

ÇEVRE BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA YENİ BİLİMSEL ÇALIŞMALAR

Editör: ALİ BİLGİLİ



BİDGE Yayınları

**Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Alanında Yeni Bilimsel
Çalışmalar**

Editör: PROF. DR. ALİ BİLGİLİ

ISBN: 978-625-8995-73-2

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-03-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

DİJİTAL TARIM PERSPEKTİFİNDE UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ TABANLI AKILLI TARIM UYGULAMALARI	1
---	---

BİRCE HAMUT

İKLİM KRİZİ VE KURAKLIK:EKOLOJİK, SOSYAL VE EKONOMİK BOYUTLAR	26
--	----

SERPİL SAVCI

KENT EKOLOJİSİNDE YEŞİL ALTYAPI:POTANSİYELLER VE RİSKLER	36
---	----

SERPİL SAVCI

ATIKTAN KAYNAĞA PERSPEKTİFİYLE TÜRKİYE’DE DÖNGÜSEL EKONOMİ: AB DÜZENLEMELERİYLE KARŞILAŞTIRMALI OLARAK FIRSATLAR, YAPISAL SINIRLILIKLAR VE POLİTİKA ÖNCELİKLERİ	47
--	----

EMİNE SU TURAN, BEHZAT BALCI, FATMA ELÇİN ERKURT

ÇAPAKÇUR ÇAYI’NIN (BİNGÖL) FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE VİVİPARUS CONTECTUS İLE ELEKTROKİMYASAL PROSESLER KULLANILARAK SU ARITIMININ İNCELENMESİ	83
--	----

*FİLİZ KUTLUYER KOCABAŞ, HAYRULLAH ÖĞEDEY, MEHMET
KOCABAŞ*

BÖLÜM 0

DİJİTAL TARIM PERSPEKTİFİNDE UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ TABANLI AKILLI TARIM UYGULAMALARI

BİRCE BELİZ HAMUT¹

Giriş

Teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler ve bilgisayar teknolojisindeki yenilikler birçok bilim dalında yeni çalışma alanlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Özellikle 21. yüzyılda dijitalleşme, nesnelerin interneti, yapay zekâ, büyük veri gibi yeni teknolojilerin daha yoğun bir şekilde kullanımı, insanların günlük yaşamlarından ekonomiye kadar geniş bir alanda dönüşümlere yol açmıştır (Sadiku ve ark. 2025, 930). Bu ilerleme ve yaygınlaşma teknolojinin tüm bilim alanlarında kullanılmasına da olanak tanımıştır. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri de bu teknolojiler arasında yer almaktadır. Birçok alanda kullanılan bu teknolojiler insanların hayatlarını da kolaylaştıran araçlar arasındadır (Nizamani ve ark. 2023, 284).

Teknolojinin gelişmesi üzerine yaşanan atılımlardan biri Uzaktan Algılama (UA) sektöründe gerçekleşmiştir (Chinmayi ve

¹ PhD, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Orcid: 0000-0001-8009-047X

ark. 2025, 2772). Her alanda kullanılan Uzaktan Algılama, cisimlere temas etmeden, çeşitli bileşenlerle onların fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinilmesini sağlamaktadır (Jia ve Stein, 2017, 1343; Kintada ve ark. 2025, 1). Elde edilen veri çoğunlukla uydu üzeri algılayıcılar kullanılarak ya da balon veya uçak gibi hava araçlarına yerleştirilen algılayıcılar sayesinde olmaktadır (Avcı ve ark. 2015, 53; Pahlevi, 2023). Uzaktan Algılama, ormancılık, tarım, jeoloji, çevre ve şehircilik, altyapı çalışmaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Liu ve ark. 2006, 1431; Rokade ve ark. 2007, 943; Royer ve ark. 2011, 714; Hu ve ark. 2010; Kunwar ve ark. 2010, 204; Goyal ve ark. 2020, 605).

Bir diğer teknolojinin gelişmesi ile ortaya çıkan ve Uzaktan Algılama ile entegre bir şekilde kullanılan Coğrafi Bilgi Sistemleri(CBS), konuma dayalı verilerin işlenmesi, düzenlenmesi, depolanması ve analiz edilebilmesi konularında karar vericilere eşsiz imkanlar sağlamaktadır (Kochanek ve ark. 2025, 4740). CBS'nin temel hammaddesi veri olup, sistemin toplam %60-80'lik kısmını bu verilerin toplanması ve işlenmesi oluşturmaktadır. Bu noktada Uzaktan Algılama'nın sonuç ürünü olan Coğrafi Bilgi Sistemi önemli bir noktada yer almaktadır (Mishra, 2021, 49).

Günlük hayatımızda Uzaktan Algılama gibi pek çok alanda etkili olan CBS'de yoğun olarak kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir. CBS'nin kullanım alanları da bu sebeple oldukça geniştir (Leeonis ve ark. 2024, 181). Son dönemlerde CBS, iletişim, veri tabanı yönetimi, görüntü işleme, yapay zekâ gibi alanlarda gerçekleşen hızlı gelişmeler verinin işlenmesi ve analiz edilmesi açısından yeni ürün tasarımları ile teknolojik gelişmelere katkı sağlamıştır (Kochanek ve ark. 2026, 385).

İnsanlık, tarihindeki en büyük ekolojik krizlerden olan iklim değişikliğidir. Bu değişim ile mücadele ederken geleneksel yöntemlerimiz çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple teknolojinin varlığı ile beraber daha kolay ve sürdürülebilir

yöntemleri kullanmayı amaçlamaktayız (Dwivedi ve ark. 2022, 268). Dünya’da nüfusun artmasıyla beraber gıda talebi, girdi maliyeti, çevresel baskı artmaktadır. Bunların yanı sıra iklim ve su arzı düşmekte, biyolojik çeşitlilik azalmakta, beslenme ve gıda güvenliği sorunları ortaya çıkmaktadır. Tarımsal faaliyetlere bakıldığında ise bozulan ekilebilir arazilerin restorasyon ihtiyacı oluşmaktadır (Bahar ve ark. 2020, 959). Bu ihtiyaçları karşılamak, iklim krizine karşı önemler almak ve doğayı koruma için yönetim sistemlerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu yönetim sistemlerini oluştururken de teknolojinin dallarından biri olan Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinden faydalanılması gerekir (Atalay ve ark. 2025, 5006).

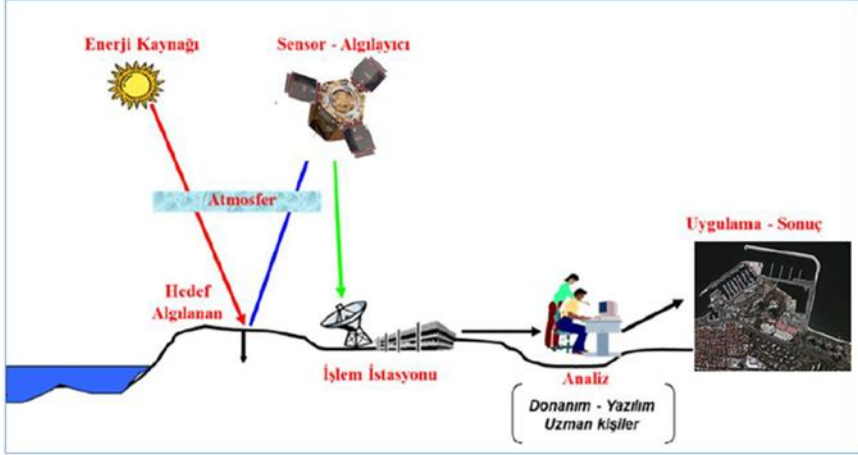
Günümüzde ise Coğrafi Bilgi Sistemi ve Uzaktan Algılama uygulamalarının tarımda kullanımının avantajları oldukça fazladır. Bu teknolojiler, tarımda geniş alanları hızlı ve etkili bir şekilde izlemeyi amaçlamıştır (Rose ve ark. 2018, 87; Wang ve ark. 2024, 1975). Özellikle uydu ve İnsansız Hava Aracı (İHA) sayesinde verilerin toplanmasını, tarım arazilerinin düzenli olarak izlenmesini ve analiz edilmesini sağlar (Phang ve ark. 2023, 127057). Bu sayede, bitki sağlığı, toprak nemi ve ürün deseni gibi parametreler daimi olarak takip edilebilmektedir. Bu teknolojik gelişmelerle çiftçiler ve tarım işletmeleri, daha etkili ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını kullanabilmektedirler (Dogra ve ark. 2025, 27).

UZAKTAN ALGILAMA TEKNOLOJİLERİ VE TARIMSAL KULLANIMI

Uzaktan Algılama (UA) bilindiği gibi yeryüzündeki cisimleri uzaktan izleyebilmek ve bilgi sahibi olabilmek için kullanılan bir araçtır. Uzaktan Algılamanın uygulanabilirliğini sağlayan bileşenler ise enerji kaynağı, sensör-algılayıcı, işlem istasyonu, donanım-yazılım ve sonuç olarak bilinmektedir (Kaczmarek ve Blachowski, 2025, 2628) (Resim 1). Bu bileşenler sayesinde elde ettiği veriler için altlık oluşturur. Oluşturduğu altlık ile yorum, analiz, tespit

yapmak için Coğrafi Bilgi Sistemleri teknolojilerinden faydalanır (Liu ve ark. 2006, 1431; Rokade ve ark. 2007, 943; Royer ve ark. 2011, 714; Hu ve ark. 2010; Kunwar ve ark. 2010, 204; Mierzejowska ve Żogała, 2018, 101).

Resim 1. Uzaktan Algılama Bileşenleri



Kaynak: Demiroğlu İ. (2022)

Günümüzde tarımda önemli teknolojilerden biri olan UA'nın temelini, çevrenin ve bitkinin tüm bilgilerini elde etmek amacıyla yer tabanlı, uzay ve hava kaynaklı sensörler oluşturur. Uzaktan Algılamada sensör-algılayıcı dediğimiz bileşende yeryüzünü görüntülemek amacıyla uydular kullanılmaktadır (Shahi ve ark. 2025, 2352). Genel olarak bakıldığında herhangi bir cisim etrafında (örneğin Galaksi, Güneş, Dünya veya Mars) dönen cisimlere uydu denilmektedir. Yeryüzünü görüntülemek için kullanılan uydu sistemleri de Landsat, Meteosat, Rapid Eye, Spot, GeoEye, WorldView, Envisat, RASAT, Göktürk-2 vb. uydularıdır (Resim 2).

Resim 2. Uzaktan Algılama için Kullanılan Uydular



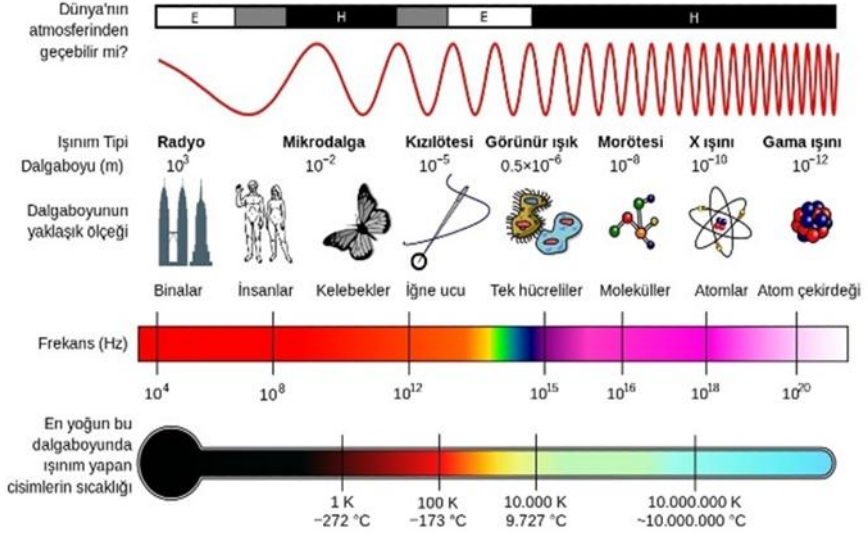
Kaynak: Selding P.B. (2015)

Uzaktan algılamanın tarımda kullanım şekli ise bitkileri tahrip etmeden uzaktan büyük ölçekte izlenmesini sağlar. İnsansız kara araçlarına, uyduya veya saha robotlarına monte edilmiş bilgiyi üretip işleyebilen sensörler ile bitkilerden yansıyan elektromanyetik radyasyon sayesinde verinin elde edilmesini sağlar (Łągiewska ve Panek-Chwastyk, 2025, 2314). Bu sistem bitkilerde biyokimyasal, morfolojik, fenolojik ve fizyolojik özellikleri tanımlanmak amacıyla kullanılmaktadır. Aynı zamanda bitkinin performans ve uygunluğunu belirleyen özelliklerden veri ve çözüm üretmeye yöneliktir (Weiss ve ark. 2020, 111402). Uzaktan Algılama tarım alanında daha detaylı olarak bakıldığında bitki yoğunluğu, yaprak alanı, yaprak içeriği ve işlevleri, bitki örtüsü, toprak sıcaklığı ve toprak nemi gibi bilgilerin elde edilmesini amaçlamıştır. Bu sayede bitki sağlığı, besin eksikliği, sulama süresi ve miktarı, verim tahmini gibi durumların yönetilmesini sağlamaktadır (Weiss ve ark. 2020, 111402; Martos ve ark. 2021, 5911).

Uzaktan algılamanın temel prensiplerinden bir diğeri de elektromanyetik spektrum ile olan ilişkisidir. Tarımsal uygulamalarda elektromanyetik spektrum ile bitki sağlığını izleme, toprak özelliklerini belirleme, ürün tahmini ve sulama yönetimi gibi pek çok alanda etkin olarak kullanılmaktadır (Omia ve ark. 2023, 354). Bu belirlemelerde yakın kızılötesi ve mor ötesi dalgalar, sentetik açıklıklı radarlar, floresan spektroskopisi, multispektral ve hiperspektral görüntüler, görünür kırmızı, yeşil ve mavi (KYM) dalgalar, bitki- toprak-su indeksleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Mishra ve ark. 2017, 49; Ahmad ve ark. 2021, 7; Martos ve ark. 2021, 5911; Zheng ve ark. 2021, 531; Javiaid ve ark. 2022, 150).

Yakın kızılötesi (NIR) bölgesi (750-1400 nm), bitki biyokütlesini ve bitki genel sağlığını değerlendirmek amacıyla kullanılan en yaygın bölgedir (Imran ve ark. 2020, 2254). Bitkiler, yapılarındaki su içeriğine bağlı olarak NIR ışığını farklı oranlarda yansıtırlar. Kısa dalga kızılötesi (SWIR) bölgesi (1400-3000 nm) kuraklık tespiti yapmak ve toprak bileşimini analiz etmek için kullanılır. Aynı zamanda SWIR bandı, toprak nemi, organik madde ve mineral içeriğini belirlemede oldukça etkilidir (Holzman ve ark. 2021, 3371). Bir diğ er dalga boyu ise morötesi (UV) bölgesidir (10-400 nm). Dalga boyu bitki yapraklarının yüzey özelliklerini ve stres durumlarını belirlemek için kullanılır (Khanal ve ark. 2025, 493). Görünür bölge (400-700 nm) ise bitki gelişiminin değerlendirilmesinde ciddi bir öneme sahiptir (Gill ve ark. 2022, 156). Görünür ışığın mavi bölgesi (450-495 nm) genç bitkilerin büyümesini teşvik ederken, yeşil bölge (495-570 nm) bitkiler tarafından en az emilen kısımdır. Bu nedenle sağlıklı bitkiler yeşil görünür (Su ve ark. 2025, 795). Kırmızı bölge (620-700 nm) ise klorofil tarafından güçlü bir şekilde emildiğ inden, bitki fotosentezi için hayati önem taşımaktadır (Resim 3).

Resim 3. Elektromanyetik Spektrum



Kaynak: Kızıltuğ E. (2024)

Tarımsal alanlara ait bir takım bilgilerin elde edilmesinde dalga boylarının yanı sıra çeşitli indeksler de kullanılmaktadır. Bu indeksler, bitki sağlığı, verimlilik ve genel tarla durumunu değerlendirmek için kullanılır (Gungor ve ark. 2026, 158). İndeksler toprak, su, bitki indeksleri olarak ayrılmaktadır. En yaygın kullanılan spektral indeksler;

- Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi (NDVI): Bitki örtüsünün sağlığını ve yoğunluğunu tespit eder. Yüksek indeks değerleri, sağlıklı ve yoğun bitki örtüsünü gösterken, Düşük indeks değerleri ise bitkilerin stres altında olduğunu veya seyrek olduğunu gösterir. NDVI, özellikle tarla bitkilerinin izlenmesi ve verim tahminleri açısından kullanılmaktadır (Martinez ve Labib, 2023, 13).

•Toprağa Göre Ayarlanmış Bitki Örtüsü İndeksi (SAVI): Bitki örtüsünün sağlığını değerlendirirken toprak yansıtmasının etkisini azaltmak için geliştirilen bir indekstir. Bu indeks, bitki örtüsünün yoğun olmadığı alanları tespit ederek daha doğru sonuçları ortaya koyar (Altıkat, 2025, 139).

•Su İndeksi (WI): Bitkilerdeki su içeriğini ve su stresini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Bitkilerin su ihtiyacını ve sulama gereksinimlerini belirlemede etkili bir indekstir (Testi ve ark. 2008, 395).

•Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (NDWI): Doğal alanlarda veya ekim yapılan bölgelerde yüzey suyu varlığını ve bitki örtüsündeki su içeriğini değerlendirmek için kullanılır. Özellikle sulak alanların izlenmesi ve sulama yönetimi için kullanılan bir indekstir (Le ve ark. 2023, 3360).

•Toprak İndeksi (Soil index): Isıl kızıllötesi (TIR) ve orta kızıllötesi (MIR) bantları sayesinde toprak alanlarını tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır (Chen ve ark. 2025, 34).

•Normalize Edilmiş Fark Tuz İndeksi (NDSI): Topraklardaki tuz miktarındaki değişimlerin tespiti için önemlidir (Kagan ve ark. 2015, 15748).

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİNİN TARIMSAL ANALİZLERDE ROLÜ

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Uzaktan Algılama ile entegre şekilde kullanılan ve UA'nın elde ettiği verilerin depolanmasını, yönetilmesini, işlenmesini, analiz edilmesini ve görselleştirilmesini sağlayan entegre bir teknoloji sistemidir. CBS, çok disiplinli bir alan olup, mekânsal bilgilerin etkin bir şekilde yönetilmesine ve değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sistemler, hem doğal hem de yapay çevreye ilişkin verilerin modellenmesine yardımcı olur. Aynı zamanda karar destek süreçlerinde de etkin bir şekilde rol

oyun (Tsatsaris ve ark. 2023, 94). Coğrafi Bilgi Sistemlerinin temel fonksiyonları için beş ana unsurun bulunması gerekmektedir. Bunlar CBS'nin bileşenleri olarak bilinen donanım, yazılım, veri, insanlar ve yöntemlerdir.

•Donanım (Hardware): CBS'nin işlemlerini mümkün kılan bilgisayar ve buna bağlı yan ürünlerin bütünüdür. Bu sistem içerisinde araç olarak görünen bilgisayar yan donanımlarına da ihtiyaç duymaktadır. Örneğin, yazıcı (printer), çizici (plotter), tarayıcı (scanner), sayısallaştırıcı (digitizer), veri kayıt üniteleri (data collector) gibi cihazlar da CBS için önemli sayılabilecek donanımlar içerisinde. Günümüzde birçok CBS yazılımı farklı donanımlar üzerinde çalışmaktadır. Merkeze bağlı bilgisayar sistemleri, kişisel bilgisayar sistemleri, ağ (network) donanımlı bilgisayar sistemleri gibi değişik donanımlar mevcuttur (Ali, 2020).

•Yazılım (Software): Coğrafi bilgileri depolamak, analiz etmek ve görüntülemek gibi ihtiyaç duyulan fonksiyonları, yüksek düzeyli programlama sayesinde gerçekleştirilen algoritmalar. Yazılımların çoğu ticari amaçlı firmalarca geliştirilse de üniversiteler ve diğer araştırma kurumları da eğitim ve araştırmaya yönelik yazılımlar geliştirmiştir. Ancak Dünyadaki CBS pazarının önemli bir kısmı yazılım geliştiren firmaların elindedir (Verma ve Kotwal, 2025).

•Veri (Data): CBS'nin en önemli bileşenlerinden biridir. Grafik yapıdaki veriler ile tanımlayıcı nitelikteki veriler veya tablo verilerini gerekli kaynaklardan toplayabilmektedir. Aynı zamanda Coğrafi Bilgi Sistemi konumsal veriyi diğer veri kaynakları ile de birleştirebilir. Böylece birçok veri organize edilerek konumsal veriler ile birleştirilebilmektedir. Bu sebeplerle veri, CBS için temel öğedir. Ancak elde edilmesi en zor bileşen olarak kabul edilmektedir (Akıllı ve ark. 2025, 530).

•İnsanlar: Sistemleri tasarlayan ve koruyan uzman teknisyenlerden, performansları artırmak için bu sistemleri kullanan kişilere kadar olan kitleyi temsil etmektedir. Bu nedenle CBS'nin gelişmesi kullanıcıların ona sahip çıkmasına bağlıdır. Aynı zamanda konuma bağlı her türlü analiz için CBS'yi kullanabilme, yeteneklerini artırmalarına ve değişik disiplinleri oluşturmaları gerekmektedir. Bu yüzden CBS'nin avantajlarının tanıtılması sağlanmalıdır (Li ve ark. 2023, 137).

•Yöntem: Coğrafi Bilgi Sistemlerinin kullanılabilmesi için çeşitli yazılımlara bağlı programlar mevcuttur. Bu programlar üzerinde ise farklı türde yöntemler bulunmaktadır. Kullanıcının hangi yöntemi seçeceği o kişinin hedefine göre değişmektedir. Bu anlamda birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlar, Unsupervised, Supervised, Kriging, IDW, Spline gibi yöntemlerdir (Maxwell ve Shobe, 2022, 12).

Tarımın kendine has özelliklerinin olması ve kayıt tutma problemlerinin yaşanması sebebiyle verinin temini oldukça güç olmaktadır. Bu yüzden tarım gelişen getirmiş olduğu yeniliklere adapte olmak zorundadır. Bu yeniliklerden birisi de Coğrafi Bilgi Sistemi teknolojisidir. Neredeyse bütün alanlarda kullanılabilen CBS tarımda da geniş uygulama alanlarına sahiptir. Özellikle tarımsal taşınmazların değerlendirilmesinde ortaya çıkan sorunlar bu teknoloji sayesinde çözülebilmektedir (Yarılgaç, 2012, 71).

Coğrafi Bilgi Sistemi teknolojisinin kullanımı ile veriler dijital ortamda tutulabilmektedir. Aynı zamanda bu verilerin güncellenmesi kolaylaşmakta ve mevcut veriler ile modeller oluşturularak çeşitli sorunlara ışık tutabilmektedir (Karakayacı ve Oğuz, 2007, 283; Meneses ve ark. 2025, 976). Coğrafi Bilgi Sistemleri sayesinde;

- Uydu ve İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı veri toplama yöntemleri ile tarım arazilerinin düzenli olarak izlenmesini hatta analiz edilmesini sağlar.

- Analiz edilen araziler için bitki sağlığı, toprak nemi ve ürün deseni gibi parametrelerin işlenip bu veriler sayesinde sürekli olarak takip edilmesi sağlanabilmektedir.

- Ayrıca, CBS kullanılarak yapılan mekânsal analizler, tarım arazilerinin verimliliğini artırmak ve kaynak kullanımını optimize etmek için bilgiler sunmaktadır..

- Sulama planlaması için su ihtiyacı analizleri yapılmaktadır.

- CBS ile ürün tahmini için modeller geliştirilebilmektedir (Ge ve ark. 2021, 1562).

Bu sistemler, tarım sektörünün daha sürdürülebilir olmasına imkan sağlamaktadır. Aynı zamanda verimli uygulamaların geliştirilmesine olanak tanıyarak sektöre önemli katkılar sunmaktadır.

TARIMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNDEKİ MEKÂNSAL ETKİLER

Uzaktan algılama ve CBS entegrasyonu, tarımda dijital değişimin temeli olarak öne çıkmaktadır. Teknolojik ilerlemeler, tarımsal üretimde hem verimlilik artışını destekler hem de çevresel sürdürülebilirliği de güçlendirmek ve geliştirmektedir. Bu teknoloji sayesinde de çiftçilerin daha bilinçli ve sürdürülebilir kararlar alınması sağlanmaktadır (Pawar ve ark. 2025).

Gelecekte yapay zekâ ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojiler daha fazla desteklenecektir. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemi tabanlı karar destek sistemleri, tarımsal üretimi daha verimli, düşük maliyetli ve iklim değişikliğine karşı dirençli hale getirecektir (Kumari ve ark. 2024, 89).

Tarımda Uzaktan Algılama ve CBS entegrasyonunun bazı uygulama alanları aşağıdaki gibidir:

- Bitki Sağlığı ve Verim Tahmini:** Uzaktan Algılama teknolojileri sayesinde sensörler kullanılarak bitki örtüsüne ait elde edilen veriler bitkinin gelişimini ve sağlığını değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Bu analizler, CBS aracılığıyla elde edilen mekânsal verilerle birleştirilerek, hangi alanlarda verim düşüklüğü olduğu tespit ederek zamanında önlemler alınmasını sağlar (Hassan ve ark. 2019, 95).

- Sulama Yönetimi:** Termal görüntüleme ve dalga sensörlerini kullanarak tarım alanlarının toprak nem seviyesini izleyebilmektedir. Bu veriler CBS sayesinde, su kaynaklarının etkin yönetilmesine katkı sağlar. Aynı zamanda tarım arazilerinin aşırı sulama ya da kuraklık riskine karşı su tasarrufu yapılmasına yardımcı olmaktadır (Zhang ve ark. 2024, 344).

- Tarımsal Hastalık ve Zararlı Tespiti:** Hastalık ve zararlı organizmaların neden olduğu bitki stresini belirlemek için hiperspektral görüntüler ve multispektral sensörler kullanılmaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri de bu zararlı popülasyonlarının mekânsal dağılımı haritalandırılarak, biyolojik ve kimyasal mücadele stratejilerini ortaya koymaktadır (Mamabolo ve ark. 2025, 2772).

