

Yüzme Eğitimi ve Antrenörlüğü için Ekolojik Havuz Sistemleri: Genç Sporcular için Mikroplastik ve Kimyasal Risklere Sürdürülebilir Çözümler 8

Necip Zeki Budak¹

Recep Bozdemir²

Yakup Budak³

Özet

Yüzme havuzları, sporcuların performans geliştirme süreçlerinde vazgeçilmez tesisler olmasına rağmen, içerdikleri mikroplastik ve kimyasal kirleticiler sporcu sağlığı için ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu çalışma, sentetik mayolar, kozmetik ürünler ve havuz ekipmanlarından kaynaklanan mikroplastiklerin solunum, cilt ve endokrin sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini incelemektedir. Ayrıca, klor bazlı dezenfektanların oluşturduğu trihalometanlar ve kloraminler gibi dezenfeksiyon yan ürünlerinin sağlık risklerini değerlendirmektedir. Geleneksel havuz temizleme yöntemlerinin sınırlılıklarını ele alan çalışma, biyolojik filtrasyon sistemleri, ozon ve UV dezenfeksiyon teknolojileri ve yeşil kimya uygulamaları gibi sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Vaka çalışmaları ve ekonomik analizler, yeşil çözümlerin başlangıçta daha yüksek yatırım gerektirmesine rağmen, uzun vadede sağlık, çevre ve ekonomik avantajlar sağladığını göstermektedir. Çalışma, mikroplastik standartları, dezenfeksiyon yan ürünleri limitleri ve yeşil teknoloji teşvikleri gibi politika önerileriyle sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak, sporcuların sağlığını korurken çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için bütüncül bir yaklaşım önerilmektedir.

- 1 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Tokat, 60200, Türkiye, necipzekibudak@gmail.com <https://orcid.org/0009-0002-3286-8448>
- 2 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Tokat, 60200, Türkiye, recep.bozdemir@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0002-3286-8448>
- 3 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, ybudak74@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7108-5548>

1. Giriş

Yüzme havuzları, sporcuların performans geliştirme ve rehabilitasyon süreçlerinde kritik öneme sahip tesislerdir. Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, havuz sularında bulunan mikroplastikler ve kimyasal dezenfektanların sporcu sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkilere neden olabileceğini ortaya koymuştur [1,2]. Bu bölüm, yüzme havuzlarındaki mikroplastik ve kimyasal kirliliğin kaynaklarını, sağlık etkilerini ve sürdürülebilir çözüm önerilerini kapsamlı şekilde incelemektedir.

Dünya genelinde her yıl yaklaşık 8 milyon ton plastik atık okyanuslara karışmakta ve bu atıkların parçalanmasıyla oluşan mikroplastikler (<5 mm) su kaynaklarında yaygın kirleticiler haline gelmektedir [3]. Yüzme havuzları da bu kirlilikten etkilenmektedir. Havuzlarda kullanılan sentetik mayolar, havuz ekipmanları ve kozmetik ürünler mikroplastik kirliliğinin başlıca kaynaklarıdır [4]. Ayrıca, havuz suyunun dezenfeksiyonu için kullanılan klor gibi kimyasallar, organik maddelerle reaksiyona girerek trihalometanlar (THM) ve haloasetik asitler (HAA) gibi potansiyel zararlı dezenfeksiyon yan ürünlerini (DYÜ) oluşturmaktadır [5,6].

Bu bölümün amacı, yüzme havuzlarındaki mikroplastik ve kimyasal kirliliğin sporcu sağlığı üzerindeki etkilerini incelemek ve bu sorunlara yönelik sürdürülebilir, çevre dostu çözümler sunmaktır. Ayrıca, geleneksel havuz bakım yöntemlerinin sınırlılıklarını tartışarak, biyolojik filtrasyon sistemleri, ozon dezenfeksiyonu ve UV filtrasyon teknolojileri gibi yenilikçi yeşil çözümlerin etkinliğini değerlendirmektedir.

2. Metodoloji

Bu çalışmada sunulan bilgiler, konuyla ilgili bilimsel makaleler, teknik raporlar ve uluslararası standartların sistematik incelemesine dayanmaktadır. Literatür taraması için Web of Science, Scopus ve PubMed veri tabanları kullanılmış, “mikroplastik”, “yüzme havuzu”, “dezenfeksiyon yan ürünleri”, “sporcu sağlığı”, “yeşil kimya” ve “sürdürülebilir havuz yönetimi” anahtar kelimeleriyle aramalar gerçekleştirilmiştir. Toplam 90 makale incelenmiş ve bu bölümün hazırlanmasında kaynak olarak kullanılmıştır.

Ayrıca, farklı ülkelerdeki yüzme havuzu standartları ve düzenlemeleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş, özellikle Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve Dünya Sağlık Örgütü’nün belirlediği kriterler dikkate alınmıştır. Yeşil çözümlerin etkinliğini değerlendirmek için laboratuvar çalışmaları ve saha uygulamalarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu metodoloji, uluslararası bir perspektif sağlayarak, bulguların küresel geçerliliğini artırmaktadır.

