

İTÜ



İTÜ DERGİSİ-e



Çevre, İklim ve
Sürdürülebilirlik

İTÜ



© 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi
© 2022, Istanbul Technical University

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/itucis>

Baş Editör/Editor-in-Chief:

Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK, İstanbul Teknik Üniversitesi

Yardımcı Editörler/Co-Editors:

Prof. Dr. Şule İtir SATOĞLU, İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa Evren ERŞAHİN, İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. İsmail DABANLI, İstanbul Teknik Üniversitesi

Editör ve Danışma Kurulu/Editors and Advisory Board:

Prof.Dr. İsmail KOYUNCU, İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Ali DENİZ, İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Tanju KARANFİL, Clemsin University
Prof.Dr. Cumali KINACI, İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Ülkü YETİŞ, Ortadoğu Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Ayşe FİLİBELİ, Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof.Dr. İsmail TOROZ, İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Ahmet Duran ŞAHİN, İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Vedat UYAK, Pamukkale Üniversitesi
Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ, Konya Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Barış ÇALLI, Marmara Üniversitesi
Prof. Dr. Osman ARIKAN, İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan EĞİLMEZ, University of New Haven

Yazışma adresi: Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Tel: (0212) 285 30 13 / 4127

Faks: (0212) 285 33 02

Web: <https://www.ituyayinevi.com/>

Elektronik posta: itucis@itu.edu.tr



İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları
Mustafa İnan Kütüphanesi
İTÜ Ayazağa Kampüsü, 34469
Maslak/İSTANBUL

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

Yıl : 2022

Cilt : 23

Sayı : 1

İÇİNDEKİLER

No	Makale Adı	Sayfa No
1	Atıksu Arıtma ve Derin Deniz Deşarj Tesislerinin Maliyet Analizi (Derleme makale) Büşra ÇİÇEKALAN, Yasemin AKDAĞ, Hale ÖZGÜN, İsmail KOYUNCU, İzzet ÖZTÜRK	1 – 8
2	SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Modeline Genel Bir Bakış ve Modelin Türkiye’deki Uygulamaları (Derleme makale) İsmail Bilal PEKER, Gokhan CUCELOGLU	9 – 26
3	Türkiye'nin en kapsamlı çevresel restorasyon ve endüstriyel kümelenme uygulaması: Ergene Nehri havzası çevre koruma ve havzalar arası atıksu transferi projesi (Araştırma makalesi) Lütfi AKÇA, Cumali KINACI, Mahmut Ekrem KARPUZCU, Mehmet CEYHAN, Murat AKTAŞ, Erdem GÖRGÜN, Ali Fuat AYDIN, Yakup KARAASLAN, İzzet ÖZTÜRK	27 – 40
4	Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Sıfır Emisyonlu bir Yelkenli Tekne Tasarımı ve Seyir Simülasyonları (Araştırma makalesi) Hamdi Sena NOMAK, İsmail ÇİÇEK	41 – 54
5	İstanbul’da Şehir Isı Adası ve Kentsel Gelişim Senaryolarına Bağlı Değişimi (Araştırma makalesi) Deniz Hazel DİREN ÜSTÜN, Ebru KAPLAN, Yurdanur ÜNAL	55 – 68
6	Avrupa Birliği (AB) ve Türkiye’de Döngüsel Ekonomi ve Sıfır Atık Yönetimi (Araştırma makalesi) Aybike MISIR, Osman ARIKAN	69 – 78
7	Arıtma Çamurlarının Yönetimi ve Maliyeti: Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetimi Projesi (Araştırma makalesi) Ayşe FİLİBELİ, Azize AYOL, Nurdan BÜYÜKKAMACI	79 – 90
8	İleri Kimyasal Oksidasyon Teknolojileri ile Endüstriyel Kirletici Giderimine Genel Bakış (Derleme makale) İdil ARSLAN ALATON	91-98

Editörden

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik Dergisi'nin 2022 yılı ilk sayısı (bu sayı) Mayıs itibari ile Dergipark platformu üzerinden e-dergi olarak yayınlanmış bulunmaktadır. Daha önce 2005-2012 yılları arasında İTÜ Dergisi-e / Su Kirlenmesi Kontrolü adıyla yayın yapan dergimizin yeni isim ve içeriği ile güncellenen bu ilk sayısında toplam 8 makale yer almaktadır. Bu makalelerden beşi orijinal araştırma makalesi, üçü ise belirli alanlardaki kapsamlı literatür araştırması (derleme) türündedir. Dergimizin üniversitelerimiz, araştırma merkezleri ile kamu ve özel sektörde çalışan bilim insanları ve uygulamacıların; çevre, iklim ve sürdürülebilirlik konularındaki temel mühendislik araştırmaları ile örnek mühendislik uygulamalarını yayınlatabilecekleri uygun bir platform oluşturması beklenmektedir.

