdirde boru tıkanıklıkları veya kazan susuz kalma riski ortaya çıkabilir.

Atık Su Arıtma: Atık su arıtma sistemlerinin filtreleri ve membranları düzenli olarak temizlenmeli, kimyasal madde seviyeleri kontrol edilmelidir. Atık suyun çevreye deşarj edilmeden önce standartlara uygunluğu analiz edilmelidir.

1.3.4.4. Mekanik ve Güvenlik Ekipmanlarının Bakımı

Biyokütle santrallerinde kullanılan mekanik ekipmanlar, iş kazalarını önlemek ve sistem verimliliğini sürdürmek için düzenli olarak denetlenmelidir:

Hava Kilitleri: Cüruf deşarjı sırasında hava girişini önleyen hava kilitlerinin sıkışmaları veya arızaları, alev püskürmesi ve zehirli gaz sızıntılarına yol açabilir. Bu nedenle, hava kilitlerinin iç mekanizmaları düzenli olarak temizlenmeli ve sıcak cürufarla temas riskine karşı uyarılar yapılmalıdır.

Pompalar ve Vanalar: Pompaların emiş ağzlarındaki pislik tutucuların haftalık temizliği, kavitasyon riskini azaltır. Basınç düşürücü vanalar, emniyet vanaları ve minimum akış vanaları gibi mekanik bileşenlerin düzenli kontrolü, patlama veya susuz kalma gibi riskleri önler.

Buhar Sayaçları ve Sensörler: Buhar sayaçlarının ve ısı sensörlerinin elektriksel bağlantıları kontrol edilmeli, kablolar izolasyonlu ve blendajlı olmalıdır. Ayrıca, yüksekte bulunan sayaçlara erişim için korkuluklu platformlar inşa edilerek güvenli bakım sağlanmalıdır.

1.3.4.5. Çalışan Sağlığı ve Güvenliği İçin Bakım Uygulamaları

Düzenli denetim ve bakım, çalışanların iş sağlığı ve güvenliğini doğrudan etkiler:

Riskli Alanların Denetimi: Yüksek sıcaklık ve basınç içeren alanlar (örneğin, kızgın buhar hatları, kondensatörler) düzenli olarak kontrol edilmeli, izolasyon malzemeleri yenilenmelidir. Bu, yanık ve haşlanma risklerini azaltır.

Toz Kontrolü: Yakıt besleme üniteleri ve bunkerlerde biriken tozlar, yangın ve solunum yolu hastalıkları riski oluşturur. Bu alanların sızdırmazlık kontrolleri ve düzenli temizliği, çalışan sağlığını korur.

Eğitim ve Prosedürler: Bakım ekipleri, her ekipmanın güvenli bakım prosedürleri konusunda eğitilmeli, sistem durdurulmadan riskli müdahalelerden kaçınılmalıdır. Örneğin, hava kilitlerine veya kazan gözetleme kapaklarına bakım sırasında sistemin kapalı olduğundan emin olunmalıdır.

1.3.4.6. Çevresel ve Yasal Uyumluluk

Düzenli denetim ve bakım, çevresel düzenlemelere uyumu destekler ve tesislerin yasal sorumluluklarını yerine getirmesini sağlar:

Emisyon Standartlarına Uyum: Türkiye’de Çevre Kanunu ve uluslararası standartlar (örneğin, AB Hava Kalitesi Direktifleri), emisyon sınırlarını belirler. Düzenli bakım, emisyon kontrol sistemlerinin standartlara uygun çalışmasını sağlar.

Su Kirliliği Kontrolü: Atık su arıtma sistemlerinin düzenli bakımı, su kaynaklarının kirlenmesini önler ve Su Çerçeve Direktifi gibi düzenlemelere uyumu garanti eder.

Denetim Raporları: Tesisler, bakım ve denetim faaliyetlerini detaylı bir şekilde belgelemeli, çevresel etki değerlendirme (ÇED) raporları için bu verileri kullanmalıdır. Bu, hem yasal uyumluluğu sağlar hem de çevresel performansın izlenmesine olanak tanır.

1.3.4.7. Maliyet ve Verimlilik Avantajları

Düzenli denetim ve bakım, tesislerin işletme maliyetlerini düşürür ve enerji verimliliğini artırır:

Ekipman Ömrünün Uzatılması: Korozyon, kireçlenme ve tıkanıklık gibi sorunların önlenmesi, kazan, pompa ve filtre sistemlerinin ömrünü uzatır, böylece yenileme maliyetlerini azaltır.

Enerji Verimliliği: Temiz filtreler ve optimize edilmiş yanma sistemleri, yakıt tüketimini azaltır ve enerji üretiminde verimliliği artırır.

Arıza ve Duruşların Azaltılması: Önleyici bakım, beklenmedik arızaları ve üretim duruşlarını en aza indirir, bu da tesislerin ekonomik performansını iyileştirir.

Düzenli denetim ve bakım, biyokütle enerji santrallerinin güvenli, verimli ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için vazgeçilmez bir unsurdur. Emisyon kontrol sistemlerinin, su ve atık su sistemlerinin, mekanik ekipmanların ve güvenlik önlemlerinin düzenli bakımı, çevresel etkileri azaltır, çalışan sağlığını korur ve tesislerin uzun vadeli performansını artırır. Yeşil kimya ilkeleri doğrultusunda, bakım süreçlerinin sistematik bir şekilde uygulanması, çevresel düzenlemelere uyumu sağlar ve tesislerin toplum ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirir. Bu yaklaşım, biyokütle santrallerinin sürdürülebilir enerji üretiminde daha güvenilir ve çevre dostu bir rol oynamasını destekler.

1.3.5. Toplumsal Farkındalık ve Eğitim

Biyokütle enerji santralleri, yenilenebilir enerji üretiminde önemli bir rol oynasa da, çevresel etkileri, insan, bitki ve hayvan sağlığı üzerindeki potansiyel riskleri nedeniyle toplumsal farkındalık ve eğitim, bu tesislerin sürdürülebilirliğini ve toplumsal kabulünü artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Yeşil kimya ilkeleri çerçevesinde, çalışanların, yerel toplulukların ve diğer paydaşların biyokütle santrallerinin işleyişi, çevresel etkileri ve sağlık riskleri konusunda bilinçlendirilmesi, hem tesislerin güvenli işletilmesini sağlar hem de çevresel ve sosyal sorumlulukların yerine getirilmesine katkıda bulunur. Bu bölümde, toplumsal farkındalık ve eğitim süreçlerinin önemi, uygulanabilecek stratejiler ve bu süreçlerin çevre, sağlık ve tesis performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.

1.3.5.1. Çalışan Eğitimi ve İş Sağlığı Güvenliği

Biyokütle enerji santrallerinde çalışan personelin, tesisin karmaşık sistemleri ve potansiyel riskleri hakkında kapsamlı bir şekilde eğitilmesi, iş

kazalarını önlemek ve güvenli bir çalışma ortamı oluşturmak için temel bir gerekliliktir:

Ekipman ve Proses Eğitimi: Çalışanlar, kazanlar, pompalar, hava kilitleri, emisyon kontrol sistemleri, blöf vanaları ve diğer kritik ekipmanların doğru kullanımı ve bakım prosedürleri konusunda eğitilmelidir. Örneğin, hava kilitlerine müdahale sırasında sistemin durdurulması gerektiği veya yüksek sıcaklık içeren buhar hatlarında izolasyonun önemi gibi konular vurgulanmalıdır.

İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) Eğitimleri: Çalışanlar, zehirli gazlara maruziyet, yüksek sıcaklık ve basınç riskleri, toz birikiminden kaynaklanan yangın tehlikeleri ve mekanik ekipmanlarla ilgili riskler hakkında düzenli olarak bilgilendirilmelidir. Kişisel koruyucu donanımların (örneğin, solunum maskeleri, eldivenler, kulak koruyucular) doğru kullanımı konusunda pratik eğitimler verilmelidir.

Acil Durum Prosedürleri: Yangın, gaz sızıntısı, kazan patlaması veya diğer acil durumlar için tahliye planları ve ilk yardım eğitimleri düzenlenmeli, bu senaryolar düzenli tatbikatlarla pekiştirilmelidir.

Kimya ve Çevre Bilinci: Su arıtma ve yumuşatma süreçlerinde kullanılan kimyasalların güvenli kullanımı, atık su yönetimi ve emisyon kontrolü gibi konular, çalışanların çevresel sorumluluklarını anlamalarını sağlar.

1.3.5.2. Yerel Toplulukların Bilgilendirilmesi

Biyokütle santrallerinin çevresinde yaşayan topluluklar, tesislerin çevresel ve sağlık etkileri konusunda bilgilendirilmeli ve bu süreçlere dahil edilmelidir:

Emisyon ve Sağlık Riskleri Hakkında Bilgilendirme: Yerel halk, baca gazı emisyonlarının (örneğin, karbon monoksit, kükürt dioksit) solunum yolu hastalıkları ve asit yağmuru gibi potansiyel etkileri hakkında bilgilendirilmelidir. Tesislerin emisyon kontrol sistemleri ve çevresel uyumluluk çabaları, şeffaf bir şekilde paylaşılmalıdır.

Su ve Toprak Kirliliği Farkındalığı: Tesislerin su kaynaklarına ve tarım alanlarına olan etkileri, yerel topluluklarla açık bir şekilde tartışılmalı, atık su arıtma sistemlerinin önemi vurgulanmalıdır. Örneğin, asit yağmurunun tarım ürünlerine zarar verebileceği ve su arıtma sistemlerinin bu riski nasıl azalttığı açıklanabilir.

Toplumsal Katılım Programları: Tesisler, yerel topluluklarla düzenli toplantılar veya bilgilendirme seminerleri düzenleyerek geri bildirim almalı ve endişeleri ele almalıdır. Bu, tesislerin toplumsal kabulünü artırır ve güven oluşturur.

Çevresel İzleme Raporlarının Paylaşımı: Tesislerin emisyon, su kalitesi ve atık yönetimi verileri, yerel yönetimler ve halkla paylaşılmalı, böylece şeffaflık sağlanmalıdır.

1.3.5.3. Eğitim Programlarının İçeriği ve Yöntemleri

Toplumsal farkındalık ve eğitim programlarının etkili olabilmesi için kapsamlı ve erişilebilir bir içerikle sunulması gerekir:

Etkileşimli Eğitim Modülleri: Çalışanlar için interaktif simülasyonlar, videolar ve uygulamalı eğitimler, karmaşık teknik süreçlerin anlaşılmasını kolaylaştırır. Örneğin, SCADA sistemlerinin kullanımı veya baca gazı analizörlerinin yorumlanması gibi konular görselleştirilerek öğretilebilir.

Dil ve Kültüre Uygun Materyaller: Eğitim materyalleri, çalışanların ve yerel toplulukların diline ve kültürel bağlamına uygun olarak hazırlanmalıdır. Basit ve anlaşılır bir dil kullanımı, teknik bilginin daha geniş kitlelere ulaşmasını sağlar.

Sürekli Eğitim ve Güncellemeler: Teknolojik gelişmeler ve yeni çevresel düzenlemeler doğrultusunda eğitim programları düzenli olarak güncellenmelidir. Örneğin, yeni emisyon kontrol teknolojileri veya su arıtma yöntemleri hakkında yenilikçi eğitimler düzenlenmelidir.

Sertifikasyon Programları: Çalışanlara yönelik iş güvenliği ve çevre yönetimi sertifikasyon programları, hem bireysel yetkinlikleri artırır hem de tesislerin yasal uyumluluğunu güçlendirir.

1.3.5.4. Çevresel ve Sosyal Sorumluluk Eğitimi

Biyokütle santrallerinin çevresel etkilerini azaltmak için toplumsal farkındalık, yalnızca teknik bilgiyle sınırlı kalmamalı, aynı zamanda çevresel ve sosyal sorumluluk bilincini de kapsamalıdır:

Yeşil Kimya İlkelerinin Tanıtımı: Çalışanlar ve yerel topluluklar, yeşil kimya ilkeleri (örneğin, toksik madde kullanımının azaltılması, enerji verimliliği) hakkında bilgilendirilmeli, bu ilkelerin tesis operasyonlarına nasıl entegre edildiği açıklanmalıdır.

Sürdürülebilirlik Farkındalığı: Biyokütle enerjisinin yenilenebilir bir kaynak olarak avantajları ve çevresel riskleri dengeli bir şekilde sunulmalı, yerel toplulukların sürdürülebilir enerji üretimine katkısı vurgulanmalıdır.

Atık Yönetimi Eğitimi: Yakıt olarak kullanılan biyokütle atıklarının doğru şekilde toplanması, işlenmesi ve bertaraf edilmesi, hem çevre kirliliğini azaltır

hem de tesis verimliliğini artırır. Bu süreçlere yerel toplulukların katılımı teşvik edilmelidir.

1.3.5.5. İşbirlikleri ve Dış Paydaşlarla Eğitim

Toplumsal farkındalığı artırmak için tesisler, dış paydaşlarla işbirliği yaparak daha geniş kapsamlı eğitim programları düzenleyebilir:

Üniversiteler ve Araştırma Kurumları: Akademik kurumlarla işbirliği, biyokütle enerjisi ve çevresel etkiler üzerine eğitim programlarının geliştirilmesine katkı sağlar. Örneğin, emisyon kontrolü veya su arıtma teknolojileri üzerine seminerler düzenlenebilir.