3. Yüzme Havuzlarında Mikroplastik Kirliliği

3.1. Mikroplastiklerin Kaynakları ve Özellikleri

Mikroplastikler, boyutları 5 mm'den küçük olan plastik parçacıklardır ve birincil ve ikincil mikroplastikler olarak sınıflandırılırlar [7]. Birincil mikroplastikler, kozmetik ürünlerde (peeling ürünleri, diş macunları) ve sentetik tekstil ürünlerinde doğrudan kullanılmak üzere üretilirken, ikincil mikroplastikler daha büyük plastik ürünlerin parçalanmasıyla oluşur [8].

Yüzme havuzlarındaki mikroplastik kirliliğinin başlıca kaynakları şunlardır [4, 9-12]:

- 1. Sentetik Giysiler ve Tekstil Ürünleri:** Naylon, polyester ve spandex gibi sentetik malzemelerden üretilen mayolar, her yıkamada yaklaşık 700.000 mikroplastik fiber salmaktadır. Deniz ve havuzlarda yapılan çalışmalarda birçok mikroplastik fiber tespit edilmiştir.
- 2. Havuz Ekipmanları:** Şnorkel, palet, yüzme tahtası gibi plastik ekipmanlar zamanla aşınarak mikroplastik parçacıklar oluşturmaktadır.
- 3. Kozmetik Ürünler:** Güneş kremleri, şampuanlar ve vücut losyonları gibi kişisel bakım ürünleri mikroplastik içerebilmektedir. Bu ürünlerin havuz suyuna karışması, mikroplastik konsantrasyonunu artırmaktadır.
- 4. Havuz Bakım Ürünleri:** Bazı havuz temizlik ürünleri ve filtrasyon sistemlerinde kullanılan malzemeler de mikroplastik kaynağı olabilmektedir.



Şekil 1. Yüzme Havuzlarında Mikroplastik Kaynakları İnfografiği

3.2. Mikroplastiklerin Sporcu Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkileri halen araştırılmakta olan bir konudur, ancak son çalışmalar endişe verici bulgular ortaya koymaktadır. Sporcular için özellikle önemli olan sağlık etkileri şunlardır:

- 1. Solunum Sistemi Etkileri:** Havuz suyundan buharlaşan mikroplastikler solunabilmekte ve akciğerlerde birikebilmektedir. Yüksek yoğunluklu antrenman sırasında artan solunum hızı, sporcuların daha fazla mikroplastik soluma riskini artırmaktadır [13]. Vasse ve arkadaşları (2024), profesyonel yüzücülerde mikroplastik maruziyeti ile astım ve bronşit semptomları arasında anlamlı bir ilişki bulmuşlardır [14].
- 2. Cilt Sorunları:** Mikroplastikler, cilt bariyerini geçerek lokal inflamasyona ve alerjik reaksiyonlara neden olabilmektedir. Özellikle uzun süre suda kalan yüzücülerde dermatit vakalarının artışı gözlemlenmiştir [15].
- 3. Endokrin Sistem Bozuklukları:** Mikroplastiklere eklenen bisfenol A (BPA) ve ftalatlar gibi katkı maddeleri endokrin bozucu etki gösterebilmektedir. Bu durum, sporcuların hormonal dengesini etkileyerek performans düşüşüne ve uzun vadede üreme sağlığı sorunlarına yol açabilmektedir [16,17].
- 4. Bağışıklık Sistemi Etkileri:** Mikroplastiklerin bağışıklık sistemini baskılayıcı etkileri olduğu düşünülmektedir. Bu durum, yoğun antrenman programları nedeniyle zaten bağışıklık sistemi baskılanmış olan elit sporcular için ek risk oluşturmaktadır [18].
- 5. Gastrointestinal Etkiler:** Yüzme sırasında yanlışlıkla yutulan havuz suyu ile mikroplastikler sindirim sistemine girebilmekte ve gastrointestinal inflamasyona neden olabilmektedir [19].

4. Yüzme Havuzlarında Kimyasal Riskler

4.1. Dezenfeksiyon Yan Ürünleri ve Oluşum Mekanizmaları

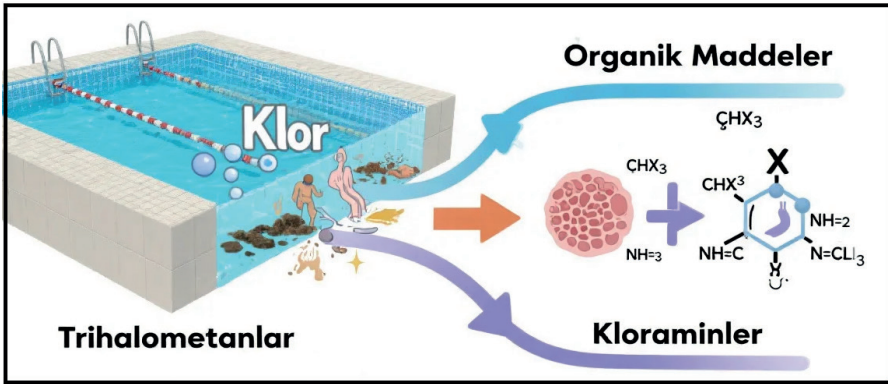
Yüzme havuzlarında su kalitesini korumak ve patojenleri kontrol etmek için kullanılan dezenfektanlar, organik maddelerle reaksiyona girerek çeşitli dezenfeksiyon yan ürünleri (DYÜ) oluşturmaktadır. Bu yan ürünlerin başlıcaları şunlardır [20-24]:

- 1. Trihalometanlar (THM):** Kloroform, bromodiklorometan, dibromoklorometan ve bromoform gibi THM'ler, klorun ter, idrar, saç ve cilt hücreleri gibi organik maddelerle reaksiyonu sonucu

oluşmaktadır. Havuz suyunda ortalama THM konsantrasyonu 20-130 $\mu\text{g/L}$ arasında değişmektedir.