- Toprak Analizi ve Arazi Kullanımı:** Uzaktan algılama, arazi kullanımına yönelik verileri, toprak bileşimi, organik madde içeriği ve drenaj koşulları gibi özellikleri değerlendirebilmek için kullanılmaktadır. CBS yardımıyla beraber tarım alanlarının verimliliği artırılarak en uygun ekim stratejileri, doğru gübreleme yöntemleri ve arazi kullanım koşulları belirlenerek sürdürülebilir bir yaklaşım geliştirilebilmektedir (Lausch ve ark. 2025, 2233).

- İklim Değişikliği ve Tarımsal Risk Yönetimi:** Uzun vadeli iklim değişikliği eğilimleri UA ile analiz edilebilmektedir. Aynı zamanda tarımsal üretim üzerindeki potansiyel etkileri tahmin etmeye

yardımcı olur. Coğrafi Bilgi Sistemleri ile kullanıldığında, ekstrem hava olaylarının mekânsal analizleri yapılabilmektedir. Bunların yanı sıra tarımsal risk yönetim politikaları geliştirilebilmektedir (Charalampopoulos ve Droulia, 2023, 18).

UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFI BİLGİ SİSTEMLERİNDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR

Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemlerini kullanan kullanıcılar birçok olumlu sonucun yanı sıra olumsuz sonuçlarının da varlığını ortaya koymaktadır. Bu teknolojik sistemde karşılaşılan sorunlar ise şunlardır;

- Uzaktan algılama verilerinin işlenmesi, sensör kalibrasyonu ve uygun platform seçimi gibi insan müdahalesi olan durumlarda verilerin hata payı ve sapma oranları yüksek olabilmektedir. Aynı zamanda görüntülerin çözünürlüklerinin belirlenmesinde sorunlar ortaya çıkabilmektedir.

- Uzaktan algılama cihazlarının zamanla kalibrasyonları bozulabilmektedir. Bu durum hatalı verilerin elde edilmesine yol açabilmektedir.

- Uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri üzerine uzmanlaşan kişilerin işe alınmasının maliyeti nedeniyle pahalı hale gelebilir.

- Coğrafi Bilgi Sistemleri araçları pahalı olmaları sebebiyle temin edilmesi zor olabilmektedir.

- Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımları kullanacak kişiler için öğrenme süreci uzun olabilir.

- Mekansal ilişkileri ortaya koyar. Ancak mutlak çözümler sunmaz.

- Geleneksel haritalarla günümüzdeki verilerin entegrasyonu zordur.

•Coğrafi Bilgi Sistemli programların masaüstü uygulamaları veri açısından büyük yer kaplamaktadır. Bu sebeple verimli bir işlemci ve daha fazla depolama alanı gerektiren donanımların kullanılması gerekmektedir (Guccione ve ark. 2024, 2281).

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin her ne kadar olumsuz yanları da olsa olumlu yanları çok daha fazladır. Bu sebeple Uzaktan Algılama teknolojileri;

- Tarımsal üretimde verimliliği artırmaktadır.
- Su ve toprak kaynaklarının daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır.
- Çevresel etkilerini azaltmayı sağlamaktadır.
- Sürdürülebilir tarım politikalarının geliştirilmesi ve uygulanmasında kullanılmaktadır.
- Hassas tarım uygulamalarının geliştirilmesi sayesinde su ve pestisit kullanımında optimizasyon sağlanmaktadır.
- Doğal alanların korunması için yönetim planları oluşturmaktadır.
- Arazi kullanım yönetiminde etkin bir şekilde kullanılmaktadır.
- Tarıma elverişli olmayan alanların belirlenmesine yardımcı olmaktadır.
- Topraklardaki erozyon kontrolü için kullanılmaktadır.
- Bitki sağlığının izlenmesi ve erken teşhis sistemleri ile verim kayıplarının önüne geçilmesini sağlamaktadır.
- Üretim maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olmaktadır.

- Toprak organik madde içeriği belirlenerek uygun ekim ve gübreleme stratejileri oluşturulabilmektedir.

- Biyolojik çeşitliliğin korunmasına katkı sağlamaktadır.

Gelecekte, tarımsal etimi daha güçlü bir duruma getirebilmek için CBS tabanlı karar destek sistemlerinin yaygınlaştırılması gereken önemli bir adımdır. Bu teknolojiler sayesinde tarımsal faaliyetlerin daha doğru ve bilinçli bir şekilde yönetilmesi sağlanabilmektedir. Aynı zamanda çevresel etkiler daha minimize edilebilmektedir. Devlet kurumları ve özel sektör işletmeleri, bu teknolojileri çiftçilere ulaştırarak kullanımına yönelik teşvik mekanizmaları geliştirmelidir. Bu sektörler Uzaktan Algılama ve Coğrafı Bilgi sistemleri teknolojisi yardımıyla veri paylaşımı yaparak altyapılarını da güçlendirmelidir. Böylece tarımsal sürdürülebilirlik adına bu teknolojinin yerel bir durumda kullanılması değil, küresel ölçekte kullanılmasının sağlanması ile gıda güvenliğinin daha sağlam temellere oturtulması amaçlanmalıdır.

KAYNAKÇA

Ahmad, A., Ordoñez, J., Cartujo, P., & Martos, V. (2021). Remotely Piloted Aircraft (RPA) in Agriculture: A Pursuit of Sustainability. *Agronomy*, 11, 1, 7.

Akıllı, C., Polat, Y., & Kılınç, F. (2025). Managerial Opinions on the Functions of Geographic Information Systems in Education Management and Planning in Türkiye: The Case of Elazığ. *Adiyaman University Journal of Educational Sciences*, 15, 2, 530-569.

Ali, E. (2020). Geographic Information System (GIS): Definition, Development, Applications and Components. Department of Geography, Ananda Chandra College, Jalpaiguri-735101.

Altıkat, A. (2025). Satellite-Based Monitoring of Vegetation and Soil Moisture Indices for Stress Detection and Irrigation Planning in a Semi-Arid Apple Orchard. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 21, 2, 139-161.

Atalay, A., Perkumiene, D., Safaa, L., Škema, M., & Aleinikovas, M. (2025). Artificial Intelligence Technologies As Smart Solutions for Sustainable Protected Areas Management. *Sustainability*, 17, 5006.

Avcı, U. D., Güneş, P. U., & Çabuk, A. (2015). Uzaktan Eğitim ile Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Eğitimlerinin Verilmesine Dair Bir Değerlendirme. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7, 3, 53-68.

Bahar, N. H. A., Lo, M., Sanjaya, M., Vianen, J. V., Alexander, P., Ickowitz, A., & Sunderland, T. (2020). Meeting The Food Security Challenge for Nine Billion People in 2050: What Impact on Forests?. *Global Environmental Change*, 62, 102056.

Charalampopoulos, I. & Droulia, F. (2023). A Pathway towards Climate Services for the Agricultural Sector. *Climate*, 12, 18.

Chen, Q., Vaudour, E., Richer-de-Forges, A. C., & Arrouays, D. (2025). Spectral Indices In Remote Sensing of Soil: Definition, Popularity, and Issues. A Critical Overview. *Remote Sensing of Environment*, 329, 114918.

Chinmayi, H. K., Flynn, K. C., & Ashworth, A. J. (2025). Advancements in Remote Sensing Techniques for Earthquake Engineering: A Review. *Earthquake Research Advances*, 5, 100352.

Demiroğlu, İ. (2022). Uzaktan Algılama Teknikleri Kullanılarak Zerne Barajının Alansal, Hacimsel ve Kıyı Değişimlerinin Zamana Bağlı Analizi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.

Dogra, P., Yadav, A. K., Venkatarao, C. V., Aparna, Omprakash, Asiwal, R., & Verma, R. (2025). Remote Sensing and Geographic Information Systems in Agriculture: Applications and Challenges. *Biological Forum an International Journal*, 17, 5, 27-36.

Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Kar, A. K., Baabdullah, A. M., Grover, P., Abbas, R., Andreini, D., Abumoghli, I., Barlette, Y., Bunker, D., Kruse, L. C., Constantiou, I., Davison, R. M., De, R., Dubey, R., Fenby-Taylor, H., Gupta, B., He, W., Kodama, M., Mantymaki, M., Metri, B., Michael, K., Olaisen, J., Panteli, N., Pekkola, S., Nishant, R., Raman, R., Rana, N. P., Rowe, F., Sarker, S., Scholtz, B., Sein, M., Shah, J. D., Teo, T. S. H., Tiwari, M. K., Vendelø, M. T., & Wade, M. (2022). Climate Change and COP26: Are Digital Technologies and Information Management Part of The Problem or The Solution? An Editorial Reflection and Call to Action. *International Journal of Information Management*, 63, 102456.

Ge, X., Ding, J., Jin, X., Wang, J., Chen, X., Li, X., Liu, J., & Xie, B. (2021). Estimating Agricultural Soil Moisture Content through UAV-Based Hyperspectral Images in the Arid Region. *Remote Sens*, 13, 1562.

Gill, T., Gill, S. K., Saini, D. K., Chopra, Y., Koff, J. P. & Sandhu, K. S. (2022). A Comprehensive Review of High Throughput Phenotyping and Machine Learning for Plant Stress Phenotyping. *Phenomic*, 2, 156-183.

Goyal, M. K., Sharma, A., & Surampalli, R. Y. (2020). Remote Sensing and GIS Applications in Sustainability. *Sustainability*, 605-626, <https://doi.org/10.1002/9781119434016.ch28>.

Guccione, D. E., Turvey, E., Roncella, R., Thoeni, K., & Giacomini, A. (2023). Proficient Calibration Methodologies for Fixed Photogrammetric Monitoring Systems. *Remote Sens*, 16, 2281.

Gungor, R., Sanli, F. B., Ates, A. M., & Yilmaz, O. S. (2026). Evaluation of Classification Accuracy of Spectral Indices and Machine Learning Algorithms for Greenhouse Detection Using the Google Earth Engine Platform. *Journal of Agricultural Sciences*, 32, 1, 158-176.

Hassan, M. A., Yang, M., Rasheed, A., Yang, G., Reynolds, M., Xia, X., Xiao, Y., & He, Z. (2019). A Rapid Monitoring Of NDVI Across The Wheat Growth Cycle for Grain Yield Prediction Using A Multi-Spectral UAV Platform. *Plant Science*, 282, 95-103.

Holzman, M. E., Rivas, R. E., Bayala, & M. I. (2021). Relationship between TIR and NIR-SWIR as Indicator of Vegetation Water Availability. *Remote Sens*, 13, 3371.

Hu, G. Y., Dong, Z. B., Wei, Z. H., & Lu J. F. (2010). Land Use and Land Cover Change Monitoring in The Zoige Wetland by Remote Sensing 6th International Symposium on Digital Earth: Data Processing and Applications, SPIE 7841.

Imran, H. A., Gianelle, D., Rocchini, D., Dalponte, M., Martín, M. P., Sakowska, K., Wohlfahrt, G., & Vescovo, L. (2020). VIS-NIR, Red-Edge and NIR-Shoulder Based Normalized Vegetation Indices

Response to Co-Varying Leaf and Canopy Structural Traits in Heterogeneous Grasslands. *Remote Sens*, 12, 2254.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Enhancing Smart Farming Through The Applications of Agriculture 4.0 Technologies. *International Journal of Intelligent Networks*, 3, 150-164.

Jia, P. & Stein, A. (2017). Using Remote Sensing Technology To Measure Environmental Determinants of Non-Communicable Diseases. *International Journal of Epidemiology*, 46, 4, 1343-1344.

Kaczmarek, A. & Blachowski, J. (2025). Remote Sensing Perspective on Monitoring and Predicting Underground Energy Sources Storage Environmental Impacts: Literature Review. *Remote Sens*, 17, 2628.

Kagan, T. P., Zaady, E., Salbach, C., Schmidt, A., Lausch, A., Zacharias, S., Notesco, G., Ben-Dor, E., & Karnieli, A. (2015). Mapping the Spectral Soil Quality Index (SSQI) Using Airborne Imaging Spectroscopy. *Remote Sens*, 7, 15748-15781.

Karakayacı, Z. & Oğuz, C., (2007). Tarım Arazilerinin Değerlemesinde Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Uygulanması. Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 30 Ekim-02 Kasım 2007, Trabzon.

Kızıltuğ, E. (2024). Elektromanyetik Dalga Nedir?. <https://evrimagaci.org/blog/elektromanyetik-dalga-nedir-kisaca-17022>

Kinthada, N. R., Sailaja, V. H., Rajesh, M., Kodimela, A., Kumar, S. A., & Kumar, K. S. (2025). Remote Sensing GIS and GPS: Principles and Applications. *The Institute for Innovations in Engineering and Technology*, 1-102, ISBN: 978-81-981763-7-0.

Khanal, S., Rochfort, S. J., & Steinbauer, M. J. (2025). Ultraviolet-A Radiation (UVA) as a Stress and the Influence of Provenance and Leaf Age on the Expression of Phenolic Compounds by *Eucalyptus camaldulensis* ssp. *Camaldulensis*. *Plants*, 14, 493.

Kochanek, A., Generowicz, A., & Załona, T. (2025). The Role of Geographic Information Systems in Environmental Management and the Development of Renewable Energy Sources-A Review Approach. *Energies*, 18, 4740.

Kochanek, A., Angrecka, S., Pietrucha, I., Załona, T., Petryk, A., Generowicz, A., Akbulut, L., & Atılgan, A. (2026). Integration of GIS, Big Data and Artificial Intelligence in Modern Waste Management Systems-A Comprehensive Review. *Sustainability*, 18, 385.

Kumari, K., Nafchi, A. M., Mirzaee, S., & Abdalla, A. (2024). AI-Driven Future Farming: Achieving Climate-Smart and Sustainable Agriculture. *AgriEngineering*, 7, 89.

Kunwar, P., Kachhwaha, T. S. Kumar, A. Agrawal, A. K. Singh A. N., & Mendiratta N. (2010). Use of High-Resolution IKONOS Data and GIS Technique for Transformation of Landuse/Landcover for Sustainable Development. *Current Science*, 98, 2, 204-212.

Łagiewska, M. & Panek-Chwastyk, E. (2025). Integrating Remote Sensing and Autonomous Robotics in Precision Agriculture: Current Applications and Workflow Challenges. *Agronomy*, 15, 2314.

Lausch, A., Bumberger, J., Jung, A., Pause, M., Selsam, P., Zhou, T., & Herzog, F. (2025). Monitoring Agricultural Land Use Intensity with Remote Sensing and Traits. *Agriculture*, 15, 2233.

Le, T. S., Harper, R. & Dell, B. (2023). Application of Remote Sensing in Detecting and Monitoring Water Stress in Forests. *Remote Sens.*, 15, 13, 3360.

Leeonis, A. N., Ahmed, M. F., Mokhtar, M. B., Halder, B., Lim, C. K., Majid, N. A., & Scholz, M. (2024). Importance of Geographic Information System (GIS) Application to Reduce the Impact of Flood Disasters in Malaysia: A Meta-Analysis. *Water*, 17, 181.

Li, X., Yue, J., Wang, S., Luo, Y., Su, C., Zhou, J., Xu, D., & Lu, H. (2023). Development of Geographic Information System Architecture Feature Analysis and Evolution Trend Research. *Sustainability*, 16, 137.

Liu, X., Zhu, W. Q., Yang, X. Q., & Pan, Y. Z., (2006). Modeling of Population Density Based On Gis And Rs. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1, 8, 1431-1434.

Mamabolo, E., Mashala, M. J., Mugari, E., Mogale, T. E., Mathebula, N., Mabitsela, K., & Ayisi, K. K. (2025). Application of Precision Agriculture Technologies for Crop Protection and Soil Health. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101270.

Martinez, A. I. & Labib, S. M. (2023). Demystifying Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for Greenness Exposure Assessments and Policy Interventions in Urban Greening. *Environmental Research*, 230, 115155.

Martos, V., Ahmad, A., Cartujo, P., & Ordoñez, J. (2021). Ensuring Agricultural Sustainability Through Remote Sensing in The Era of Agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11, 5911.

Maxwell, A. E. & Shobe, C. M. (2022). Land-Surface Parameters for Spatial Predictive Mapping and Modeling. *Earth-Science Reviews*, 226, 103944.

Meneses, E. L., Palomero-Ilardia, I. M., Pelicano-Piris, N., & Morales-Cevallos, M. B. (2025). Harnessing Intelligent GISs for Educational Innovation: A Bibliometric Analysis of Real-Time Data Models. *Educ. Sci.*, 15, 976.

Mierzejowska, A. & Żogała, M. (2018). The Characteristics of Geographical Information Systems in Terms of Their Current Use. Polish Academy of Sciences (PAN), Committee on Agronomic Sciences Section of Land Reclamation and Environmental Engineering in Agriculture, DOI: 10.2478/jwld-2018-0064.

Mishra, P., Asaari, M. S. M., Herrero-Langreo, A., Lohumi, S., Diezma, B., & Scheunders, P. (2017). Close Range Hyperspectral Imaging of Plants: A Review. *Biosystems Engineering*, 164, 49-67.

Mishra, M. (2021). Remote Sensing Data Products and Formats. Indira Gandhi National Open University, ISBN-978-81-266-5845-9.

Nizamani, M. M., Zhang, Q., Muhae-Ud-Din, G., Awais, M., Qayyum, M., Farhan, M., Jabran, M., & Wang, Y. (2023). Application of GIS and Remote-Sensing Technology in Ecosystem Services and Biodiversity Conservation. *Application of GIS and Remote-Sensing Technology*, DOI:10.1201/9781032646268-12.

Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M. S., Baek, I., Kabenge, I., & Kwan Cho, B. (2023). Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances. *Remote Sens*, 15, 354.

Pahlevi, R. (2023). Analysis of Using Balloon Technology for Aerial Surveillance in Indonesia On. <https://theconversation.com/chinese-spy-balloon-over-the-us-an-aerospace-expert-explains-how-the-balloons-work-and-what-they-can-see-199245>

Pawar, D. R., Khose, R. N., Yannawar, P. L., Gawali, B. W., & Bagul, P. S. (2025). Integrating GIS and Remote Sensing Technologies for Enhanced Precision Farming. International Conference on Climate Change, ISBN-978-93-48606-60-0.

Phang, S. K., Chiang, T. H. A., & Chang, M. M. L. (2023). From Satellite to UAV-Based Remote Sensing: A Review on Precision Agriculture. *IEEE Access*, 11, 127058- 127076.

Rokade, V. M., Kundal, P., & Joshi, A. K., (2007). Groundwater Potential Modelling Through Remote Sensing and GIS: A Case Study from Rajura Taluka, Chandrapur District, Maharashtra. *Journal of the Geological Society of India*, 69, 5, 943-948.

Rose, D. C. & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in An Era of Smart Farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87.

Royer, P. D., Cobb, N. S., Clifford, M. J., Huang, C. Y., Breshears, D. D., Adams H. D., & Villegas, J. C. (2011). Extreme Climatic Event-Triggered Overstorey Vegetation Loss Increases Understorey Solar Input Regionally: Primary and Secondary Ecological Implications. *Journal of Ecology*, 99, 3, 714-723.

Sadiku, M. N. O., Ajayi, S. A., & Sadiku, J. O. (2025). Emerging Technologies: Overview. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 9, 5, 930-940.

Selding, P. B. (2015). DigitalGlobe için Kamu İşleri İstikrarlı, Ancak Ticari İşler Hayal Kırıklığı Yarattı. <https://spacenews.com/for-digitalglobe-government-business-steady-but-commercial-disappoints/>

Shahi, T. B., Balasubramaniam, T., Sabir, K., & Nayak, R. (2025). Pasture Monitoring Using Remote Sensing and Machine Learning: A Review of Methods and Applications. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37, 101459.

Su, Q., Park, Y. G., Kambale, R. D., Adelberg, J., Karthikeyan, R., & Jeong, B. R. (2025). Advancing Light-Mediated Technology in Plant Growth and Development: The Role of Blue Light. *Horticulturae*, 11, 795.

Testi, L., Goldhamer, D. A., Iniesta, F., & Salinas, M. (2008). Crop Water Stress Index Is A Sensitive Water Stress Indicator in Pistachio Trees. *Irrig Sci*, 26, 395-405.

Tsatsaris, A., Kalogeropoulos, K., Stathopoulos, N., Louka, P., Tsanakas, K., Tsesmelis, D. E., Krassanakis, V., Petropoulos, G. P., Pappas, V., & Chalkias, C. (2021). Geoinformation Technologies in Support of Environmental Hazards Monitoring under Climate Change: An Extensive Review. *J. Geo-Inf.*, 10, 94.

Verma, R. & Kotwal, M. (2025). Geographic Information Systems: A Review of Its Evolution, Challenges and Future Trends. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7, 3.

Wang, J., Wang, Y., Li, G., & Qi, Z. (2024). Integration of Remote Sensing and Machine Learning for Precision Agriculture: A Comprehensive Perspective on Applications. *Agronomy*, 14, 1975.

Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote Sensing for Agricultural Applications: A Meta-Review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402.

Yarılgaç, T. (2012). The Use of Geographic Information Systems (GIS) In Fruit Growing. *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 2, 1, 71-80.

Zhang, Y., Wang, G., Li, L., & Huang, M. (2024). A Monitoring Method for Agricultural Soil Moisture Using Wireless Sensors and the Biswas Model. *Agriculture*, 15, 344.

Zheng, C., Abd-Elrahman, A., & Whitaker, V. (2021). Remote Sensing and Machine Learning in Crop Phenotyping and Management, with An Emphasis on Applications in Strawberry Farming. *Remote Sens*, 13, 531.

BÖLÜM 1

İKLİM KRİZİ ve KURAKLIK:EKOLOJİK, SOSYAL ve EKONOMİK BOYUTLAR

Serpil SAVCI¹

Giriş

Kuraklıklar en yaygın, karmaşık ve şiddetli doğal afetler olarak tanımlanmaktadır. Toplulukların karşılaşılabileceği en maliyetli doğal felaketler arasında yer alırlar ve etkileri başlangıç noktalarından yüzlerce kilometre öteye kadar uzanabilir. Ayrıca değişen iklim koşullarıyla zamansal olarak yoğunlaşabilir. Etkileri tarım, ekosistemler, su kaynakları, ekonomi ve toplumun genel geçim kaynakları için felaket olabilir (Disasa ve ark., 2026, 2). Kuraklık, dünya çapında tarımsal üretimi en çok sınırlayan çevresel faktörler arasında yer almaktadır. İklim değişikliği tahminleri, 21. yüzyılda kuraklıkların süresinin ve şiddetinin özellikle Akdeniz havzasında artacağına işaret etmektedir. Bu durumun, karbon dengesini ve ürün verimliliğini önemli ölçüde etkileyeceği düşünülmektedir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından ortaya konan orta düzey Temsilci Konsantrasyon Yolu senaryosu 6'ya göre, havadaki CO₂ konsantrasyonu 21. yüzyılın

¹ Prof. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Şehir ve Bölge Planlama, Orcid: 0000-0003-2015-2223

sonuna kadar 700 ppm değerine ulaşacaktır. Buna ek olarak, paylaşılan sosyo-ekonomik yollar temelli orta düzey senaryo, gezegeenin ortalama yüzey sıcaklığında 3  C'lik bir artış öngörmektedir (Yoldi-Achalandabaso ve ark., 2024, 2).

Bu kitap bölümünde, iklim değişikliğinin yaratacağı kuraklık sonucunda ortaya çıkabilecek ekolojik, sosyal ve ekonomik etkileri anlatılmıştır.

İklim Krizinin Ekolojik Boyutları

İklim krizi ekolojik sistemleri çok boyutlu şekilde etkilemektedir. Biyo eşitlilik kaybı, su ve toprak döngülerinde bozulma ve türlerin yok olma riski artmaktadır. Son yıllarda yayımlanan uluslararası akademik makaleler bu etkilerin hızlandığını ve geri dönüşü zor bir noktaya doğru ilerlediğini vurgulamaktadır.

İklim krizinin ekolojik boyutları arasında biyo çeşitlilik kaybı, toprak, su döngülerinde ve ekosistemde bozulma, türlerin yok olma riski sıralanabilmektedir.

İklim değişikliği habitatların daralmasına ve türlerin yok olma riskinin artmasına yol açmaktadır. İnsan kaynaklı iklim değişikliği artık biyoçeşitliliğe yönelik en önemli tehdidi oluşturmaktadır. Türlerin fenolojisini, dağılımını ve bolluğunu önemli ölçüde etkilemekte ayrıca ekosistem yapısını, işlevini, istikrarını ve iklim değişikliğine karşı geri bildirim düzenlemesini de etkilemektedir. İklim değişikliği, biyoçeşitlilik üzerinde derin ve çok boyutlu baskılar uygulamaktadır. Yükselen sıcaklıklar, birçok organizmanın uygun iklimleri takip etmek için kutuplara ve rakım olarak yukarıya doğru kaymasıyla birlikte, büyük ölçekli türlerin yeniden dağılımını tetiklemektedir. Bu konuda adaptasyon stratejilerinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir (Mengzhi ve ark., 2025).

Artan sıcaklık ve değişen yağış rejimleri toprak nemini ve su döngüsünü olumsuz yönde etkilemektedir. İklim değişikliğinin

toprak, su ve biyoçeşitlilik koruma süreçlerini ciddi şekilde zorladığını özellikle tarımsal üretim ve ekosistemde kayıplara yol açtığını ortaya koymuştur (Steiner ve ark., 2023).