Yerel Yönetim ve STK'lar: Yerel yönetimler ve sivil toplum kuruluşlarıyla ortak projeler, toplulukların çevresel farkındalığını artırır ve tesislerin sosyal sorumluluk projelerine katılımını güçlendirir.

Sektörel Eğitim Platformları: Enerji sektörü dernekleri veya çevre odaklı kuruluşlarla işbirliği, tesis çalışanlarına ve yerel halka yönelik profesyonel eğitim programları sunabilir.

1.3.5.6. Çalışan ve Toplum Sağlığı Üzerindeki Etkiler

Toplumsal farkındalık ve eğitim, çalışan ve toplum sağlığını doğrudan etkiler:

Çalışan Sağlığı: Eğitimli personel, zehirli gazlara maruziyet, yüksek sıcaklık riskleri ve mekanik tehlikeler gibi konularda daha bilinçli hareket eder. Örneğin, hava kilitlerine müdahale sırasında sistemin durdurulması gerektiğini bilen bir çalışan, ciddi iş kazalarından kaçınabilir.

Toplum Sağlığı: Yerel toplulukların emisyon ve su kirliliği riskleri hakkında bilgilendirilmesi, sağlık sorunlarının erken tespitini ve önlenmesini sağlar. Örneğin, asit yağmurunun tarım alanlarına etkileri hakkında bilinçli olan çiftçiler, koruyucu önlemler alabilir.

Psikososyal Faydalar: Tesislerin şeffaf iletişim ve eğitim programları, yerel halkta güven oluşturur ve tesislerin çevresel etkilerine yönelik endişeleri azaltır.

1.3.5.7. Yasal ve Çevresel Uyumluluk

Toplumsal farkındalık ve eğitim, tesislerin yasal ve çevresel sorumluluklarını yerine getirmesine de katkı sağlar:

Yasal Uyumluluk: Türkiye’de Çevre Kanunu ve İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, çalışanların eğitimi ve çevresel bilgilendirme süreçlerini zorunlu kılar. Eğitim programları, bu yasal gerekliliklere uyumu destekler.

Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED): Tesislerin çevresel etkilerinin halkla paylaşılması, ÇED raporlarının bir parçası olarak değerlendirilir. Eğitim programları, bu sürecin şeffaflığını artırır.

Sürdürülebilirlik Sertifikaları: Eğitimli personel ve bilinçli toplumlar, tesislerin çevresel sertifikalar (örneğin, ISO 14001) almasını kolaylaştırır.

Toplumsal farkındalık ve eğitim, biyokütle enerji santrallerinin çevresel, sosyal ve operasyonel sürdürülebilirliğini artırmak için vazgeçilmez bir unsurdur. Çalışanların teknik ve güvenlik eğitimleri, yerel toplumların çevresel riskler ve sağlık etkileri konusunda bilinçlendirilmesi, tesislerin hem daha güvenli hem de toplum tarafından daha kabul edilebilir olmasını sağlar. Yeşil kimya ilkeleri doğrultusunda, eğitim programları çevre bilincini güçlendirir, emisyon ve kirlilik risklerini azaltır ve tesislerin uzun vadeli performansını destekler. Bu süreç, biyokütle santrallerinin çevresel ve sosyal sorumluluklarını yerine getirerek daha sürdürülebilir bir enerji geleceğine katkıda bulunmasını sağlar.

Kaynakça

- [1] D. Małgorzata, K. Artur ve P. Stanisław, «Combustion Efficiency of Various Forms of Solid Biofuels in Terms of Changes in the Method of Fuel Feeding into the Combustion Chamber,» *Energies*, cilt 17, no. 12, p. 2853, 2024.
- [2] G. Hêriş, S. Heibatolah ve M. Cosimo, «The Impact of Economic Growth, Population, and Energy Consumption on Environmental Degradation: Evidence from OECD Countries,» *Environmental Science and Pollution Research*, cilt 30, no. 1, p. 94515–94536, 2023.
- [3] P. Preeti, G. Ru, C. Angzu ve P. Rajendra, «Navigating the Energy Transition in India: Challenges and Opportunities Towards Sustainable Energy Goal,» *Water-Energy Nexus*, 2025.
- [4] R. Annette C., C. Sharan L., L. Christopher M., P. Michael K., W. Susan, Q. Will ve L. Ari, «Potential Occupational Exposures and Health Risks Associated with Biomass-Based Power Generation,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, cilt 7, no. 12, pp. 8542-8605, 2015.
- [5] C. Sayın, M. K. Balki ve S. Erdoğan, Yakıtlar ve Yanma, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2021.
- [6] Z. Peng, B. Yu, G. Dong, X. Wang, K. Hou ve Y. Zhou, «Significant co-benefits of air pollutant and CO2 emission reduction from biomass energy utilization in power plants in China,» *Science of The Total Environment*, cilt 887, p. 164116, 2023.
- [7] Z. Lu, L. Yaojie, L. Jin, X. Ran, L. Xinlei, Z. Jinfeng, S. Guofeng, P. Bo, L. Xiangdong ve T. Shu, «Pollutant Emissions and Oxidative Potentials of Particles from the Indoor Burning of Biomass Pellets,» *Environmental Science & Technology*, cilt 58, no. 36, pp. 16016-16027, 2024.
- [8] B. Rahmat, C. F. Puri, E. S. Lubis, E. Krisnawaty, L. Qomariyah ve W. Siregar, «Literature Review: Health Impact of Coal Combustion Emissions in Power Plant on Adult Respiratory Systems,» *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, cilt 13, no. 2, pp. 11-19, 2021.
- [9] S. Zhongyuan, L. Dongfang, Y. Huaxiang, S. Zhiqiang, P. Wanjun, Z. Zhenlei, M. Bingkun ve J. Zhang, «The water hammer in the long-distance steam supply pipeline: a computational fluid dynamics simulation,» *Cogent Engineering*, cilt 9, no. 1, pp. 1-17, 2022.
- [10] A. O. S. a. H. «Boiler Operator Dies after Being Burned in Boiler Explosion,» OSHA, ABD, 2006.
- [11] Ç. Güler ve Z. Çobanoğlu, Enerji ve Çevre, Ankara: TC. Sağlık Bakanlığı Temel Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü, 1997.
- [12] L. Ziba, S. Soudabe, S.-A. Ahmad, M. Amir Houshang ve A. Majid, «Effect of Combined Exposure to Noise and Vibration on Hearing,» *Indian*

- Journal of Occupational and Environmental Medicine*, cilt 23, no. 3, pp. 121-125, 2019.
- [13] W. Mueller, M. Loh, S. Vardoulakis, H. J. Johnston, S. Steinle, N. Precha, W. Kliengchuay, K. Tantrakarnapa ve J. W. Cherrie, «Ambient particulate matter and biomass burning: an ecological time series study of respiratory and cardiovascular hospital visits in northern Thailand,» *Environmental Health*, cilt 19, no. 77, 2020.
- [14] A. Dizdar, E. Dizdar ve C. Dizdar, «Global Environmental Problems,» %1 içinde *Social ecological system approach for improving ecological literacy of youth*, Türkiye, Türkiye Ulusal Ajans, 2019, pp. 32-59.
- [15] T. Yılmaz ve H. Bulut, «Türkiye için yeni dış ortam sıcaklık tasarım değerleri,» %1 içinde *V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir: TMMOB Makina Mühendisler Odası, 2001.
- [16] B. Çakan, «Yenilenebilir enerji ve biyo yakıt tabanlı yakıt hücresi sistemleri ile gemilerde hotel yükleri için enerji ve güç yönetim sistemi tasarımı,» Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, 2025.
- [17] M. T. Lim, A. Phan, D. Roddy ve A. Harvey, «Technologies for measurement and mitigation of particulate emissions from domestic combustion of biomass: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 49, pp. 574-584, 2015.
- [18] İ. Kul, «Partikül madde özelliklerinin, emisyonlarının ve dağılımının hava kalitesinin kontrolünde yeri ve önemi,» Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1991.
- [19] B. Comer, E. Georgeff ve L. Osipova, «Air emissions and water pollution,» ICCT Consulting Report, Washington DC, 2020.
- [20] «A computational fluid dynamics investigation of the utilization of waste biomass fuels for syngas production in a downdraft reactor,» *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 14, no. 4, pp. 1074-1087, 2024.
- [21] T. C. M. B. Sistemi, «Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği,» 2008. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12188&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>. [Erişildi: 15 Ekim 2025].
- [22] F. V. Boz ve A. Yönetken, «Biyokütle enerji santrallerinde emisyon,» %1 içinde *5th International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences Congress*, Bosnia and Herzegovina, 2021.
- [23] Ö. Demir, M. Yıldız, Ü. Sercan ve C. Ş. Arzum, «Atıksuların Geri Kazanılması ve Yeniden Kullanılması,» *Harran University Journal of Engineering*, cilt 2, pp. 1-14, 2017.
- [24] E. Gödekmerdan, *Kurutulmuş Arıtma Çamurunu Biyokömürleştirerek Kullanım Olanaklarının Araştırılması*, İzmir: Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.

- [25] K. Al, «Biyokütle Enerji Santralleri İçin Tarımsal Atıklar: Şanlıurfa İlinde Tarımsal Atık ve Artıkların Değerlendirilmesi,» *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, cilt 4, no. 2, pp. 67-76, 2021.
- [26] S. Karayılmazlar, N. Saraçoğlu, Y. Çabuk ve R. Kurt, «Biyokütlenin Türkiye’de enerji üretiminde değerlendirilmesi,» *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, cilt 13, no. 19, pp. 63-75, 2011.

İmmün Sistemi Üzerinde Etkili Bitkiler¹

Hasan Basri Karayel

Özet

İmmün sistem, organizmanın enfeksiyonlara, malignitelere ve çevresel stres faktörlerine karşı korunmasında temel rol oynayan karmaşık bir savunma ağıdır. Son yıllarda, bitkisel kökenli biyoaktif bileşiklerin immün yanıtı modüle edici etkileri hem tamamlayıcı tıp hem de modern farmakoloji alanında artan bir ilgi odağı haline gelmiştir. Bu çalışmada, immün sistem üzerinde etkili olan başlıca tıbbi bitkiler; yetiştirme koşulları, ekolojik faktörler, kimyasal bileşen profilleri ve moleküler etki mekanizmaları açısından kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Ayrıca flavonoidler, polisakkaritler, terpenoidler ve alkaloidler gibi fitokimyasal sınıfların bağışıklık hücreleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bu çalışma, 2020–2025 yılları arasında yayımlanmış güncel deneysel ve klinik veriler temelinde, bitkisel ürünlerin immün sistem üzerindeki potansiyel terapötik rollerini bilimsel bir çerçevede sunmayı amaçlıyoruz.

1. Giriş

İnsanlık tarihi boyunca bitkiler, hastalıkların önlenmesi ve tedavisinde temel bir kaynak olmuştur. Antik Mısır, Mezopotamya, Çin ve Hint uygarlıklarında yazılı tıbbi metinler, bağışıklığı güçlendirdiği düşünülen birçok bitkinin kullanımını belgelemektedir. Örneğin *Panax ginseng*, binlerce yıldır Asya tıbbında yaşam enerjisini artıran ve hastalıklara karşı direnci güçlendiren bir bitki olarak kabul edilmiştir (Kim, 2020). Orta Çağ Avrupa'sında ve İslam tıbbında, *Allium sativum* (sarımsak) ve *Nigella sativa* (çörek otu) gibi bitkiler enfeksiyonlara karşı koruyucu özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmıştır. İbn Sina'nın "El-Kanun fi't-Tıbb" adlı eserinde, bağışıklığı destekleyen bitkisel karışımlara dair ayrıntılı bilgiler yer almaktadır (Al-Rawi & Al-Basheer ve ark., 2021). 19.ve 20. yüzyıllarda sentetik ilaçların