2. **Haloasetik Asitler (HAA):** Monokloroasetik asit, dikloroasetik asit ve trikloroasetik asit gibi HAA'lar, klorun organik maddelerle reaksiyonu sonucu oluşan diğer önemli DYÜ'lerdir.
3. **Kloraminler:** İnorganik kloraminler (monokloramin, dikloramin ve trikloramin) ve organik kloraminler, klorun azot içeren bileşiklerle reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Özellikle trikloramin (azot triklorür), havuz ortamında karakteristik "klor kokusu"na neden olan ve göz ile solunum yolu irritasyonuna yol açan bir bileşiktir.

DYÜ oluşumunu etkileyen faktörler arasında dezenfektan türü ve konsantrasyonu, pH, sıcaklık, organik madde yükü ve havuz kullanım yoğunluğu bulunmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık ve düşük pH koşulları, DYÜ oluşumunu hızlandırmaktadır.



Şekil 2. Dezenfeksiyon Yan Ürünlerinin Oluşum Şeması

Bu bilimsel diyagram, yüzme havuzlarında dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşum mekanizmasını göstermektedir.

4.2. Kimyasal Dezenfektanların Sporcu Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Yüzme havuzlarında kullanılan kimyasal dezenfektanlar ve bunların yan ürünleri, sporcu sağlığı üzerinde çeşitli olumsuz etkilere neden olabilmektedir [25-28]:

1. **Solunum Sistemi Sorunları:** Kloraminler, özellikle trikloramin, havuz ortamında buharlaşarak "havuz astımı" olarak bilinen duruma

yol açabilmektedir. Profesyonel yüzücülerde astım prevalansının genel popülasyona göre 2-6 kat daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

2. **Göz ve Cilt İrritasyonu:** Klor ve kloraminler, göz ve cilt irritasyonuna neden olmaktadır. Profesyonel yüzücülerde konjonktivit ve dermatit vakaları sıklıkla görülmektedir.
3. **Genotoksikite ve Kanser Riski:** THM'ler ve HAA'lar gibi bazı DYÜ'lerin genotoksik ve karsinogenik potansiyele sahip olduğu bilinmektedir. Uzun süreli maruziyet, DNA hasarına ve kanser riskinin artmasına neden olabilmektedir.
4. **Üreme Sistemi Etkileri:** Bazı DYÜ'lerin endokrin bozucu etkileri olduğu ve üreme sistemi üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceği düşünülmektedir.
5. **Oksidatif Stres:** Klor ve DYÜ'ler, vücutta oksidatif strese neden olabilmektedir. Yüksek yoğunluklu antrenman yapan sporcularda zaten artmış olan oksidatif stres, bu kimyasalların etkisiyle daha da şiddetlenebilmektedir.

4.3. Geleneksel Havuz Temizleme Yöntemlerinin Sınırlılıkları

Yüzme havuzlarında yaygın olarak kullanılan geleneksel temizleme ve dezenfeksiyon yöntemleri, mikroplastik ve kimyasal kirliliği kontrol etmede çeşitli sınırlılıklara sahiptir [29-32]:

1. **Klor Bazlı Dezenfeksiyon:** En yaygın kullanılan yöntem olmasına rağmen, klor bazlı dezenfeksiyon, DYÜ oluşumuna neden olmakta ve mikroplastikleri etkili bir şekilde uzaklaştıramamaktadır. Ayrıca, klor kullanımı, havuz suyunun pH dengesini bozabilmekte ve ek kimyasal kullanımını gerektirmektedir.
2. **Kum Filtreleri:** Geleneksel kum filtreleri, 20-100 μm boyutundaki partikülleri tutabilmekte, ancak daha küçük mikroplastikleri (1-20 μm) geçirmektedir. Gomiero ve arkadaşları (2018), standart kum filtrelerinin mikroplastiklerin sadece %25-30'unu tutabildiğini göstermiştir [30].
3. **Kimyasal Flokulasyon:** Alüminyum sülfat gibi kimyasal flokülantlar, mikroplastiklerin çökmesini sağlayabilmekte, ancak bu kimyasalların kendileri de çevresel sorunlara neden olabilmektedir.
4. **Bakım Maliyetleri:** Geleneksel yöntemler, yüksek kimyasal tüketimi nedeniyle maliyetlidir ve sürekli bakım gerektirmektedir.

5. **Çevresel Etkiler:** Klor ve diğer kimyasalların kullanımı, havuz suyunun boşaltılması sırasında çevresel kirliliğe neden olabilmektedir.