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik Dergisi'nin 2022 yılından itibaren e-dergi formatında yayınlanmasını sağlayan İTÜ Rektörü sayın Prof. Dr. İsmail Koyuncu'ya şükranlarımızı arz ederiz. Dergiye sunulan makalelerin titiz bir şekilde değerlendirilmesinde katkı sağlayan hakem hocalarımız ile yayın kurulu üyelerimize, yoğun emekleri dolayısıyla teşekkürlerimizi sunarız.

Dergimizin, Türk bilim ve mühendislik camiası için hayırlı ve faydalı olmasını dileriz.

Prof.Dr. İzzet ÖZTÜRK
Baş-Editör

DERLEME MAKALE

Atıksu Arıtma ve Derin Deniz Deşarj Tesislerinin Maliyet Analizi

Büşra ÇİÇEKALAN¹, Yasemin AKDAĞ², Hale ÖZGÜN³, İsmail KOYUNCU⁴, İzzet ÖZTÜRK⁵

Yazışma yazarı:
Büşra ÇİÇEKALAN,
cicekalan@itu.edu.tr

Referans:
Çiçekalan, B., Akdağ, Y., Özgün, H.,
Koyuncu, İ. ve Öztürk İ., (2022), Makale
Başlığı, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik,
23(1) 1-8.

Makale Gönderimi : 19 KASIM 2021
Online Kabul : 08 ŞUBAT 2022
Online Basım : 30 MAYIS 2022

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-1806-9917

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-9608-3511

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
MEM-TEK Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik
Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0001-8784-8351

⁴ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
MEM-TEK Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik
Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0001-8354-1889

⁵ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-8274-5326

Özet

Günümüzde, atıksuların arıtılması ve deşarj standartlarına uygun hale getirilmesi ile alıcı ortamların su kalitesinin korunması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, çevresel kirliliğin önlenmesi açısından önemli bir role sahip olan mevcut atıksu arıtma tesisleri (AAT)'ne ait maliyetlerin analiz edilmesi ileride inşa edilmesi planlanan arıtma tesislerinin maliyet tahminleri açısından oldukça önemli bir konudur. Bu çalışmada, Türkiye'de ve dünyadaki AAT'nin yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri mukayeseli olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, atıksu ön arıtma ve derin deniz deşarj sistemlerinin maliyetleri ile ileri biyolojik atıksu arıtma tesisleri (İBAAT)'nin maliyetleri detaylı olarak araştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda; derin deniz deşarj sistemlerinin maliyetinin deşarj hattı uzunluğu, deşarj borusu çapı, zemin durumu ve boru tipine bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Ön arıtma tesislerinde ilk yatırım maliyetleri için en önemli maliyet bileşenini ekipman maliyeti oluştururken, İBAAT'lerin yatırım maliyetleri içerisinde en önemli maliyet bileşeni ise inşaat maliyetidir. Ön arıtma tesisleri ve İBATT'lerdeki en önemli işletme ve bakım maliyeti enerji maliyetidir. Özellikle gelişmiş ülkelerde sürdürülebilir atıksu arıtımı hedefi olan sistemlerin kullanılması klasik atıksu arıtma sistemlerine kıyasla ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyeti açısından daha düşük maliyetlidir. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda; arıtma türüne bağlı olarak ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyeti için maliyet fonksiyonları ortaya konulmuştur. Çalışmada yer alan maliyet fonksiyonları; planlanan derin deniz deşarj sistemleri, ön arıtma tesisleri ve İBAAT'lerin finansal açıdan değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atıksu arıtma tesisi; derin deniz deşarj sistemleri; sürdürülebilir atıksu arıtımı; yatırım maliyeti; işletme ve bakım maliyeti