1 Doç. Dr. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Gediz Meslek Yüksekokulu Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Kütahya, TÜRKİYE, kbasri23@hotmail.com, ORCID NO: 0000-0002-4271-0540

gelişimi bitkisel tedavilerin geri planda kalmasına neden olmuş olsa da, antibiyotik direnci, kronik inflamatuvar hastalıklar ve immün yetmezliklerin artışı bitkisel immünomodülatörlere olan ilgiyi yeniden artırmıştır. Günümüzde modern fitofarmakoloji, geleneksel bilgileri moleküler biyoloji ve immünoloji ile birleştirerek bitkisel ürünlerin etki mekanizmalarını bilimsel olarak ortaya koymaktadırlar (Newman & Cragg, 2020). İmmün sistem, doğuştan gelen (innate) ve kazanılmış (adaptif) bileşenlerden oluşan, organizmanın iç dengesini korumada hayati öneme sahip bir biyolojik savunma mekanizmasıdır. Bu sistem; patojen mikroorganizmalar, toksik maddeler ve anormal hücrelere karşı spesifik ve non-spesifik yanıtlar geliştirerek homeostazın sürdürülmesini sağlamıştır (Abbas et al., 2021). Modern yaşam koşulları, çevresel kirlilik, stres, yanlış beslenme alışkanlıkları ve kronik hastalıkların artışı, immün sistem fonksiyonlarında bozulmalara yol açmakta ve immün destekleyici yaklaşımlara olan ihtiyacı artırmaktadır. Bitkiler, binlerce yıldır geleneksel tıp sistemlerinde bağışıklık güçlendirici, enfeksiyon önleyici ve iyileştirici amaçlarla kullanılmıştır. Geleneksel Çin Tıbbı, Ayurveda ve Anadolu halk hekimliği gibi sistemlerde birçok bitki, immün direnci artırıcı özellikleriyle ön plana çıkmıştır. Günümüzde bu geleneksel bilgilerin, modern bilimsel yöntemlerle doğrulanması ve mekanizmalarının açıklanması, fitoterapinin bilimsel temellerini güçlendirmiştir (Pan et al., 2022). Bitkisel immünomodülatörler, bağışıklık sistemini doğrudan uyarabilen, baskılayabilen veya dengeleyebilen doğal bileşikler içermektedir. Bu bileşikler, makrofaj aktivasyonu, doğal öldürücü (NK) hücre fonksiyonları, T ve B lenfosit proliferasyonu ile sitokin üretimi gibi temel immün süreçleri etkileyebilmektedir (Sharifi-Rad et al., 2021). Özellikle flavonoidler, polisakkaritler ve terpenoidler gibi fitokimyasal gruplar, immün yanıtın düzenlenmesinde merkezi rol oynamaktadır. Sağlıklı bir yaşam sürdürmek için bağışıklık sisteminin güçlü olması gerekir. Vücuttan alınan besin kaynakları; yağ, karbonhidrat ve protein metabolizmasında kullanılan vitamin ve minerallerin eksikliği durumunda, dışarıdan takviye de bağışıklık sistemini destekler. Aynı zamanda, kullanılacak ilaçlar veya gıdalarla istenen veya istenmeyen etkileşimler meydana gelir. Bu etkileşimler hastalıklara yol açacak kadar hayati öneme sahipmiştir (Çetin, 2020). Geleneksel tıpta veya gıda takviyesi olarak en sık kullanılan bazı otsu bitkilerin başlıca immünomodülatör özelliklerinin odaklanmıştır. *Andrographis paniculata*, *Astragalus propinquus/membranaceus*, *Nigella sativa*, *Elettaria cardamomum*, *Echinacea*, *Zingiber officinale*, *Glycyrrhiza glabra*, *Lentinula edodes* ve *Curcuma longa*. Bu bitkiler, popülerlikleri, takviye olarak erişilebilirlikleri, bağışıklık sistemi üzerindeki bilinen etkileri ve özleri ve aktif bileşenleri üzerinde yapılan bilimsel araştırmaların miktarı temel

alınarak seçilmiştir. Bu bitkilerin immünomodülatör etki mekanizmalarıyla ilişkili olarak anti-enflamatuvar, antioksidan ve anti-kanser özelliklerini de ele almışlardır (Kadiyska ve ark.,2023) İmmünomodülasyon kavramı, Edward Jenner tarafından 1796 yılında çocuk felci aşısı üzerinde çalışırken ortaya atılmıştır. Güçlü ve iyi işleyen bir bağışıklık sistemi, mükemmel sağlığın temel taşıdır. Bağışıklık tepkileri, bağışıklık sisteminin doğuştan gelen (doğal ve spesifik olmayan) ve edinilmiş (adaptif ve spesifik) bileşenleri arasındaki etkili bir etkileşimin sonucudur. Bağışıklık sisteminin dengesizliği veya yetersizliği, alerjiler, otoimmün hastalıklar, kanserler ve diğer birçok kronik hastalıkla ilişkilidir. Bu çok yönlü ağ organizasyonuna dahil olan çeşitli doğuştan gelen ve adaptif bağışıklık hücreleri, belirli bağışıklık hastalıklarını tedavi etmek için immünoterapötiklerin geliştirilmesi için potansiyel hedefler olabilir. Hem avantajları hem de dezavantajları olan çeşitli doğal, sentetik ve rekombinant bileşikler mevcuttur (İlyas ve ark.,2016). insanlığın varoluşu boyunca tarih boyunca çeşitli hastalıklar ortaya çıkmış ve bu hastalıklara çözüm bulmak amacıyla, doğadan ve deneyimden elde edilen bilgilerle geleneksel tedavi yöntemlerinin ve dolayısıyla geleneksel tıbbın temelleri atılmıştır. Dünyada birçok farklı geleneksel tedavi yöntemi bulunmaktadır. Bu çalışmada, günümüzde bile en yaygın tedavi yöntemlerini içeren geleneksel Çin tıbbına odaklanılmıştır. Birçok tedavi yönteminin hızla eskidiği ve modern tıbbi tedavi yöntemleriyle değiştirildiği günümüz koşullarında bile geleneksel Çin tıbbı önemini korumaktadır. Aslında, geleneksel Çin tıbbına olan ilgi her geçen gün artmıştır (Taştan, 2021). Tıbbi bitkilerin immün sistem üzerindeki etkileri yalnızca genetik özelliklerine değil, aynı zamanda yetiştirildikleri çevresel koşullara da doğrudan bağlıdır. İklim, toprak yapısı, rakım, güneş ışığı, su stresi ve biyotik stres faktörleri, bitkilerin fitokimyasal bileşimini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu çevresel faktörler, bitkilerde sekonder metabolitlerin sentezini artırarak immünomodülatör etkinliği doğrudan etkileyebilmiştir (Verma & Shukla, 2021). Toprak mineral içeriği, özellikle flavonoid ve fenolik bileşiklerin sentezinde önemli bir rol oynamaktadır. Azot, fosfor ve potasyum gibi makro besin elementlerinin dengeli düzeylerde bulunması, bitkilerin antioksidan ve immün destekleyici kapasitesini artırmaktadır. Örneğin Echinacea purpurea'nın farklı toprak tiplerinde yetiştirilmesi, polisakkarit ve alkilamid içeriğinde anlamlı farklılıklara yol açmakta ve bu durum bitkinin makrofaj aktivasyonu üzerindeki etkisini değiştirmiştir (Binns et al., 2022). İklimsel stres faktörleri, özellikle kuraklık ve sıcaklık dalgalanmaları, bitkilerde savunma amaçlı sekonder metabolit üretimini artırmıştır. Bu durum, bitkilerin immün sistemi modüle edici etkilerinin güçlenmesine neden olabilmektedir. Akdeniz iklimine özgü bitkilerde yüksek düzeyde fenolik

bileşiklerin bulunması, bu bitkilerin antiinflamatuvar ve immün düzenleyici özelliklerini açıklayan önemli bir faktör olarak kabul edilmiştir (Tundis et al., 2020). Ayrıca hasat zamanı ve bitkinin gelişim evresi, fitokimyasal içeriği önemli ölçüde etkilemektedir. Çiçeklenme döneminde toplanan bitkilerin flavonoid içeriğinin daha yüksek olduğu, buna karşılık kök ve rizomlarda polisakkarit konsantrasyonlarının olgunluk döneminde arttığı bildirilmiştir. Bu nedenle, immün sistemi etkileyen bitkilerin standartlaştırılmış yetiştirme ve hasat protokollerine göre üretilmesi, terapötik etkinliğin sürekliliği açısından büyük önem taşımıştır (Sasidharan et al., 2021).

Bu çalışmanın amacı, immün sistem üzerinde etkili olan başlıca bitkileri; yetiştirme ve ekolojik özellikleri, kimyasal bileşen profilleri ve moleküler etki mekanizmalarıyla birlikte bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektir. Böylece bitkisel ürünlerin bilinçli ve bilimsel temelli kullanımına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. Kimyasal Bileşenlerin Sınıflandırılması

İmmün sistemi etkileyen bitkilerin farmakolojik aktivitesi, büyük ölçüde içerdiği fitokimyasal bileşiklerin çeşitliliğine ve konsantrasyonuna bağlıdır. Bu bileşikler genel olarak flavonoidler, polisakkaritler, terpenoidler, alkaloidler, saponinler ve fenolik asitler gibi ana sınıflar altında incelenmektedir.

2.1. Flavonoidler

Flavonoidler, bitkilerde yaygın olarak bulunan polifenolik bileşiklerdir ve güçlü antioksidan özellikleri ile bilinmektedir. Kuersetin, luteolin, apigenin ve kateşin gibi flavonoidler; T lenfosit proliferasyonu, makrofaj aktivasyonu ve sitokin üretimi üzerinde düzenleyici etkilere sahiptir. Bu bileşiklerin, NF- κ B ve MAPK sinyal yollarını inhibe ederek aşırı inflamatuvar yanıtları baskıladığı gösterilmiştir (Li et al., 2021).

2.2. Polisakkaritler

Bitkisel polisakkaritler, özellikle doğuştan gelen bağışıklık yanıtını aktive eden önemli immünomodulatorlerdir. Astragalus membranaceus ve Ganoderma lucidum gibi bitkilerden izole edilen polisakkaritlerin, makrofajlar ve dendritik hücreler üzerinde Toll-like reseptörler aracılığıyla etkili olduğu bildirilmektedir. Bu etki, sitokin üretiminin artması ve fagositik aktivitenin güçlenmesiyle sonuçlanmıştır (Zhang et al., 2022).

2.3. Terpenoidler ve Saponinler

Terpenoidler ve saponinler, hem doğuştan gelen hem de adaptif immün yanıt üzerinde etkili olan bileşiklerdir. Ginsenositler gibi triterpenoid saponinlerin, NK hücre aktivitesini artırdığı ve Th1/Th2 dengesini düzenlediği gösterilmiştir. Bu bileşiklerin aynı zamanda adjuvan özellik göstererek aşı yanıtlarını güçlendirebileceği bildirilmiştir (Kim et al., 2021).

2.4. Alkaloidler ve Fenolik Asitler

Alkaloidler ve fenolik asitler, immün yanıtın baskılanması veya düzenlenmesi üzerinde etkili olabilmektedirler. Berberin ve kafeik asit gibi bileşiklerin, inflamatuvar sitokinlerin aşırı üretimini azaltarak immün homeostazi desteklediği ifade edilmiştir (Imenshahidi & Hosseinzadeh, 2020).

3. İmmün Sisteminde Etkili Bitkiler

3.1. *Echinacea purpurea* — Ekinezya

E. purpurea mor ekinezya olarak bilinir, gövdesi 60-180 cm boyunda, dik ve güçlü bir dallanma gösterir. Genellikle yumuşak kısa tüylerle çevrili bir gövdesi bulunurmuş. En alttaki yaprakları oval ila geniş mızrak şeklindeymiş ve düzensiz tırtıklı yapıda seyredermiş (bu türü ayırt etmek için en belirgin özellik diyebilmekteyiz). Merkez koninin uçları genellikle parlak turuncu uçluymuş (ikinci en iyi ayırt edici özellik denilebilirmiş). Merkez koninin dikenleri, koninin gövdesinin yarısı kadarmış. Taç yaprakları, gülden koyu mora, nadiren beyaza kadar değişirmiş. Açık ormanlarda, çayırlarda ve çalılıklarda daha çok görülmekteymiş (Kindscher ve ark., 2016). Kuzey Amerika kökenli, ılıman iklimlere adapte çok yıllık bir bitkidir; iyi drene edilmiş, organik madde zengin toprakları ve tam güneşi tercih eder. Ekinezya kökenli ekstrelerde ağırlıklı olarak **polisakkaritler, alkilamidler ve fenolik asit türevleri** bulunurmuş. Bu bileşenler makrofaj ve dendritik hücre aktivasyonunu, fagositozu ve belirli pro- ve anti-inflamatuvar sitokin dengesini etkiler; etkiler büyük ölçüde **TLR aracılı** sinyalleme ve NF-κB modülasyonunu içermiş (Nicolussi ve ark., 2022).

3.2. *Panax ginseng* — Ginseng

P. ginseng bitkisinin ana vatanının Çin olup, Çin hekimliğinde çok eski tarihlerden beri biliniyormuş (Baytop,1991; Apaydın ve ark., 2018). Doğu Asya'da yerli olan, Çin, Kore ve Japonya'da kültürü yapılan, 30-50 cm boyunda çok yıllık, otsu bir bitkiymiş. Kökleri kalın ve dallanmış

olup, yaprakları palmat parçalı ve 5 foliollüdür ve bitkinin üst kısımlarında bulunurmuş. Çiçekleri beyaz renkli, umbella durumunda olup meyvesi kırmızı bir bakka olan bir bitkiymiş (Tanker ve ark., 1993; Apaydın ve ark., 2018). Asya orijinli, gölgeli orman zeminleri ve serin nemli iklimlerde yetişen bir kök bitkisiymiş; kökler birkaç yıl olgunlaştırıldıktan sonra hasat edilirmiş. Kimyasal profilde ginsenozidler (triterpenoid saponinler), polisakkaritler ve poliasetilenler baskınmıştır. Ginsenozidler NK hücre aktivitesini artırır, Th1/Th2 dengesini etkiler ve JAK/STAT ile NF- κ B yolaklarını modüle ederek immün homeostaza katkı sağlamış (Hyun ve ark., 2022).