Toprak biyoçeşitliliği, besin döngüsü, toprak yapısı, organik maddenin ayrışması ve bitki sağlığı yoluyla ekosistemi ve tarımsal verimliliği desteklemek için önemlidir. Ancak iklim değişikliği, küresel ölçekte toprak biyoçeşitliliğine büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Toprak, küresel biyoçeşitliliğin %25'inden fazlasını barındırmaktadır. Ancak bu çeşitliliğin büyük bir kısmı hala yeterince araştırılmamıştır. Toprak mikrobiyal türlerinin tanımlanmasının çeşitliliğin yalnızca %1'ini oluşturacağına inanılmaktadır; bu da yer altı ekosistemlerinin önemli ölçüde bilinmediğini göstermektedir. En önemli toprak organizmalarının çoğu (bakteriler, mantarlar, protozoalar, nematodlar, eklembacaklılar ve halkalı solucanlar) çevrede yaptığımız değişikliklere oldukça duyarlıdır. Sıcaklık ve nem rejimlerindeki değişiklikler, canlı aktivitesini, üreme oranlarını ve mekansal dağılımı etkileyerek toprak süreçleri üzerinde sonuç doğurmaktadır. Örneğin, kuraklık mikrobiyal biyokütleyi yaklaşık %50 oranında azaltabilirken, uzun süreli ısınma uygulaması toprakta organik madde mineralizasyonunu ve CO₂ ve N₂O emisyonlarını artırabilir. Toprak faunası ve mikroorganizmalarının değişen iklimlere tepki olarak strese girdiğini ve bunun da besin ağı yapısında değişikliklere ve fonksiyonel çeşitlilik kayıplarına neden olduğunu gösteren kanıtlar sunmaktadır. Ayrıca, iklimin neden olduğu bitki örtüsü, yaprak döküntüsü girdisi ve kök salgılama modellerindeki değişiklikler de mikrobiyal toplulukların bileşimini etkilemektedir. Tarımsal bağlamda, bu etkiler, biyoçeşitliliğin bozulmasına ve toprak savunma gücünün azalmasına yol açan tek tip ürün yetiştirme, yüksek kimyasal kullanım ve yoğun tarım gibi zararlı uygulamalarla daha da artmaktadır. Bu bağlamda, iklim değişikliği perspektifinde toprak biyoçeşitliliğini korumak için uyarlanabilir ve

sürdürülebilir toprak yönetiminin önemini vurgulamaktadır. Koruyucu toprak işleme, organik gübreleme, örtü bitkileri yetiştirme ve tarımsal ormancılık, bozulma ve biyoçeşitlilik kaybıyla mücadele etmek için kullanılabilecek yöntemlerden bazılarıdır (Raza ve ark., 2025).

Ekosistemde bozulmalar bağlamında ormanlar, sulak alanlar ve deniz ekosistemlerinin iklim krizinden doğrudan etkilendikleri düşünülmektedir. Ripple ve ark., (2024), iklim değişikliğinin ekolojik fonksiyonları zayıflattığını göstermektedir.

Küresel ısınma türlerin göç yollarını ve yaşam alanlarını değiştirmektedir (Gabric, 2023).

2050 yılına kadar, öngörülen nüfus artışı nedeniyle enerji talebi %80, gıda talebi %50 ve su talebi %55 artması beklenmektedir. Yeterli miktarda ve uygun kalitede tatlı suyun bulunabilirliği, insan toplumları ve doğal ekosistemler için bir ön koşul olarak düşünülmektedir. Dünyanın birçok yerinde, insan faaliyetlerinden kaynaklanan aşırı su tüketimi ve kirliliği, bulunabilirliğin yanı sıra gıda ve enerji güvenliği, çevre kalitesi, ekonomik kalkınma ve sosyal refah üzerinde de büyük bir baskı oluşturmaktadır. Artan nüfus, ekonomik büyüme, hem gıda hem de gıda dışı kullanım için tarım ürünlerine olan talebin artması ve tüketim alışkanlıklarının daha çok et ve şeker bazlı ürünlere doğru kayması nedeniyle tatlı su kaynakları üzerindeki rekabet yıllardır artmaktadır (Samberger, 2022, 2).

İklim Krizinin Sosyal Boyutları

İklim değişikliği, 21. yüzyılda insanlığın karşı karşıya kaldığı en büyük ve en zorlu sorunlardan biri olarak ortaya çıkmıştır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC, 2022) raporlarında da belirtildiği gibi, insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının küresel sıcaklıkları artırdığı, deniz seviyesinin

yükseldiği, aşırı hava ve iklimle ilgili bozulmalara ve çevresel dengesizliklere yol açtığı konusunda bilimsel bir fikir birliği bulunmaktadır. Bununla birlikte, iklim değişikliğinin etkileri toplumlar arasında eşit olarak dağılmamaktadır. Zengin ve yüksek gelirli küresel topluluklar karbon emisyonlarına en yüksek oranda katkıda bulunurken, yoksullar, kadınlar, yerli halklar ve Güney ülkelerinde yaşayanlar gibi kesimler iklim risklerine karşı en büyük baskıyı yaşamaktadır (Khan, 2025).

İklim krizinin toplumsal etkileri ele alındığında, kuraklık ve deniz seviyesindeki yükselmesi nedeniyle göç olaylarında artış olacağı düşünülmektedir. Hwang (2025), iklim krizinin özellikle kıyı ve yerli topluluklarda göçü hızlandırdığını ve sosyal eşitsizlikleri derinleştirdiğini vurgulamaktadır.

İklim Krizinin Ekonomik Boyutları

İklim Krizi sadece çevresel bir endişe olmaktan çıkıp, iklim değişikliği küresel finansal istikrar için önemli bir risk haline gelmiş ve uluslararası finansal ve ekonomik sistemleri derinden etkilemiştir.

2024 yılında, ortalama küresel sıcaklıklar, sanayi öncesi döneme göre yaklaşık 1,55 °C daha yüksek olup, bu tarihi bir zirve olarak görülmektedir. Aynı yıl, iklimle ilgili afetler 167 milyondan fazla insanı etkilemiş ve yaklaşık 242 milyar dolarlık ekonomik kayba neden olmuştur. Bu istatistikler, iklim riskinin sistemik doğasını ve ticaret, sermaye akışları ve para birimi istikrarı yoluyla yayılma potansiyelini vurgulamaktadır (Ma ve ark., 2023, 1).

İklim krizi ekonomik sistemleri doğrudan etkileyen çok boyutlu bir sorun olup, tarım, enerji, turizm ve istihdam gibi sektörlerde ciddi kayıplara yol açmaktadır. Akademik çalışmalar iklim değişikliğinin yalnızca çevresel değil aynı zamanda üretkenlik, büyüme ve kamu maliyesi üzerine kalıcı etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Tarım ve gıda güvenliği alanında, artan sıcaklıklar ve düzensiz yağışlar tarımsal üretimde düşüşe neden olmaktadır. Bu durum gıda fiyatlarını yükseltmekte ve gıda güvenliğini tehdit etmektedir. Sulama ihtiyacının artması, suyun ekonomik değerini yükseltmekte ve kıtlık riskini arttırmaktadır (Başoğlu, 2014, 176).

Şiddetli yağışlar, seller ve kuraklıklar gibi felaketler dünya çapında sık sık meydana gelmektedir. Çin'de de birçok ilçe düzeyindeki şehir büyük ölçüde zarar görmüş, altyapıda ciddi hasarlar meydana gelmiş ve kamu hizmetlerinin sunumunda zorluklar yaşanmıştır. Bu durum, yerel yönetimler üzerinde bir mali baskı oluşturmuştur (Wang ve Hu, 2025, 1).

Sera gazı emisyonları hem dünyanın enerji sistemi hem de gıda üretimi için temel öneme sahiptir. İklim değişikliğinde rol oynayan başlıca gaz olan CO₂'nin üretimi, fosil yakıtların yakılmasıyla gerçekleşir; özellikle, petrol, kömür ve doğal gazdaki karbonhidratlardaki kimyasal bağların kırılması ve bileşenlerin CO₂ ve H₂O'ya oksitlenmesiyle termal enerji üretilir. Karbondioksit emisyonları olmadan ucuz enerji elde edilemez. Benzer şekilde, kendi başına önemli bir sera gazı olan metan (CH₄) emisyonları, anaerobik sindirim ve ayrışmada hidrojen birikimini önlemek için gereklidir. Metan emisyonları olmadan sığır eti, koyun eti, süt ürünleri veya pirinç elde edilemez. Sera gazı emisyonlarının kaynakları, diğer tüm çevre sorunlarından daha yaygındır. Her şirket, her çiftlik, her hane bir miktar sera gazı yayar. Etkileri de benzer şekilde yaygındır. Hava durumu tarımı, enerji kullanımını, sağlığı ve doğanın birçok yönünü etkiler; bu da her şeyi ve herkesi etkiler. İklim değişikliğinin nedenleri ve sonuçları çok çeşitlidir ve iklim değişikliğine en az katkıda bulunan düşük gelirli ülkelerdekiler, etkilerine karşı en savunmasız olanlardır. İklim değişikliği aynı zamanda uzun vadeli bir sorundur. Bazı sera gazlarının atmosferdeki ömrü binlerce yıl olarak ölçülebilir (Tol, 2009, 29).

Sonuç

İklim, Dünya'nın atmosferinin, hidrosferinin davranışını ve yapısını tanımlayan uzun vadeli istatistiklerle tanımlanabilir. Dünya üzerindeki yaşam, iklimin elverişliliğine bağlıdır. Dünya iklimindeki herhangi bir değişiklik, insanlık, biyoçeşitlilik ve dünya genelindeki ekosistemlerin sağladığı sağlık ve hizmetler üzerinde anında etki yaratacak ve dünya sisteminin sosyoekonomik kalkınmayı destekleme yeteneğini değiştirecektir. İklim değişikliklerine uyum sağlamak ve etkilerini azaltmak için, iklimin doğal değişkenliğini, iklimin neden ve nasıl değiştiğini ve iklim değişikliklerinin Dünya ekosistemlerini nasıl etkilediğini anlamak esastır (Wang ve Schimel, 2009, 21).

İklim krizi ekolojik, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla birbirine bağlı küresel bir tehdit olup, ekosistemlerin bozulması, ekonomik üretim ve kaynakların daralması, toplumsal eşitsizliklerin derinleşmesi gibi sonuçlar doğurmaktadır. İklim krizinin en belirgin etkisi türlerin yok oluş hızını arttırmasıdır. Habitat kaybı, orman yangınları ve okyanus asidifikasyonu ekosistemleri tehdit etmektedir (Şengül ve Murat, 2024, 343).

Sosyal boyut açısından düşünüldüğünde sıcak hava dalgaları, hava kirliliği ve iklim kaynaklı hastalıklar toplum sağlığını olumsuz etkilemektedir. İklim krizinden en çok kırılgan gruplar olarak isimlendirilen yoksullar ve kıyı bölgelerinde yaşayanlar etkilenmektedir. Bu durum iklim göçlerini ve sosyal eşitsizlikleri arttırmaktadır. Psikososyal etkiler açısından ele alındığında eko-anksiyete ve toplumsal stres bireylerin ruh sağlığını etkilemektedir.

Bu çalışmada iklim krizinin ekolojik, ekonomik ve sosyal boyutları ele alınmıştır.

Kaynakça

- 1.Disasa, K. N., Yan, H., Zhang, J., Wang, G., Zhang, C., Zhang, D., Hao, B. (2025). Comprehensive review of drought characteristics and intensification under climate change: implications for agriculture and water resources. *Journal of Hydrology*, 134571.
- 2.Gabric, A. J. (2023). The climate change crisis: a review of its causes and possible responses. *Atmosphere*, 14(7), 1081.
- 3.Yoldi-Achalandabaso, A., Fricke, W., Miranda-Apodaca, J., Vicente, R., Munoz-Rueda, A., & Pérez-López, U. (2024). Climate change does not impact the water flow of barley at the vegetative stage, ameliorates at anthesis and worsens after subsequent drought episodes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 215, 109060.
- 4.Khan Z., (2025). Climate Change and Social Inequality: Policy, Economics, and Social Justice, *ACADEMIA International Research Journal (Multidisciplinary)*, 1-2.
- 5.Mengzhi, X., Jixia, L., Shixin, L., & Qianming, Z. (2025). How biodiversity conservation adapts to climate change: from a cross-spatial scale framework. *Frontiers in Climate*, 7, 1646318.
- 6.Steiner, J. L., Lin, X., Cavallaro, N., Basso, G., & Sassenrath, G. (2023). Climate change impacts on soil, water, and biodiversity conservation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 78(2), 27A-32A.

7. Raza, M. Y., Ahmed, M., Arshad, A., & Ikram, S. (2025). Impacts of Climate Change on Soil Biodiversity. In *Climate Resilient and Sustainable Agriculture: Volume 1: Adaptation and Mitigation Strategies* (pp. 73-97). Cham: Springer Nature Switzerland.
8. Ripple, W. J., Wolf, C., Gregg, J. W., Rockström, J., Mann, M. E., Oreskes, N., Crowther, T. W. (2024). The 2024 state of the climate report: Perilous times on planet Earth. *BioScience*, 74(12), 812-824.
9. Hwang, J. Y., (2025). Climate change and social inequality: Analyzing the disproportionate impact of environmental crises on marginalized communities, *International Journal of Science and Research Archive*, 15 (01), 1251-1262.
10. Başoğlu, A. (2014). Küresel iklim değişikliğinin ekonomik etkileri. *Sosyal bilimler dergisi*, 7, 175-196.
11. Wang, Y., & Hu, L. (2025). Climate change and exchange rate variables: A potential storm of urban debt. *International Review of Financial Analysis*, 105, 104422.
12. Ma, Y., Zhao, W., Ding, Z. (2025). Does climate risk influence exchange rates?. *Global Finance Journal*, 101203.
13. Samberger, C. (2022). The role of water circularity in the food-water-energy nexus and climate change mitigation. *Energy Nexus* 6, 100061.

14. Tol, R. S. J., (2009). The Economic Effects of Climate Change, *Journal of Economic Perspectives*, 23, 2, Pages 29–51.
15. Wang, G., & Schimel, D. (2003). Climate change, climate modes, and climate impacts. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 1-28.
16. Şengül, B., & Murat, G. (2024). Küresel iklim krizinin sosyal boyutu ve sosyal politika önlemleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 15(41), 342-358.

BÖLÜM 2

KENT EKOLOJİSİNDE YEŞİL ALTYAPI: POTANSİYELLER ve RİSKLER

1. Serpil SAVCI¹

Giriş

Şehirler hızla genişlemekte ve küresel nüfusun yaklaşık %70'inin 2050 yılına kadar kentsel alanlarda yaşayacağı tahmin edilmektedir. Kentsel büyüme, yoğunlaşma ve geçirimsiz yüzeylerin artması, yağmur suyu sistemlerini zorlamakta, sel riskini artırmakta, kentsel ısı adası etkisini yoğunlaştırmakta ve kentsel yaşam alanlarını bozarak biyoçeşitlilik kaybını daha da kötüleştirmektedir. İklim değişikliği ve küresel biyoçeşitlilikteki azalma, bu zorlukları daha da artırmaktadır (Nawrath ve ark., 2026).

İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan hızlı kentleşme ve küresel iklim değişikliği, kentsel yağmur suyu yönetimi üzerindeki baskıları artırarak ekosistem dinamikleri ve insan sağlığı üzerinde ciddi etkiler yaratmıştır. Tarih boyunca, yalnızca insan yapımı malzemelerden inşa edilen geleneksel yağmur suyu altyapısı olarak

¹ Prof. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Şehir ve Bölge Planlama, Orcid: 0000-0003-2015-2223

isimlendirilen yağmur suyu tahliye kanalları, oluklar ve yer altı sistemleri, genellikle sel riskini en aza indirmek için yağmur suyunu hızla toplayıp araziden uzaklaştırarak alıcı su kütlelerine yönlendirmek üzere tasarlanmıştır (Wang ve ark., 2023).

Küresel olarak, şehirler iklim değişikliği, su güvenliği sorunları, hava kirliliği, kötüleşen halk sağlığı ve refahı gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Sonuç olarak, uzmanlar iklimle ilgili etkiler ve diğer çevresel sorunlarla başa çıkmak için yeni stratejiler aramaktadır. Şehir içindeki sucul alan miktarını artırmak, bu zorlukların üstesinden gelmek için önerilen bir politika stratejisidir. Örneğin, Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi olan 'sürdürülebilir şehirler ve topluluklar' (BM, 2015) ve Yeni Kentsel Gündem (BM, 2017) şehirlerde daha fazla yeşil alan oluşturulmasını açıkça talep etmektedir (Veerkamp ve ark., 2021).

Benzer şekilde, Avrupa Birliği, toplumsal zorlukların çözümü için hem yeşil hem de mavi alanların kentsel planlamaya entegrasyonunu savunan bir araştırma ve inovasyon politikası geliştirmiştir. Kentsel yeşil ve mavi alan, genellikle kentsel yeşil ve mavi altyapı olarak adlandırılır ve stratejik olarak planlanmış, doğal ve yarı doğal alanlar ile diğer çevresel özelliklerin bir ağı olarak tanımlanabilir; bu ağ, bir şehrin sınırları içinde çok çeşitli ekosistem hizmetleri sunmak üzere tasarlanmış ve yönetilmiştir. Parklar, sokaktaki ağaçlar, yeşil çatılar ve kentsel su yolları, kentsel yeşil altyapı örnekleridir. Kentsel bağlamda, önemli ekosistem hizmetleri arasında hava kalitesi düzenlemesi, yerel sıcaklık düzenlemesi ve rekreasyon olanakları yer almaktadır (Veerkamp ve ark., 2021). Bu kitap bölümünde yeşil altyapı, Avrupa ve Türkiye'deki örnekler, potansiyeller ve riskler değerlendirilmiştir.

Yeşil Altyapı Kavramı

Yeşil altyapı, stratejik olarak planlanan ve yönetilen doğal, yarı-doğal, kamuya ve özel mülkiyete ait alanların oluşturduğu ağıdır.

Bu ağ kent ekolojisinin gelişmesine katkı sağlayarak sürdürülebilir kentsel gelişimin temel unsurlarından biri haline gelmektedir (Asilsoy ve Yaralıoğlu, 2021). Yeşil altyapının bileşenleri, doğal habitatlar, yeşil koridorlar ve açık ve yeşil alanlar olarak üçe ayrılabilir. Kent içindeki ormanlık ve sulak alanlar, biyolojik çeşitliliği destekleyen ekosistemler doğal habitatları oluşturmaktadır. Ekolojik bağlantıyı sağlayan, türlerin hareketine izin veren yeşil alanlar, yeşil koridorları oluştururken, parklar, meydanlar, rekreasyon alanları ise toplumsal yaşamı destekler ve ekosistem hizmeti sunarak açık ve yeşil alanları oluşturur. Burada amaç, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak, afetlere karşı dirençli kentler oluşturmak ve toplumun tüm kesimlerini kapsayan mekânsal bütünleşmeyi sağlamaktır (www.dkm.org.tr).

Küresel ölçekte artan nüfus ve kentleşme, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem hizmetlerini tehdit etmektedir. Yeşil altyapı bu olumsuz etkileri azaltmada kritik bir araçtır denilebilir (www.cevrecibelediyeler.org.tr, 2020).

Kentleşme ve Yeşil Altyapı İlişkisi

Kentleşmenin hızla arttığı günümüzde, ekolojik dengelerin bozulması ve iklim değişikliğinin etkileri, yeşil altyapının bir lüks değil, zorunluluk haline geldiğini göstermiştir. Bayrak ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada yeşil altyapı kentlerin iklim değişikliğine uyum kapasitesini arttıran ve afetlere karşı dirençli hale getiren bir sistem olduğu vurgulanmıştır.

Temiz Topsakal ve Sağlık'ın (2024), biyomimikrik kentler üzerine yapmış oldukları çalışmada, yeşil altyapının doğadan ilham alan çözümlerle birleştiğinde kentlerin daha dirençli hale geldiği vurgulanır. Bu yaklaşım doğa tabanlı çözümlerle birlikte ele alındığında kentlerin sürdürülebilirlik vizyonunu güçlendirir.

Potansiyeller ve Riskler

Yeşil altyapı kentlerde iklim değişikliğine uyum ve ekosistem hizmetleri açısından büyük potansiyeller sunarken, yüksek maliyet, bakım zorlukları ve politika engelleri gibi riskler barındırabilir.

Ekosistem ve iklimsel katkılar açısından yeşil altyapı kentlerde ekosistem hizmetlerini güçlendirerek sürdürülebilir yaşamın temelini oluşturur. Rodrigues ve ark., (2025), yeşil altyapının karbon yutakları, yağmur suyu yönetimi ve ısı adası etkisini azaltma gibi işlevleriyle iklim değişikliğine uyumda kritik rol oynadığını vurgulamıştır.

Toplumsal sağlık ve refah açısından ise Herath ve Bai (2024), altyapının kent sakinlerinin fiziksel ve ruhsal sağlığını desteklediğini, parklar ve yeşil koridorların stres azaltıcı etkisi olduğunu belirtmektedir. Bu yönüyle yeşil altyapı yalnızca çevresel değil sosyal bir yatırım olarak da görülebilir.

Ekonomik katkılar açısından uzun vadede enerji tasarrufu, gayrimenkul değerlerinde artış ve turizm gelirleri yeşil altyapının ekonomik potansiyelleri arasında yer almaktadır. Kadic ve ark., (2025), doğa tabanlı çözümlerin kent ekonomisine doğrudan katkı sağladığını göstermektedir.

Riskler ve zorluklar açısından yüksek başlangıç maliyetleri düşünülebilir. Chau ve ark., (2025), Melbourne örneği üzerine yaptıkları çalışmada yeşil altyapı projelerinin başlangıç maliyetlerinin gri altyapıya göre daha yüksek olduğu ve bu durumun politik karar vericiler için caydırıcı olabildiğini belirtmiştir.

Bakım ve sürdürülebilirlik sorunları açısından değerlendirildiğinde, sistemlerin düzenli bakım gerektirmesi uzun vadede maliyet ve iş gücü doğurabilmektedir. Bu durum özellikle gelişmekte olan ülkelerde yeşil altyapının sürdürülebilirliğini tehdit edebilir.

Politika ve Yönetim engelleri açısından bakıldığında kurumsal koordinasyon eksikliği yasal düzenlemelerin yetersizliği ve finansman sorunları yeşil altyapının yaygınlaşmasını engelleyebilir. Chau ve ark., (2025) bu engellerin aşılması için çok düzeyli yönetim modellerinin geliştirilmesi gerektiğini savunmaktadır.

Sosyal eşitsizlik ve yeşil gentrifikasyon açısından riskler değerlendirildiğinde, yeşil altyapı yatırımları bazı durumlarda yeşil gentrifikasyona yol açarak düşük gelirli grupların yaşam alanlarını tehdit edebilir. Bu risk sosyal adalet perspektifinden ele alınması gereken bir konudur.

Avrupa’da Yeşil Altyapı Örnekleri

Avrupa’daki yeşil altyapı örnekleri, kavramın potansiyellerini somutlaştırırken aynı zamanda uygulama sürecindeki riskleri de gözler önüne sermektedir. Öne çıkan projeler arasında Kopenhag’ın yağmur suyu yönetimi için geliştirdiği biyowales sistemleri, Hollanda’nın doğa tabanlılığı koruma projeleri ve İspanya’nın kent içi yeşil koridorları bulunmaktadır.

Danimarka’nın Başkenti Kopenhag’ta yağmur suyu, yağmur bahçeleri ile kentsel sel riskini azaltmaya yönelik bir proje bulunmaktadır. Şehrin % 30’a yakın yağmur suyu bu sistemlerle yönetilmekte ve ısı adası etkisi azaltılmaktadır. Ancak yüksek bakım maliyeti ve uzun vadeli finansman ihtiyacı riskler arasında sayılabilmektedir (Build news, 10 Groundbreaking Green infrastructure Project).

Hollanda’da nehir taşkınlarını önlemek için doğal taşkın alanlarının yeniden düzenlenmesi için uygulanan proje ile hem ekosistem hizmetleri güçlenmekte hem de taşkın riski azalmaktadır. Ancak tarım alanlarının yeniden düzenlenmesi sosyal ve ekonomik çatışmalara yol açabilmektedir (European commission-Green Infrastructure).

İspanya'nın Barcelona Kentinde biyolojik çeşitliliği arttırmak için yeşil koridor ağı bulunmaktadır. Bu proje türlerin hareketini kolaylaştırmakta ve kent sakinlerine yeni rekreasyon alanları sunmaktadır. Ancak yoğun kentleşme nedeniyle alan sınırlamaları ve yeşil gentrifikasyon riski oluşturabilmektedir (European Platform for Urban Greening Case Studies).

Finlandiya'nın Başkanti Helsinki'de ise kamu binalarında yeşil çatılar ile enerji verimliliği ve yağmur suyu yönetimi sağlanmaktadır. Bu proje enerji üretimini azaltmakta ve karbon yutakları oluşturabilmektedir. Ancak iklim koşulları nedeniyle bitki seçimi ve bakım zorlukları yaşanmaktadır (European Platform for Urban Greening Case Studies).

Türkiye’de Yeşil Altyapı Örnekleri

Türkiye’de yeşil altyapı uygulamaları ekolojik koridorlar, kent iç yeşil alanlar, yağmur suyu yönetimi ve sürdürülebilir ulaşım sistemleri gibi farklı ölçeklerde hayata geçirilmektedir. Akademik çalışmalar bu uygulamaların hem iklim değişikliğine uyum hem de kentlerin yaşanabilirliğini arttırma açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Demiroğlu ve ark., (2019), Türkiye’de yeşil altyapı sistemlerinin mekânsal planlama bağlamında uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada 2014 tarihli Mekansal Planlar Yapım Yönetmeliği ve 2012 tarihli Bütünşehir Yasası üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Sonuç olarak yeşil altyapı bileşenlerinin korunması ve birbirine bağlanması sürdürülebilir yaşam için temel olarak görüldüğünü vurgulamışlardır.

Ankara’da Çankaya Belediyesi kent içinde ekolojik koridorların ve park sistemlerinin bütünleştirilmesi üzerine bir çalışma proje başlatmıştır. Projenin amacı biyolojik çeşitliliği korumak ve kent içi yaşam kalitesini arttırmaktır (Şehirlerde Yeşil Altyapı ve Doğa Tabanlı Çözümler, 2019).

İzmir’de gerçekleştirilen bir proje bisiklet yollarının kent ulaşımına entegre edilmesi üzerine yapılmıştır. Sonuç olarak sağlıklı yaşamı destekleyen yeşil ulaşım altyapısı elde edilmiştir (Şehirlerde Yeşil Altyapı ve Doğa Tabanlı Çözümler, 2019).