Cost Analysis of Wastewater Treatment Plants and Marine Disposal Systems

Abstract Nowadays, it is of great importance to treat wastewater, bring it into compliance with discharge standards, and protect the water quality of receiving environments. Cost analysis of existing wastewater treatment plants (WWTP), that has an important role in preventing environmental pollution, is a very critical issue in terms of cost estimation of the WWTPs planned to be built in the future. In this study, not only capital cost but also operating and maintenance costs of wastewater treatment plants (WWTP) in Turkey and in the world were evaluated comparatively. In this context, the costs of preliminary WWTPs and marine disposal systems were analyzed in detail as well as the costs of advanced biological WWTPs. The findings obtained from this study indicate that the cost of marine disposal systems varies depending on the line length, pipe diameter, ground condition and pipe type. While the most important cost item for the capital costs in preliminary WWTPs is the equipment cost, the most important cost item among the capital costs of advanced biological WWTPs is the construction cost. The most important operating and maintenance cost in of preliminary WWTPs and

advanced biological WWTPs is the energy cost. Especially in developed countries, the use of sustainable wastewater treatment systems has lower costs in terms of capital, operation and maintenance costs than conventional wastewater treatment systems. As a result of the literature survey; depending on the treatment type, cost functions for the capital cost and operating and maintenance cost were presented. Cost functions obtained in the study are of utmost significance to be used in economic evaluation of planned marine disposal systems, of preliminary WWTPs and advanced biological WWTPs.

Keywords: Wastewater treatment plants; marine disposal systems; sustainable wastewater treatment; capital cost; operation and maintenance cost

1. Giriş

Evsel atıksu kaynaklı kirlilik; doğrudan insan sağlığını etkilemesi ve alıcı ortam ile içme suyu kaynakları için büyük risk oluşturması açısından oldukça önemlidir. Evsel atıksu arıtma tesisleri (AAT)'nde enerji kullanımını dünyadaki elektrik enerjisi kullanımının yaklaşık %3'üne denk gelmektedir (Li ve diğ., 2015). Artan enerji maliyetlerinden dolayı AAT'lerde enerji verimliliğinin artırılması ve enerji maliyetlerinin azaltılması yönünde uygulamalar önem kazanmıştır. Bu yüzden son yıllarda evsel atıksu arıtımında yüksek enerji tüketimi olan konvansiyonel sistemler yerine enerji açısından verimli ve kaynak geri kazanımına elverişli teknolojiler tercih edilmeye başlanmıştır. AAT'lere gelen ham evsel atıksuyun, arıtma için gerekli olan enerjinin yaklaşık 10 katı fazla (13-15 kJ/g KOİ) enerji ihtiva ettiği bilinmektedir (Olsson, 2012). Atıksudan geri kazanılan enerji ile AAT'lerin enerji nötr ve hatta enerji pozitif işletilmesi mümkün hale gelmektedir. Ayrıca, günümüzde artan enerji fiyatları ve yeni yasal düzenlemelerle getirilen sıkı deşarj standartları, AAT'lerin işletme maliyetlerini arttırmaktadır. Enerji maliyetinin artışı ve sürdürülebilirlik çalışmalarının sıklıkla gündeme gelmesi sonucunda enerji optimizasyonu, ekonomik ve çevresel açıdan daha da önemli hale gelmiştir. Bu kapsamda, AAT'lerde işletme maliyetinin optimizasyonu için enerji tüketiminin ve arıtma kapasitelerinin tesis girişinden çıkışına kadar ünite bazında izlenmesi önem arz etmektedir (Erşahin ve diğ., 2017). AAT'lerin finansal açıdan sürdürülebilirliği için en az işletme maliyetleri kadar yatırım maliyeti de oldukça önemli olup, maliyet optimizasyonu her iki maliyet bileşeni dikkate alınarak yapılmalıdır.

AAT'lerde arıtma prosesi ve tasarım kriterlerinin doğru seçilmesi, ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerinin azaltılması açısından önem arz etmektedir. AAT planlama aşamasında yapılan yaklaşık maliyet tahmini ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerini kapsar. AAT'lerin maliyet bileşenlerini etkileyen en önemli unsurlar; arıtma tesisinin hizmet edeceği nüfus, gelir ve gelişmişlik seviyesi, ham atıksuyun karakteristiği ve deşarj standartlarıdır. İnşası planlanan AAT'nin hizmet edeceği nüfus tesise gelecek olan atıksu miktarını doğrudan etkileyecek olup, ünitelerin boyutlandırılmasında oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Atıksuyun karakteristiği, hane halkı gelir seviyesi ve deşarj standartları arıtma prosesinin seçiminde kritik hale gelmektedir.