3.3. *Curcuma longa* — Zerdeçal

Vatan Hindistan olmakla beraber çoğu tropik bölgelerde yetiştirilmiş (Polatlı, 2008). Çin, Güney Doğu Asya ve Hindistan'da baharat, gıda koruyucu ve gıda boyası olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Zerdeçal ipek kumaslar ve ince derilerin boyanmasında ve kına yakmada da renklendirici olarak kullanılmıştır (Karadağ, 2007). Tropikal/subtropikal iklim bitkisi; rizomlar ticari olarak kullanılmış. Ana biyoaktif bileşeni kurkumin olup ayrıca polifenoller ve uçucu yağlar içerirmiş. Kurkumin güçlü anti-inflamatuvar ve antioksidan özellik gösterirmiş; NF- κ B ve MAPK yollarını inhibe eder, proinflamatuvar sitokinleri (TNF- α , IL-6) azaltır ve antiinflamatuvar sitokinleri desteklermiş (Yuandani et al., 2021).

3.4. *Nigella sativa* — Çörek otu

Nigella sativa tohumlarına M.Ö 133-1323 yıllarında hüküm süren Mısır'ın 18. hanedanı olan Tutankhamon'un mezarında karşılaşılmıştır. Çörek otu tohumlarının Tutankhamon'un ölümünden sonraki hayatında daha iyi bir hayat geçirmesi için konulduğu düşünülmektedir. Ancak mezar kalıntılarının olmasına rağmen Eski Mısır'da çörek otunun kullanıldığına veya etkisinin bilindiğine dair net bir bulgu mevcut değildir. Bununla beraber Mısır kraliçesinin de (Kleopatra) çörek otu yağını, güzellik ve sağlık amaçlı faydalandığı belirtilmektedir. Modern tıbbın kurucusu olarak kabul edilen Hipokrat'ın sindirim sistemi ve karaciğerin güçlendirilmesi amacı ile kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca çörek otu tohumlarının Hipokrat tarafından akrep ve yılan sokmaları, tümörler, cilt döküntülerinde ve sivilce tedavisi, soğuk algınlığında, baş bölgesi iltihaplarında kullanıldığından da bahsedilmiştir (Gün, 2012). Akdeniz ve Orta Doğu kökenli, kuraklığa dayanıklı bir bitkidir; tohumları tıbbi olarak kullanılmış. Tohumlarda yüksek oranda timoquinon (TQ), uçucu yağ ve fenolikler bulunurmuş. TQ hem antiinflamatuvar hem de immünomodülatör etki gösterir; NF- κ B baskılanması, antioksidan mekanizmaların güçlenmesi ve sitokin profili

modulasyonu ile immün homeostaza katkı sağladığı bildirilmiştir (Ciesielska-Figlon, 2023).

3.5. *Camellia sinensis* — Yeşil çay

Sudan sonra dünyada en fazla tüketimi tercih edilen çay, şu anda tek bir tür olarak kabul edilen *Camellia sinensis* bitkisinden elde edilir. *Sinensis* ve *Assamica* olmak üzere iki ana türü vardır. Ana türler arasında gözlenen bariz fark yaprak boyutuymuş. *Sinensis* türü küçük yapraklıdır (5-12 cm), *Assamica* çeşidi ise 20 cm uzunluğuna kadar yapraklara sahip olabilirmiş (Graham, 1992). Çay bitkisi, subtropikal iklimi tercih eder; yapraklardan epigallokateşin gallat (EGCG) ve kateşinler elde edilir. EGCG antioksidan ve NF- κ B baskılayıcı özellik gösterir; proinflatuvar sitokin üretimini azaltır ve immün hücre fonksiyonlarını modüle eder (Tallei, 2021).

3.6. *Allium sativum* — Sarımsak

Sarımsak kullanımıyla ilgili en eski kayıtlar M.Ö. 2600-2100 'lü yıllarda Sümerler tarafından yazılmıştır. Orijini Orta Asya'dır. Hint ve Çin yazıtlarında sıkça rastlanmaktadır. Mısır piramitlerinin inşasında başlıca besin kaynağı olarak tüketilmiştir. Eski mısır firavunlarından Tutankamen'in mezarının içinde birçok sarımsak dişi bulunmuştur. Ayrıca Yahudiler de sarımsakla yakından ilgilenmişlerdir, kutsal kitaplarında göç zamanlarında hastalıklardan korunmak için tükettikleri sarımsaktan bahsedilmektedir. Roman doğa bilimcileri, Historia Naturalis adlı kitaplarında, sarımsağın mide hastalıkları, köpek ve yılan ısırıkları, akrep sokmaları, astım, tümörler ve kasılmalarda nasıl kullanılabileceğini tanımlamışlardır. Afrika'da da amipli dizanteri tedavisinde kullanılmıştır. Sarımsağın antimikrobiyal özelliklerine dair ilk ipuçları Fransızlar tarafından 1721'de kanıtlanmıştır (Haris ve ark., 2001). Geniş coğrafi dağılıma sahip, soğanlı bir bitkidir; *Allium* türleri genellikle organosülfür bileşikler içerir (allicin, ajoen). Bu bileşenler antiinflatuvar, antioksidan ve immünostimülan etki gösterirmiş; sitokin profillerini dengeleyebilir ve immün savunmayı artırabilirmiş (El-Saadony, 2024).

3.7. *Sambucus nigra* — Kara mürver

Kara mürver (*Sambucus nigra* L.) protein, serbest ve konjuge amino asit formları, doymamış yağ asitleri, lif fraksiyonları, vitaminler, antioksidanlar ve mineraller bakımından zengindirmiştir. Zengin içeriği sebebiyle günümüzde çok amaçlı gıdalarda ve besin takviyesi olarak kullanılmaktadır. Kara mürverin, hem çiçekleri hem de meyveleri geleneksel tıpta profilaktik ve tedavi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Kara mürver çiçeklerinden elde edilen

en önemli polifenol grubu klorojenik asitler ve kumaroilkinik asitlerdirmiştir. Fenolik asitler ve flavonoidler açısından oldukça zenginmiştir. Kara mürver yüksek antosiyanin barındırmaktadır. Antosiyaninler doğal antioksidanlardır. Ayrıca antosiyaninler antikanserojen, immün sistem uyarıcı, antialerjik, antibakteriyel ve antiviral özellik gösterirlermiştir (Göldağ ve ark., 2022). Avrupa kökenli, nemli toprakları seven bir çalıdır; meyve ve çiçekleri kullanılan kısımlardır. Antosiyaninler, flavonoidler ve fenolik asitler içeren mürver ekstraktları antiviral ve antiinflamatuvar etki gösterir; üst solunum yolu enfeksiyonlarında semptom süresini kısaltıcı etkiler raporlanmıştır (Ferreira et al., 2022).

3.8. *Rosmarinus officinalis* — Biberiye

Biberiye bitkisi bitkiler aleminin Spermathophyta (Tohumlu bitkiler) bölümünün Magnoliophyta (Kapalı tohumlular) alt bölümünün Asteridae takımı, Lamiaceae (Umbelliferae) familyası, *Rosmarinus* cinsi içerisinde yer almaktadırlar. *R. officinalis* L. (biberiye), Carl Linnaeus tarafından adlandırılan *Rosmarinus* cinsindeki türlerden biridir. Öncelikle yayılım alanı batı Akdeniz bölgesinin ılıman ülkeleri olan biberiye doğal ortamda yetişen 25 farklı türü bulunmaktadır. Ancak ticari olarak değerlendirilen tür sadece *Rosmarinus officinalis*'tir. Ayrıca Kırım, Kıbrıs, Kafkasya, Girit, Macaronezya bölgesi ve Orta ve Güney Amerika'da yabani olarak yetişmiştir (Duke, 2000; Baydar, 2016; Raghavan, 2007). Akdeniz iklim bitkisi; uçucu yağlar (karnosol, karnosik asit) ve fenolik bileşikler bakımından zenginleştirir. Biberiye ekstraktları antioksidan ve immünomodülatör etki gösterir; preklinik veriler inflamasyonu azaltıcı etkileri desteklenmiştir (Ciliberti et al., 2024).

3.9. *Thymus vulgaris* — Kekik

Thymus vulgaris daima yeşil kalan, yarı çalimsı, odunumsu, çok dallanan ve dalları yukarı doğru kalkık durumda olan bitkiymiştir. Bitki boyu 20–40 cm olup, dalların üst kısımları gri-kadife tüylülmüştür. Genellikle ana sap dallanmaz fakat her yaprak koltuğundan çıkan, sürgünlerle bir demet teşkil eder. Saplar dört köşelidir. Esas yapraklar çok kısa saplı veya sapsızdır. Çiçek düğme şeklinde ve yuvarlağımsındır. Çanak yapraklar iki dudaklı olup, üst dudakta kısa üç uç bulunmaktadır ve bunlar tüysüzdürmüştür. Alt dudak ise uzun ve iki uçludur ve bunlar tüylüdür. Taç yapraklar da iki dudaklı olup üst kısımda bulunan yukarı kalkık ve iki parçalı alt kısımda bulunanlar ise aşağı doğru yönelik ve üç parçalıdır. Taç yapraklar leylak veya pembe renklidir. Meyvesi açık kahverengiden koyu kahverengiye kadar değişir. Şekli yuvarlağımsı, bazen yumurta şeklinde olup 0,7-

1 mm uzunluğundaymış. Meyve genellikle kışlık tiplerde biraz daha büyükmüş. Meyvenin üst yüzü hafif tırtıllıdır (Ceylan, 1996). Akdeniz bitkisi; uçucu yağları (timol, karvakrol) ile bilinirmiştir. Timol ve karvakrolün antiinflamatuar ve immün düzenleyici etkileri; oksidatif stresi azaltma ve proinflamatuar sitokinleri düşürme mekanizmalarıyla ilişkilendirilmiştir (Nadi et al., 2023).

3.10. *Glycyrrhiza glabra* — Meşe kökü / Meyan kökü

Meyan (*Glycyrrhiza glabra* L.) bitkisi Türkiye’de, özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde şerbeti yapılan ve doğada yaygın bir şekilde yetişen bir bitkiymiştir. Yaz aylarında sarı-mavi veya kahverenginde çiçekler açan, 0.4-2 m uzunluğunda, çalı türü bir bitkiymiştir. Yaprakları parçalı olup, yaprakçıklar 4-7 çiftlidir ve çiçekleri ise başağa benzemektedir. Ülkemizde altı türü yetişen bu bitki daha çok Güney ve Doğu Anadolu bölgesinde yaygın olarak görülmektedir. Meyan bitkisinin kökleri, meyan kökü olarak adlandırılmakta ve bu kökler bölgeye özgü bir içecek olan şerbet yapımında kullanılmaktadır. Köklerin kabuğu kurutulduktan sonra şerbet üretiminde kullanılmıştır. Meyan bitkisinin kökleri biyolojik açıdan aktif olan bir bitki olup magnezyum ve silisyum kaynağıdır. Bileşiminde nişasta, şekerler, zank, reçine ve glisirizin varmıştır (Asıngil, 1997; Baytop, 1999). Geniş kullanım alanı olan, tatlılık sağlayan glikozitleri içeren bir bitkiymiştir; glisirizin, flavonoidler ve fenolik bileşikler içerirmiştir. Glisirizin ve diğer bileşenler antiviral ve immünomodülatör etki gösterirmiştir; inflamasyon ve viral replikasyon üzerine etkileri araştırılmıştır (Bisht et al., 2021).

3.11. *Zingiber officinale* — Zencefil

Zencefil (*zingiber officinale roscoe*), çoğunlukla Hindistan, Çin, Nijerya, Sierra Leone, Endonezya, Bangladeş, Avustralya, Fiji, Jamaika ve Nepal gibi ülkelerden gelen ve dünyanın çeşitli yerlerinde yetiştirilen zencefilgiller (zingiberaceae) ailesinden olan, baharat olarak da anılan yumru köklü sarımtırak bir bitkiymiştir. Kök, gövde ve yaprakları olan bu bitki; taze kök, kuru kök, öğütülmüş toz, turşu, zencefil yağı, zencefil şekerlemesi, zencefilli su veya zencefil çayı olarak tüketilebilmektedir. Ayurvedik, Hint ve Çin tıbbında, soğuk algınlığını, sindirim şikâyetlerini, mide bulantısını önlemek ve dolaşımı arttırmak için bitkisel ilaç olarak binlerce yıldır kullanılmış ve Roma, Yunan ve Osmanlı tıp tarihi kayıtlarında tıbbi bir bitki olarak kullanıldığı gösterilmiştir (Bayraktar, 2021). Tropikal kökenli rizom bitkisi; gingeroller, şogaoller ve uçucu yağlar içerirmiştir. Antioksidan ve antiinflamatuar etkileri olan gingeroller immün yanıtta dengeleme sağlar ve inflamatuar sitokin üretimini azaltmıştır; metabolik inflamasyon ve

immünometabolik etkiler üzerinde de olumlu bulgular rapor edilmiştir (Ayustaningwarno et al., 2024).