Geleneksel Havuz Sistemleri	Yeşil Havuz Sistemleri
 Dezenfeksiyon Yöntemi	 Yeşil
 Filtrasyon	 Çevresel Etki
 Çevresel Etk	 Maliyet
 Sağlık Etkileri	 Bakım

Şekil 3. Geleneksel ve Yeşil Havuz Sistemleri Karşılaştırma Tablosu

Bu karşılaştırma tablosu, geleneksel havuz sistemleri ile yeşil havuz sistemleri arasındaki temel farkları göstermektedir.

5. Yeşil Çözümler ve Sürdürülebilir Havuz Yönetimi

5.1. Biyolojik Filtrasyon Sistemleri

Biyolojik filtrasyon sistemleri, yüzme havuzlarında mikroplastik ve kimyasal kirliliği azaltmak için doğal mikroorganizmalar ve ekolojik süreçlerden yararlanan çevre dostu çözümler sunar. Bu sistemler, klor gibi geleneksel kimyasal arıtma yöntemlerine sürdürülebilir bir alternatif oluşturarak, sporcu sağlığını ve çevresel sürdürülebilirliği destekler.

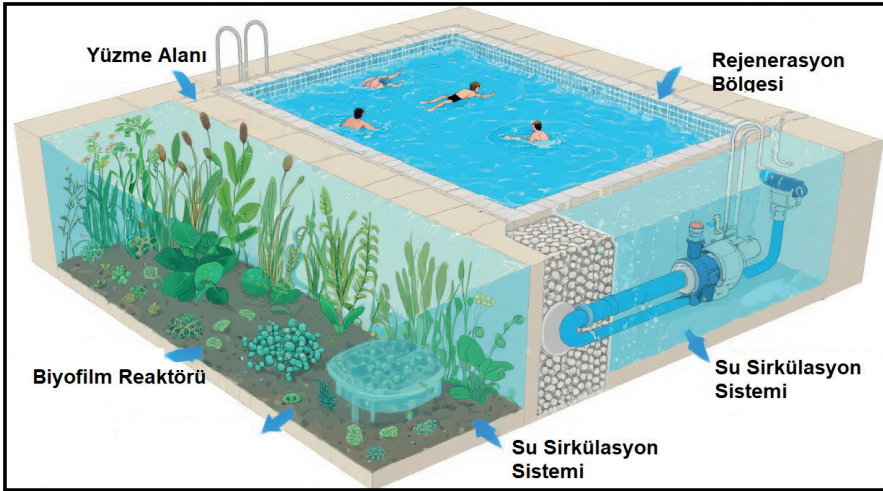
Biyofilm teknolojisi, biyolojik filtrasyonun temel bir uygulamasıdır. Bu sistemlerde, özel tasarlanmış yüzeylerde büyüyen mikroorganizma toplulukları, sudaki kirleticileri metabolize ederek parçalar. Araştırmalar, iyi tasarlanmış biyofilm reaktörlerinin mikroplastiklerin %85-95'ini tutabildiğini göstermektedir [34].

Bitki bazlı filtrasyon (fitofiltrasyon), su bitkileri, algler ve makrofitler aracılığıyla havuz suyundaki mikroplastikleri, ağır metalleri ve fazla besin maddelerini absorbe ederek su kalitesini iyileştirir. Su mercimeği, nilüfer ve saz gibi bitkiler, havuz suyunun arıtılmasında yüksek etkinlik gösterir.

Araştırmalar, bitki bazlı filtrasyon sistemlerinin sucul ortamlarda mikroplastik konsantrasyonunu % 60-75 oranında azalttığını ortaya koymuştur [36].

Enzim bazlı sistemler, biyolojik filtrasyonun yenilikçi bir yaklaşımıdır. PETaz, lipaz ve kutinaz gibi enzimler, polietilen tereftalat (PET), polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi mikroplastik türlerini biyolojik olarak parçalayabilir. Bu enzimler, havuz suyuna doğrudan eklenebilir veya immobilize edilerek filtrasyon sistemlerinde kullanılabilir [36].

Biyolojik havuzlar veya doğal yüzme havuzları, biyolojik filtrasyonun en kapsamlı uygulamasıdır. Bu havuzlar, kimyasal dezenfektanlara ihtiyaç duymadan su kalitesini korumak için doğal ekosistemler olarak tasarlanır. Tipik bir biyolojik havuz, yüzme bölgesi ve rejenerasyon bölgesi olmak üzere iki kısımdan oluşur. Araştırmalar, biyolojik havuzların patojen kontrolünde ve su kalitesinin korunmasında etkili olduğunu göstermiştir [37].



Şekil 4. Biyolojik Havuz Filtrasyon Sistemi Kesit Diyagramı

Bu teknik diyagram, biyolojik havuz filtrasyon sisteminin kesitini ve çalışma prensibini göstermektedir.

5.2. Ozon ve UV Dezenfeksiyon Teknolojileri

Ozon ve ultraviyole (UV) dezenfeksiyon sistemleri, yüzme havuzlarında klor gibi geleneksel kimyasal dezenfektanlara alternatif olarak kullanılan çevre dostu yöntemlerdir. Bu teknolojiler, trihalometanlar ve kloraminler gibi dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumunu azaltarak sporcu sağlığını korur.