Eskişehir’de Porsuk Çayı çevresinde ekolojik koridor ve rekreasyon alanlarının oluşturulması üzerine bir proje gerçekleştirilmiştir. Projenin amacı su ekosistemini korumak ve kent içi yeşil alanları artırmaktır (Şehirlerde Yeşil Altyapı ve Doğa Tabanlı Çözümler, 2019).

Gaziantep’te de yeşil altyapı ve akıllı şehir uygulamaları örnekleri bulunmaktadır. Özellikle ‘Yeşil Dalga’ trafik yönetim sistemi ve sürdürülebilir ulaşım projeleri öne çıkmaktadır. Bu uygulamalar kentte enerji verimliliğini arttırırken karbon salınımını azaltmayı hedeflemektedir. Yeşil Dalga ve Trafik uygulama sistemi 2019 yılında Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı koordinasyonunda başlamıştır. Kentte 15 ana arterde ve 51 kavşakta sinyalizasyon sistemleri ‘yeşil dalga’ mantığıyla çalışmaktadır. Projenin amacı, araçların dur kalk yapmadan akıcı şekilde ilerlemesini sağlamak, yakıt tüketimini ve karbon salınımını azaltmaktır (akillisehirler.cbs.gov.tr). Ayrıca yine aynı belediyenin ‘Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi Planı’ projesi bulunmaktadır. Bu proje yapay zeka tabanlı trafik sinyal kontrol sistemini oluşturmaktadır. Amaç dijital dönüşümle trafik yoğunluğunu azaltmak ve enerji verimliliğini artırmaktır (Gaziantep Büyükşehir Belediyesi, 2015).

Bu uygulamaların tamamı, enerji verimliliği sağlaması, karbon salınımını azalması, kent içi yaşam kalitesini yükselmesi ve doğa tabanlı çözümlerle örneğin bisiklet yolları ve toplu taşıma entegrasyonu ile doğrudan yeşil altyapı kapsamında değerlendirilmektedir.

Bütün bu örnekler Türkiye’de yeşil altyapının yalnızca çevresel değil aynı zamanda sosyal ve ekonomik faydalar sağladığını ortaya koymaktadır. Akademik literatürde de vurgulandığı gibi yeşil altyapı uygulamaları, iklim değişikliğine uyum, afetlere karşı direnç, kentlerin yaşanabilirliğini artırma, ekosistem hizmetlerinin sürekliliğini sağlama açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç

Yeşil altyapı kentlerin sürdürülebilirlik vizyonunu güçlendiren bir araçtır denilebilmektedir. Ancak potansiyellerin hayata geçirilebilmesi için risklerin doğru yönetilmesi gerekmektedir. İklimsel, ekolojik, sosyal ve ekonomik boyutlarda sağladığı faydalar maliyet ve yönetim engelleriyle dengelenmelidir. Bu bağlamda uluslararası literatür yeşil altyapının yalnızca çevresel değil aynı zamanda politik ve toplumsal bir mesele olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye’de yeşil altyapı uygulamaları üzerine yapılan incelemeler göstermektedir ki, farklı kentlerde hayata geçirilen projeler yalnızca çevresel sürdürülebilirliği değil aynı zamanda sosyal ve ekonomik faydaları da beraberinde getirmektedir. Ankara’da ekolojik koridorların ve park sistemlerinin bütünleştirilmesi, İzmir’de bisiklet yolları ve sürdürülebilir ulaşım altyapısı, Eskişehir’de Porsuk Çayı çevresindeki ekolojik rehabilitasyon, Gaziantep’te Yeşil Dalga trafik yönetimi ile akıllı ulaşım stratejileri Türkiye’de yeşil altyapı vizyonunun somut örnekleri olarak öne çıkmaktadır.

Kaynakça

1. Wang, M., Sun, C., & Zhang, D. (2023). Opportunities and challenges in green stormwater infrastructure (GSI): A comprehensive and bibliometric review of ecosystem services from 2000 to 2021. *Environmental Research*, 236, 116701.
2. Nawrath, M., Furuseth, I. S., Barkved, L., & Seifert-Dähnn, I. (2026). Incentives for the implementation and maintenance of urban blue-green infrastructure: A systematic review. *Landscape and Urban Planning*, 268, 105572.
3. Veerkamp, C. J., Schipper, A. M., Hedlund, K., Lazarova, T., Nordin, A., & Hanson, H. I. (2021). A review of studies assessing ecosystem services provided by urban green and blue infrastructure. *Ecosystem Services*, 52, 101367.
4. Asilsoy, B., Yaralıoğlu, İ., (2021). Yeşil altyapı kavramının teorik bir çerçevede değerlendirilmesi, *Mimarlık Mühendislik Dergisi*, 3,1.
5. Şehirlerde Yeşil Altyapı ve Doğa Tabanlı Çözümler İyi Uygulama Örnekleri, 2020.
6. Yeşil Altyapı ve Doğa Tabanlı Çözümlere Yönelik On Bir İyi Uygulama, 2020, www.cevrecibelediyeler.org.tr.
7. Temiz Topsakal, M., Sağlık, A., Biyomimikrik Kentlerin Yeşil Altyapı Yönetimi ile Değerlendirilmesi, ÇOMÜ, 2024.
8. Bayrak, G., (2022), (Editör) Yeşil Altyapı, İksad Yayınevi, Ankara. 186 S.
9. Rodrigues, B. N., et al., 2025. Green infrastructure for urban climate mitigation and adaptation, Springer.

10. Kadic A., et al., 2025. Green Infrastructure's Role in climate change adaptation. MDPI.
11. Herath P., Bai X., 2024. Benefits and co-benefits of urban green infrastructure for sustainable cities, Springer.
12. Chau, H-W et al., 2025 Key Barriers and Challenges to Green infrastructure implementation: Policy Insights from Melbourne, MDPI, 2025.
13. European Commission- Green infrastructure, https://www.publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC130517/JRC130517_01.pdf. Erişim Tarihi:08.03.2026
14. Interreg Europe-Green and Blue infrastructure, <https://www.interregeurope.eu/find-policy-solutions/policy-briefs/green-and-blue-infrastructure>. Erişim Tarihi:08.03.2026.
15. Build News-10 Groundbreaking Green infrastructure Projects, <https://www.build-news.com/sustainable-construction-and-green-building/10-groundbreking-green-infrastructure-projects-reshaping-modern-cities/>. Erişim Tarihi:08.03.2026.
16. JRC Publications-Case studies towards green transition in EU regions. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130517>. Erişim Tarihi:08.03.2026.
17. European Platform for Urban Greening-Case studies. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://platformurbangreening.eu/wp-content/uploads/2021/12/European-Platform-for-

Urban-Greening_Case-Studies-from-Year-One_2021.pdf. Erişim Tarihi:08.03.2026.

18. Demiroğlu D., Karadağ, A.A., Cengiz A. E., (2019) Türkiye’de yeşil altyapı sisteminin uygulanabilirliği üzerine bir değerlendirme.Peyzaj-Education Science Cullture and Art Journal, 1(2), 12-21.
19. Doğa Koruma Merkezi Vakfı (2019). şehirlerde yeşil altyapı ve doğa tabanlı ozmler: İyi uygulama rnekleri, Ankara, Doğa Koruma Merkezi
20. evre şehircilik ve İklım Değerikliği Bakanlığı (2019). Gaziantep Yeşil Dalga Uygulaması. Akıllı şehirler Portalı.
<https://akillisehirler.csb.gov.tr/2021/09/24/yesil-dalga-uygulamasi/>. Erişim Tarihi:08.03.2026.
21. Gaziantep Büyükşehir Belediyesi, (2025).
<https://www.gaziantep.bel.tr/>. Erişim Tarihi:08.03.2026.
22. Gaziantep Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi Planı. <https://ipa.uab.gov.tr/gaziantep-surdurulebilir-ve-akilli-hareketlilik-strateji-plani24122024>. Erişim Tarihi:08.03.2026.

BÖLÜM 3

ATIKTAN KAYNAĞA PERSPEKTİFİYLE TÜRKİYE’DE DÖNGÜSEL EKONOMİ: AB DÜZENLEMELERİYLE KARŞILAŞTIRMALI OLARAK FIRSATLAR, YAPISAL SINIRLILIKLAR VE POLİTİKA ÖNCELİKLERİ

Emine Su TURAN¹

Behzat BALCI²

Fatma Elçin ERKURT³

Giriş

Küresel ölçekte artan doğal kaynak kullanımı, iklim değişikliği ve atık baskısı, mevcut doğrusal ekonomi modelinin sürdürülebilir olmadığını açıkça göstermektedir. Bu bağlamda DE, kaynakların değerini olabildiğince uzun süre sistemde tutmayı, atık oluşumunu en aza indirmeyi ve ikincil hammadde piyasalarını güçlendirmeyi hedefleyen dönüştürücü bir paradigma olarak öne çıkmaktadır (Geissdoerfer vd., 2017:757; Stahel, 2016:435).

¹ Arş. Gör. Dr., Çukurova Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-4361-6628

² Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-4636-4235

³ Doç. Dr., Çukurova Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-0079-2493

Literatürde DE; yalnızca “azalt–yeniden kullan–geri dönüştür (3R)” yaklaşımıyla değil, aynı zamanda tasarım, iş modeli inovasyonu, tüketim alışkanlıkları ve kamu politikalarını kapsayan sistemsal bir dönüşüm süreci olarak ele alınmaktadır (Kirchherr vd., 2017:221; Korhonen vd., 2018:37).

Döngüsel ekonominin önemi, Birleşmiş Milletler’in 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile olan doğrudan bağlantıları üzerinden daha da belirginleşmektedir. Özellikle SKA 9 (Sanayi, yenilikçilik ve altyapı), SKA 8 (İnsana yakışır iş ve ekonomik büyüme), SKA 12 (Sorumlu üretim ve tüketim) ve SKA 13 (İklim eylemi) bağlamında, ürün ömürlerinin uzatılması, onarım ve yeniden kullanımın yaygınlaştırılması, ikincil hammadde pazarlarının geliştirilmesi ve atık önleme politikalarının güçlendirilmesi yoluyla çok yönlü katkılar sunmaktadır (Schroeder vd., 2019:77).

Avrupa Birliği (AB), 2020 yılında yayımladığı Döngüsel Ekonomi Eylem Planı (CEAP) ve 2024’te yürürlüğe giren Sürdürülebilir Ürünler için Eko-Tasarım Tüzüğü (ESPR) ile bu dönüşümü somut mevzuatlarla yönlendirmektedir. Dijital ürün pasaportları, tekstil ve ambalajda genişletilmiş üretici sorumluluğu (EPR) uygulamaları ve tamir hakkı gibi düzenlemeler, döngüsel ekonomiyi piyasa işleyişinin merkezine yerleştirmektedir (European Union, 2024).

Türkiye ise 2017’de başlatılan Sıfır Atık Politikası, 2019 yılında Sıfır Atık Yönetmeliği, 2021 yılında Yeşil Mutabakat Eylem Planı ve 2025 yılında UDESEP gibi politik araçlarla döngüsel ekonomi gündemini hızla benimsemiştir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre belediye atıklarının düzenli depolamaya yönlendirilen oranı azalırken, geri kazanım oranı artış göstermiştir. 2025 itibarıyla uygulamaya giren Depozito Yönetim Sistemi (DYS) ise yüksek kaliteli ikincil hammadde akışını artırmayı

hedeflemektedir (TÜİK, 2023; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı [ÇŞİDB], 2025).

Bu çalışmada, “Atıktan Kaynağa” yaklaşımı çerçevesinde Türkiye’nin döngüsel ekonomi politikaları ve uygulamaları, Avrupa Birliği’nin Döngüsel Ekonomi Eylem Planı ile karşılaştırmalı olarak ele alınmakta; sürdürülebilir kalkınma hedefleri bağlamında ortaya çıkan fırsatlar, zorluklar ve politika önerileri değerlendirilmektedir.

Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilir Kalkınma İlişkisi

Kavramsal çerçeve: döngüsellik ile sürdürülebilirliğin kesişimi

DE, malzeme ve enerji girdilerini, atık ve emisyon akışlarını sistematik biçimde en aza indirerek kaynakların rejeneratif döngüler içinde tutulmasını amaçlayan bir üretim–tüketim modelidir (Geissdoerfer vd., 2017:757; Stahel, 2016:435). Literatürdeki tanımlar, çoğunlukla “azalt-yeniden kullan-geri dönüştür (3R)” ilkeleri etrafında yoğunlaşsa da, sürdürülebilir kalkınmayla (SK) ilişkilerinin tanımlanmasında ayrışmalar ve kavramsal belirsizlikler bulunduğu vurgulanmaktadır (Kirchherr vd., 2017:221; Korhonen vd., 2018:37). Bu nedenle DE, tekil bir atık yönetimi yaklaşımından ziyade, tasarımdan iş modellerine, tedarik zincirinden tüketim kalıplarına uzanan sistemsel bir dönüşüm çerçevesi olarak ele alınmalıdır (Geissdoerfer vd., 2017:757; Kirchherr vd., 2017:221; Korhonen vd., 2018:37; Stahel, 2016:435).

Sürdürülebilir kalkınma amaçları bağlamında katkılar

DE’nin ürün ve malzemelerin değerini tasarım, bakım-onarım, yeniden kullanım, yeniden imalat ve geri dönüşüm gibi stratejiler aracılığıyla ekonomik döngü içinde mümkün olduğunca uzun süre korumayı; buna bağlı olarak birincil kaynak girdisini, atık oluşumunu ve emisyonları azaltmayı amaçlayan rejeneratif bir üretim–tüketim yaklaşımı olması sürdürülebilir kalkınma amaçları bağlamında ciddi katkılar sağlamaktadır (Geissdoerfer vd.,

2017:757; Kirchherr vd., 2017:221). Bu çerçeve, SKA ile güçlü bir örtüşme sergileyerek özellikle SKA 12 (Sorumlu Üretim ve Tüketim) kapsamında kaynak verimliliği ve atık önleme performansını güçlendirir; enerji ve malzeme verimliliği üzerinden SKA 13 (İklim Eylemi), su/atık su yüklerinin azaltımı ve kirliliğin önlenmesi üzerinden SKA 6 (Temiz Su ve Sanitasyon), kaynak verimli sanayi ve yenilikçi iş modelleri üzerinden SKA 9 (Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı) ve kentsel ölçekte kaynak akışlarının iyileştirilmesi üzerinden SKA 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) gibi amaçlara çoklu eş-fayda üretir. Nitekim literatürdeki sistematik değerlendirmeler, döngüsel ekonomi uygulamalarının çok sayıda SKA ve alt-amacına doğrudan ve dolaylı katkı potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Schroeder vd., 2019:77).

Mutlak ayrışma, kaynak verimliliği ve sistem sınırları

Küresel kaynak kullanımının 1970’lerden bu yana üç kattan fazla artması ve 2060’a dek %60 ek artış öngörülleri, yalnızca geri dönüşüm odaklı yaklaşımların yetersiz kalabileceğini göstermektedir (UNEP/ International Resource Panel [IRP], 2024). Toplumsal-metabolizma çalışmalarına göre, küresel madde akışları hâlâ ağırlıklı doğrusal bir yapıda ilerlemekte; ikincil malzeme girdilerinin payı sınırlı kalmaktadır (Haas vd., 2015:765). Bu bulgular, SKA doğrultusunda “mutlak kaynak kullanımını” ve çevresel baskıları azaltan, bütüncül bir politika karmasına (ekotasarım, onarım hakkı, dijital ürün pasaportları, kamu alımlarında döngüsellik vb.) ihtiyaç olduğunu göstermektedir (UNEP/IRP, 2024; Haas vd., 2015:765).

Riskler ve yan etkiler: “döngüsellik geri tepmesi”

DE faaliyetleri ürün başına çevresel etkiyi azaltırken, fiyat düşüşleri ve ikame etkileri toplam tüketimi artırarak beklenen kazanımları kısmen silebilir; literatürde bu durum “döngüsel

ekonomi geri tepmesi (circular economy rebound)” olarak adlandırılır (Zink ve Geyer, 2017:593). Bu riski azaltmak için, ürün dayanıklılığını artıran standartlar, onarım/yeniden kullanımın önünü açan mevzuat ve talep-yönetimi araçları (paylaşımlı kullanım, kiralama, malzeme vergileri) birlikte kurgulanmalıdır (Zink ve Geyer, 2017:593).

Küresel eğilimler: AB politikaları ve düzenleyici çerçeve

Avrupa Birliği, 2020 Döngüsel Ekonomi Eylem Planı (CEAP) ile döngüsellliği tasarımdan piyasaya gözeten kapsamlı bir yol haritası ortaya koymuştur (Avrupa Komisyonu, 2020). 2024’te yürürlüğe giren “Sürdürülebilir Ürünler için Eko-tasarım Tüzüğü (ESPR)” ise dayanıklılık, onarılabirlik, yeniden kullanım ve geri dönüştürülebilirlik ölçütlerini yatay olarak ürün gruplarına yaymayı amaçlamaktadır; dijital ürün pasaportları (DPP) bu dönüşümün temel araçlarından biridir (AB, 2024). Bu politika seti, ikincil hammadde piyasalarının derinleşmesi ve tek kullanımlık ürünlere bağımlılığın azalması bakımından, SKA’larla uyumlu bir düzenleyici altyapı sunmaktadır (EC CEAP, 2020; ESPR, 2024).

Türkiye bağlamı: kurumsal çerçeve, göstergeler ve yeni araçlar

Türkiye’de 2017’de başlatılan Sıfır Atık Politikası, 2019 tarihli “Sıfır Atık Yönetmeliği” ile kurumsallaşmış; plastik poşetlerin ücretlendirilmesi 2019’dan itibaren ülke genelinde uygulanmaya başlamıştır. Bu politika bileşenleri, atık oluşumunun önlenmesi, kaynağında ayrı toplama ve geri kazanımın artırılmasını hedeflemektedir (T.C. Resmî Gazete, 2019). TÜİK’in 2022 “Atık İstatistikleri” bültenine göre, belediye atıklarının büyük bölümü atık işleme tesislerine yönlendirilmekte; düzenli depolamaya giden pay düşmektedir. Bu durum, geri kazanım altyapısının yaygınlaştığını göstermektedir (TÜİK, 2023). Avrupa Çevre Ajansı’nın (EEA) Türkiye atık yönetimi ülke notunda, Sıfır Atık Politikasının geri dönüşüm oranlarını artırmaya dönük hedefleri ve uygulama araçları

özetlenmektedir (T.C. Resmi Gazete, 2019; TÜİK 2022; EEA 2025). Türkiye’de 2025 itibarıyla ülke genelinde uygulanmaya başlayan DYS, cam, PET ve alüminyum içecek ambalajlarının depozito bedeli karşılığında iadesini hedefleyerek yüksek kaliteli ikincil hammadde arzını artırmayı amaçlamaktadır. DYS’nin resmî bilgi sistemi ve kapsam duyuruları, dâhil olan ürün/paket sınıflarını ve uygulama esaslarını tanımlamaktadır (DBYS/TÜÇA). Bu araç, üretici sorumluluğu mekanizmalarıyla birlikte ambalaj atıklarının döngüye geri kazandırılmasında kritik bir kaldıraçtır (DBYS, 2023–2025). Türkiye’nin 2021 tarihli “Yeşil Mutabakat Eylem Planı” AB düzenlemeleriyle uyumu, döngüsel üretim–ticaret standartlarını ve yeşil dönüşümün dış ticarete etkilerini bütüncül biçimde ele almakta; Paris Anlaşması’nın 2021’deki onay süreciyle birlikte iklim hedefleri ve kaynak verimliliği gündemine bağlanmaktadır. Bu uyum, ekotasarım, eko-etiket, kamuda yeşil alımlar ve atık önleme/yeniden kullanım başlıklarında politikanın yatay yayılımını destekler niteliktedir (Ticaret Bakanlığı, 2021; 2022).

Değerlendirme: politika entegrasyonu ve araştırma gündemi

DE–SK ilişkisinin kuvvetlenmesi; (i) tasarım aşamasından başlayarak onarım ve yeniden kullanım yollarını açan düzenlemeler, (ii) ikincil hammadde piyasalarında kalite standartları ve izlenebilirlik, (iii) yerel yönetimlerde ayrı toplama–ön işleme kapasitesinin artırılması, (iv) üretici sorumluluğu sistemlerinin (EPR/DYS) kapsayıcılığı ve etkinliği ile mümkündür. Türkiye’nin Sıfır Atık ve DYS deneyimi, AB CEAP ve ESPR gibi küresel politika eğilimleriyle birlikte ele alındığında; atık oluşumunun önlenmesi ve malzeme döngülerinin kapatılması yönünde güçlü bir politika mimarisine işaret etmektedir. Bununla birlikte, literatürün uyardığı “geri tepme” riskini sınırlamak için talep tarafı araçları (dayanıklılık, onarılabilirlik, uzun ömürlü tasarım standartları) ve fiyat sinyalleriyle desteklenen, veriye dayalı izleme–değerlendirme

çerçeveleri kritik önemdedir (Zink ve Geyer, 2017:593; UNEP/ IRP, 2024).

Türkiye’de Atık Yönetimi Politikaları ve Mevcut Durum

Türkiye’de atık yönetimi mevzuatı, 2872 sayılı Çevre Kanunu çerçevesinde; atıkların önlenmesi, azaltılması, yeniden kullanım/geri kazanım ve kalan kısmın çevreyle uyumlu bertarafını önceleyen hiyerarşi doğrultusunda şekillenmektedir (ÇŞİDB, 2015). Mevzuatın omurgasını Atık Yönetimi Yönetmeliği (2015) oluşturur; yönetmelik atıkların sınıflandırılması, toplanması, taşınması, işlenmesi ve bertarafına ilişkin yükümlülükleri bütüncül bir sistem yaklaşımıyla tanımlar. Bu çerçeveyi güçlendiren Sıfır Atık Yönetmeliği, kurum ve işletmelerde sıfır atık sistemi kurulmasını, izleme ve belgelendirmeyi zorunlu kılarak önleme-azaltma-ayırma eksenini kurumsallaştırmıştır (ÇŞİDB, 2019). Ambalaj atıkları ve üretici sorumluluğu ise Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği ile güncellenmiş; üretici/ihtalatçıların piyasaya sürülen ambalajlar için genişletilmiş üretici sorumluluğu çerçevesindeki yükümlülükleri netleştirilmiştir (ÇŞİİDB, 2021). Elektrikli-elektronik atıklar (AEEE) için 2022’de yayımlanan yeni yönetmelik, ürün tasarımından bertarafa kadar kısıtlayıcı hükümler ve üretici sorumluluğu mekanizmalarını güçlendirmiştir (ÇŞİİDB, 2022).

Kurumsal yapı düzeyinde 2020 sonunda Türkiye Çevre Ajansı (TÜÇA) kurulmuş; ajansın temel görevlerinden biri ambalajlı içeceklerde DYS’ni ulusal ölçekte işletmektir (T.C. Resmî Gazete, 2020). 2025 yılı itibarıyla DYS mevzuatı ve uygulama duyuruları yayımlanmış; depozito katılım bedeli tarifiesi ve usul esasları kamuoyuna açıklanmış, sistem pilot illerden ülke geneline aşamalı geçiş hedefiyle yaygınlaştırılmaktadır (TÜÇA, 2025). Ulusal stratejiler ve uyum çerçevesi 2016-2023 dönemini kapsayan Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (UAYEP), geri kazanım ve düzenli depolama hedefleriyle politika yol haritası sunmuştur (ÇŞİİDB,

2016). 2023 sonrasında planın 2023-2035 dönemine uzatılması yönünde çalışmalar yürütülmektedir (Ticaret Bakanlığı, 2023). Paralel olarak, Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı (UDESEP) kamuoyuna duyurulmuş; belge kaynak verimliliği ve atık hiyerarşisi odaklı öncelikleri netleştirmiştir (ÇŞİİDB, 2025). Ayrıca İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030) atık önleme, nitelikli sıfır atık belgelendirmesi ve uygulamaları sera gazı azaltımı hedefleriyle ilişkilendirerek yatay politika uyumu sağlamaktadır (ÇŞİİDB, 2024).

Türkiye’de mevcut durum: göstergeler ve eğilimler değerlendirildiğinde belediye atık yönetimine ilişkin en güncel resmi istatistiklere göre, atık hizmeti verilen belediyelerde 2024 yılında 32,3 milyon ton belediye atığı toplanmış, toplanan atığın %88,9’u atık işleme tesislerine, %10,9’u ise belediye çöplüklerine yönlendirilmiştir. Kişi başına düşen günlük ortalama belediye atığı miktarı 1,09 kg/kişi-gün olarak hesaplanmıştır (TÜİK, 2025). Bir önceki resmi bültende, 2022 yılında 30,3 milyon ton belediye atığı toplandığı; bunun %85,9’unun geri kazanım, yakma, kompost veya düzenli depolama gibi işleme bertaraf süreçlerine sevk edildiği bildirilmiştir (TÜİK, 2023). Öte yandan, ulusal politika izleme göstergeleri kapsamında raporlanan geri kazanım oranının 2022’de %30,13, 2023’te %34,92 ve 2024’te %36,08 düzeylerine yükselmesi, döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda ilerlemeye işaret etmektedir (ÇŞİİDB, 2024; ÇŞİİDB, 2025). Bununla birlikte, uluslararası karşılaştırmalar Türkiye’nin belediye atığı geri dönüşüm/geri kazanım performansının AB ortalamasının gerisinde seyrettiğini ortaya koymakta; örneğin AB-27’de belediye atığı geri dönüşüm oranı 2023 yılında %47,7 olarak raporlanmıştır (EEA, 2025).

Belediyelerde iyi uygulama örnekleri de bulunmaktadır. İstanbul’da İSTAÇ A.Ş., aktarma istasyonları, malzeme geri kazanım hatları, tıbbi atık sterilizasyonu ve depolama sahalarında

“atık-tan enerji” uygulamalarıyla Türkiye’nin en gelişkin entegre sistemlerinden birini işletmektedir (İSTAÇ A.Ş., 2024). Ankara’da Mamak ve Sincan-Çadırtepe tesisleri, depolama gazının elektrik üretiminde kullanılması ve biyometanizasyon uygulamalarıyla döngüsel modele yaklaşan yapılar sunmaktadır. Kocaeli’de İZAYDAŞ; Tehlikeli atık yakma kapasitesiyle sanayi kaynaklı atıklarda güvenli bertaraf ve enerji geri kazanımı sağlayan öncü bir belediye şirket modelidir (İZAYDAŞ, 2024). İzmir’de İzmir Büyükşehir Belediyesi’nin “Plastik Atıksız Şehir Eylem Planı (2022-2030)”, yerel düzeyde plastik azaltımı ve ayrıştırmaya yönelik hedefler ortaya koymaktadır (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2022).