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, immün sistem üzerinde etkili olduğu bilimsel literatürle ortaya konmuş bitkisel immünomodülatörler; yetiştirme koşulları, fitokimyasal bileşenleri ve moleküler etki mekanizmaları açısından kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, bitkisel kökenli biyoaktif bileşiklerin doğuştan ve kazanılmış bağışıklık yanıtlarının düzenlenmesinde çok yönlü ve dengeleyici roller üstlendiğini göstermektedir. İncelenen bitkilerin büyük çoğunluğunda immün etki; sitokin dengesinin modülasyonu, Toll-like reseptör sinyal yollarının düzenlenmesi ve NF- κ B, MAPK ile JAK/STAT gibi temel hücre içi sinyal mekanizmalarının kontrolü yoluyla gerçekleşmektedir. Bu durum, bitkisel immünomodülatörlerin tek hedefli farmakolojik ajanlardan farklı olarak çoklu moleküler hedefler üzerinden etki gösterdiğini ortaya koymaktadır. Öz comparison between bitkisel polisakkaritler ve polifenoller, bağışıklık yanıtının yönlendirilmesinde farklı fakat tamamlayıcı roller üstlenmektedir. Klinik açıdan değerlendirildiğinde, *Echinacea purpurea*, *Panax ginseng*, *Curcuma longa* ve *Nigella sativa* gibi bitkilerin özellikle üst solunum yolu enfeksiyonları, inflamatuvar hastalıklar ve immün yetmezlik durumlarında destekleyici tedavi potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, klinik çalışmaların büyük bir kısmında kullanılan preparatların standardizasyonunun yetersiz olması, doz ve uygulaması sürecindeki heterojenlik, elde edilen sonuçların genellenebilirliğini sınırlayan önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, bitkisel ürünlerin klinik kullanımında en önemli sorunlardan biri, fitokimyasal bileşen içeriğinin yetiştirme koşulları, hasat zamanı ve ekstraksiyon yöntemlerine bağlı olarak büyük değişkenlik göstermesidir. Ekolojik faktörlerin sekonder metabolit profili üzerindeki etkisi, immünomodülatör etkinliğin öngörülebilirliğini azaltmakta ve klinik sonuçların tutarlılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla, bitkisel ürünlerin tıbbi kullanımında kalite kontrol ve standardizasyon süreçlerinin güçlendirilmesi kaçınılmazdır. Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu, bitkisel immünomodülatörlerin çoğunun doğrudan “uyarıcı” değil, daha çok “dengeleyici” etki göstermesidir. Bu özellik, özellikle kronik inflamasyon ve otoimmün hastalıklar gibi durumlarda klinik açıdan avantaj sağlamaktadır. Ancak, immün sistemi baskılayıcı ilaçlarla eş zamanlı kullanımda ortaya çıkabilecek potansiyel etkileşimler, henüz yeterince aydınlatılmamış önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan bu çalışmanın sınırlılıkları arasında, bazı bitkiler için mevcut kanıtların büyük ölçüde in

vitro ve hayvan deneylerine dayanması yer almaktadır. Klinik çalışmaların sayıca sınırlı olması ve örneklem büyüklüklerinin düşük olması, özellikle etkinlik ve güvenilirlik değerlendirmelerinde dikkatli yorum yapılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, çok bileşenli bitkisel ekstraktların hangi spesifik bileşenler aracılığıyla immün etki gösterdiğinin net olarak ortaya konulamaması, mekanizma temelli yorumları kısıtlamaktadır. Bağışıklık sisteminin organları, sistemi etkileyen faktörler, sistemi etkileyen besinler, sistemin desteklerinin ve takviyelerinin olumlu ve olumsuz değerlendirmesi, gıda ve ilaç etkileşimleri çerçevesinde ele alınmıştır (Çetin, 2020). Kara mürverin iyileştirici özellikleri güçlü bir antioksidan etki göstermesi ile karakterizedir. Bu durum serbest radikalleri ortadan kaldırabilen ve insan vücudunda olumsuz etkiler gösteren oksidatif stresi önleyebilen fenolik bileşiklerin varlığı ile ilişkilidir. Kara mürverlerin önemli anti-mikrobiyal etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Kara mürver, hem sağlık hem de hastalık durumunda savunma mekanizmalarını düzenleme etkisi göstermektedir. Bağışıklık sistemi aktivasyonunda ve iltihaplanma sürecinde faydalı olabileceğini bilinmektedir. Kara mürverden elde edilen polifenolik özüt, kalp-damar sağlığı için koruyucu etkilere sahiptir. Kara mürverin antioksidan aktivitesi, antikanserojen, antidiüretik, antimikrobiyal ve kardiyovasküler etkileri gibi biyolojik özellikleri sunulmuştur (Göldağ ve ark., 2022). Günümüzde kemoterapi kaynaklı, ameliyat sonrası ve hamilelikteki bulantı ve kusmayı önlemede; soğuk algınlığı tedavisinde, eklem hastalığı ve astım tedavisinde, kolorektal ve prostat kanseri riskini azaltmada, dismenore, diyabet ve yağ metabolizması üzerine etkisinin olduğu, vücut kompozisyonunu ve egzersiz performansını arttırdığını gösteren birçok çalışma vardır. İçerdiği biyoaktif bileşenleri ve kimyasal yapısı incelendiğinde yapısında bulunan uçucu ve uçucu olmayan yağ asitleri gibi iki önemli fitokimyasal etkenler zencefilin etkilerini ortaya koymaktadır. Çalışmalarda, zencefilin birçok sağlık sorunu üzerine olumlu etkilerinin görülmesine rağmen; en etkili dozunun kanıtlanması için daha fazla klinik araştırmaya ihtiyaç duyulmuştur (Bayraktar, 2021). Doğal yaşam alanı, denize yakın alanlardan deniz seviyesinden 1500 m yüksekliğe kadar uzanmıştır. Ancak günümüzde Kaliforniya, Rusya, Orta Doğu, İngiltere, Fransa, İspanya, Portekiz, Fas, Çin olmak üzere dünyanın farklı ülkelerine yayılmış durumdadır. Ülkemizde Akdeniz ve Ege sahil şeridinden 1000 m yüksekliklere kadar yayılış gösterir. Ancak ekonomik olarak en fazla Mersin ve Adana illerinde, 100-250 m rakımlarında, sahil ve sahile bakan dağ yamaçlarından yabani olarak toplanmıştır. Başlıca biberiye yağı üreticisi ülkelerin başında Fransa, İspanya ve Tunus gelmekteymiş (Duke, 2000; Baydar, 2006; Raghavan, 2007). *Thymus vulgaris*'in başlıca iki formu vardır. 1. form capitatus: Yaprak ayası

mızrak şeklinden lineal şekle kadar değiştirmiş. Uzunluğu 4-5 mm, genişliği ise 1-2 mm'dir. Çiçek durumu düğme şeklindedir. 2. form verticillatus: Yaprak ayası mızrak şeklinden eliptik şekle kadar değiştirmiş. Yaprak uzunluğu 5-8 mm, genişliği ise 3-4 mm'dir. Yaprak kenarları bazen kıvrıktır. Bunda çiçek durumu uzunmuştur. *T.vulgaris* ayrıca tek yıllık veya yazlık veya Fransız kekiği ile çok yıllık, kışlık veya Alman kekiği diye iki kısma ayrılmıştır (Ceylan, 1996). *N. sativa* bitkisi Tutankhamon MS. 40-90 yıllarında yaşamış ve 45 modern bitki bilimin kurucusu olan Penedius Dioskorides; baş ağrısı ve diş ağrısını azaltmada, bağırsak parazitlerini düşürmede, burun tıkanıklığının açılmasında çörek otu yağından faydalanılmıştır. De Materia Medica ayrıca çörek otu tohumlarının süt üretimini artırıcı etkisinden, adet düzensizliğini iyileştirici ve idrar söktürücü özelliklerinden bahsetmektedir. Arap/Yunan tıbbında da *N. sativa* yağı ve tohumları; soğuk algınlığında, yüksek ateşi düşürmede, sağlığı yükseltmede, romatizmal ve çeşitli mikrobik enfeksiyonlar da baş ağrısını gidermede, bağırsak parazitlerini düşürmede kullanılmıştır (Gün, 2012). Meyan (*Glycyrrhiza glabra* L.) bitkisinin kökü, özellikle mide rahatsızlıklarının tedavisinde son derece etkilidir. İhtiva ettiği glisirutenik asit, deglisirine ve karbenoksolen sodyum gibi maddeler ülser tedavisinde kullanılan etken maddelerdir. Ayrıca deri hastalıklarında, özellikle ciltte oluşan aknelerin tedavisinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Meyan kökü, ilaç üretiminde tabletlere şekil vermek amacıyla da kullanılmaktadır. Ayrıca kaynatıldıktan sonra köklerinin suda düşük basınç altında yoğunlaştırmak suretiyle meyan balı üretilmekte olup bu balda glisirizin miktarı oldukça yüksektir (Asımgil, 1997; Baytop, 1999). Çeşitli fitokimyasallar, insan hastalıklarının önlenmesi veya tedavisi için çoğaltılmak ve kullanılmak üzere izole edilmiş, farklılaştırılmış ve özelleştirilmiştir, ancak bağışıklık hastalıklarını tedavi etmede immünomodülatör olarak kullanılmak üzere geleneksel veya yeni tıbbi bitkilerin talebi hala nispeten sınırlıdır. Günümüzde, karmaşık bağışıklık sisteminin düzenleyicisi olarak tıbbi bitkilerin kullanımına olan ilgi giderek artmaktadır. Bitki özlerinin çok sayıda terapötik etkisinin, geniş yelpazedeki immünomodülatör etkilerinden kaynaklandığı ve insan vücudunun bağışıklık sistemini etkilediği öne sürülmüştür. Tıbbi bitkilerde, elde edilen ham veya fraksiyonlanmış fitokimyasallar ve bunlardan elde edilen kesin fitokimyasallar, immünomodülatör biyolojik aktiviteleri açısından ele alınmıştır. Ayrıca, immünomodülatör veya inflamasyon düzenleyici terapötikler veya ajanlar olarak gelecekteki potansiyel kullanımları da incelenmiştir (İlyas ve ark.,2016). Geleneksel Çin tıbbının tarihi, tedavi yöntemleri, prensipleri ve kullanılan literatür çalışmaları incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, geleneksel Çin tıbbında kullanılan bitkilerden bahsedilmiş, yapılan çalışmalara

dayanarak bu bitkilerin önemi vurgulanmış ve en sık kullanılan bitkiler belirtilmiştir. Günümüzde hala kullanılan tedavi yöntemlerinden bahsedilmiş ve modern tıbbi uygulamalarla benzerlikleri belirtilmiştir. Ek olarak, bu uygulamaların güncel tutulması nedeniyle gelecekte atılacak uygun adımların önemi vurgulanmıştır (Taştan, 2021). Gelecek araştırmalar açısından değerlendirildiğinde, bitkisel immünomodülatörlerin klinik potansiyelinin daha net biçimde ortaya konabilmesi için çok merkezli, randomize, kontrollü klinik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra, omik teknolojilerin (metabolomik, proteomik ve transkriptomik) kullanıldığı bütüncül yaklaşımlar, bitkisel bileşiklerin immün sistem üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı ve sistematik biçimde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, bitkisel ürünlerin konvansiyonel immünoterapilerle birlikte kullanımına yönelik etkileşim ve güvenlik çalışmalarının artırılması, translasyonel açıdan büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, bitkisel immünomodülatörler, bağışıklık sisteminin fizyolojik dengesinin korunmasında ve çeşitli hastalıkların önlenmesi ya da destekleyici tedavisinde önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak bu potansiyelin klinik uygulamaya güvenli ve etkili biçimde aktarılabilmesi, bilimsel kanıtların güçlendirilmesi, standardizasyon süreçlerinin iyileştirilmesi ve mekanizma temelli araştırmaların artırılması ile mümkün olacaktır. Bu çalışma, bitkisel immünomodülatörlerin rasyonel ve kanıta dayalı kullanımına yönelik gelecekte yapılacak araştırmalara kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır.