Ozon Dezenfeksiyonu: Ozon (O_3), güçlü bir oksidan olarak patojenleri hızlı ve etkili bir şekilde inaktive eder. Klorla karşılaştırıldığında, ozonun dezenfeksiyon hızı önemli ölçüde yüksektir ve DYÜ oluşumunu % 70-90 oranında azaltılabilir [38]. Ozon, organik maddelerle reaksiyona girerek THM'ler gibi zararlı yan ürünlerin oluşumunu engeller, böylece sporcuların solunum yolu irritasyonu ve cilt tahrişi gibi sağlık risklerini azaltır [39].

UV Dezenfeksiyonu: UV-C ışınları (200-280 nm), mikroorganizmaların DNA'sına zarar vererek patojenleri etkisiz hale getirir. Bu yöntem, kimyasal dezenfektan kullanımını %50-80 oranında azaltılabilir ve kloraminler gibi solunum yolu tahrişine neden olan bileşikler parçalanabilir [38].

Kombine Sistemler: Ozon ve UV teknolojilerinin birlikte kullanımı, dezenfeksiyon etkinliğini artırır ve kimyasal kullanımını minimuma indirir. Ozon/UV kombinasyonları, ileri oksidasyon prosesleri (AOP) olarak bilinir ve organik kirleticilerin parçalanmasında yüksek etkinlik gösterir [34].

5.3. Yeşil Kimya Uygulamaları

Yeşil kimya prensipleri, yüzme havuzlarında kullanılan kimyasalların çevresel etkilerini azaltarak hem sporcu sağlığını korur hem de sürdürülebilir havuz yönetimi sağlar.

Biyobozunur Flokulantlar: Nişasta, kitosan ve aljinat gibi doğal polimer bazlı biyobozunur flokulantlar, çevre dostu çözümler sunar. Araştırmalar, kitosan bazlı flokulantların sucul ortamlarda mikropplastik partikülleri % 60-75 oranında uzaklaştırabildiğini göstermektedir [40].

Enzim Bazlı Temizleyiciler: Lipaz, proteaz ve amilaz gibi enzimler içeren temizlik ürünleri, havuz kenarlarında biriken organik kirleri biyolojik olarak parçalar. Bu ürünler, klor bazlı temizleyicilere olan ihtiyacı azaltarak DYÜ oluşumunu engeller [41].

Doğal pH Dengeleyiciler: Sodyum bikarbonat ve sitrik asit gibi doğal bileşikler, havuz suyunun pH dengesini korumak için etkili alternatiflerdir. Bu bileşikler, kimyasal atık üretimini azaltır ve havuz suyunun sporcular için güvenli bir aralıkta (pH 7.2-7.8) kalmasını sağlar [38].

Mikropplastik İçermeyen Havuz Ekipmanları: Biyobazlı ve biyobozunur malzemelerden üretilen havuz ekipmanları, mikropplastik salınımını kaynağında azaltır. Araştırmalar, biyobozunur polimerlerin geleneksel plastiklere kıyasla çevresel kirliliği % 80'e kadar azalttığını göstermektedir [34].

5.4. Sürdürülebilir Havuz Tasarımı ve İşletimi

Sürdürülebilir havuz tasarımı ve işletimi, enerji verimliliği, su tasarrufu ve kimyasal kullanımının azaltılmasını hedefleyerek hem çevresel ayak izini küçültür hem de sporcu sağlığını korur.

Enerji Verimli Sistemler: Değişken hızlı pompalar, ısı pompaları ve güneş enerjisi sistemleri, havuz işletiminde enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır. Araştırmalar, değişken hızlı pompaların enerji kullanımını % 30-50 oranında düşürebildiğini göstermektedir [41].

Su Tasarrufu Teknolojileri: Geri yıkama suyunun geri kazanımı, yağmur suyu hasadı ve buharlaşma önleyici örtüler, havuzlarda su tüketimini %20-40 oranında azaltabilir [42].

Akıllı Havuz Yönetim Sistemleri: Sensörler ve otomatik dozaj sistemleri, havuz suyunun kimyasal bileşimini gerçek zamanlı olarak izleyerek kimyasal kullanımını optimize eder. Araştırmalar, akıllı yönetim sistemlerinin kimyasal tüketimini % 25-40 oranında düşürebildiğini göstermektedir [43,44].

Eğitim ve Bilinçlendirme: Havuz kullanıcılarının ve personelin hijyen konusunda eğitimi, antropojenik kirleticilerin havuz suyuna karışmasını azaltır. Eğitim programları, yüzücülerin mikroplastik ve kimyasal kirlilik kaynaklarını azaltmak için bilinçli davranışlar sergilemesini teşvik eder [45].

6. Vaka Çalışmaları ve Başarı Örnekleri

6.1. İspanya Costa Brava Sürdürülebilir Havuz Projesi

Costa Brava bölgesinde gerçekleştirilen araştırma, su ve enerji açısından daha sürdürülebilir bir yüzme havuzu modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. Buharlaşma önleyici örtülerin kullanımı su kaybını % 35 oranında azaltırken, değişken hızlı pompalar enerji tüketimini % 40 düşürmüştür. Proje kapsamında uygulanan bitki bazlı filtrasyon sistemi, havuz suyundaki mikroplastik konsantrasyonunu % 65 oranında azaltmış ve THM seviyelerini WHO'nun önerdiği 100 µg/L sınırının altına çekmiştir. Havuz kullanıcılarının % 80'i su kalitesinde iyileşme bildirmiştir [46].