Türkiye, sıfır atık yaklaşımının kurumsallaşması, üretici sorumluluğunun güçlendirilmesi ve DYS’nin devreye alınması gibi kritik adımlarla ilerlemektedir. Ancak geri kazanım oranının %30 seviyesinden AB ortalamalarına yükseltilmesi, organik atıkların kaynaktan ayrı toplanması, ikincil hammadde piyasalarının geliştirilmesi ve belediyeler arası kapasite farklarının giderilmesi öncelikli alanlardır (ÇŞİİDB, 2024; TÜÇA, 2025).

Atıktan Kaynağa Dönüşüm: Döngüsel Ekonomi Uygulamaları

DE, ürün–bileşen–malzemelerin değerini sistematik biçimde korumayı; teknik ve biyolojik döngüler arasında ayrım yaparak “tasarımda onarım/yenileme/yeniden kullanım” ve “yüksek kaliteli geri dönüşüm” yoluyla kaynağın sistemde tutulmasını hedefler (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Bu yaklaşım, kaynak verimliliğini artırırken çevresel baskıları azaltmayı ve ekonomik dayanıklılığı güçlendirmeyi amaçlar.

Geri dönüşüm odaklı malzeme döngüleri

Türkiye’de atık yönetiminde geri kazanım altyapısının büyüdüğünü gösteren güncel resmi istatistikler, 2022’de atık işleme tesislerinde toplam 133,2 milyon ton atığın işlendiğini; bunun 51,7 milyon tonunun geri kazanıldığını ortaya koymaktadır (TÜİK,

2023). Bu veriler, geri kazanımın miktar ve pay olarak arttığını ancak daha fazla gelişme alanı bulunduğunu göstermektedir. Geri dönüşümün artmasını destekleyen kilit politika araçları arasında Sıfır Atık Yönetmeliği ve bakanlığın Sıfır Atık programındaki dönüm noktaları yer alır. Ayrıca Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği üretici sorumluluğu ve geri dönüştürülebilir tasarım kriterleriyle döngüsellliği destekler (ÇŞİDB, 2021).

Yeniden kullanım ve onarım modelleri

Yeniden kullanım, onarım ve yeniden doldurma yaklaşımları, malzeme kalitesini koruyarak döngünün üst basamaklarında değer yaratan uygulamalardır. Türkiye’de DYS, içecek ambalajlarında yüksek kaliteli malzeme döngüsünü hedefleyen temel bir araç olarak devreye alınmıştır (TÜÇA, 2025). Bu tür sistemler, ambalaj geri kazanım kalitesini artırırken belediye toplama yükünü azaltır (ÇŞİDB, 2019). Bunun yanında, Türkiye Döngüsel Ekonomi Platformu (TDEP) ve Materials Marketplace gibi girişimler, işletmeler arası ikincil hammadde eşleştirmesi ve yeniden kullanım için ekosistem altyapısı sağlamaktadır (SKD Türkiye, 2022).

Atıktan enerji ve biyobozunur fraksiyon yönetimi

Atık hiyerarşisinde atıktan enerji (WtE), geri dönüşüm ve kompost seçeneklerinin tamamlayıcısıdır. Türkiye’de İstanbul Kemerburgaz Atık Yakma ve Enerji Üretim Tesisi, günlük 3.000 ton atık işleyerek yaklaşık 77 MW elektrik üretim kapasitesine sahiptir (İSTAÇ A.Ş., 2024; İstanbul Büyükşehir Belediyesi [İBB], 2024). Bu tür tesislerde emisyon standartlarına uyum ve ön ayırma kritik öneme sahiptir. Biyobozunur fraksiyonda ise anaerobik çürütme (AD) ve düzenli depolama gazı (LFG) yakalama metan salımlarını azaltarak iklim faydası sağlar. Türkiye’de İzmir’de yapılan mekânsal modelleme çalışmaları, merkezi biyogaz tesislerinin fizibil olduğunu göstermektedir (Yalçinkaya, 2020). Ayrıca Türkiye genelinde atık

depolama sahalarından elektrik üretim kapasitesine dair modelleme çalışmaları da yapılmıştır (Can, 2022).

Endüstriyel simbiyoz ve yenilikçi projeler

Endüstriyel simbiyoz, işletmeler arasında enerji, su ve malzeme değişimi ile atığın kaynağa dönüşümünde sistemsel çözümler sunar. Türkiye’de 2008’den itibaren başlatılan endüstriyel simbiyoz projeleri ve Ulusal Endüstriyel Simbiyoz Programı deneyimleri, kaynak verimliliğinde önemli kazanımlar sağlamıştır (Dolgen & Alpaslan, 2020:30; Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2019). Ayrıca AB destekli raporlar ve Dünya Bankası’nın Türkiye döngüsel ekonomi geçiş raporu, sanayide ikincil hammadde kullanımının ölçeklenmesini öncelikli görmektedir (European Topic Centre on Circular Economy and Resource Use [ETC/CE], 2022; World Bank, 2025).

Ekonomik ve Sosyo-Çevresel Katkıları

DE, atıkların kaynağa dönüştürüldüğü bir üretim-tüketim sistemi kurarak ekonomik değer yaratırken çevresel baskıları azaltır. Türkiye bağlamında bu yaklaşım; yeşil istihdam, kaynak verimliliği, karbon azaltımı ve toplumsal farkındalık eksenlerinde ölçülebilir kazanımlar sunar.

Döngüsel uygulamalar (onarım, yeniden kullanım, yeniden imalat, geri dönüşüm ve paylaşımlı hizmetler) emek yoğunluğu yüksek alanlarda yeni işler oluşturur. Avrupa Birliği’nde yapılan bütünleşik modelleme, döngüsel ekonomi politikalarının 2030’a dek ~700 bin ek istihdam ve GSYH’de ~%0,5 artış yaratabileceğini göstermektedir (European Commission, 2022). Türkiye özelinde, UNDP-ILO makroekonomik değerlendirmesi 2030’a kadar yaklaşık 300 bin net ilave istihdam ve GSYH’de artış öngörmektedir; bu kazanımlar özellikle yenilenebilir enerji, atık yönetimi ve enerji verimliliği yatırımlarıyla tetiklenmektedir (UNDP & ILO, 2022). Ayrıca geri dönüşüm ve yeniden kullanımın istihdam yoğunluğu,

depolamaya kıyasla daha yüksektir: ABD Çevre Koruma Ajansı'nın çalışmaları 1.000 ton geri dönüştürülen malzeme başına ortalama 1,17 istihdam yaratıldığını rapor eder; metal, inşaat-yıkıntı ve alüminyum akışlarında bu etki daha da belirgindir (EPA, 2020). Bu bulgular, atıkların kaynağa dönüştürülmesi yaklaşımının yerel KOBİ ekosistemi (onarım atölyeleri, parça kurtarma, kompost ve biyometan tesisleri, ikinci el pazarları) için ölçeklenebilir iş alanları açtığını ve bölgesel kalkınma politikalarıyla sinerji ürettiğini göstermektedir (OECD, 2018).

Kaynak verimliliği; daha az malzemeye aynı çıktıyı üretmeyi, yaşam döngüsü boyunca yeniden kullanım/yeniden imalat ve yüksek geri dönüştürülmüş içerik kullanımını içerir. Çalışmalara göre malzeme verimliliği stratejileri (tasarruflu tasarım, yoğun kullanım, geri dönüşüm) enerji verimliliği ve yenilenebilirlerle birlikte uygulandığında hem maliyetleri düşürür hem de ekonomik dayanıklılığı artırır (IRP, 2020). Türkiye'de hammadde ithalat bağımlılığı göz önüne alındığında, yerli ikame malzeme akışlarının (hurda metaller, inşaat-yıkıntı atıklarından agrega, biyobazlı girdiler) güçlendirilmesi cari açık ve tedarik zinciri riski üzerinde olumlu etki yaratır (OECD, 2018).

Doğal kaynakların çıkarımı ve işlenmesi, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık yarısından ve biyolojik çeşitlilik kaybı ile su baskısının %90'ından sorumludur (IRP, 2020). IRP modellemeleri, malzeme verimliliği önlemlerinin 2050'de:

- Konutlarda yaşam döngüsü emisyonlarını G7 ülkelerinde %35–40 azaltabileceğini,
- Binek araçlarda malzeme çevrimi emisyonlarını G7'de %57–70 azaltabileceğini göstermektedir (IRP, 2020).

Bu bulgular, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır hedefi ile uyumlu olarak binalarda yeniden kullanım/geri kazanım, çelik ve çimento ikamesi, araçlarda daha küçük/yoğun kullanım ve yüksek geri dönüştürülmüş içerik gibi atıktan kaynağa stratejilerinin iklim politikalarında merkezi rol oynayabileceğini göstermektedir.

Türkiye’de Sıfır Atık yaklaşımı 2017’de ulusal politika olarak başlatılmış; 2019 tarihli Sıfır Atık Yönetmeliği ile kurumsal çerçeve güçlendirilmiştir (EEA, 2025). Ülke profiline göre 2017–2023 arasında belediyeler tarafından toplanan atıklarda geri kazanım payının %13’ten %35’e yükseldiği, plastik poşet ücretlendirmesinin 2019–2024 döneminde ~1,8 milyon ton plastik birikimini engellediği ve ~74,7 bin ton GHG emisyonunu önlediği bildirilmektedir (EEA, 2025).

Yerel düzeyde, İstanbul ilçe belediyeleri üzerine yapılan bir değerlendirme; eğitim, gönüllülük ve teşvik tabanlı programların katılımı anlamlı biçimde artırdığını, 2017–2022 arasında 19 milyon+ kişiye eğitim verildiğini ve kurumsal kapasitenin güçlendiğini göstermektedir (Henden Şolt, 2023). Buna karşılık öğretmenlerle yürütülen ulusal bir niteliksel çalışma, Sıfır Atık projesinin amaç ve kapsamına ilişkin bilgi düzeyinin heterojen olduğunu ve eğitim-odaklı farkındalık eksikliklerinin başarıyı sınırlayabildiğini ortaya koymuştur (Yüzüak & Erten, 2022:71).

Türkiye için bütünleşik kazanım tablosu değerlendirildiğinde, atıktan kaynağa geçişin Türkiye’de beklenen katkıları şunlardır:

- Onarım-yeniden kullanım-geri dönüşüm zincirlerinde yüksek istihdam yoğunluğu ve KOBİ tabanlı kapsayıcı büyüme (UNDP & ILO, 2022; EPA, 2020).
- Kaynak verimliliği ile üretim maliyetlerinde azalma, tedarik güvenliğinde artış ve ithal girdi bağımlılığında azalma (OECD, 2018).
- Bina ve ulaşırmada malzeme verimliliği stratejileri yoluyla derin karbon azaltımı (IRP, 2020).
- Sıfır Atık politikası, yerel eğitim programları ve mevzuatla desteklenen toplumsal farkındalık ve davranış dönüşümü (EEA, 2025; Henden Şolt, 2023; Yüzüak & Erten, 2022:71).

Bu bileşenler, yeşil istihdam, kaynak verimliliği, karbon azaltımı ve farkındalık başlıklarını aynı politika setinde buluşturduğunda Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma amaçlarına hızlı ve adil bir geçişle yaklaşmasını mümkün kılar.

Türkiye’de Döngüsel Ekonomi Alanında İyi Uygulama Örnekleri

Sanayi ölçeği: endüstriyel simbiyoz ve EİP dönüşümleri

Türkiye’de sanayi sektöründe döngüsel ekonomi bağlamında öne çıkan en önemli uygulamalardan biri İskenderun Körfezi Endüstriyel Simbiyoz Programıdır. Bu programda 51 firma arasında 420 potansiyel eşleşme belirlenmiş; yıllık 6.500 m³ su tasarrufu, 33,58 GWh enerji tasarrufu, 36.680 tCO₂ azaltımı ve 276.253 ton hammadde ikamesi sağlanmıştır (Alkaya vd., 2014). Sonraki dönemde yayımlanan ulusal değerlendirme ve rehber dokümanlar, endüstriyel simbiyoz yaklaşımının farklı bölgelerde yaygınlaştırılmasına yönelik kurumsal çerçeve ve uygulama adımlarını detaylandırarak, Türkiye’de endüstriyel simbiyozun “pilot proje” ölçeğinden bölgesel sanayi dönüşüm araçlarına evrildiğini göstermektedir (İzmir Kalkınma Ajansı [İZKA], 2022; ÇŞİDB, 2024). Benzer şekilde, İzmir Atatürk Organize sanayi bölgesinin (OSB) Eko-Endüstriyel Park dönüşümünde 1.152.032 m³ su, 63.892 tCO₂, 151.840 MWh enerji ve 16.000 ton katı atık azaltımı elde edilmiştir (Dolgen & Alpaslan, 2020:30). Ayrıca Adana Hacı Sabancı Organize Sanayi Bölgesi’nde “Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde OSB’nin eko-endüstriyel parka dönüştürülmesi amacıyla döngüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyozun geliştirilmesi” temalı TÜBİTAK 1005 projesi gibi girişimler, EİP dönüşümünün yeni bölgelere yayıldığını işaret etmektedir. Bu örnekler, endüstriyel simbiyozun Türkiye’de ölçülebilir kazanımlar sunduğunu göstermektedir.

Tarım ölçeği: biyo-atıklardan enerji ve ürün geri kazanımı

Türkiye’de tarımsal atıkların enerjiye dönüştürülmesinde anaerobik çürütme öne çıkmaktadır. Piliç gübresi ve tarımsal yan ürünlerin anaerobik çürütme ile işlenmesi, sera gazı emisyonlarını azaltırken yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde, farklı organik atıkların anaerobik çürütme ile kojenerasyonunun çevresel ve ekonomik üstünlüğü de ortaya konmuştur (Balcıoğlu vd., 2022:924). Bu yaklaşımın uygulama ölçeğinde belediye ve yerel yönetim örnekleri de bulunmaktadır; örneğin Kayseri’de Beydeğirmeni Biyogaz Tesisi gibi tesislerin, farklı organik atık fraksiyonlarını değerlendirerek elektrik üretimi gerçekleştirdiği ve yerel ölçekte atık azaltımına katkı sunduğu raporlanmıştır (Kayseri Büyükşehir Belediyesi, 2025). Bununla birlikte, Türkiye’de biyo-atık yönetimi altyapısının kurumsallaşmasına yönelik güncel bir çerçeve olarak hazırlanan bakanlık dokümanında, 2024 yılı ilk yarısı itibarıyla belediye atıklarının işlendiği çevre lisanslı tesisler arasında kompost ve biyometanizasyon tesislerinin sayısına ilişkin güncel envanter bilgileri paylaşılmıştır (ÇŞİDB, 2024). Ayrıca, süt endüstrisinde ortaya çıkan peynir altı suyu biyogaz ve gübre üretiminde kullanılmakta, böylece atıkların tarımda döngüsellğe kazandırılması mümkün olmaktadır (Sirmacekic vd., 2022). Bu gelişmeler, tarım kaynaklı organik akışların enerji–gübre ekseninde değerlendirilmesine paralel şekilde, kentsel organik atık akışlarının da biyolojik arıtım/geri kazanım teknolojileriyle döngüsellğe yönlendirildiğini göstermektedir.

Enerji sektörü: atıktan türetilmiş yakıtlar (RDF) ve eş-işleme

Türkiye’de özellikle çimento sektöründe ATY, arıtma çamuru ve çeşitli atık türevli yakıtların eş-işleme yoluyla değerlendirilmesi, fosil yakıt ikamesi ve çevresel etki azaltımı bakımından kritik bir döngüsel ekonomi uygulaması olarak konumlanmaktadır (Çankaya & Pekey, 2019). Sektörün en güncel kurumsal raporlamasına göre, 2024 yılında 2,1 milyon ton alternatif

yakıt kullanımıyla ısı enerji ihtiyacının %13'ü alternatif yakıtlardan karşılanmış; ayrıca 6,6 milyon ton alternatif hammadde ile yaklaşık %5'lik ikame oranına ulaşılmıştır (TÜRKÇİMENTO, 2025). Bu veriler, ATY ve alternatif hammadde kullanımının Türkiye'de döngüsel ekonomi-karbonsuzlaşma kesişiminde ölçeklenmekte olan bir endüstriyel pratik olduğunu göstermektedir.

Belediye ölçeği: sıfır atık, yakma+enerji ve depolama gazından elektrik

Belediye ölçeğinde Türkiye'nin en görünür politika çerçevesi Sıfır Atık olup, ulusal raporlamada geri kazanım oranının 2024'te %36,08'e yükseldiği, yaygınlaşan uygulama kapsamına ilişkin göstergelerle birlikte duyurulmuştur (ÇŞİDB, 2025). Teknoloji odaklı iyi uygulamalara bakıldığında, İstanbul'da Atık Yakma ve Enerji Üretim Tesisi günlük 3.000 ton (yıllık yaklaşık 1 milyon ton) kapasiteyle işletilmekte ve tesisin 85 MW kurulu güce sahip olduğu kurumsal kaynaklarda belirtilmektedir (İSTAÇ, 2024.; İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2024.). Organik fraksiyonun yönetiminde ise, Türkiye'de biyo-atıkların yönetimine ilişkin güncel envanter ve yol haritası dokümanları; kompost ve biyometanizasyon tesislerinin yaygınlaştığını ve belediye atık yönetiminde biyolojik geri kazanım teknolojilerinin artan rolünü vurgulamaktadır (ÇŞİDB, 2024). Ayrıca İzmir'de yeşil atıkların kompostta dönüştürülmesi gibi uygulamalar, kentsel organik akışların "toprağa geri kazandırım" yaklaşımıyla yönetimine örnek teşkil etmektedir (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2025). Bu bütünleşik yaklaşım, döngüsel ekonominin belediye ölçeğinde hem politika (Sıfır Atık) hem de altyapı (biyolojik geri kazanım, yakma+enerji, LFG/enerji vb.) bileşenleriyle çok kanallı biçimde ilerlediğini ortaya koymaktadır (Salihoğlu, 2018:1126; ÇŞİDB, 2024). İstanbul'da Sıfır Atık uygulamaları hem ilçe belediyeleri hem de mega projeler ölçeğinde uygulanmaktadır. İlçe belediyeleri düzeyinde yapılan bir çalışmada, farklı atık fraksiyonlarının toplama performansları değerlendirilmiş

ve sürdürülebilir şehir planlaması açısından önemli kazanımlar raporlanmıştır (Henden Şolt, 2023). İstanbul Havalimanı'nda ise 2019–2020 yılları arasında %43–49 geri dönüşüm sağlanmıştır (Özbay vd., 2021:134). Ayrıca, İstanbul Atık Yakma ve Enerji Üretim Tesisi yılda yaklaşık 1 milyon ton atığı işleyerek 630 GWh elektrik üretmekte ve 400.000 hanenin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır (Asian Infrastructure Investment Bank [AIIB], 2021). Bunun yanında, düzenli depolama sahalarından elde edilen depolama gazı (LFG) ile elektrik üretimi de Türkiye’de etkin bir belediye ölçeği uygulaması olarak dikkat çekmektedir (Salihoğlu, 2018:1126).

Döngüsel Ekonominin Türkiye’nin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına Katkısı

DE, kaynak verimliliğini artırma, atık oluşumunu en aza indirme ve ikincil hammadde akışlarını güçlendirme yoluyla pek çok SKA’ya aynı anda katkı veren etkinleştirici bir politika çerçevesidir. Literatür, DE uygulamalarının özellikle SKA 6 (Temiz Su ve Sanitasyon), SKA 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), SKA 8 (İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme), SKA 9 (Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı), SKA 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar), SKA 12 (Sorumlu Üretim ve Tüketim) ve SKA 13 (İklim Eylemi) ile güçlü örtüşmelerine işaret eder (Schroeder vd., 2019:77). Türkiye’nin 2053 net-sıfır hedefi bağlamında da DE; enerji, sanayi, tarım ve belediye hizmetleri ekseninde düşük karbonlu dönüşümü hızlandıran tamamlayıcı araçlar sunmaktadır (World Bank, 2022).

Politika uyumu ve kurumsal çerçeve (SKA 12, SKA 9, SKA 13) bakımından; on İkinci Kalkınma Planı (2024–2028), “katı atık yönetiminin döngüsel ekonomi ilkeleri gözetilerek etkinleştirilmesi”ni ve Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı’nın (UDESEP) hazırlanmasını öngörerek DE’yi ana akımlaştırmıştır (Strateji ve Bütçe Başkanlığı [SBB], 2023). UDESEP (2024–2028), elektronik-BİT, batarya-araçlar, ambalaj,

plastik, tekstil, inşaat-bina ve gıda-biyokütle gibi öncelikli sektörlerde eylemleri takvimlendirerek ürün yaşam döngüsü boyunca kaynak verimliliği ve ikincil hammadde kullanımını artırmayı amaçlar (T.C. ÇŞİİDB, 2025). Bu politika hattı, sanayide kaynak verimliliği ve yenilikçiliği (SKA 9) ile sorumlu üretim/tüketimi (SKA 12) güçlendirirken, emisyon azaltımına katkıyla SKA 13'e eşlik eder.

Sürdürülebilir şehirler ve atıkta değer (SKA 11, SKA 12) bakımından; Türkiye'nin Sıfır Atık yaklaşımı; atıkların önlenmesi, kaynağında ayrıştırma ve yüksek kaliteli geri kazanım zincirleri üzerinden SKA 11 ve SKA 12'ye doğrudan hizmet eder. İstanbul'da ilçe belediyeleri düzeyindeki uygulamalar, ayrı toplama ve geri kazanım kapasitesinin operasyonel verimliliğe dönüştürülebileceğini göstermiştir (Henden Şolt, 2023). Türkiye'nin eş-sunuculuğunda BM Genel Kurulu'nun 30 Mart'ı "Uluslararası Sıfır Atık Günü" ilan etmesi, DE'nin ulusal düzeydeki görünürlüğünü ve çok taraflı işbirliğini pekiştirmiştir (UN, 2025). Ayrıca TÜİK 2022 Atık İstatistikleri, atık işleme tesislerinde 51,7 milyon ton materyalin geri kazanıldığını bildirerek DE'nin materyal döngülerini genişletme potansiyelini ortaya koyar (TÜİK, 2023).

Temiz enerji ve iklim eylemi: atıktan enerjiye çözümler (SKA 7, SKA 13) bakımından; belediye ölçeğinde atığın enerjiye dönüştürülmesi (WtE) ve düzenli depolama gazından (LFG) elektrik üretimi, metan emisyonlarının azaltımı yoluyla SKA 13'e; yenilenebilir/yerli enerji üretimi yoluyla SKA 7'ye katkı verir. İstanbul'daki Atıktan Enerji Üretim Tesis, 1,4 milyon ton/yıl evsel atıktan ~630 GWh/yıl elektrik üretim kapasitesiyle (iki aşamada) iklim ve enerji hedeflerine çapraz katkı üretir (AIIB, 2021). Türkiye'de LFG'den elektrik üretimi üzerine yapılan ampirik çalışma, ton atık başına ortalama 0,08 MWh elektrik üretim katsayısını rapor ederek belediye tesislerinin ölçeklenebilir bir iklim çözümü sunabileceğini göstermiştir (Salihoğlu, 2018:1126).

Tarım ve biyoekonomi; biyogaz ile değer zinciri dönüşümü (SKA 7, SKA 12, SKA 13) bakımından; tarım ve hayvancılık atıklarının anaerobik çürütme ile biyogaza dönüştürölmesi, kırsal enerji arz güvenliği ve gübre ikamesi üzerinden SKA 7 ve SKA 12’yi; metan azaltımı üzerinden SKA 13’ü destekler. Türkiye bağlamında yürütölen yaşam döngüsü ve sürdürölabilirlik analizleri, farklı atık akımlarının (ör. hayvansal gübreler, organik yan ürünler) kojenerasyon için çevresel ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Balcıoğlu, vd., 2022). Hayvansal gübrelerden biyogaz potansiyeli ve sera gazı azaltım kapasitesi, il bazında senaryolarla da ortaya konmuştur (Ersoy ve Uğurlu, 2020).

Sanayide kaynak verimliliği ve ekosistem yaklaşımı (SKA 9, SKA 12) bakımından; Organize Sanayi Bölgeleri’nde (OSB) eko-endüstriyel park ve endüstriyel simbiyoz yaklaşımları; enerji, su ve malzeme döngülerinin kapatılmasını hedefleyerek sanayi altyapısını daha dayanıklı ve verimli kılar (SKA 9, SKA 12). Dünya Bankası’nın Yeşil OSB çerçevesi ve Türkiye’deki saha uygulamaları, firmalar arasında ikincil hammadde ve atık ısı paylaşımı gibi DE pratiklerinin iklim taahhütleriyle uyumunu vurgular (World Bank, 2022). Türkiye deneyimini özetleyen çalışmalar da EİP yaklaşımının yüksek potansiyel taşıdığını, ancak ölçekleme için yönetişim ve finansman mekanizmalarının güçlendirilmesi gerektiğini belirtir (Dolgen & Alpaslan, 2020:30).

Su döngüsünün kapatılması ve yerel dayanıklılık (SKA 6, SKA 11) bakımından; politika düzeyinde gri suyun yeniden kullanımı, yağmur suyu hasadı ve alternatif su kaynakları için mevzuat geliştirilmesi yönündeki hedefler; şehirlerde su döngüsünün kapatılması için DE ilkeleriyle uyumludur (SBB, 2023). Bu, kentsel su stresini azaltarak SKA 6 ve SKA 11’e eşzamanlı katkı sağlar.