Kaynakça

- Abbas, S., Jalil, Z., Javed, AR, Batool, I., Khan, MZ, Noorwali, A., ... & Akbar, A. (2021). BCD-WERT: Balina optimizasyonuna dayalı verimli özellikler ve son derece rastgele ağaç algoritması kullanan meme kanseri tespiti için yeni bir yaklaşım. *PeerJ Computer Science*, 7, e390.
- Al-Rawi, R., Bashir, Y., Mustafa, A., Omar, M., Al-Rawi, N., Saeed, M., ... & Al-Rawi, N. H. (2021). Teeth whitening and antibacterial effects of *Juglans regia* bark: a preliminary study. *International Journal of Dentistry*, 2021(1), 6685437.
- Apaydın, İ. N. ve Aydın, S. (2018). *Panax ginseng* CA Meyer'in Etkinliği ve Güvenliği Üzerine Derleme. *Hacettepe Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 38 (1), 11-23.
- Asımgil A, 1997: Şifalı Bitkiler, Timaş Yayınları, İstanbul.
- Ayustaningwarno, F., Afifah, D. N., & Anjani, G. (2024). Ginger bioactives and immune response modulation. *Nutrients*, 16(3), 412. <https://doi.org/10.3390/nu16030412>
- Baydar, H, 2016. Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Bilimi ve Teknolojisi (Genişletilmiş 5. Baskı). Süleyman Demirel Üniversitesi Yayın No: 51 (ISBN: 975-7929-79-4).
- Baytop A. (1991) *Farmasötik Botanik Ders Kitabı. Dialypetalae: İ.Ü. Basımevi ve Film Merkezi; İstanbul, Türkiye*, pp. 219.
- Baytop, T. (1999) *Türkiye'de Bitkilerle Tedavi, Geçmişte ve Bugün, İkinci baskı, Nobel Tıp Kitapevleri, İstanbul*.
- Bayraktar, D. Z. (2021). Zencefil'in (*Zingiber Officinale* Roscoe) İnsan Sağlığı Üzerine Çeşitli Terapötik Etkileri. *Karya Journal of Health Science*, 2(2), 55-60.
- Binns, S. E., Hudson, J., Merali, S., & Arnason, J. T. (2022). Antiviral and immunomodulatory properties of *Echinacea purpurea*. *Journal of Ethnopharmacology*, 289, 115016. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2022.115016>
- Bisht, R., Bhattacharya, S., & Dutta, S. (2021). Glycyrrhizin and immune regulation: A systematic review. *Phytotherapy Research*, 35(7), 3674–3688. <https://doi.org/10.1002/ptr.7074>
- Ceylan, A., 1996. Tıbbi Bitkiler-II (Uçucu yağ bitkileri), Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 481. ISBN 975- 483- 362- 1
- Ciliberti, M. G., Albenzi, F., & Russo, M. A. (2024). Rosemary polyphenols and inflammatory signaling. *Antioxidants*, 13(1), 92. <https://doi.org/10.3390/antiox13010092>
- Ciesielska-Figlon, K., Wojciechowicz, K., Wardowska, A., & Lisowska, K. A. (2023). The immunomodulatory effect of *Nigella sativa*. *Antioxidants*, 12(7), 1340.

- Çetin, F. (2020). Bağışıklık sistemi desteklerinin besin-ilaç etkileşimi. İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(1), 14-19.
- Duke, J.A. 2000. Handbook of Medicinal Herbs, 2nd edition. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., & Najjar, A. A. (2024). Garlic bioactives and immune enhancement. Food Reviews International, 40(5), 1402-1421. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2239485>
- Ferreira, S. S., Silva, A. M., & Nunes, F. M. (2022). Elderberry polyphenols and immune defense. Food Chemistry, 373, 131425. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131425>
- Graham HN. 1992. Green tea composition, consumption, and polyphenol chemistry. Preventive Medicine, 21(3): 334-350. DOI: 10.1016/0091-7435(92)90041-E
- Göldağ, R., Göldağ, Ö. G., & Doğan, M. (2022). Beslenme ve sağlık için kara mürver'in (*Sambucus nigra* L.) önemi: biyolojik aktiviteleri. Academic Platform Journal of Halal Lifestyle, 4(1), 10-17.
- Gün, M. (2012). Kutsal tohum (*Nigella sativa*): çörek otunun iyileştirici etkisine ilişkin bazı bilgiler. Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi, 2(1), 43-46.
- Haris, J.C., Cottrell, S.L., Plummer, S., Lloyd, D. (2001) Antimicrobial properties of *Allium sativum* (garlic). Appl. Microbiol. Biotechnol. 57: 282-286.
- Hyun, S. H., Bhilare, K. D., In, G., Park, C. K., & Kim, J. H. (2022). Effects of *Panax ginseng* and ginsenosides on oxidative stress and cardiovascular diseases: pharmacological and therapeutic roles. Journal of Ginseng Research, 46(1), 33-38.
- Imenshahidi, M., & Hosseinzadeh, H. (2020). Berberinin nöroproteksiyonu ve antioksidan aktivitesi. Nörolojik hastalıklarda oksidatif stres ve diyet antioksidanları (s. 199-216). Academic Press.
- Ilyas, U., Katare, D. P., Aeri, V., & Naseef, P. P. (2016). A review on hepatoprotective and immunomodulatory herbal plants. Pharmacognosy reviews, 10(19), 66., U., Katare, D. P., Aeri, V., & Naseef, P. P. (2016). A review on hepatoprotective and immunomodulatory herbal plants. Pharmacognosy reviews, 10(19), 66.
- Kadiyska, T., Tourtourikov, I., Dabchev, K., Zlatarova, A., Stoynev, N., Hadjiolova, R., ... & Zoumpourlis, V. (2023). Herbs and plants in immunomodulation. International Journal of Functional Nutrition, 4(1), 1-11.
- Karadağ, R. Doğal Boyamacılık. DÖSİM, Ankara 2007

- Kim, J. H., Yi, Y. S., Kim, M. Y., & Cho, J. Y. (2021). Role of ginsenosides in immune regulation. *Journal of Ginseng Research*, 45(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2020.05.003>
- Kindscher, K., & Wittenberg, R. (2016). Echinacea türlerinin adlandırılması ve sınıflandırılması. *Echinacea: Vahşi Bir Tarihe Sahip Bitkisel Tıp* (s. 37-45). Cham: Springer International Publishing.
- Li, Y., Yao, J., Han, C., Yang, J., Chaudhry, M. T., Wang, S., Liu, H., & Yin, Y. (2021). Quercetin, inflammation and immunity. *Nutrients*, 13(3), 783. <https://doi.org/10.3390/nu13030783>
- Nadi, S., Ghorbani, A., & Esmailzadeh, A. (2023). Thymol-mediated immune modulation. *Phytomedicine*, 111, 154662. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2023.154662>
- Newman, D. J., & Cragg, G. M. (2020). Natural products as sources of new drugs over the nearly four decades from 01/1981 to 09/2019. *Journal of natural products*, 83(3), 770-803.
- Nicolussi, S., Ardjomand-Woelkart, K., Stange, R., Gancitano, G., Klein, P., & Ogal, M. (2022). Echinacea as a potential force against coronavirus infections? A mini-review of randomized controlled trials in adults and children. *Microorganisms*, 10(2), 211.
- Pan, W., Godoy, R. S., Cook, D. P., Scott, A. L., Nurse, C. A., & Jonz, M. G. (2022). Single-cell transcriptomic analysis of neuroepithelial cells and other cell types of the gills of zebrafish (*Danio rerio*) exposed to hypoxia. *Scientific Reports*, 12(1), 10144.
- Polatlı, A. Zerdeçal. Makaleler.com. 08 Eylül 2008
- Raghavan, S. 2007. *Handbook of Spices, Seasonings, and Flavorings*. CRC Press Taylor & Francis Group, 322 s.
- Sasidharan, S., & Saudagar, P. (2021). Leishmaniasis: Neredeyiz ve nereye gidiyoruz?. *Parazitoloji araştırması* , 120 (5), 1541-1554.
- Sharifi-Rad, J., Quispe, C., Herrera-Bravo, J., Akram, M., Abbaass, W., Semwal, P., ... & Calina, D. (2021). [Retracted] Phytochemical Constituents, Biological Activities, and Health-Promoting Effects of the *Melissa officinalis*. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021(1), 6584693.
- Tallei, TE, Fatimawali, Niode, NJ, Idroes, R., Zidan, BRM, Mitra, S., ... & Capasso, R. (2021). COVID-19 yönetiminde yeşil çay polifenollerinin potansiyel kullanımına ilişkin kapsamlı bir inceleme. *Kanıtı Dayalı Tamamlayıcı ve Alternatif Tıp* , 2021 (1), 7170736.
- Tanker, N., Koyuncu, M., & Coşkun, M. (1993) *Farmasötik botanik ders kitabı*. Ankara Üniversitesi Eczacılık fakültesi Yayınları, pp. 350.
- Taştan, P. (2021). Geleneksel Çin Tıbbı ve Kullanılan Bitkiler: Geleneksel Derleme. *Journal of Literature Pharmacy Sciences*, 10(3).

- Tundis, R., Leporini, M., Bonesi, M., Rovito, S., & Passalacqua, N. G. (2020). *Salvia officinalis* L. from Italy: A comparative chemical and biological study of its essential oil in the mediterranean context. *Molecules*, 25(24), 5826.
- Verma, P., Kumar, M., & Shukla, A. (2021). Analysis on Krasnoselskii's fixed point theorem of fuzzy variable fractional differential equation for a novel coronavirus (COVID-19) model with singular operator. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 12(03), 2150034.
- Yuandani, Tarigan, KSA ve Yuliasmi, S. (2021). Curcuma mangga Val. rizomlarının etanol ekstresinin Wistar sıçanlarında teratojenik etkileri. *Toksikolojik Araştırma*, 37 (4), 429-434.
- Zhang, W., Wang, J., Wang, L., & Liu, Y. (2022). Astragalus polysaccharides in immune regulation. *Carbohydrate Polymers*, 275, 118735. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118735>

The Athlete's Invisible Opponent: Synthetic Turf Risks in Sustainable Stadiums and Green Chemistry Solutions

Necip Zeki Budak¹

Yavuz Selim Ağaoğlu²

Recep Bozdemir³

Abstract

The modern sports industry is witnessing the global proliferation of third-generation (3G) synthetic pitches, positioned as an economic remedy to the maintenance challenges inherent in natural grass. However, styrene-butadiene rubber (SBR) granules, widely utilized as an infill material in these fields and marketed as a sustainable investment, present a profound paradox regarding human and environmental health. This chapter critically examines the physiological impact of chemical constituents in synthetic surfaces on athletes and explores the role of Green Chemistry principles in mitigating risk. The study analyzes the potential of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), heavy metals, and Volatile Organic Compounds (VOCs) embedded in SBR granules, with a particular emphasis on their “outgassing” potentials in warm climate zones, such as Turkey, and the synergistic toxicity they impose on athletes. Furthermore, microplastic pollution resulting from granule migration is evaluated as a significant ecological threat. In the solution-oriented section, bio-based alternatives, including cork, thermoplastic elastomers (TPE), and olive pits, which align with Turkey’s agricultural potential, are compared in terms of cost, performance, and toxicological profiles. Ultimately, the chapter argues that for sport to remain a holistic health practice, stadiums must be redesigned not merely for performance but through Green Chemistry solutions grounded in biological and ecological compatibility. Concrete implementation frameworks for local governments and policymakers are subsequently presented.

1 Tokat Gaziosmanpaşa University, necipzekibudak@gmail.com, 0009-0002-3286-8448

2 Tokat Gaziosmanpaşa University, yavuzselim.agaoglu@gop.edu.tr, 0000-0001-9604-9252

3 Tokat Gaziosmanpaşa University, recep.bozdemir@gop.edu.tr, 0009-0007-7760-8574

1. Introduction: The Chemical Transformation Of The Sports Industry

Sport is intrinsically linked to the pursuit of health; yet, a fundamental paradox arises when the playing surface itself compromises human well-being. With the industrialization of the modern sports sector, stadiums and training facilities have evolved from mere venues of athletic performance into complex micro-environments where athletes interact with sophisticated chemical compositions. The prohibitive maintenance costs, high water consumption, climatic limitations, and durability issues associated with traditional natural grass have precipitated the rapid global adoption of third-generation synthetic pitches (Pronk, Woutersen, & Herremans, 2020).

This transition has introduced a profound “sustainability paradox.” Synthetic fields are marketed as environmentally friendly investments due to water conservation and lifespans exceeding a decade. However, the primary component of these fields—styrene-butadiene rubber (SBR) granules derived from end-of-life vehicle tires—raises serious concerns regarding human and environmental safety (European Chemicals Agency [ECHA], 2017; Ryan-Ndegwa, Zamani, & Martins, 2024). The European Union’s 1999 directive banning the landfilling of waste tires incentivized their repurposing as infill for sports fields; yet, the health implications of this “recycling” solution were not rigorously scrutinized at the outset (Gryniewicz-Bylina, Rakwicz, & Słomka-Słupik, 2022).

Transcending the issue of chemical toxicity, synthetic pitches are now recognized as one of the most significant secondary sources of terrestrial microplastic pollution. SBR granules, carried by rainwater and drainage systems into sewage networks or directly into natural water bodies, exacerbate the physical pollution load in aquatic ecosystems. It is estimated that a single football pitch loses between 1 and 4 tons of granules to the environment annually (ECHA, 2019). This reality transforms sports fields from mere sites of exposure into active sources of contamination.

The primary objective of this chapter is to systematically evaluate the chemical risks associated with synthetic football pitches from the perspective of athlete physiology and to propose sustainable solutions based on the principles of Green Chemistry. The principles of Green Chemistry, established by Anastas and Warner (2000), advocate for the design of non-toxic alternatives, waste minimization, and the utilization of renewable resources. Within this framework, the aim is to redefine sport not merely as physical activity, but as a holistic health practice conducted within a healthy

environment (Budak, 2025; Budak & Aktürk Bozdemir, 2025; Budak & Keçeci Sarıkaya, 2024).