6.2. Algarve Üniversitesi Sürdürülebilir Yüzme Havuzu Projesi

Algarve Üniversitesi, Saint-Gobain Weber Portugal ve Cristal Construções konsorsiyumuyla yürütülen projeler kapsamında, düşük çevresel ayak izi ve yüksek enerji verimliliğine sahip sürdürülebilir yüzme havuzu konseptleri geliştirilmiştir. Bu projelerde geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı,

CO₂ emisyonlarının azaltılması, su kayıplarının minimize edilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu hedeflenmiştir [47].

Ayrıca, enerji ve su tüketimini en aza indirirken kullanıcı konforunu koruyan açık hava ısıtma yüzme havuzları tasarlanmıştır. Bu kapsamda güneş enerjisi, fotovoltaiik paneller, ters yerden ısıtma ve faz değişim malzemeli eşanjörler gibi yenilikçi sistemler entegre edilmiştir. Tüm sistemler, yenilenebilir enerji kullanımını optimize eden akıllı kontrol modülüyle yönetilmektedir [48].

7. Ekonomik Analiz ve Maliyet-Fayda Değerlendirmesi

Yeşil çözümlerin yüzme havuzlarında uygulanması, başlangıçta yüksek yatırım maliyetleri gerektirse de, uzun vadede önemli ekonomik avantajlar sunmaktadır.

Başlangıç Yatırım Maliyetleri: Biyolojik filtrasyon sistemleri, ozon jeneratörleri ve UV dezenfeksiyon sistemleri, geleneksel klor bazlı sistemlere kıyasla % 30-50 daha yüksek başlangıç maliyetine sahiptir [49]. Ancak, bu sistemlerin uzun vadeli faydaları, başlangıç maliyetlerini dengelemektedir.

İşletme Verimliliği ve Ekonomik Tasarruf: Yeşil teknolojiler sayesinde kimyasal kullanımı % 40-80, enerji tüketimi % 30-50 ve su tüketimi % 20-40 oranında azalmaktadır. Bu verimlilik artışı, ilk yatırım maliyetlerini 3-5 yıl gibi kısa bir sürede amorti edebilmektedir.

Sporcu Sağlığı ve Azalan Sağlık Giderleri: Yeşil çözümler, havuz suyundaki zararlı kimyasallara ve mikroplastiklere maruziyeti azaltarak sporcu sağlığını korur ve uzun vadede sağlık harcamalarının azalmasına katkı sağlar.

Çevresel Sürdürülebilirlik ve Ekosistem Koruma: Kimyasal kullanımının ve atık suyun çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılması, ekosistem hizmetlerinin korunmasını destekler. Çevresel maliyet-fayda analizleri, bu çözümlerin ekosistem sağlığını iyileştirerek uzun vadeli ekonomik faydalar yarattığını doğrulamaktadır [50,51].

8. Politika Önerileri ve Düzenleyici Çerçeve

Yüzme havuzlarında mikroplastik ve kimyasal kirliliğin etkin yönetimi için bütüncül bir politika ve düzenleyici çerçeve gereklidir:

1. Havuz suları için mikroplastik ve DYÜ konsantrasyon limitlerinin bilimsel temellere dayalı olarak belirlenmesi ve düzenli denetlenmesi

2. Biyolojik filtrasyon ve gelişmiş arıtma sistemleri gibi çevre dostu teknolojilerin benimsenmesini teşvik eden finansal destek mekanizmaları
3. Sürdürülebilir havuz yönetimi prensipleri üzerine odaklanan zorunlu eğitim ve sertifikasyon programları
4. Mikroplastik salan tüketici ürünlerinin ve ekipmanların kullanımına yönelik kısıtlamalar

9. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Yüzme havuzlarındaki mikroplastik ve kimyasal riskler, sporcu sağlığı için önemli tehditler oluşturmaktadır. Geleneksel havuz temizleme ve dezenfeksiyon yöntemleri, bu riskleri yeterince azaltamamakta ve kendileri de çeşitli sağlık ve çevresel sorunlara neden olabilmektedir.

Biyolojik filtrasyon sistemleri, ozon ve UV dezenfeksiyon teknolojileri, yeşil kimya uygulamaları ve sürdürülebilir havuz tasarımı gibi yeşil çözümler, mikroplastik ve kimyasal riskleri azaltmak için umut verici alternatifler sunmaktadır. Bu çözümler, sporcu sağlığını korurken çevresel etkileri de minimuma indirmektedir.

Gelecekte, nanoteknoloji, biyomimetik membranlar ve yapay zeka destekli havuz yönetim sistemleri gibi yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi, yüzme havuzlarının sürdürülebilirliğini daha da artırabilecektir. Ayrıca, mikroplastiklerin biyolojik olarak parçalanmasını sağlayan yeni enzim ve mikroorganizmaların keşfi, havuz suyundaki mikroplastik kirliliğinin kontrolünde önemli ilerlemeler sağlayabilecektir.