Karşılaşılan Zorluklar ve Engeller

Teknolojik ve altyapısal bariyerler

Türkiye’de belediye ölçeğinde kaynakta ayrı toplama ve biyobozunur atık yönetimi altyapısı henüz yaygın ve etkin değildir. 2021’de belediye atıklarının yaklaşık %81’i düzenli depolamaya yönelmiş, geri dönüşüm oranı ise düşük seviyelerde kalmıştır (EEA, 2025). Bu tablo, döngüsellüğün temel şartı olan “yüksek kaliteli, ayrı toplanmış akışlar” için kapasite açığını göstermektedir.

Sanayide ise izlenebilirlik, malzeme pasaportu ve geri dönük tedarik zinciri tasarımı gibi dijital çözümler (geri dönüştürülmüş içerik doğrulama, EUDR/CBAM uyumu için veri) ölçek ekonomileriyle birlikte belirleyici hâle gelmektedir. Dünya Bankası’nın (2025) değerlendirmesi, özellikle tekstil ve otomotiv tedarik zincirlerinde dijital izleme, geri dönüştürülmüş hammaddeye erişim ve kaynak verimliliği yatırımlarındaki eksiklikleri kritik darboğazlar olarak tanımlamaktadır.

Tekstil sektöründe yapılan nitel çalışmalar, döngüsel ürün tasarımında sökülebilirlik, tek malzeme kullanımı ve kimyasal sınırlara uygunluk gibi teknik gerekliliklerin, üretici tarafında tasarım ve süreç yeniliği eksikliği nedeniyle sınırlı biçimde uygulandığını ortaya koymuştur (Nyström, 2023). Ayrıca, Türkiye’nin “Sıfır Atık” programı kurumsal çerçeveyi güçlendirmiş olsa da uygulamada “hedef/taktik belirsizliği” ve “finansal destek yetersizliği” gibi etmenlerin başarıyı sınırladığı vurgulanmıştır (Ayçin & Kayapınar Kaya, 2021:1078).

Finansal bariyerler

Küçük ve orta büyüklükteki işletmeler (KOBİ) için döngüsel iş modellerine geçişte ilk yatırım maliyetleri, uzun geri dönüş süreleri ve finansmana erişim zorlukları önemli engellerdir (Rizos vd., 2016). Avrupa genelindeki araştırmalar, “sermaye yetersizliği” ve “kamu desteği eksikliği”ni yaygın engeller olarak öne çıkarırken, Türkiye bağlamında da benzer bulgular raporlanmaktadır. Makro düzeyde, yatırımcıların yönlendirilmesi için sınıflandırma ve açıklama standartları kritik öneme sahiptir. Ancak Türkiye’de Yeşil

Taksonomi düzenlemesi halen hazırlık/taslak aşamasındadır ve 2026 sonuna doğru yürürlüğe girmesi beklenmektedir (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2024; UNFCCC, 2025). Bu durum yatırımcı açısından belirsizlik yaratmaktadır. Dünya Bankası (2022), yeşil dönüşüm için finansman mobilizasyonunun, ölçek yatırımları ve politika güvenceleriyle birlikte tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır (World Bank, 2022).

Kurumsal ve düzenleyici bariyerler

Yetki ve sorumluluk paylaşımı, belediyeler arası kapasite farkları nedeniyle uygulamada eşitsizliklere yol açmaktadır (EEA, 2025). Ambalaj atıkları için 2024'te yapılan düzenleme, geri dönüştürülebilirlik performansına dayalı üretici sorumluluğu ücretlendirmesini getirmiştir (MoEUCC, 2024). Ancak depozito iade sisteminin yaygınlaşması ve kayıt dışı akışların denetimi için zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Sıfır Atık girişimi ise güçlü bir kurumsal takvime sahip olmakla birlikte, performans ölçümünde standardizasyon ve yerel düzeyde uygulamaya geçiş önemli bir ihtiyaçtır.

Kültürel ve davranışsal bariyerler

Literatür, tüketici farkındalığı eksikliği, kalite algısı ve alışkanlıkların döngüsel ürünlerin benimsenmesini sınırladığını göstermektedir (Kirchherr vd., 2017:221; Polyportis vd., 2022). Türkiye’de yapılan çalışmalar, hanehalkı geri dönüşüm davranışında niyet ile eylem arasındaki boşluğu vurgulamakta ve sosyal normların, kolaylığın ve erişilebilirliğin kritik olduğunu belirtmektedir (Dursun, 2024:55). Ayrıca, döngüsel ürünlere yönelik kalite/güven algısı bariyerinin, şeffaf etiketleme ve kamu alımlarında “döngüsel içerik” kriterleri ile aşılabileceği ifade edilmektedir (Polyportis vd., 2022).

Politika ve Strateji Önerileri

Türkiye'nin döngüsel ekonomiye geçişi, yalnızca atık yönetiminde iyileştirmelerle sınırlı kalmamalı; ürün tasarımı, tüketici davranışlarına, kamu alımlarından dijital izlenebilirliğe kadar tüm değer zincirini kapsayan bütüncül bir dönüşüm gerektirir. AB'nin 2020 tarihli Döngüsel Ekonomi Eylem Planı (CEAP) ile bunu hayata geçirmek üzere ürün politikasını, ambalaj ve tekstil gibi kritik akışları ve tamir/yeniden kullanım kültürünü mevzuatla desteklediği görülmektedir (European Commission, 2020). Türkiye'nin 2021 Yeşil Mutabakat Eylem Planı ve 2025'te duyurulan Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı (UDESEP) bu yönde güçlü çerçeveler sunarken, somut ve ölçülebilir uygulama adımlarının hızla devreye alınması kritik önemdedir. Ayrıca Türkiye'nin döngüsellik oranının 2018'de %4,5 olduğuna dair bulgu, politika önceliklendirmesi için önemli bir başlangıç veri noktasıdır (Ticaret Bakanlığı, 2021; ÇŞİDB, 2025).

Ürün politikası ve tasarım: ESPR ve dijital ürün pasaportu (DPP) ile uyum

AB'nin 2024 tarihli Sürdürülebilir Ürünler İçin Eko-Tasarım Tüzüğü (ESPR; AB 2024/1781) ürünlerin dayanıklılık, onarılabirlik, geri dönüştürülebilirlik ve geri dönüştürülmüş içerik kullanımını zorunlu kılacak yetki kurar; DPP (Dijital Ürün Pasaportu) bu çerçevenin omurgasıdır. Türkiye için öneriler:

- DPP pilotları: Öncelikli sektörlerde (bataryalar/elektrikli araçlar, elektronik, tekstil, ambalaj) DPP pilotları başlatılarak üretici ve tedarik zincirlerinin veri hazırlığı hızlandırılmalı. AB'de 2025–2030 çalışma planı yayımlanmış ve DPP'nin yaygınlaşacağı doğrulanmıştır (European Commission, 2025).
- Mevzuat uyumu: ESPR'nin ürün grubu bazlı ikincil mevzuatlarına (delegated acts) paralel Türkiye spesifik minimum tasarım gerekleri hazırlanmalı; geri dönüştürülmüş içerik ve modüler tasarım hedefleri konmalı.

- Batarya pasaportu: AB Batarya Tüzüğü (AB 2023/1542) uyarınca 2027'den itibaren ≥ 2 kWh bataryalar için dijital pasaport zorunluluğu gelecektir; Türkiye, iç piyasaya ve AB ihracatına dönük üreticiler için uyum takvimi ve veri yönetişimi rehberini şimdiden yayımlamalı. (European Commission, 2025; Vora, 2025).

Ambalaj ve tekstil: PPWR ve tekstil EPR ile hızlı hizalanma

AB Ambalaj ve Ambalaj Atıkları Tüzüğü (PPWR; AB 2025/40) 22 Ocak 2025'te Resmî Gazete'de yayımlandı; 11 Şubat 2025'te yürürlüğe girdi ve 18 ay sonra genel uygulama başlıyor. Yeniden kullanım, geri dönüşüm tasarımı, gereksiz ambalajın önlenmesi ve geri dönüştürülmüş içerik gibi net hedefler getiriyor. Türkiye'de:

- PPWR-uyumlu hedefler: Gıda dışı/temaslı ambalajlarda gereksiz hacim ve çoklu malzeme kullanımını sınırlayan tasarım kuralları; içecek şişelerinde zorunlu geri dönüştürülmüş içerik ve yeniden kullanım hedefleri benimsenmeli.
- Tekstil EPR: AB, Tekstil için zorunlu ve uyumlu Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) önerisini WFD revizyonu kapsamında 2023'te sundu; 2025'te geçici anlaşmaya varıldı. Türkiye, Tekstil EPR'yi ulusal ölçekte hayata geçirerek toplama-ayırma-yeniden kullanım-geri dönüşüm altyapısını üretici sorumluluk fonlarıyla finanse etmelidir (European Commission, 2025).

Tamir hakkı ve servis ekonomisinin geliştirilmesi

- AB Tamir Hakkı Direktifi 13 Haziran 2024'te kabul edilip 30 Temmuz 2024'te yürürlüğe girmiştir; garanti süresinde onarım sonrası ilave garanti ve garanti sonrası makul bedelle onarım gibi uygulamalarla tüketicinin onarımı tercih etmesi teşvik edilmektedir. Türkiye'de:

- Tamir edilebilirlik endeksi: Beyaz eşya, küçük ev aletleri ve elektronik için “tamir edilebilirlik puanı” etiketi ve yedek parça/servis erişimi zorunlulukları getirilmeli.
- KDV indirimi: Onarım hizmetlerinde KDV indirimi ve yerel tamir ekosistemine mikro hibelerle destek sağlanmalıdır (Reuters, 2024).

Kamu alımları, vergi ve finansman

- Yeşil Kamu Alımları (GPP): Kamu ihalelerinde ESPR/PPWR uyumlu tasarım, DPP, geri dönüştürülmüş içerik ve yeniden kullanım kriterleri zorunlu tutulmalı. CEAP bu yaklaşımı yatay politika aracı olarak öne çıkarır (European Commission, 2020).
- Vergi araçları: Birincil hammadde kullanımını caydıran, ikincil hammadde ve onarımı teşvik eden vergi düzenlemeleri (ör. ikincil malzemelerde KDV indirimi) değerlendirilmelidir.
- KOBİ destekleri: DPP veri haritalama, malzeme pasaportu, izlenebilirlik yazılımları ve eko-tasarım danışmanlığı için hibe/kredi mekanizmaları oluşturulmalıdır.

Yerel yönetimler: sıfır atık 2.0, kaynağında ayrıştırma ve performans bazlı finansman

Türkiye’de Sıfır Atık Yönetmeliği (12.07.2019, RG 30829) ile kurulan sistem, belediye ölçeğinde yaygınlaşmıştır. Bir sonraki aşamada:

- Performans ölçümü: Hanelerde ikili/çoklu ayrıştırmanın kapsama oranı, saflık oranı ve kişi başı belediye atığı göstergelerine dayalı başarı primi mekanizmaları kurulmalı.
- “Pay-as-you-throw” pilotları: Atık oluşumunu azaltmak için hacme/ağırlığa dayalı ücretlendirme pilotları başlatılmalı.

- Büyükşehir-OSB entegrasyonu: OSB ile belediyelerin atık/yan ürün değişimi (industrial symbiosis) için dijital pazar yerleri kurulmalıdır (   DB, 2019).

Stratejik  ncelikler ve göstergeler: UDESEP ile uyumlu yol haritası

UDESEP sunumlarında öncelik verilen sektörler (elektronik-B T, batarya-araçlar, ambalaj, inşaat ve binalar, plastik, tekstil, gıda-biyokütle) Türkiye’nin hızlı kazanım sağlayabileceği alanlara işaret etmektedir. Politika uygulaması için önerilen yıllık gösterge seti:

- Döngüsel malzeme kullanımı oranı (CMU), iç ambalaj atık geri dönüşüm oranı, yeniden kullanım payı, tamir hizmetleri ciro payı, ikincil hammadde pazar derinliği.
- DPP kapsama oranı ( r n/bileşen bazında), EPR fonlarının geri kazanım yatırımlarına aktarım oranı, kritik hammadde ikamesi ve geri kazanımı.

Bu göstergeler, CEAP’in  l   lebilirlik vurgusuyla uyumlu olarak ulusal izleme çerçevesine dâhil edilmelidir (European Commission, 2020;    DB, 2025).

Akademik kanıtlara dayalı tasarım: “tasarla-yeniden kullan-onar-d n   t r”  nceliği

Literatür, döngüsel ekonominin başarısının ürün tasarımı ve i  modeli inovasyonuna (yeniden kullanım, onarım, paylaşım, kiralama) bağlı olduğunu; yalnızca geri dönüşüme odaklı yaklaşımların sınırlı kaldığını göstermektedir (Kirchherr vd., 2017:221). Ayrıca kavramın sınırlılıklarına (ikame etkileri, geri kazanım verim sınırları, rebound riskleri) dikkat çekilerek sistemik bir dönüşüm gerekliliği vurgulanır (Korhonen vd., 2018:37). Bu nedenle Türkiye’nin politika tasarımında tasarım aşamasında atığı  nleme ve hizmetle me modellerini teşvik eden destek araçlarına öncelik verilmelidir (Peyravi vd., 2024).

AB'nin CEAP, ESPR (2024/1781), PPWR (2025/40), Tamir Hakkı Direktifi (2024) ve Batarya Tüzüğü (2023/1542) gibi mevzuatları; tasarımdan tüketici davranışına kadar net ve uygulanabilir kurallar getirerek pazar dönüşümünü hızlandırmaktadır. Türkiye'de UDESEP ve Yeşil Mutabakat Eylem Planı bu çerçeveyi sahiplenmekte; şimdi odak uygulama: DPP pilotları, PPWR-uyumlu ambalaj hedefleri, Tekstil EPR, tamir ekosistemini güçlendiren vergi ve mevzuat düzenlemeleri, belediye-OSB entegrasyonu ile performans bazlı finansman. Kısacası, atıktan kaynağa giden yol; akıllı tasarım, dijital izlenebilirlik ve adil finansman üçgeninde hızlanacaktır

Sonuç

Bu çalışmada, Türkiye'nin döngüsel ekonomiye geçiş sürecinde belirgin bir politika ivmesi yakaladığını; Sıfır Atık yaklaşımı ile UDESEP ve Depozito Yönetim Sistemi (DYS) gibi araçlar aracılığıyla yönetim kapasitesini güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Güncel resmi göstergeler, 2024 yılında 32,3 milyon ton belediye atığı toplandığını; atığın önemli bir bölümünün işleme tesislerine yönlendirildiğini ve geri kazanım oranının 2022–2024 döneminde artış eğilimi sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, AB-27 belediye atığı geri dönüşüm oranlarıyla karşılaştırıldığında mevcut fark, dönüşümün yalnızca miktarsal artışla değil, aynı zamanda “kalite” boyutuyla (saf akışların sağlanması ve yüksek nitelikli ikincil hammadde üretimi) ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Politika perspektifinden bakıldığında, döngüselliğin yaygınlaştırılması yalnızca geri dönüşüm performansının yükseltilmesiyle sınırlı değildir; tasarım odaklı önlemler (dayanıklılık/onarılabilirlik), dijital izlenebilirlik sistemleri (Dijital Ürün Pasaportu vb.), EPR/DYS finansman mimarisinin güçlendirilmesi ve yerel ölçekli performans yönetiminin birlikte ele alındığı bütüncül bir düzenleme setine ihtiyaç vardır. Bu çerçevede Türkiye için öncelikli adımlar; (i)

kaynağında ayrı toplamanın kapsama alanını ve saflık oranını yükseltecek operasyonel standartların ve teşviklerin geliştirilmesi, (ii) biyobozunur atıkların ayrı yönetimi ile biyolojik geri kazanım kapasitesinin yaygınlaştırılması, (iii) ikincil hammadde piyasalarında kalite standartlarının güçlendirilmesi ve izlenebilirlik altyapısının kurulması, (iv) KOBİ'lerin eko-tasarım, dijitalleşme ve döngüsel iş modeli dönüşümünü destekleyecek hedefli finansman araçlarının uygulanması ve (v) kamu alımlarında döngüsellik kriterlerinin ana akımlaştırılması olarak sıralanabilir. Bu bütünleşik politika karmasının, “atıktan kaynağa” dönüşümünü hızlandırırken SKA 9, 12 ve 13 başta olmak üzere sürdürülebilir kalkınma hedeflerine eşzamanlı katkıyı güçlendireceği düşünülmektedir.

Kaynakça

Alkaya, E., Böğürücü, M., & Ulutaş, F. (2014, June 19–21). Industrial symbiosis in Iskenderun Bay: A journey from pilot applications to a national program in Turkey. SYMBIOSIS 2014, Athens, Greece. <https://biyorem.com/projeler/en/4.pdf>

Asian Infrastructure Investment Bank. (2021). Turkey: Istanbul waste-to-energy generation project. Asian Infrastructure Investment Bank. <https://www.aiib.org>

Ayçin, E., & Kayapınar Kaya, S. (2021). Towards the circular economy: Analysis of barriers to implementation of Turkey's zero waste management using the fuzzy DEMATEL method. *Waste Management & Research*, 39(8), 1078–1089. <https://doi.org/10.1177/0734242X20988781>

Balcıoğlu, G., Jeswani, H., & Azapagic, A. (2022). Evaluating the environmental and economic sustainability of energy from anaerobic digestion of different feedstocks in Turkey. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 924–940. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.011>

Can, A. (2022). Investigation of provincial capacity to produce biogas from waste disposal sites in Turkey. *Energy*, 258, 124778. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124778>

Çankaya, S., & Pekey, B. (2019). A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey. *Journal of Environmental Management*, 249, 109362. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109362>

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2015). Atık Yönetimi Yönetmeliği (Resmî Gazete, 02 Nisan 2015, Sayı 29314). <https://csb.gov.tr>

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2016). Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (2016–2023). <https://csb.gov.tr>

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2019). Sıfır Atık Yönetmeliği (Resmî Gazete, 12 Temmuz 2019, Sayı 30829). <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/yon-30829s-f-rat-k-20211027162935.docx>

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği (Resmî Gazete, 26 Haziran 2021, Sayı 31523). <https://csb.gov.tr>

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik (Resmî Gazete, 26 Aralık 2022, Sayı 32055). <https://csb.gov.tr>

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). Çevresel göstergeler 2023. <https://csb.gov.tr>

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı (UDESEP). <https://webdosya.csb.gov.tr/db/dongusel/icerikler/udesep-tekup-sunum-2025-02-11-20250212080717.pdf>

Dolgen, D., & Alpaslan, M. N. (2020). Eco-Industrial Parks: Experiences from Turkey. *Global Journal of Ecology*, 5(1), 30–32. <https://doi.org/10.17352/gje.000016>

Dursun, İ. (2024). Roles of mobile applications in removing barriers to recycling in Türkiye. *Ulusal Akademik Dergi*, 15(2), 55–72.

Ellen MacArthur Foundation. (2015). Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition. <https://ellenmacarthurfoundation.org>

Environmental Protection Agency. (2025). Recycling Economic Information (REI) report.

<https://www.epa.gov/smm/recycling-economic-information-rei-report>

Ersoy, E., & Uğurlu, A. (2020). The potential of Turkey's province-based livestock sector to mitigate GHG emissions through biogas production. *Journal of Environmental Management*, 255, 109858. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109858>

European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive

European Commission. (2022). EU strategy for sustainable and circular textiles. https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en

European Commission. (2025). Ecodesign for Sustainable Products and Energy Labelling Working Plan 2025–2030 (COM(2025) 187 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52025DC0187>

European Environment Agency. (2025). Country profile waste management – Türkiye: Waste management country profile with a focus on municipal and packaging waste (Municipal and packaging waste management country profiles 2025). <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/waste-and-recycling/municipal-and-packaging-waste-management-country-profiles-2025/tr-municipal-waste-factsheet.pdf>

European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products (ESPR). Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng>

European Topic Centre on Circular Economy and Resource Use. (2022). Circular economy country profile – Türkiye. Eionet. <https://www.eionet.europa.eu>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E.-J. (2017). The circular economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). How circular is the global economy? *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 765–777. <https://doi.org/10.1111/jiec.12244>

Henden Şolt, H. B. (2023). Evaluation of the Zero Waste Project in Istanbul District Municipalities from the perspective of sustainable urban planning. *Sustainability*, 15(15), 11896. <https://doi.org/10.3390/su151511896>

International Resource Panel. (2020). Resource efficiency and climate change: Material efficiency strategies for a low-carbon future (Summary for policymakers). United Nations Environment Programme. https://globalabc.org/sites/default/files/2020-06/resource_efficiency_and_climate_change_summary_for_policy_makers_final_march_26_2020%20%281%29.pdf

İSTAÇ A.Ş. (2024). 2023 yılı faaliyet raporu. <https://www.istac.istanbul>

İstanbul Büyükşehir Belediyesi. (2024). Climate change monitoring report 2023. <https://cevre.ibb.istanbul/wp-content/uploads/2024/10/2023-Climate-Change-Monitoring-Report-SON-VERSIYON.pdf>

İZAYDAŞ. (2024). 2023 yıllık faaliyet raporu. <https://www.izaydas.com.tr>

İzmir Büyükşehir Belediyesi. (2022). Plastik Atıksız Şehir Eylem Planı (2022-2030). <https://www.izmir.bel.tr>

İzmir Büyükşehir Belediyesi. (2025). Büyükşehir'in yeşil atıkları kompost gübreye dönüşüyor.

<https://www.izmir.bel.tr/tr/Haberler/buyuksehir-in-yesil-atiklari-kompost-gubreyeye-donusuyor/57284/156>

İzmir Kalkınma Ajansı. (2022). Türkiye’de Endüstriyel Simbiyoz: Mevcut Durum Raporu. https://endustriyelsimbiyoz.ikvp.izka.org.tr/wp-content/uploads/2022/05/EK-6.-Endustriyel-Simbiyoz-Mevcut-Durum-Raporu_public.pdf

Kayseri Büyükşehir Belediyesi. (2025) – Beydeğirmeni Biyogaz Tesisi’nden Çevre Dostu Enerji: 1 Yılda 19 Milyon kW Elektrik. <https://www.kayseri.bel.tr/haberler/beydegirmeni-biyogaz-tesisinden-cevre-dostu-enerji-1-yilda-19-milyon-kw-elektrik>

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

Nyström, E. (2023). Adoption barriers to circular product design in the Turkish textile sector [Master’s thesis, University of Borås]. University of Borås.

OECD. (2018). The macroeconomics of the circular economy transition: A critical review of modelling approaches (OECD Environment Working Papers No. 130). <https://doi.org/10.1787/af983f9a-en>

Özbay, İ., & Gokceviz, N. A. (2022). Towards zero-waste airports: A case study of Istanbul Airport. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(1), 134–142. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01308-2>

Polyportis, A., Mugge, R., & Magnier, L. (2022). Consumer acceptance of products made from recycled materials: A scoping review. *Resources, Conservation & Recycling*, 186, 106533. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106533>

Peyravi, B., Peleckis, K., Limba, T., & Peleckienė, V. (2024). The circular economy practices in the European Union: Eco-innovation and sustainable development. *Sustainability*, 16(13), 5473. <https://doi.org/10.3390/su16135473>

Reuters. (2024, April 23). EU Parliament approves rules requiring companies to repair worn-out products. <https://www.reuters.com/sustainability/eu-parliament-approves-rules-requiring-companies-repair-worn-out-products-2024-04-23/>

Rizos, V., Behrens, A., Kafyeke, T., Hirschnitz-Garbers, M., & Ioannou, A. (2016). Implementation of circular economy business models by SMEs: Barriers and enablers. *Sustainability*, 8(11), 1212. <https://doi.org/10.3390/su8111212>

Salihoglu, N. K. (2018). Electricity generation from landfill gas in Turkey. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(10), 1126–1137. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1474145>

Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The relevance of circular economy practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>

SKD Türkiye. (2022). Türkiye Döngüsel Ekonomi Platformu yayınları. <https://www.skdturkiye.org>

Sirmacekic, E., Atilgan, A., Rolbiecki, R., Jagosz, B., Rolbiecki, S., Gokdogan, O., Niemiec, M., & Kociğcka, J. (2022). Possibilities of using whey wastes in agriculture: Case of Turkey. *Energies*, 15(24), 9636. <https://doi.org/10.3390/en15249636>

Stahel, W. R. (2016). The circular economy. Nature, 531(7595), 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>

Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB). (2023). On İkinci Kalkınma Planı (2024–2028).

Ticaret Bakanlığı. (2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı (Cumhurbaşkanlığı Genelgesi 2021/15). <https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%C5%9E%C4%B0L.pdf>

Ticaret Bakanlığı. (2022, 21 Temmuz). Green action plan [Bilgilendirme sayfası]. <https://www.trade.gov.tr/exports/green-action-plan>

Ticaret Bakanlığı. (2023). Yeşil Mutabakat Çalışma Grubu. Yıllık Faaliyet Raporu 2023. <https://ticaret.gov.tr>

TÜRKÇİMENTO. (2025). Türk çimento sektörü 2024 sürdürülebilirlik raporu. https://www.turkcimento.org.tr/tr/basin_bulten_detay/turk-cimento-sektoru-2024-surdurulebilirlik-raporu-yayimlandi

Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). Atık istatistikleri, 2022. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570>

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). Atık istatistikleri, 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2024-54134>

Türkiye Çevre Ajansı. (2025). Depozito Yönetim Sistemi duyuruları. <https://dbys.gov.tr>

T.C. Resmî Gazete. (2019). Sıfır Atık Yönetmeliği (Sayı: 30829)

T.C. Resmî Gazete. (2020). 7261 sayılı Türkiye Çevre Ajansının kurulması ile bazı kanunlarda değişiklik yapılmasına dair kanun (Sayı: 31350)

United Nations Development Programme, & International Labour Organization. (2022). Social and employment impacts of climate change and green economy policies in Türkiye: Application of the Green Jobs Assessment Model for Türkiye (GEI-2 Country Report). <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-07/7524096.pdf>

United Nations Environment Programme, & International Resource Panel. (2024). Global Resources Outlook 2024: Bend the trend—Pathways to a liveable planet as resource use spikes. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44901/Global-Resource-Outlook_2024.pdf

United Nations Environment Programme. (2025, March 30). International Day of Zero Waste 2025. <https://www.unep.org/events/un-day/international-day-zero-waste-2025>

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025). Türkiye Second NDC (NDC 3.0). <https://unfccc.int/node/652920>

Vora, A. (2025). Understanding the EU Batteries Regulation: Key deadlines and obligations for producers. Lorax EPI. https://www.loraxcompliance.com/blog/env/2025/03/07/Understanding_the_EU_Batteries_Regulation_Key_Deadlines_and_Obligations_for_Producers.html

World Bank. (2022). Türkiye—Country climate and development report. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099006106072221642>

World Bank. (2025). Türkiye's circular economy transition in the EU's global value chain ecosystem. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099011525165021675>

Yalçınkaya, S. (2020). A spatial modeling approach for siting, sizing and economic assessment of centralized biogas plants in organic waste management. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120040. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120040>

Yüzüak, A. V., & Erten, S. (2022). Teachers' views about Turkey's Zero Waste Project. *Journal of Turkish Science Education*, 19(1), 71–81. <https://doi.org/10.36681/tused.2022.110>

Zink, T., & Geyer, R. (2017). Circular economy rebound. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 593–602. <https://doi.org/10.1111/jiec.12545>

BÖLÜM 4

ÇAPAKÇUR ÇAYI'NIN (BİNGÖL) FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE *Viviparus contectus* İLE ELEKTROKİMYASAL PROSESLER KULLANILARAK SU ARITIMININ İNCELENMESİ

FİLİZ KUTLUYER KOCABAŞ¹
HAYRULLAH ÖĞEDEY²
MEHMET KOCABAŞ³

Giriş

Ülkemizde çevre kirliliğinin önemli bir boyutunu katı atık sorunu oluşturmaktadır. Artan nüfus ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak büyüyen tüketim ihtiyaçları, aynı gezegeni paylaşan insanlar için bu sorunun temel kaynağını meydana getirmektedir. Katı atık miktarını azaltmak ve bu atıkları etkin şekilde bertaraf etmek

¹ Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, 62000, Tunceli, Türkiye, ORCID: 0000-0001-8334-5802.