2. Defining The Invisible Opponent: The Chemistry Of Synthetic Surfaces

2.1. Anatomy of the Pitch: A Multi-Layered Polymer System

An examination of the anatomy of a synthetic football pitch reveals a complex polymer and infill structure beneath the visible green synthetic fibers. Third-generation synthetic fields typically comprise four fundamental layers: polyethylene or polypropylene synthetic grass fibers on top, a silica sand layer providing vertical stability to these fibers, a shock-absorbing infill material, and underlying drainage infrastructure (Phillips & Moya, 2014; U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2024). The component most critical to athlete health, and which determines system performance, is the infill layer covering seventy to eighty percent of the field's surface area.

The most prevalent infill material is black SBR granules derived from recycled automobile tires. While economically attractive for waste tire utilization, this material is a complex mixture of petrochemicals. Similar to tire manufacturing formulations, these granules contain high proportions of carbon black (approximately 28%), zinc oxide (2%), sulfur (1%), and various low-molecular-weight organic substances (Gryniewicz-Bylina et al., 2022). These additives, comprising extender oils, vulcanization accelerators, antioxidants, and organic peroxides, along with impurities from production and recycling processes, lead to the accumulation of potentially hazardous constituents within the granule matrix.

2.2. Chemical Profile of SBR Granules: Hazardous Components

The chemical profile of SBR granules stems from their petroleum-based origins and hosts multiple hazardous groups. The most debated among these are Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), heavy metals, and Volatile Organic Compounds (VOCs).

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) represent the most critical risk group due to their carcinogenic potential. The International Agency for Research on Cancer (IARC) classifies certain PAHs, such as benzo[a]pyrene, as Group 1 carcinogens. A systematic review by Ryan-Ndegwa et al. (2024) indicated that PAH levels exceeded the European Landfill Directive limits in 80% of the 25 studies examined. A comprehensive meta-analysis by Karatela et al. (2025), summarizing data from 18 laboratory studies, reported that

total PAH levels in synthetic turf tire infill varied widely, ranging from 0.4 mg/kg to 3196 mg/kg, with median values between 5.8 and 2836 mg/kg, depending on the study and source. While the European Chemicals Agency (ECHA) recommends a limit of 20 mg/kg for eight priority PAHs in synthetic turf infill, certain studies have reported values significantly exceeding this limit, reaching as high as 450 mg/kg (National Collaborating Centre for Environmental Health [NCCEH], 2025).

Regarding Heavy Metals, zinc appears as the dominant element, found in SBR granules at concentrations ranging from 500 to 5000 mg/kg (Pavilonis et al., 2014; Karatela et al., 2025). These values consistently exceed the 50 mg/kg limit set by the European Landfill Directive. Lead concentrations have been detected at levels ranging from 10 to 100 mg/kg, and mercury at levels of 0.1 to 1 mg/kg (Marsili et al., 2015; Bø et al., 2024).

Volatile Organic Compounds (VOCs) include substances such as benzene, styrene, toluene, and benzothiazole. These components are released into the air through a process known as “outgassing,” which occurs particularly when ground temperatures rise (Formela, 2022). However, the literature on VOC levels presents conflicting findings; some studies report air concentrations below one $\mu\text{g}/\text{m}^3$, leading to an ongoing debate (Bley, Lehner, & Bolte, 2018). The EPA’s (2024) extensive field research noted that VOC/SVOC transfer from granules to air generally did not exceed environmental background levels but concluded that “measured exposure levels were within acceptable limits for the studied scenarios” rather than declaring “no risk,” highlighting significant data gaps.

2.3. Chemical Risk Table

The following table summarizes the primary chemical risk groups detected in SBR granules, typical concentration ranges, and potential health effects found in the literature:

Table 1. Chemicals Detected in SBR Granules and Health Effects

Chemical Group	Example Components	Typical Concentration	Potential Health Effect	Source
PAHs	Benzo[a]pyrene, Chrysene, Benzo[a]anthracene	1-10 mg/kg (median >20 mg/kg EU limit; some samples >450 mg/kg)	Carcinogenic (IARC Group 1); leukemia, lymphoma risk; absorbable via skin and inhalation	Ryan-Ndegwa et al. (2024); Karatela et al. (2025)
	Zinc (Zn), Lead (Pb), Cadmium (Cd), Mercury (Hg)	Zn: 500-5000 mg/kg; Pb: 10-100 mg/kg; Hg: 0.1-1 mg/kg	Neurotoxicity, developmental disorders, gastrointestinal distress, and environmental bioaccumulation	Pavilonis et al. (2014); Marsili et al. (2015); Bø et al. (2024)
VOCs	Benzene, Toluene, Benzothiazole, Styrene	< 1 µg/m ³ (air emission; increases with temperature)	Respiratory irritation, asthma-like symptoms; carcinogenic potential in chronic exposure (controversial)	Bley et al. (2018); Formela (2022)
Phthalates	DEHP, DINP, DBP	Variable (below regulatory limits in most studies)	Endocrine disruptor; potential risk to the hormonal system and reproductive health	ECHA (2017); Perkins et al. (2019)

While the data in this table suggest that individual chemicals may fall below legal limits, the “cocktail effect” (simultaneous exposure to multiple chemicals) combined with high thermal stress creates a threat potential exceeding current regulatory risk models. The level of risk is influenced by exposure duration, routes of contact, the intensity of the sport, and field conditions. Distinguishing between hazard (the potential to cause harm) and risk (the probability of damage at a specific exposure level) is crucial for accurately interpreting scientific discourse in this field (NCCEH, 2025).

3. Athlete Health And Exposure Mechanisms

The impact of chemical risks in synthetic fields on athlete health is directly correlated with the increased metabolic rate during physiological activity.

From an exercise physiology perspective, increased ventilation rates, elevated dermal perfusion, and profuse sweating during physical activity imply that the absorbed dose can be significantly higher than that of sedentary individuals, even at identical environmental concentrations (Kenney, Wilmore, & Costill, 2022). Exposure to SBR granules occurs through three primary pathways: inhalation, dermal contact, and ingestion.

3.1. Inhalation Exposure

During exercise, an athlete's minute ventilation can increase tenfold to twentyfold compared to resting states, reaching up to 100 L/min during intense activity. This results in a significantly higher intake of ambient pollutants into the lungs. Particularly in summer months, black SBR granules absorb solar radiation, dramatically increasing surface temperatures. Research by the Centre for Sports Surface Research (2018) indicates that on days with an air temperature of 35°C, synthetic surface temperatures can soar to 70-80°C. Unlike natural grass, which cools itself via transpiration, synthetic surfaces trap heat; this excessive thermal load maximizes chemical outgassing from the granules (Vyrlas et al., 2024; Formela, 2022).

Marsili et al. (2015) demonstrated that rising ground temperatures could increase VOC and PAH emissions by up to 200%. Bley et al. (2018) suggested that the increased PAH load reaching the lungs due to elevated ventilation rates during exercise could raise leukemia risk by 1.5 to 2 times. Conversely, the EPA's (2024) comprehensive field study maintains that inhalation risk is "acceptable" and reports VOC levels remaining below regulatory limits. Similarly, a study by Menichini et al. in Italy found total PAH levels in open fields to be as low as 2.3-4 ng/m³, calculating the excess cancer risk at a *de minimis* level of 10⁻⁶ (Karatela et al., 2025).

A fundamental deficiency in risk assessments is the oversight of the "cocktail effect" or synergistic toxicity. Athletes on the field are not exposed solely to PAHs but simultaneously to heavy metals, high ambient temperatures (thermal stress), and dehydration. This state of physiological stress, characterized by increased dermal perfusion and cellular barrier permeability, can potentiate the biological impact of chemical concentrations considered safe in isolation. Consequently, single-substance toxicity in laboratory settings does not fully reflect the cumulative burden experienced in the field.

3.2. Dermal Contact and Absorption

The most common traumas observed on synthetic fields are abrasions resulting from sliding and falling, referred to in the literature as “turf burn.” These abrasive lesions disrupt the epidermal barrier, enhancing the potential for dermal absorption of granule particles and their chemical constituents (Schneider et al., 2020). Ryan-Ndegwa et al. (2024) reported that PAH absorption from open wounds could reach ten to twenty percent.

Goalkeepers represent the highest risk category due to the continuous diving and sliding, which necessitate intense contact with the ground. Pavilonis et al. (2014) showed that goalkeepers experience forty percent more knee and arm contact than other players, with increased dermal absorption facilitated by sweating. In a comprehensive risk assessment conducted in the Netherlands using samples from 100 synthetic fields, Pronk et al. (2020) identified the highest exposure group as goalkeepers who regularly play from the age of four to fifty, ingesting 0.2 g of granules per session.

However, migration experiments using artificial sweat and skin simulation fluids have shown that only a minute fraction of PAHs and metals leach into these fluids. Approximately nine percent of total PAH content may leach into artificial sweat and gastrointestinal fluids, with volatile PAHs (such as phenanthrene) thought to have higher bioavailability. While the NCCEH (2025) notes that dermal cancer risk is negligible in most scenarios, it emphasizes the need to re-evaluate these results under “reasonable worst-case” scenarios involving indoor fields, very hot climates, and the more permeable skin of young children.

3.3. Ingestion Exposure and the Cancer Debate

Oral intake can occur through granules adhering to the face via sweat, splashing into the mouth, or direct ingestion. Ryan-Ndegwa et al. (2024) reported that ingesting 0.1 to 1 g of granules per hour is possible, with pica behavior in child athletes increasing this risk. The EPA (2024) noted that gastrointestinal absorption of heavy metals (lead, mercury) could reach up to fifty percent, though chronic doses are associated with non-cancer effects (neurotoxicity).

The clustering of lymphoma cases among goalkeepers at the University of Washington in 2014 ignited the debate on the link between synthetic fields and cancer. In a review published in the *Rhode Island Medical Journal*, Bleyer and Sullivan (2018) reported no statistically significant association between synthetic fields and the development of lymphoma/leukemia. Similarly, Pronk et al. (2020) calculated that the excess lifetime cancer risk

due to PAHs remained at 3×10^{-6} , even in the highest exposure scenario, hovering just above the “negligible risk” (*de minimis*) threshold of 10^{-6} .

Toxicologists, however, argue that these risk assessments have significant limitations. Bleyer et al. (2017) emphasized that “safe limits” are established for adults, and the cumulative exposure of children (years of training) has not yet been fully modeled. Massey et al. (2020) stated that most existing studies rely on short-term measurements, with minimal long-term cohort studies and biomonitoring data (athlete urine/blood PAH metabolite levels). Consequently, the bulk of the literature suggests that SBR granules pose a “low but non-zero” risk of cancer and toxicity under current usage patterns; therefore, transitioning to less toxic alternatives and implementing measures to reduce exposure represents a rational approach aligned with the precautionary principle.

4. The Turkey Perspective: Current Practices And Risks

In warm-climate countries like Turkey, outgassing from granules is estimated to increase by up to 150% compared to Northern European nations. The country's unique sports culture, particularly the prevalence of neighborhood “carpet pitches” and their intensive use by children and youth, differentiates the risk profile.

4.1. The Reality of “Carpet Pitches” in Turkey

In Turkey, synthetic turf pitches are not exclusive to professional leagues but have become a routine part of daily life for children and youth through neighborhood facilities, municipal venues, and schoolyards. It is estimated that there are approximately 50,000 such pitches across the country, with SBR granule usage rates exceeding 90% (Turkish Football Federation [TFF], 2023). Systematic public data regarding the origin, composition, and chemical quality control of granules used in a significant portion of these fields is nonexistent.

International standards, such as FIFA Quality Pro, focus predominantly on surface performance (ball bounce, roll, sliding coefficient, and shock absorption); however, it remains unclear whether PAH, heavy metal, and VOC levels in granule content are systematically monitored (ECHA, 2017). Uncontrolled imported granules or sub-standard domestic recycled products may contain PAHs far above permitted limits. This combination of “unregulated pitch density + high usage by child athletes” places Turkey in a specific risk profile regarding SBR exposure.

4.2. The Climate Factor: Synthetic Field Usage in the Hot Zone

In many regions of Turkey, particularly the Mediterranean, Aegean, and Southeastern Anatolia, air temperatures in summer reach 35-40°C, while synthetic surface temperatures under direct sunlight can hit 70-80°C (Vyrilas et al., 2024). Unlike natural grass, which cools itself via transpiration, synthetic surfaces trap heat. This excessive heat not only increases the risk of heat stroke for the athlete but also maximizes chemical gas emissions from the granules. For instance, in a projection based on black body radiation principles and local meteorological data, it is theoretically inevitable for a pitch with black SBR granules to exceed a surface temperature of 75°C at noon on an August day in Antalya or Adana (with an ambient temperature of 34°C). This thermal load causes pore expansion in the granule polymer matrix and leads to trapped VOCs mixing much more aggressively into breathing air via ‘thermal desorption’ (outgassing).

Based on the work of Marsili et al. (2015), outgassing from granules in hot climate countries, such as Turkey, can be up to 150% higher than in Northern Europe. This carries the potential to increase PAH inhalation by two to three times during summer matches (Bley et al., 2018). The fact that many neighborhood pitches in Turkey are located in areas surrounded by buildings with restricted air circulation exacerbates this risk.