Sonuç olarak, yüzme havuzlarında temiz bir gelecek için, bilimsel araştırmaların, teknolojik yeniliklerin, politika düzenlemelerinin ve eğitim çalışmalarının entegre bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, sporcuların sağlığını korurken çevresel sürdürülebilirliği de sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] World Health Organization. (2006). *Guidelines for safe recreational water environments: Volume 2, Swimming pools and similar environments*. Geneva: WHO Press. <https://www.who.int/publications/i/item/9241546808>
- [2] Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453-458. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- [3] Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- [4] Wang, C., Zhao, J., & Xing, B. (2021). Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124357. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124357>
- [5] Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 636(1-3), 178-242. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>
- [6] Chowdhury, S., Alhooshani, K., & Karanfil, T. (2014). Disinfection by-products in swimming pools: Occurrences, implications, and future needs. *Water Research*, 53, 68-109. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.050>
- [7] Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- [8] Boucher, J., & Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources. IUCN, Global Marine and Polar Programme. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>
- [9] De Falco, F., Gullo, M. P., Gentile, G., et al. (2018). Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics. *Environmental Pollution*, 236, 916-925. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.057>
- [10] Kandasubramanian, B., & Issac, M. (2021). Mikroplastiklerin su ve sucul sistemlerdeki etkisi. *Çevre Bilimi ve Kirlilik Araştırmaları Uluslararası*, 28, 19544-19562. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13184-2>
- [11] Napper, I. E., Bakir, A., Rowland, S. J., et al. (2015). Characterisation, quantity, and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. *Marine Pollution Bulletin*, 99(1-2), 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.029>

- [12] Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G. J., et al. (2017). Identification of microplastics in effluents of wastewater treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108, 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015>
- [13] Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., et al. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview of possible human health effects. *Science of The Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- [14] Vasse, G. F., & Melgert, B. N. (2024). Microplastic and plastic pollution: impact on respiratory disease and health. *European Respiratory Review*, 33(172), 230226. <https://doi.org/10.1183/16000617.0226-2023>
- [15] Han, W., Cui, J., Sun, G., Miao, X., Zhang, P., & Li, N. (2024). Nano boyutlu mikroplastiklere maruz kalma, GSDMD'nin mitokondriyal lokalizasyonunu tetikleyerek cilt hücrelerinin yaşlanmasına neden olur. *Environmental Pollution*, 123874. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123874>
- [16] Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., et al. (2020). A detailed review study on the potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- [17] Hwang, J., Choi, D., Han, S., et al. (2020). Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Scientific Reports*, 10(1), 7391. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64464-9>
- [18] Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634-6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
- [19] Vethaak, A. D., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health. *Science*, 371(6530), 672-674. <https://doi.org/10.1126/science.abc5041>
- [20] Richardson, S. D., DeMarini, D. M., Kogevinas, M., et al. (2010). What's in the pool? A comprehensive identification of disinfection by-products and assessment of mutagenicity of chlorinated and brominated swimming pool water. *Environmental Health Perspectives*, 118(11), 1523-1530. <https://doi.org/10.1289/ehp.1001965>
- [21] Carter, R. A. A., & Joll, C. A. (2017). Occurrence and formation of disinfection by-products in the swimming pool environment: A critical review. *Journal of Environmental Sciences*, 58, 19-50. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.06.013>
- [22] Manasfi, T., Coulomb, B., & Boudenne, J. L. (2017). Occurrence, origin, and toxicity of disinfection byproducts in chlorinated swimming pools: An overview. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220(3), 591-603. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.01.005>

- [23] Jmaiff Blackstock, L. K., Wang, W., Vemula, S., Jaeger, B. T., & Li, X.-F. (2017). Sweetened swimming pools and hot tubs. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(4), 149-153. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00043>
- [24] Hansen, K. M. S., Willach, S., Antoniou, M. G., et al. (2012). Effect of pH on the formation of disinfection byproducts in swimming pool water – Is less THM better? *Water Research*, 46(19), 6399-6409. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.013>
- [25] Bougault, V., Turmel, J., Levesque, B., & Boulet, L. P. (2009). The respiratory health of swimmers. *Sports Medicine*, 39(4), 295-312. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939040-00003>
- [26] Nickmilder, M., & Bernard, A. (2007). Ecological association between childhood asthma and availability of indoor chlorinated swimming pools in Europe. *Occupational and Environmental Medicine*, 64(1), 37-46. <https://doi.org/10.1136/oem.2005.025452>
- [27] Font-Ribera, L., Villanueva, C. M., Gràcia-Lavedan, E., et al. (2014). Indoor swimming pool attendance and respiratory and dermal health in schoolchildren-HITEA Catalonia. *Respiratory Medicine*, 108(7), 1056-1059. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2014.04.018>
- [28] Villanueva, C. M., Cantor, K. P., Grimalt, J. O., et al. (2007). Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools. *American Journal of Epidemiology*, 165(2), 148-156. <https://doi.org/10.1093/aje/kwj364>
- [29] Zwiener, C., Richardson, S. D., De Marini, D. M., et al. (2007). Drowning in disinfection byproducts? Assessing swimming pool water. *Environmental Science & Technology*, 41(2), 363-372. <https://doi.org/10.1021/es062367v>
- [30] Gomiero, A., Strafella, P., Pellini, G., et al. (2018). Comparative effects of ingested PVC micro particles with and without adsorbed benzo(a)pyrene vs. spiked sediments on the cellular and subcellular processes of the benthic organism *Hediste diversicolor*. *Frontiers in Marine Science*, 5, 99. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00099>
- [31] Ma, B., Xue, W., Hu, C., et al. (2019). Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 359, 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.155>
- [32] Keuten, M. G. A., Peters, M. C. F. M., Daanen, H. A. M., et al. (2014). Quantification of continual anthropogenic pollutants released in swimming pools. *Water Research*, 53, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.027>