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Munzur Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, 62000, Tunceli, Türkiye, ORCID: 0009-0004-5268-9417.

³ Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yaban Hayatı Ekolojisi ve Yönetimi Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye, ORCID: 0000-0002-7934-6500.

amacıyla günümüzde en yaygın ve en düşük maliyetli yöntemlerden biri düzenli depolamadır. Düzenli depolama alanlarının belirli ilkeler çerçevesinde verimli bir şekilde işletilmesi, atık bertarafında başarının sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Düzenli depo sahaları; katı atıkların aşamalı olarak depolanıp bertaraf edildiği, sızdırmazlık ve gaz kontrol sistemleri ile sızıntı suyu ve depo gazı gibi olumsuz etkilerin denetlendiği alanlardır (Kentish ve Stevens, 2001, s.149; Cox ve ark., 2007, s.149; Sharma ve Sanghi, 2012, s.1; Khalaf, 2016, s.1; Rathoure ve Dhatwalia, 2016; s.1 Morin-Crini ve Crini, 2017, s.1).

Katı atık depolama alanlarından kaynaklanan sızıntı suları, içeriklerinin yoğun kirletici olması sebebiyle çevre açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır. Saha yaşı temel alınarak bu sular genellikle üç kategoriye ayrılır: genç, orta ve olgun sızıntı suları. Suyun oluşumunu etkileyen faktörler arasında atıkların nem oranı, yağmur suyunun süzülmesi, katı atıkla temas ve çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal süreçler bulunmaktadır. Karmaşık bileşime sahip olmaları nedeniyle, sızıntı sularının arıtımı en zorlu atık su işlemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Düzenli depolama tesislerinde sızıntı suyu arıtımı, depo içinde veya depo dışında gerçekleştirilmek üzere iki ana yöntem çerçevesinde uygulanır. Bu sular hem biyolojik olarak kolay parçalanabilen organik maddeleri hem de bozunmaya dirençli bileşenleri yüksek oranlarda içerebilir. Dolayısıyla yalnızca klasik arıtma teknikleri yeterli olmamakta; fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma yöntemlerinden biri veya birkaçı birlikte kullanılarak etkin bir arıtım sağlanmaktadır (Rathoure ve Dhatwalia, 2016, s.1; Morin-Crini ve Crini, 2017, s.1).

Entegre arıtma yöntemleri, bu tür çevresel problemlerin giderilmesinde en umut vadeden teknikler arasında kabul edilmektedir. Bu yöntemler, iki veya daha fazla arıtma prosesi bir arada uygulanacak şekilde yürütülmektedir. Örneğin biyolojik arıtma öncesinde fizikokimyasal işlemler uygulanabilir veya farklı

fizikokimyasal, elektrokimyasal ve membran tabanlı prosesler; filtrasyon ve ileri oksidatif yöntemlerle biyolojik süreçlerin entegrasyonu sağlanabilir. Fiziksel yöntemler, atıksuda bulunan yüzebilir veya çöken katı maddelerin diğer birimlerdeki ekipmanlara zarar vermemesi ve aşırı yüklenmenin önlenmesi amacıyla uygulanmaktadır. Son yıllarda adsorpsiyon yöntemi, kararlı kirletici maddelerin uzaklaştırılmasındaki yüksek verim nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir; bununla birlikte süreç nispeten yavaş ilerlemektedir. Elektrokimyasal teknolojiler çevresel uyumluluk açısından çeşitli avantajlar sunar. Bu teknolojiler arasında elektrooksidasyon, karmaşık içerikli atıksuların, özellikle sızıntı sularının arıtımında yüksek performans göstermektedir. Bu yöntemde oksidasyon süreçlerine katılan başlıca türler, serbest radikaller, peroksitler, ozon ve klor gibi yerinde üretilen elektronlar ve oksidan maddelerdir. Elektrokimyasal tekniklerin diğer avantajları arasında basit ekipman yapısı, kolay kullanım, yüksek etkinlik, çok yönlülük ve otomasyona uyumluluk bulunmaktadır. Özellikle elektrokoagülasyon (EK), düzenli depolama sahası sızıntı suyu arıtımında en fazla araştırılan ve başarılı şekilde uygulanan yöntemlerden biridir (Kentish ve Stevens, 2001, s.149; Cox ve ark., 2007, s.1).

Tatlısu salyangozları, çevresel kirleticilere karşı duyarlılık göstermeleri ve uzun süre belirgin bir stres belirtisi vermemeleri nedeniyle biyolojik izleme organizmaları olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca insan sağlığını tehdit eden iz metal kirliliğini hızlı bir şekilde saptama olanağı sunmaları, numune toplamanın ve laboratuvar analizlerinin pratik olması, geniş sıcaklık ve tuzluluk koşullarında yaşayabilmeleri bu organizmaları ideal göstergeler hâline getirmektedir (Kutluyer Kocabaş ve Kocabaş, 2022, s.267). Bu bağlamda, bu çalışmada *V. contectus*, kapalı bir evsel atık sahasından elde edilen sızıntı suyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtım etkinliğini incelemek amacıyla seçilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Su Örnekleme ve Analiz Prosedürleri

Çapakçur Çayı'ndan (Bingöl, Türkiye) su örnekleri, belirlenen istasyonlardan steril kaplar kullanılarak uygun derinliklerden toplanmış ve soğuk zincir ile laboratuvara taşınmıştır. Toplanan örnekler üzerinde fiziksel ve kimyasal analizler uygulanmıştır. Sızıntı suyunun özelliklerini belirleyen pH, iletkenlik ve toplam çözünmüş katı madde (TDS) değerleri, Thermo Scientific Orion Versa Star pH/ISE/Conductivity/DO/RDO/Temperature Benchtop çok parametrelili cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

Toplam katı madde miktarının belirlenmesi için, önceden tartısı alınmış porselen krozelere alınan belirli hacimdeki örnekler 103°C'de etüvde kurutulmuştur. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra krozeler desikatöre alınarak soğutulmuş ve tekrar tartılmıştır. Tartımlar arasındaki ağırlık farkı, toplam katı madde içeriğini vermektedir. Uçucu askıda katı madde (UAKM) ölçümü ise örnekteki organik madde oranını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir; filtrede kalan askıda katı madde, 550°C'de yakılarak ağırlık kaybı üzerinden hesaplanmıştır.

Örneklerin bulanıklık ölçümleri, Aqualytic marka AL250T-IR model türbidimetre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, 0, 20, 200 ve 800 NTU değerlerine sahip kalibrasyon çözeltileri ile dört noktalı bir kalibrasyon prosedüründen geçirilmiştir. Analizler sırasında, her örnekten 10 mL alınarak cihazdaki numune kabına yerleştirilmiş ve ölçümler NTU birimiyle raporlanmıştır.

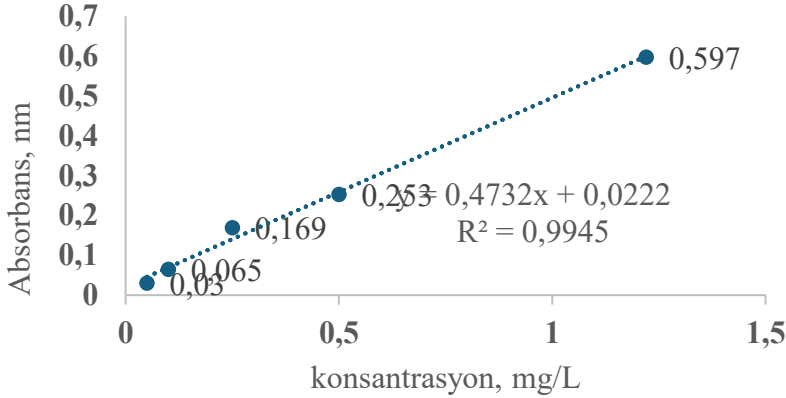
Bu çalışmada suyun renk ölçümleri, renklilik sayısı (RES) yöntemi ile yapılmıştır. 25,4 mm kalınlığındaki cam küvetler kullanılarak örnekler Shimadzu marka UV 1800 UV-VIS spektrofotometreye yerleştirilmiş ve 436 nm, 525 nm ile 620 nm dalga boylarında deiyonize suya karşı absorpsiyon değerleri tespit

edilmiştir. Ölçülen absorbans değerleri kullanılarak renklilik sayısı m^{-1} birimiyle hesaplanmıştır.

KOİ ölçümleri için standart olarak SM 5220.D Kapalı Reflüks Kolorimetrik yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntem, ısıtmalı blok kullanılarak 0–2000 mg O_2/L aralığındaki kimyasal oksijen ihtiyacını belirlemeye olanak sağlamaktadır. Bilinen KOİ konsantrasyonlarına sahip standart çözeltilerin renk değişimleri (portakaldan yeşile doğru) ölçülerek, bilinmeyen örneklerin analizinde kullanılabilecek kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Deneyde 16 mm × 100 mm boyutlarında KOİ parçalama tüpleri ve kapakları kullanılmış ve olası kontaminasyonu önlemek için %20'lik H_2SO_4 çözeltisi ile önceden yıkanmıştır. Parçalama tüplerine 3,5 mL sülfürik asit reaktifi eklenip çalkalanmış, ardından 1,5 mL $K_2Cr_2O_7$ çözeltisi ilave edilmiştir. Karıştırma işleminden sonra 2,5 mL örnek veya uygun şekilde seyreltilmiş numune eklenmiş ve tekrar karıştırılmıştır. Tüpler, 150°C sıcaklıktaki ısıtmalı bloğa yerleştirilmiş ve reaksiyonun tamamlanabilmesi için 2 saat bekletilmiştir. Reaksiyon süresi sonunda örnekler bloktan çıkarılarak oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmış ve 600 nm dalga boyunda absorbans değerleri ölçülerek konsantrasyon hesaplamaları yapılmıştır.

Amonyak azotu (NH_3-N) tayini, standart 4500-F Fenat metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fenat yöntemi, 0,02–2,0 mg- $(NH_3-N)/L$ aralığındaki düşük amonyak konsantrasyonlarını ölçmeye uygun, spektrofotometrik bir tekniktir. Deneyde, 50 mL'lik bir erlenmayer içerisine 25 mL atıksu örneği alınmış; ardından 1 mL fenol çözeltisi (≥ 89), 1 mL sodyum nitroprussid çözeltisi ve 2,5 mL parçalama reaktifi eklenerek karıştırılmıştır. Numunede renk gelişiminin sağlanması için örnekler oda sıcaklığında (22–27°C) ve yoğun ışık altında 1 saat bekletilmiştir. Kalibrasyon eğrisi oluşturmak amacıyla, stok amonyum çözeltisinden 0,05; 0,1; 0,25; 0,5 ve 1,22 mg/L'lik standart çözeltiler hazırlanmıştır. Elde edilen

standart çözeltiler ve numunelerin 640 nm'deki absorbans değerleri kullanılarak kalibrasyon eğrisi oluşturulmuş ve denklem yardımıyla numunenin amonyak konsantrasyonu belirlenmiştir. Şekil 1'de amonyak analizi için oluşturulan standart eğri gösterilmiştir.



Şekil 1 Amonyak analizi kalibrasyon eğrisi

BOİ₅ değerleri, Orbeco marka Oxi 700 cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

Örnek Toplama ve Deney Protokolü

Tatlısu salyangozu (*V. contectus*) örnekleri, Temmuz–Ağustos döneminde Demirköprü Baraj Gölü’nden elle, kepçe ve tırmık kullanılarak 1 m derinliğe kadar toplanmış ve laboratuvara canlı olarak taşınmıştır. Organizmalar, 21°C ve 12:12 aydınlık-karanlık döngüsü sağlanan 20 L’lik havalandırılmalı akvaryumlarda 15 gün balık yemiyle beslenmiştir. Deneyler üç grupta yürütülmüştür: kontrol (Çapakçur Çayı suyu), G1 (elektrokoagülasyon uygulanmış sızıntı suyu) ve G2 (sızıntı suyuna maruz kaldıktan sonra elektrokoagülasyon). Her uygulama üç

tekrarlı olup, 96 saatlik akut testlerde organizmalar beslenmemiş ve ölü bireyler günlük olarak kontrol edilmiştir.

Elektrokoagülasyon Deneyleri

Çalışmada kesikli monopolar elektrokoagülasyon reaktörü kullanılmıştır. Hücre, 1 L hacimli pleksiglas malzemeden üretilmiş olup, anod ve katotlar 30 cm² yüzey alanına sahip demir plakalar şeklindedir. Her elektrot ayrı bir DC güç kaynağına bağlanmıştır (AA Tech ADC-3303D, 0–3 A, 0–60 V). Deneylerde 500 mL sızıntı suyu kullanılmış ve manyetik karıştırıcı ile 200 rpm sabit hızda karıştırma sağlanmıştır. Deneyler oda sıcaklığında (25 ± 2 °C) ve ek elektrolit ilavesi yapılmadan yürütülmüştür. Elektrokoagülasyon işlemleri 120 dakika süreyle uygulanmış ve sızıntı suyunun arıtım performansı, 17 mA/m² akım yoğunluğunda optimize edilmiştir.

İşletme Maliyeti

Arıtım performansı, KOİ giderim yüzdesi (%) ve bulanıklık giderim yüzdesi (%) değerleri kullanılarak (denklem 1) hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} & \% \text{ giderim} \\ & = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \end{aligned} \quad (1)$$

Birim hacim başına enerji tüketimi (kWh/m³), farklı işletme koşulları için denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır (Das ve Nandi, 2019, s. 103116):

$$\begin{aligned} & \text{Enerji tüketimi} \\ & = \frac{U \cdot I \cdot t_{EC}}{V} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada U, hücrenin uygulanan voltajını (V); I, kullanılan akımı (A); t, elektrokoagülasyon işleminin toplam süresini (saat) ve V, işlem gören hacmi (m³) temsil etmektedir.

Farklı işletme koşulları altında birim hacim başına enerji tüketimi (kWh/m³), aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmiştir. Enerji ve elektrot tüketimleri ise, özellikle elektrokoagülasyon işlemi için, sırasıyla denklem (3) ve (4) kullanılarak hesaplanmıştır (Koby ve ark., 2016, s.172):

$$C_{\text{enerji}} = \frac{U \cdot i \cdot t_{EC}}{V} \quad (3)$$

Burada, Cenerji enerji tüketimini (kWh/m³), U hücre voltajını (V), i uygulanan akımı (A), tEC çalışma süresini (h) ve v atıksu hacmini (m³) ifade etmektedir.

$$C_{\text{elektrod}} = \frac{i \cdot t_{EC} \cdot M_w}{z \cdot F \cdot V} \quad (4)$$

Celektrod elektrot tüketim oranını (kg/m³), Mw alüminyumun moleküler kütlesini (26,98 g/mol), z transfer edilen elektron sayısını (zAl = 3) ve F Faraday sabitini (96.487 C/mol) temsil eder.

Bu durumda, EC hesaplamasının işletme maliyeti (OC), denklem (5) ile ifade edilir (Akter ve Islam, 2022, s. 10176, Koby ve ark., 2016, s.86).

$$\begin{aligned} OC \\ &= aC_{\text{energy}} \\ &+ bC_{\text{electrode}} \end{aligned} \quad (5)$$

Burada CenergyC_{\text{energy}}Cenergy birim hacim başına enerji tüketimini (kWh/m³) ve CelectrodeC_{\text{elektrot}}Celectrode birim hacim başına elektrot tüketim miktarını (kg/m³) ifade etmektedir, enerji (a) ve elektrot malzemesi (b) birim maliyetleri aşağıdaki gibi belirtilmektedir: aaa elektrik enerjisinin kWh başına dolar cinsinden maliyeti (\$/kWh) ve bbb alüminyum elektrot malzemesinin kg başına dolar cinsinden maliyetidir (\$/kg). Mayıs 2024'teki Türkiye piyasa fiyatlarına göre, elektrik enerjisinin birim maliyeti (a) kWh başına 0,114 \$ ve alüminyum elektrot malzemesinin birim maliyeti (b) kg başına 2.176 Amerikan dolarıdır.

Özgöl elektrik enerjisi tüketiminin hesaplanması

Çeşitli işletme parametrelerine göre özgöl elektrik enerjisi tüketimi olarak enerji tüketimi, aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenmiştir (Das ve Nandi, 2019, s. 103116):

$$\Delta M_{theoretical} = \frac{M \cdot I \cdot t_{EC}}{n \cdot F} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{\Delta M_{experimental}}{\Delta M_{theoretical}} 100 \quad (7)$$

$$SEEC = \frac{n \cdot F \cdot U}{3600 \cdot M \cdot \varphi} \quad (8)$$

Burada, Φ akım verimliliği, n elektro-çözünme anot reaksiyonundaki elektron mol sayısı, U hücre voltajı (volt), t_{EC} EC'nin toplam işlem süresi (h), F Faraday sabiti ($F=96,487$ C/mol), I elektrot plakalarının ötesinde uygulanan potansiyel (A) ve M alüminyumun moleküler ağırlığıdır (g/mol). 1347 mg/l COD konsantrasyonuna sahip bir çözelti için optimum akım yoğunluğu 12 mA/cm² idi.

Kinetik Analizler

Yalancı birinci mertbe kinetiği

Bu kinetik türü, hızlı gerçekleşen katı/sıvı sistemlerin adsorpsiyonu için Lagergren tarafından formüle edilmiş ve eşitlik 1'de ifade edilmiştir.

$$\ln C = \ln C_0 - k_1 t \quad (1)$$

C_0 : Başlangıç KOİ konsantrasyonu (mg/L),

C : t anındaki KOİ konsantrasyonu (mg/L),

k_1 : Hız sabiti değeri (1/dk),

t: Zaman (dk).

ln (C-C₀)’a karşı t grafiği çizildiğinde negatif eğimli bir doğruyu verecektir. Eğimden k_1 bulunabilir (Tongur, 2020, s.1).

Yalancı ikinci mertebe kinetiği

Ho ve McKay tarafından geliştirilen bu model, adsorbanın adsorplama kapasitesinin zamanla değişimini ifade etmektedir. Bu model eşitlik 2 ile gösterilmiştir.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + k_2 t \quad (2)$$

Eşitlik 2’de;

k_2 : (g/mg.dk) olarak yalancı ikinci mertebe hız sabiti,

t’ye karşı $1/C_t$ değerleri grafik edilirse doğrunun ordinatı kestiği noktadan k_2 değeri belirlenir (Sarpaşar, 2019, s.1).

Veri Analizi

Elde edilen veriler SPSS 14 yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiştir. Kontrol ve deney grupları (K, G1, G2) için aynı zaman dilimlerinde gözlenen farklılıkların istatistiksel anlamlılığı ($p < 0,05$) tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiş ve gruplar arasındaki farklılıkların tespitinde Duncan testi uygulanmıştır. Ayrıca, her grup içerisindeki maruz kalma süreleri (24 ve 96 saat) arasındaki değişiklikler, bağımsız çift yönlü T testi (two-paired t test) ile incelenmiştir (* $p < 0,05$).

Bulgular

Suyun Fiziko-Kimyasal Karakteristik Özellikleri

Tablo 1, Çapakçur Çayı'ndan elde edilen verilerin özetini sunmaktadır.

Tablo 1 Çapakçur Çayı fiziko-kimyasal karakteristik özellikleri.

Parametre	Değer	Birim
BOİ ₅	25	mg/L
KOİ	204,5	mg/L
NH ₃ -N	0,155	mg/L
Bulanıklık	7	NTU
pH	8,12	
TDS	465	mg/L
İletkenlik	936	µs/cm
TKM	840	mg/L
AKM	20,1	mg/L

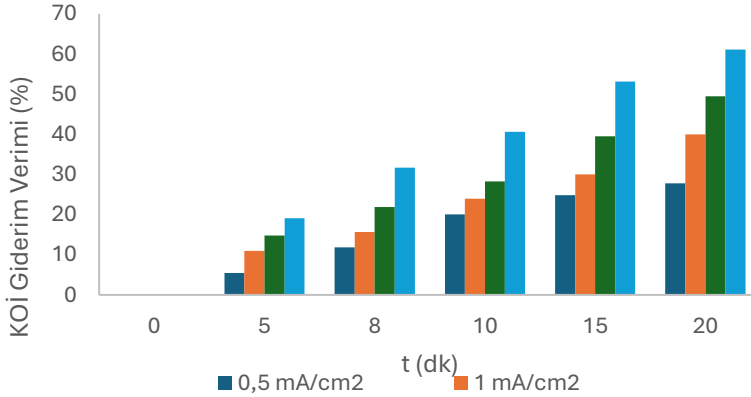
Biyolojik Ön Arıtma Performansının Değerlendirilmesi

Biyolojik ön işlem sırasında suyun pH değerleri 5, 7, 8,3 ve 9 olarak ayarlanmıştır. 96 saatlik uygulamanın sonunda KOİ giderim oranları pH 5'te %16,54 ve %10,17, pH 7'de %8,22 ve %13,3, pH 8,3'te ise %18,1 ve %27,6 olarak belirlenmiştir. Buna karşın, pH 9 ortamında KOİ seviyesi artış göstermiştir, bu da yüksek pH koşullarının biyolojik oksidasyon üzerinde olumsuz etkisi olduğunu göstermektedir.

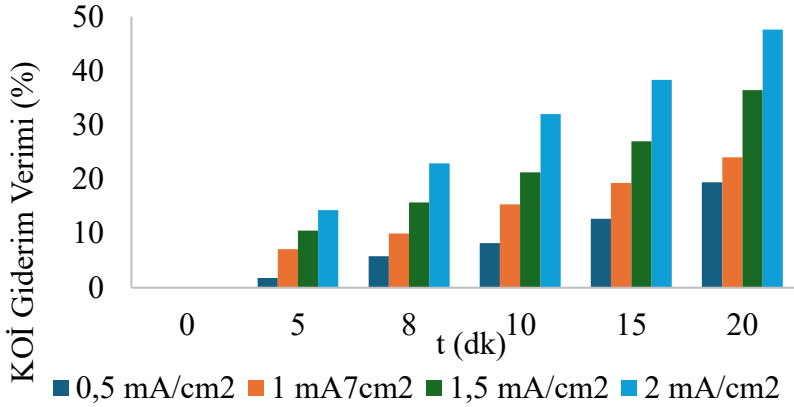
Elektrokoagülasyon prosesi ile KOİ Giderimi

Akım yoğunluğunun etkisi

Elektrokoagülasyon (EK) uygulaması sırasında, *V. contectus* kullanılarak biyolojik ön işlem yapılmış ve Çapakçur Çayı'ndan alınan su örneklerinde KOİ giderim performansı, dört farklı akım yoğunluğunda (0,5, 1, 1,5 ve 2 mA/cm²) değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır (Şekil 2 ve 3). *V. contectus* içeren deneylerde, akım yoğunluğu 0,5 mA/cm²'den 2 mA/cm²'ye artırıldığında KOİ giderimi %27,81'den %61,10'a yükselmiştir. Benzer şekilde, Çapakçur Çayı su örneklerinde akım yoğunluğunun 0,5 mA/cm²'den 2 mA/cm²'ye çıkarılması, KOİ giderimini %19,46'dan %47,57'ye yükseltmiştir.



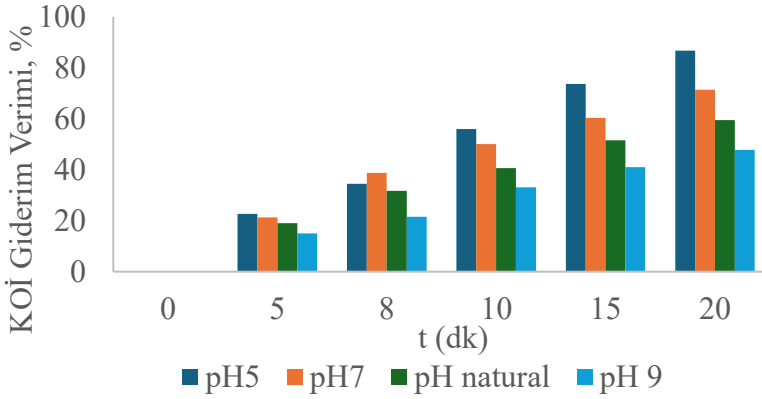
Şekil 2. *Viviparus contectus* ile biyolojik ön işlemden sonra KOİ giderim verimliliği üzerine akım yoğunluğu (0,5 mA cm⁻², 1 mA cm⁻², 1,5 mA cm⁻², 2 mA cm⁻²) ve elektroliz süresinin (5, 8, 10, 15 ve 20 dk) etkisi.