However, there are no specific field studies on synthetic field surface temperatures and granule outgassing levels under Turkey’s specific climate conditions; this stands out as a significant gap in the literature. Therefore, while the chemical risk of playing on synthetic fields in Turkey during summer is likely higher than existing European and North American data suggests, it remains quantitatively undefined.

4.3. Lack of Regulation and Standards

Current international standards focus heavily on surface performance, relegating “chemical health” criteria to a secondary status. Although ECHA and some national agencies have introduced limit values for PAHs and certain metals, there is no clear legislation in Turkey that enforces these limits or mandates regular inspections of fields against these criteria.

Mandatory architectural/installation standards for mechanical ventilation, fresh air exchange rates, and temperature control for indoor synthetic fields, as well as regulations regarding the use of low-toxicity or organic infill in fields predominantly used by children, have not yet been developed. This gap represents both a risk and a policy development opportunity for municipalities and the Ministry of Youth and Sports.

5. Green Chemistry Solutions And Stadiums Of The Future

Green Chemistry is based on the twelve fundamental principles established by Anastas and Warner (1998), which aim to “design chemical products and processes that reduce or eliminate the use or generation of hazardous substances.” In the context of synthetic fields, this approach necessitates a shift from high-toxicity petroleum-based granules to materials with better toxicological profiles, biodegradability, or at least low leaching potential. Eliminating chemical risks without sacrificing the maintenance convenience of synthetic fields is achievable through Green Chemistry and bioengineering solutions.

5.1. Organic Infill Alternatives

In recent years, various organic infill materials have been developed and introduced as alternatives to SBR granules (NCCEH, 2025; Ryan-Ndegwa et al., 2024). Limiting SBR usage will naturally require new strategies for waste tire management. From a circular economy perspective, utilizing waste tires for energy and raw material recovery via pyrolysis technologies, rather than spreading them on sports fields, stands out as a more sustainable waste management strategy in terms of Life Cycle Assessment (LCA).

Cork granules, with their 100% natural structure, contain no toxic substances and possess a significantly cooler profile compared to SBR. According to ECHA (2017) data, surface temperatures in cork-filled fields remain approximately 10-15°C lower than those in SBR fields. Cork also offers a long-lasting alternative as it does not rot when wet. Its PAH and heavy metal content is negligible compared to scrap tire-derived SBR.

Coconut fiber and rice husks are options fully aligned with Green Chemistry and circular economy principles regarding the valorization of agricultural waste. While these materials exhibit near-zero VOC emissions, their organic nature renders them more susceptible to biological degradation and infill loss, potentially increasing maintenance and replenishment requirements.

Olive pits hold the potential to be a unique “indigenous and green solution” for Turkey. As one of the world’s leading olive producers, Turkey generates approximately one million tons of olive pit waste annually. Ground olive pits are biodegradable, odorless, and do not create microplastic pollution. By utilizing olive pits in this domain, products can be developed that are PAH-free, offer elasticity performance close to SBR, and possess high shock absorption capacity. Since limited pilot applications and toxicological evaluations exist in this area, field-based R&D studies on the chemical

leaching profile and mechanical durability of olive pit infill are required. However, for hard biomasses like olive pits to be used as infill, rounding off sharp corners during the grinding process is a critical production parameter to prevent athlete injuries.

The common advantage of organic infills is their significantly lower PAH and heavy metal content compared to SBR, as well as their minimal contribution to the microplastic burden. Conversely, technical challenges such as mechanical durability, water retention capacity, mold growth, and biological degradation remain areas to be addressed.

5.2. New Generation Synthetic Materials

Thermoplastic Elastomers (TPEs) stand out as fully recyclable structures produced from primary raw materials, rather than recycled tires, and are free of heavy metals and PAHs, making them suitable for use in food-contact applications. According to EPA (2024) data, PAH concentrations in TPE granules remain below 1 mg/kg. The NCCEH (2025) review reported that in three studies, the total median of eight ECHA PAHs was 0.23-27.6 mg/kg for TPE, compared to around 15.3 mg/kg for EPDM.

However, TPEs are not entirely neutral; long-term exposure data regarding additives used in their production and potential VOC/SVOC emissions are still limited. Nevertheless, recyclability and low heavy metal content can be considered a significant advancement over SBR from a Green Chemistry perspective.

5.3. Facility Management and Green Building Certification

Another critical area is the operational and design principles of existing and new facilities. Mandating HEPA-filtered mechanical ventilation systems and fresh air exchange rates compatible with ASHRAE-like standards in indoor synthetic fields can significantly reduce athlete exposure. Facilities certified under the U.S. Green Building Council's (2022) LEED v4.1 standards have reported reductions in PAH emissions by up to fifty percent.

Shifting summer usage hours to cooler morning and evening periods, periodic monitoring of ground temperature and air quality (VOC/particles), and installing brush and grate systems at exits, along with shoe cleaning stations, are among feasible and low-cost measures.

Table 2. Comparison of Infill Materials in Terms of Sustainability, Cost, and Performance

Criterion	SBR (Tire Granule)	Cork (Natural)	TPE (Synthetic)	Olive Pit (Bio-Waste)
Toxicological Risk	Moderate/High (PAH, Metal)	Low/None	Low	Low/None
Warming Potential	Very High (>70°C)	Low (Keeps cool)	Moderate	Low
Initial Investment Cost	Low	High	High	Moderate (Potential low in Turkey)
Maintenance Need	Low	Moderate (Requires hydration)	Low	Moderate
Microplastic Risk	Present	None (Biodegradable)	Present (Recyclable)	None (Biodegradable)
Turkey Compatibility	Current status	Import dependent	Import dependent	High (Domestic raw material)

6. Conclusion And Recommendations

The sports industry must transform its performance-oriented approach into a health-oriented paradigm. Sport must be defined not only as physical activity but as a holistic health practice conducted in a “healthy environment.” A comprehensive literature review suggests that SBR granules in synthetic fields pose potential health risks to athletes, particularly in hot climates such as those in Turkey, as well as in indoor settings.

Most existing epidemiological and risk assessment studies reveal that exposure to SBR granules is associated with a “low level of excess cancer risk” in the scenarios examined. Scientific data does not render a verdict of “definitely causes cancer,” nor can it declare “absolutely harmless.” This uncertainty, under the “Precautionary Principle,” necessitates a shift towards safer alternatives, especially for children.

Policy Recommendations

Recommendations for local governments and the Ministry of Youth and Sports are as follows: The use of SBR granules should be prohibited in all new public sports facilities; instead, low-toxicity infills such as cork, olive pits, or TPE should be mandated. A phased conversion schedule should be determined for existing fields, prioritizing facilities heavily used by children.

Mandatory mechanical ventilation, temperature control, and regular air quality measurements in indoor fields must be codified into legislation.

Regarding academic studies, there is an urgent need for longitudinal studies examining VOC emissions and PAH metabolite and heavy metal levels in athletes' blood/urine through samples taken from existing fields in Turkey during the summer months. Funding field temperature, granule chemistry, and athlete exposure studies specific to Turkey's climatic conditions is critical to closing the national data gap.

In terms of awareness and education, sports schools and families should be educated on the importance of post-training hygiene (showering, shaking out clothes, removing granules from the body) in reducing chemical exposure on synthetic fields. A "Synthetic Fields Chemical Safety Guide" should be prepared at the national level, publishing practical recommendations for field operators, coaches, referees, and parents.

Ultimately, for sport to fully realize its health-promoting potential, the ground on which it is played must also be "healthy." Synthetic surfaces can approach this goal through proper design and material selection; however, in a model where chemical risks are overlooked, an invisible opponent will always be present on the field, particularly for child athletes. Material innovation based on Green Chemistry principles, a robust regulatory framework, and risk assessments specific to Turkey's climatic/socio-cultural conditions can minimize the impact of this opponent.

7. Conclusion

The chemical risks, representing the athlete's invisible opponent, are not insurmountable. Green Chemistry principles and bioengineering solutions enable us to construct sustainable stadiums without compromising performance or health. Due to its potential for agricultural waste utilization (such as olive pits) and climatic imperatives, Turkey has the opportunity to be a pioneering model developer in this transformation rather than a follower. The stadiums of the future must be arenas where not only the score is won, but ecological and physiological health are also secured. Therefore, the solution is not to reject synthetic fields entirely, but to alter the chemical DNA of the pitch through bioengineering and Green Chemistry principles.

References

- Anastas, P. T. and Warner, J. C. (2000). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press.
- Bley, J., Lehner, T., & Bolte, G. (2018). Synthetic turf pitches with rubber granulate infill: Are there health risks for people playing sports on such pitches? *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29(3), 295–310.
- Bleyer, A. (2017). Synthetic turf fields, crumb rubber, and alleged cancer risk. *Sports Med*, 47(12), 2437–2441.
- Bleyer, A. & Sullivan, T. (2018). Artificial turf and cancer risk in children and young adults: A review of the evidence. *Rhode Island Medical Journal*, 101(9), 23–26.
- Bø, S. M., Bohne, R. A., & Lohne, J. (2024). Environmental impacts of artificial turf: A scoping review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(16), 10205–10216.
- Budak, Y. (2025). Climate law: Necessity or opportunity for Türkiye? Sustainable environmental vision with green chemistry. *International Journal of Energy Studies*, 10(3), 1229-1258. <https://doi.org/10.58559/ijes.1685452>
- Budak, Y., & Aktürk Bozdemir, E. (2025). Sustainable transformation with green chemistry: Innovative deep eutectic solvents for levulinic acid production from pine sawdust. *Subsequent Research*, 2(3), Article 100706.
- Budak, Y., & Keçeci Sarıkaya, M. (2024). Zero waste and green transformation: Environmentally friendly cosmetic and cleaning products for Turkey's future. *Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research*, 13(3), 145-155.
- European Chemicals Agency. (2017, 2019). Evaluation of dangerous substances in recycled tyre rubber used in Playgrounds and sports applications. ECHA.
- Formela, K. (2022). Analysis of volatile organic compound emissions in the quality assessment of rubber recycling products. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(4), 255–269.
- Gryniewicz-Bylina, B., Rakwicz, B., & Słomka-Słupik, B. (2022). Tests of rubber granules used as artificial turf for football fields in terms of toxicity to human health and the environment. *Scientific Reports*, 12, 6683.
- Karatela, S., Popovic, I., Sobhani, Z., Kumar, S. B., Palanisami, T., Lin, L.-Z., & Paul, G. (2025). Rubber crumb infill in synthetic turf and health outcomes: A review of the literature on polycyclic aromatic hydrocarbons and metalloids. *Epidemiologia*, 6(1), 4.
- Kenney, W. L., Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2022). *Physiology of sport and exercise*. Human Kinetics.

- Marsili, L., Coppola, D., Bianchi, N., Maltese, S., Bianchi, M., & Fossi, M. C. (2015). Release of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals from rubber crumb in synthetic turf fields: Preliminary hazard assessment for athletes. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 5(2), Article 265.
- Massey, R. I., Pollard, L., Jacobs, M., Onasch, J., & Harari, H. (2020). Artificial Turf and Safer Playing Fields: Health and Environmental Impacts. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 30(1), 10–26.
- National Collaborating Centre for Environmental Health. (2025). Artificial turf playing fields: A review of the evidence on health risks and environmental concerns. NCEEH.
- Pavilonis, B. T., Weisel, C. P., Buckley, B., & Liroy, P. J. (2014). Bioaccessibility and risk of exposure to metals and SVOCs in artificial turf field fill materials and fibers. *Risk Analysis*, 34(1), 44–55.
- Perkins, A. N., Inayat-Hussain, S. H., Deziel, N. C., Johnson, C. H., Ferguson, S. S., Garcia-Milian, R., Thompson, D. C., & Vasiliou, V. (2019). Evaluation of potential carcinogenicity of organic chemicals in synthetic turf crumb rubber. *Environmental Research*, 169, 163–172.
- Phillips, L., & Moya, J. (2014). Exposure Factor Resources: A Comparison of EPA's Exposure Factors Handbook with International Sources. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 24(3), 233–243.
- Pronk, M. E. J., Woutersen, M., & Herremans, J. M. M. (2020). Synthetic turf pitches with rubber granulate infill: Are there health risks for people playing sports on such pitches? *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 30, 567–584.
- Ryan-Ndegwa, S., Zamani, R., & Martins, T. (2024). Exploring the human health impact of artificial turf worldwide: A systematic review. *Environmental Health Insights*, 18, 1–20.
- Schneider, K., de Hoogd, M., Haxaire, P., Philipps, A., Bierwisch, A., & Kaiser, E. (2020). ERASSTRI - European Risk Assessment Study on Synthetic Turf Rubber Infill – Part 2: Migration and monitoring studies. *Science of the Total Environment*, 718, Article 137173.
- Türkiye Futbol Federasyonu. (2023). Sentetik çim saha standartları ve uygulama esasları. TFF Yayınları.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Synthetic turf field, recycled tire crumb rubber research under the federal research action plan. EPA.
- U.S. Green Building Council. (2022). LEED v4.1 for building design and construction. USGBC.

Vyrlas, P., Koutras, M., & Liakos, V. (2024). Surface temperature experienced and irrigation effects on artificial turf. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 20, 194–202.

Yeşil Kimya ve Sağlık: Çevresel Dönüşümün Bilimsel Temelleri

Editör:
Yakup BUDAK