- [33] Osman, A. I., Hosny, M., Eltaweil, A. S., et al. (2023). Microplastic sources, formation, toxicity, and remediation: a review. *Environmental Chemistry Letters*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01593-3>
- [34] Tang, Y., Liu, Y., Chen, Y., et al. (2021). A review: Research progress on microplastic pollutants in aquatic environments. *Science of The Total Environment*, 766, 142572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142572>
- [35] Chandrakanthan, K., Fraser, M. P., & Herckes, P. (2024). Sucul ortamlarda mikroplastiklerin başlıca kaynağı olarak rekreasyonel aktiviteler. *Su Kirliliği. Nanoplastikler*, 3, 20. <http://dx.doi.org/10.20517/wecn.2024.40>
- [36] Science of The Total Environment. (2021). A review: Research progress on microplastic pollutants in aquatic environments. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142572>
- [37] Ecological Engineering. (2022). Biyolojik havuzların patojen kontrolü ve su kalitesinin korunmasındaki etkisini inceleyen çalışma. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106661>
- [38] Keuten, M. G. A., Peters, M. C. F. M., Daanen, H. A. M., et al. (2014). Quantification of continual anthropogenic pollutants released in swimming pools. *Water Research*, 53, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.027>
- [39] Jmaiff Blackstock, L. K., Wang, W., Vemula, S., et al. (2017). Sweetened swimming pools and hot tubs. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(4), 149-153. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00043>
- [40] Girish, N., Parashar, N., & Hait, S. (2023). Coagulative removal of microplastics from aqueous matrices: Recent progress and future perspectives. *Science of The Total Environment*, 899, 165723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165723>
- [41] Chandra, P., Enespa, Singh, R., et al. (2020). Mikrobiyal lipazlar ve endüstriyel uygulamaları: kapsamlı bir inceleme. *Microbial Cell Factories*, 19, 169. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01428-8>
- [42] Delgado Marín, J. P., Vera García, F., & García Cascales, J. R. (2019). Use predictive control to improve the energy efficiency in indoor swimming pools using solar thermal energy. *Solar Energy*, 179, 380-390. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.004>
- [43] Simoes, G., Dionisio, C., Gloria, A., Sebastião, P., & Souto, N. (2019). Smart system for monitoring and controlling swimming pools. In *2019 IEEE WF-IoT* (pp. 829-832). <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2019.8767240>
- [44] Sangeetha, A., Santhana R., Kumar, G., Golden, J., Ganesh, R., & Robinson, Y. (2023). Smart swimming pool management system

- (SSPMS) using IoT. In *2023 IEEE ICIDCA* (pp. 840-846). <https://doi.org/10.1109/ICIDCA56705.2023.10099729>
- [45] Krsmanović, S., & Radovic, L. (2018). Importance of hygiene behavior of pool facility users. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 1243-1250.
- [46] Gomez-Guillen, J.-J., Arimany-Serrat, N., Tapias Baqué, D., & Giménez, D. (2024). Water and energy sustainability of swimming pools: A case model on the Costa Brava, Catalonia. *Water*, 16(8), 1158. <https://doi.org/10.3390/w16081158>
- [47] Oliveira, M., Braga, A., Inverno, A., Santos, C., Silva, E., Carmo, F., Silva, L., Moreira da Silva, M., Cabral, P., Sequeira, P., & Lança, R. (2018). Spools: Sustainable pools are the main developments of the project. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 217, 821-832. <https://doi.org/10.2495/SDP180691>
- [48] Oliveira, M. J., Inverno, A., Farinha, F., Monteiro, J., Cabrita, C., Segura, M., do Carmo, F., Venturinha, A., & Matias, G. (2022). ECOPOOL++: Sürdürülebilir bir ısıtmalı açık yüzme havuzu geliştirmek. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 38, 389-395. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.38.0389>
- [49] Eken, T., & Aksu, İ. (2024). Yeşil yıldızlı otellerin yeşil maliyetlerinin ürün yaşam seyri maliyetleme açısından değerlendirilmesi. *Alanya Akademik Bakış*, 8(1), 130-144.
- [50] Budak, Y., & Keçeci, M. (2024). Sıfır atık ile yeşil dönüşüm: Türkiye'nin geleceği için çevre dostu kozmetik ve temizlik ürünleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 13(3), 145-155.
- [51] Aktürk Bozdemir, E., & Budak, Y. (2025). Nano-biyokimya ve yapay zekâ ile çevresel dönüşüm: Yenilikçi çözümler ve sürdürülebilir uygulamalar. *Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler*, 25.