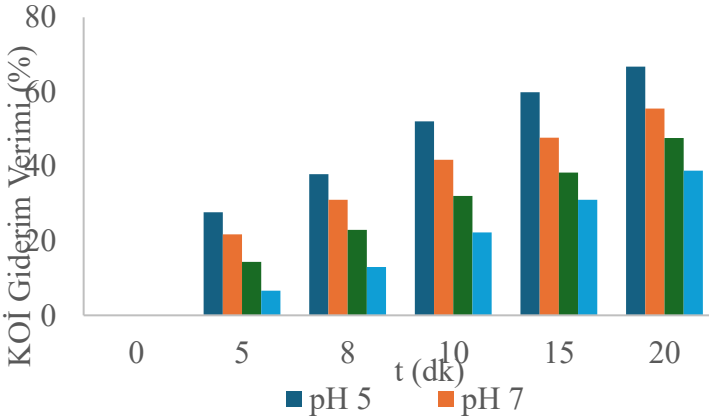
Şekil 3 Çapakçur Çayı'ndan alınan su örneklerinde KOİ giderim verimliliği üzerine akım yoğunluğu ($0,5 \text{ mA cm}^{-2}$, 1 mA cm^{-2} , $1,5 \text{ mA cm}^{-2}$, 2 mA cm^{-2}) ve elektroliz süresinin (5, 8, 10, 15 ve 20 dk) etkisi.

Başlangıç pH'nın etkisi

İşlem verimliliği üzerinde pH'ın etkisi, diğer parametreler sabit tutulurken başlangıç pH'larının 5, 7, 8,3 ve 9 olarak ayarlanmasıyla incelenmiştir. Şekil 4 ve 5, *V. contectus* ile yapılan biyolojik ön işlem ve Çapakçur Çayı örneklerinde elektrokoagülasyon sırasında KOİ konsantrasyonlarının farklı pH koşullarında nasıl değiştiğini göstermektedir. Sonuçlar hem KOİ hem de bulanıklık gideriminde en yüksek etkinliğin pH 5'te sağlandığını ortaya koymuştur; *V. contectus* örneklerinde KOİ giderimi %86,7 ve %80,95, Çapakçur Çayı örneklerinde ise %66,74 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, asidik ortamda (pH 5) genel olarak pH değerlerinde artış gözlenmiştir.



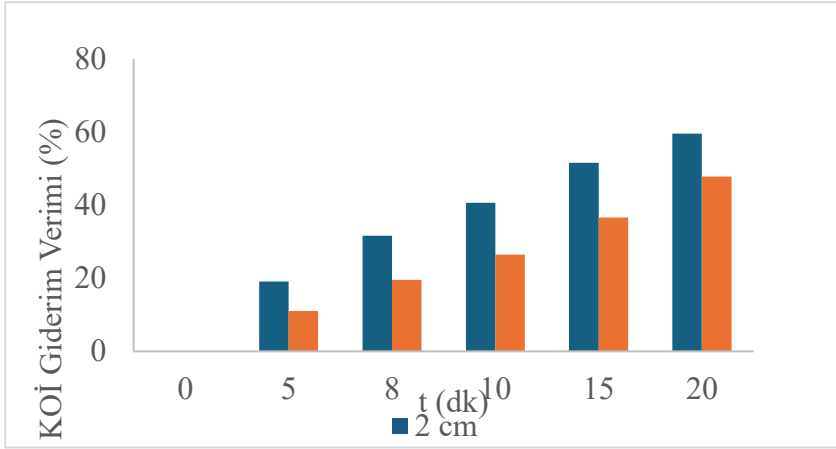
Şekil 4. Başlangıç pH'nın (5, 7, 8,3 ve 9) ve elektroliz süresinin (5, 8, 10, 15 ve 20 dakika) KOİ giderim verimliliğinin için *Viviparus contectus* ile biyolojik ön işlemden sonraki etkisi



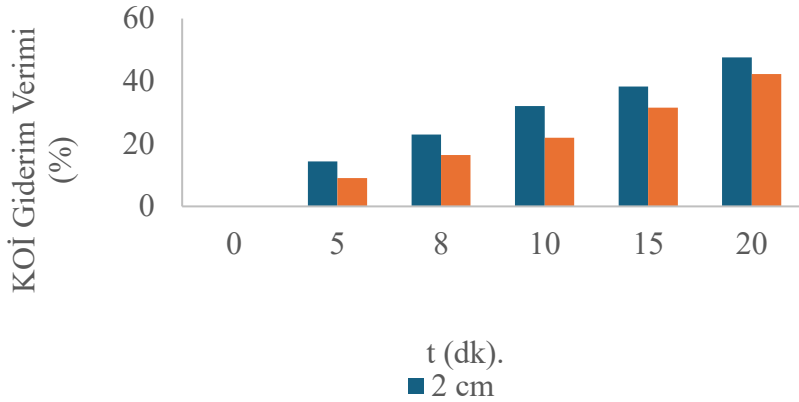
Şekil 5. Başlangıç pH'nın (5, 7, 8,3 ve 9) ve elektroliz süresinin (5, 8, 10, 15 ve 20 dakika) KOİ giderimi için Çapakçur Çayı'ndan alınan su örneklerindeki etkisi.

Elektrot mesafesinin etkisi

EK uygulaması sırasında, *V. contectus* ile biyolojik ön işlem uygulanmış ve Çapakçur Çayı'ndan alınan su örneklerinde KOİ giderimi, iki farklı elektrot aralığı (2 cm ve 4 cm) altında değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır (Şekil 6 ve 7). *V. contectus* içeren deneylerde, en yüksek KOİ giderimi %59,50 ile 2 cm elektrot mesafesinde sağlanmıştır. Çapakçur Çayı örneklerinde ise maksimum KOİ giderimi %47,57 olarak 2 cm mesafede gözlenmiştir.



Şekil 6. *Viviparus contectus* ile biyolojik ön işlemden sonra KOİ giderim verimliliği üzerine elektrot mesafesinin (2 cm ve 4 cm) ve elektroliz süresinin (5, 8, 10, 15 ve 20 dk) etkisi.



Şekil 7. Çapakçur Çayı'ndan alınan su örneklerinde KOİ giderim verimliliği üzerine elektrot mesafesinin (2 cm ve 4 cm) ve elektroliz süresinin (5, 8, 10, 15 ve 20 dk) etkisi.

Maliyet Hesaplamaları

Her iki çalışma için, elektrokoagülasyon prosesinde optimum arıtım verimine ulaşılan koşullarda (pH 5, T=25 °C, 0.1 mA/cm² ve 2 cm elektrot mesafesi) işletme maliyetlerine ilişkin hesaplamalar Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. KOİ'nin elektrokoagülasyonla gideriminde maliyet analizleri.

Örnek	Giderim Verimi (%)	Birim Enerji Tüketimi, EEC (kWh/kg.KOİ)	Elektrot Maliyeti, MC (\$/kg.KOİ)	Toplam Tüketim Maliyeti, EOC (\$/kg.KOİ)
Çapakçur Çayı	47,58	0,61	2,6	3,21
V. contectus	86,71	0,04	0,96	1,25

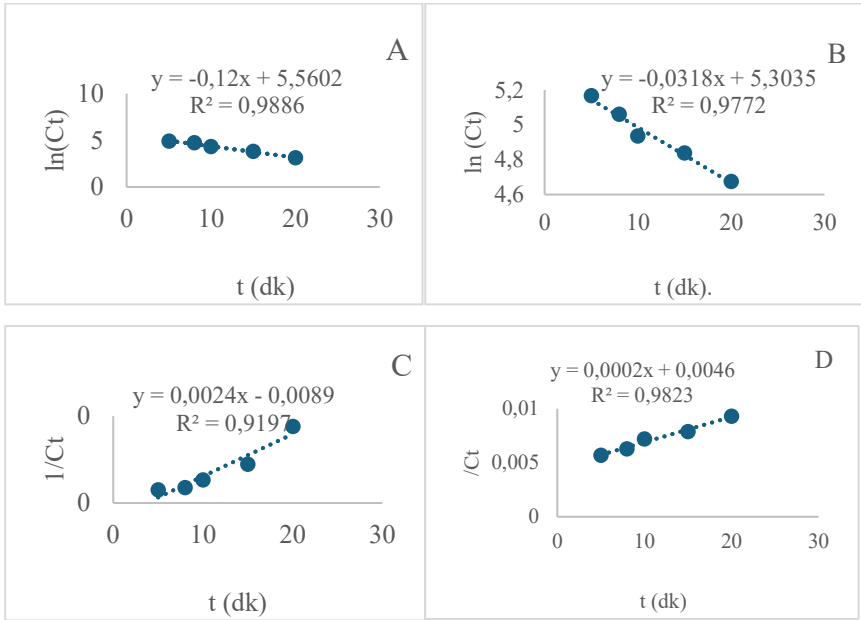
Kinetik Analiz

KOİ gideriminin elektrokoagülasyon sonrası kinetiklerini belirlemek amacıyla pseudo-first-order (yalancı birinci mertebe) ve

pseudo-second-order (yalancı ikinci mertebe) eşitliklerinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar Tablo 3'te, kinetik grafikler ise Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 3. Elektrokoagülasyon prosesi ile KOİ giderimine ait hız sabiti ve R^2 değerleri

<i>Viviparus contectus</i>			
Yalancı birinci mertebe		Yalancı ikinci mertebe	
k_1	R^2	k_2	R^2
0,101	0,989	0,0019	0,920
Çapakçur Çayı			
Yalancı birinci mertebe		Yalancı ikinci mertebe	
k_1	R^2	k_2	R^2
0,032	0,978	0,0002	0,982



Şekil 8. Kinetik analizler, A) Yalancı 1. mertebe *V. contectus*, B) Yalancı 1. mertebe Çapakçur Çayı, C) Yalancı 2. mertebe *V. contectus*, D) Yalancı 2. mertebe Çapakçur Çayı

Tatlısu salyangozu ile gerçekleştirilen KOİ giderim çalışmasının kinetiği, en yüksek korelasyon katsayısı dikkate alındığında yalancı birinci mertebe modele ($R^2=0,989$) uygunluk gösterirken, Çapakçur Çayı'ndan alınan su ile yapılan deneylerde kinetiğin yalancı ikinci mertebe modele ($R^2=0,982$) uyduğu saptanmıştır (Şekil 9).

Tartışma Ve Sonuç

Tatlı su salyangozları, kirleticilerin etkilerini ve tatlı su ekosistemlerindeki kirlilik seviyesini yansıtabilme potansiyeline sahip önemli biyoindikatörlerdir. Bugüne kadar yapılan araştırmalar, deşarj kaynaklı kirleticiler ve atık suların organizma düzeyindeki (hayatta kalma, büyüme ve üreme) ve alt organizma düzeyindeki

(biyokimyasal ve moleküler) etkilerine odaklanmıştır (Watton ve Hawkes, 1984, s.1235; Cannicci, 2009, 305; Gust ve ark., 2010, s.4517; Shen ve ark., 2020, s. 110579; Subba ve ark., 2021, s. 117563; Panda ve ark., 2022, s. 1033049). Ancak, tatlı su salyangozlarının atık su arıtımında kullanılmasına ilişkin literatürde herhangi bir bilgi bulunmamaktadır ve atık su arıtımı için en uygun tatlı su salyangozu türünün belirlenmesi hâlen keşfedilmemiştir. Bu çalışma kapsamında, tatlı su salyangozu *V. contectus* kullanılarak tatlı su atıklarındaki KOİ ve bulanıklık giderim verimleri değerlendirilmiştir.

Mevcut çalışmada, karıştırma hızının artırılmasının genellikle KOİ ve bulanıklık giderim performansını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Karıştırma hızının elektrokoagülasyon verimliliğine etkisi, çeşitli çalışmalar tarafından farklı açılardan ele alınmıştır. Bouhezila ve ark. (2011, s.347), manyetik karıştırma hızını 50 rpm'den 150 rpm'ye çıkarmanın KOİ giderim verimliliğini yükselttiğini, ancak 150 rpm'nin üzerindeki hızların verim üzerinde olumsuz sonuçlar doğurduğunu bildirmiştir. Norma ve ark. (2012, s.221) ise, karıştırmanın çözelti ortamını daha homojen hâle getirerek koagülanlar ile kirleticiler arasındaki etkileşimi artırdığını ve böylece verimliliği iyileştirdiğini ifade etmiştir. Öte yandan, yüksek hızdaki karıştırmanın iyonların hareketini bozabileceği ve flokların parçalanmasına yol açabileceği belirtilmiştir. Kullanılan deneysel koşullara göre, orta seviyedeki karıştırmanın ek maliyet yaratmayacağı öne sürülmüştür.

Bu çalışmada, enerji tasarrufu sağlamak amacıyla 20 dakikalık işlem süresi seçilmiştir. Elde edilen verilere göre akım yoğunluğunun artırılması, genellikle KOİ ve organik bileşiklerin giderimini artırmaktadır. Artan akım, pıhtılaştırıcı Al^{3+} iyonlarının oluşumunu, elektrot çözünmesini ve kabarcık oluşum hızını yükselterek H_2 flotasyonu yoluyla kirleticilerin daha hızlı giderilmesini sağlar (Ricordel ve Djelal, 2014, s.1551; Adou ve ark.,

2022, s. 01238; Sandoval ve ark., 2024, s.108306). Düşük pH'ta monomerik Al^{3+} ve $Al(OH)^{2+}$ türleri baskın iken, pH 4–9 arasında monomerik ve polimerik alüminyum türleri karmaşık çökelme süreçleriyle amorf $Al(OH)_3$ “süpürme flokları” oluşturur ve çözünür organik maddelerin adsorpsiyonunu kolaylaştırır (Verma, 2017, s.168; Ricordel ve Dejelal, 2014, s.1551). pH 8'in üzerinde monomerik $Al(OH)_4^-$ artarken flokların yaygınlığı azalır. Bu mekanizmalar, elektrokoagülasyonla KOİ ve bulanıklık gideriminde yüksek verimlilik sağlar.

20 dakikalık elektrokoagülasyon uygulaması sonrası, *V. contectus* ve Çapakçur Çayı için KOİ giderim verimleri sırasıyla %86,71 ve %47,58 olarak elde edilmiştir. Yüksek başlangıç konsantrasyonlarında KOİ'nin Al anot yakınında daha etkin giderilmesi, artan difüzyon direnci nedeniyle EK ilerledikçe verimin düşmesini açıklar. Adsorpsiyon da önemli rol oynar; sabit akım yoğunluğunda üretilen alüminyum hidroksit flokları, yüksek KOİ konsantrasyonlarında sınırlı etkiye sahip olabilir (Aker ve İslam, 2022, s.10176; Galvão ve ark., 2020, s.104368; Das ve Nandi, 2019, s.103116; Bayar ve ark., 2011, s.103).

Elektrokoagülasyon (EK), kimyasal madde eklemeyen atıksulardan organik madde, besin, ağır metal ve patojenleri uzaklaştırabilen bir arıtma yöntemidir. Al ve Fe elektrotlar en yaygın kullanılanlardır ve çeşitli çalışmalarda KOİ giderimi %81–%93 arasında bildirilmiştir (Koby ve ark., 2006, s.172; Asselin ve ark., 2008, s.1727; Bayar ve ark., 2011, s.103; Ahmadian ve ark., 2012, s.754). Mevcut çalışmada, KOİ'nin maksimum giderimi (%86,71) pH 5 ve 20 dakikalık işlem süresinde elde edilmiş, ilk 10 dakika hızlı artış göstermiş, ardından desorpsiyon nedeniyle azalma gözlenmiştir (Seculave ark., 2012, s.767).

Hesaplanan elektrik enerjisi tüketimi ve maliyetler, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sandoval ve ark. (2022,

s.108306), alüminyum ve demir elektrotlarla endüstriyel domuz mezbahası atık suyunda 25 mA/cm² akım ve 2,5 saatlik işlemle %72,7 TOC giderimi ve 19,80 kWh/m³ enerji tüketimi bildirmiştir. Benzer şekilde, Sandoval ve ark. (2022, s108306) endüstriyel sığır mezbahası atık suyunda 20 mA/cm² akımda %88 TOC giderimi ve 0,01 kWh/m³ enerji tüketimi raporlamıştır. Asselin ve ark. (2008, s.1727), yumuşak çelik BP elektrotlarla BOD, yağ-gres, KOİ ve TSS için %82–%99 giderim verimleri ve 0,71 \$/m³ maliyet bildirmişlerdir. Kobya ve ark. (2006, s.172), Al elektrotlarla pH 3 ve 150 A/m²'de %93 KOİ giderimi ve 0,027 \$/kg KOİ maliyetini raporlamıştır. Mevcut çalışmada, optimum maliyet verimliliği *V. contectus* kullanılarak Al elektrotlarla 1,25 \$/kg KOİ olarak elde edilmiştir.

Bu çalışma, tatlısu salyangozlarıyla biyolojik olarak ön arıtılmış atıksuda elektrokoagülasyonun ilk uygulamasını göstermektedir. *V. contectus* ile pH 5, 2 cm elektrot mesafesi ve 20 dakikalık işlemde maksimum KOİ giderimi %86,71 olarak elde edilmiştir; akım yoğunluğunun artırılması giderimi yükseltmiştir (Bener ve ark., 2019, s.47).

Sonuç olarak, atıksu arıtımında biyolojik, fizikokimyasal ve ileri oksidasyon teknikleri kullanılmaktadır. Ucuz, etkili ve sürdürülebilir yöntemlerin seçimi, atıksuyun geri kazanımı ve çevre koruması açısından önemlidir. Biyolojik arıtma, düşük enerji gereksinimi ve yüksek organik yük giderimi nedeniyle önerilmektedir. Hibrit yöntemler, en iyi arıtma verimi için son yıllarda test edilmektedir. Bu çalışmada, pH 5, 2 mA/cm² akım yoğunluğu, 2 cm elektrot mesafesi ve 20 dakikalık işlem süresinde, *V. contectus* ile yapılan biyolojik ön arıtım ve alüminyum elektrot kullanımıyla yüksek KOİ giderimi elde edilmiştir. Akım yoğunluğunun artırılması verimi yükseltmiştir. Biyolojik arıtım birincil işlem olarak kullanılabilir; kalan organik ve inorganik maddeler ise ikincil veya kombinasyon işlemle giderilmelidir.

Teşekkürler

Bu çalışmanın araştırma giderleri Munzur Üniversitesi MUNİBAP tarafından desteklenen YLMUB024-07 nolu “Çapakçur Çayının (Bingöl) karakterizasyonuna etki eden bazı fizikokimyasal parametrelerin tatlı su salyangozu (*Viviparus contectus*) ve elektrokimyasal prosesler uygulanarak arıtımının değerlendirilmesi” adlı projeden karşılanmıştır.

Kaynaklar

- Adou, K. E., Kouakou, A. R., Ehouman, A. D., Tyagi, R. D., Drogui, P., & Adouby, K. (2023). Coupling anaerobic digestion process and electrocoagulation using iron and aluminium electrodes for slaughterhouse wastewater treatment. *Scientific African*, 16, e01238.
- Ahmadian, M., Yousefi, N., Van Ginkel, S. W., Zare, M. R., Rahimi, S., & Fatehizadeh, A. (2012). Kinetic study of slaughterhouse wastewater treatment by electrocoagulation using Fe electrodes. *Water Science and Technology*, 66(4), 754–760.
- Akter, S., & Islam, M. S. (2022). Effect of additional Fe^{2+} salt on electrocoagulation process for the degradation of methyl orange dye: An optimization and kinetic study. *Heliyon*, 8, e10176.
- Asselin, M., Drogui, P., Benmoussa, H., & Blais, J.-F. (2008). Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from slaughterhouse wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells. *Chemosphere*, 72, 1727–1733.
- Bayar, S., Yıldız, Y. Ş., Yılmaz, A. E., & İrdemez, Ş. (2011). The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method. *Desalination*, 280(1–3), 103–107.

- Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S., & Ersöz, G. (2019). Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 47–54.
- Bouhezila, F., Hariti, M., Lounici, H., & Mameri, N. (2011). Treatment of the Oued Smar town landfill leachate by an electrochemical reactor. *Desalination*, 280(1–3), 347–353.
- Cannicci, S. (2009). Effects of urban wastewater on crab and mollusc assemblages in equatorial and subtropical mangroves of East Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(3), 305–317.
- Chen, X., Chen, G., & Yue, P. L. (2002). Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. *Chemical Engineering Science*, 57, 2449–2455.
- Chiu, Y. W., Chen, H. C., Lee, S. C., & Chen, C. A. (2002). Morphometric analysis of shell and operculum variations in the viviparid snail, *Cipangopaludina chinensis* (Mollusca: Gastropoda), in Taiwan. *Zoological Studies*, 41(3), 321–331.
- Cox, M., Négré, P., & Yurramendi, L. (2007). *Industrial liquid effluents*. INASMET Tecnalia.
- Das, D., & Nandi, B. K. (2019). Removal of Fe(II) ions from drinking water using electrocoagulation (EC) process: Parametric optimization and kinetic study. 7, 103116.
- Galvão, N., de Souza, J. B., & de Sousa Vidal, C. M. (2020). Landfill leachate treatment by electrocoagulation: Effects of current density and electrolysis time. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 104368.
- Gust, M., Buronfosse, T., Geffard, O., Mons, R., Queau, H., Mouthon, J., Garric, J., & Garric, J. (2010). In situ

- biomonitoring of freshwater quality using the New Zealand mudsnail *Potamopyrgus antipodarum* (Gray) exposed to wastewater treatment plant (WWTP) effluent discharges. *Water Research*, 44(15), 4517–4528.
- Ji, M.-K., Kabra, A. N., Salama, E.-S., Roh, H.-S., Kim, J. R., Lee, D. S., Jeon, B.-H., & Jeon, B.-H. (2014). Effect of mine wastewater on nutrient removal and lipid production by a green microalga *Micratinium reisseri* from concentrated municipal wastewater. *Bioresource Technology*, 157, 84–90.
- Kentish, S. E., & Stevens, G. W. (2001). Innovations in separations technology for the recycling and re-use of liquid waste streams. *Chemical Engineering Journal*, 84, 149–159.
- Khalaf, M. N. (2016). *Green polymers and environmental pollution control*. CRC Press; Apple Academic Press.
- .
- Koby, M., Şentürk, E., & Bayramoğlu, M. (2006). Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1–3), 172–176.
- Koby, M., Gengec, E., & Demirbas, E. (2016). Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 101, 87–100.
- Kutluyar Kocabaş, F., & Kocabaş, M. (2022). Demirköprü Baraj Gölü’nde ilk *Viviparus contectus* (Millet, 1813) kaydı ve bazı biyometrik parametrelerinin değerlendirilmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 25(1), 263–269.
- Lu, H. F., Du, L. N., Li, Z. Q., Chen, X. Y., & Yang, J. X. (2014). Morphological analysis of the Chinese *Cipangopaludina* species (Gastropoda; Caenogastropoda: Viviparidae). *Zoological Research*, 35(6), 510–527.

- Morin-Crini, N., & Crini, G. (2017). *Eaux industrielles contaminées*. Presses Universitaires de Franche-Comté.
- Norma, D., Fernandes, A., Pacheco, M. J., Ciriaco, L., & Lopes, A. (2012). Electrocoagulation and anodic oxidation integrated process to treat leachate from a Portuguese sanitary landfill. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 30(3), 221–234.
- Panda, F., Pati, S. G., Das, K., Samanta, L., Sahoo, D. K., & Paital, B. (2022). Biochemical and molecular responses of the freshwater snail *Pila* sp. to environmental pollutants, abiotic, and biotic stressors. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1033049.
- Rathoure, A. K., & Dhatwalia, V. K. (2016). *Toxicity and waste management using bioremediation*. IGI Global.
- Ricordel, C., & Djelal, H. (2014). Treatment of landfill leachate with high proportion of refractory materials by electrocoagulation: System performances and sludge settling characteristics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1551–1557.
- Sandoval, M. A., Espinoza, L. C., Coreño, O., García, V., Fuentes, R., Thiam, A., & Salazar, R. (2022). A comparative study of anodic oxidation and electrocoagulation for treating cattle slaughterhouse wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 108306.
- Sarpaşar, Z. (2019). *Zeolitin manyetik Fe_3O_4 nanoparçacıklar ile modifikasyonu ve boyar madde adsorpsiyonunun incelenmesi* (Master's thesis, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi).
- Secula, M. S., Cagnon, B., de Oliveira, T. F., Chedeville, O., & Fauduet, H. (2012). Removal of acid dye from aqueous solutions by electrocoagulation/GAC adsorption coupling: Kinetics and electrical operating costs. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(5), 767–775.

- Sharma, S. K. (2015). *Green chemistry for dyes removal from wastewater*. Scrivener Publishing; Wiley.
- Sharma, S. K., & Sanghi, R. (2012). *Advances in water treatment and pollution prevention*. Springer.
- Shen, X., Yuan, N., & Wang, C. (2020). The bioturbation effect of the snail *Bellamya aeruginosa* on phosphorus immobilisation by drinking water treatment residue in sediment: A long-term continuous flow test. *Journal of Environmental Management*, 266, 110579.
- Subba, M., Keough, M. J., Kellar, C., Long, S., Miranda, A., & Pettigrove, V. J. (2021). *Potamopyrgus antipodarum* has the potential to detect effects from various land use activities on a freshwater ecosystem. *Environmental Pollution*, 287, 117563.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (1991). *Wastewater engineering: Management*. McGraw-Hill.
- Tir, M., & Moulai-Mostefa, N. (2008). Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. *Journal of Hazardous Materials*, 158(1), 107–115.
- Tongur, T. (2020). *Yüksek polariteli bazı pestisitlerin sulu çözeltilerden aktif karbon kumaşı üzerine adsorpsiyon ve elektrosorpsiyon ile uzaklaştırılmasının spektrofotometrik yöntemle incelenmesi* (Master's thesis).
- Verma, A. K. (2017). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe–Al composite electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 20, 168–172.
- Watton, A. J., & Hawkes, H. A. (1984). Studies on the effects of sewage effluent on gastropod populations in experimental streams. *Water Research*, 18(10), 1235–1247.