İlk yatırım maliyeti genel olarak inşaat, mekanik ve elektrik ekipman maliyetleri ile arıtma tesisi arsasının temini, zemin araştırma, mühendislik ve müşavirlik bedellerini kapsamaktadır. İlk yatırım maliyeti inşa edilmesi planlanan tesisin hizmet edeceği nüfus, seçilen arıtma derecesi (ön arıtma, ileri arıtma vb.) ve tesisin inşa edileceği alanın zemin özellikleri gibi etkenlere bağlı olarak değişim gösterir. AAT'lerin inşaat maliyeti olası zemin iyileştirme faaliyetleri için gerekli işlemleri, arıtma yapılarının inşasını, tesis borulama giderlerini ve tesis içi yol ve peyzaj düzenleme bedellerini

içerir. AAT'lerin mekanik işler maliyeti arıtma ünitelerinin mekanik ekipmanlarının temin ve montajını kapsar. Elektrik işleri maliyeti ise elektrik tesisatı için gerekli kabloları, tesis içi aydınlatma ile kontrol ve otomasyon sistemi bedellerini içermektedir.

İşletme ve bakım maliyeti genel olarak tesisin işletilmesi için gerekli tüm harcamaları kapsamakta olup, enerji ve bakım-onarım giderleri ile kimyasal madde ve çamur uzaklaştırma bedelleri, personel maaşları ve diğer giderlerden oluşmaktadır. İşletme maliyeti, tesisin büyüklüğü, tesis gelen atıksu debisi ve kirlilik yükleri, deşarj standartları, arıtma tesisinin yaşı ve proses tipi gibi unsurlara bağlı olarak değişmektedir. Enerji maliyeti AAT'lerin işletme ve bakım maliyetinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bakım-onarım maliyetleri tesiste bulunan elektrik ve mekanik ekipmanların periyodik bakım ve parça maliyetlerini kapsamaktadır. Arıtma tesislerinde arıtma performansının artırılması ve arıtma çamurlarının bertaraf için uygun hale getirilmesinde kimyasal madde kullanımı gerekebilir. Kimyasal madde maliyeti atıksu ve çamur miktarına göre değişmektedir. Çamur uzaklaştırma maliyeti atıksu arıtma faaliyetleri sonucunda oluşan arıtma çamurlarının miktarına, çamur karakteristiğine ve çamur bertaraf yöntemine göre değişiklik göstermektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'de ve dünyada AAT'lerin maliyet analizi ile ilgili çalışmalar derlenmiştir. Farklı çalışmalarda AAT'ler için önerilen (ilk) yatırım ve işletme maliyeti fonksiyonları ortaya konmuştur. Bu kapsamda, atıksu ön arıtma ve derin deniz deşarj sistemlerinin maliyetleri ile ileri biyolojik arıtma tesislerinin (İBAAT) maliyetleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışma ile mevcut AAT'lerin yatırım ve işletme maliyetlerinden hareketle tasarımı planlanan benzer tesislerin yatırım ve işletme maliyetlerinin iyi bir yaklaşımla tahmini mümkün hale gelmektedir.

2. Atıksu Arıtma Tesislerinin Maliyet Analizi

2.1 Derin Deniz Deşarj Sistemleri

Derin deniz deşarjı, belirli düzeyde ön arıtmadan geçirilmiş atıksuların alıcı ortam su kalitesini bozmayacak şekilde sahilden belirli bir uzaklıkta (genellikle >20 m derinlikten) deniz dibine boru ve difüzörlerle deşarj edilmesi işlemidir. Deşarjın yapılacağı alıcı ortamın özelliğine (hassas, az hassas, hassas olmayan) bağlı olarak ön arıtmanın seviyesi belirlenir. Alıcı ortam su kalite standardı ön arıtmanın derecesine bağlı olarak, deşarj derinliği veya deşarj hattı difüzör boyu gibi unsurlar değiştirilerek sağlanabilir. Atıksuyun yeterince derin ve akıntılı bir bölgeye deşarj edilmesi durumunda seyrelme dolayısıyla karbonlu organik madde (KOİ, BOİ₅) önemli bir parametre olmaktan çıkar, fakat sıç ve akıntının yetersiz olduğu bir bölgeye deşarj edilmesi durumunda atıksudaki organik madde ve besi maddesi (N, P) konsantrasyonları önemli hale gelir. Atıksuyun deşarj noktasından sahildeki koruma (yüzme) bölgesine taşınma süresi, bakterilerin yok olması açısından önem arz etmektedir. Deşarj hattı uzunluğu ile taşınma süresi doğru orantılıdır. Deşarj hattı uzunluğu, atıksu içerisindeki mikroorganizmaların yok

olması için gerekli taşınma süresini mümkün kılacak şekilde hesaplanmalıdır. Deşarj hattı uzunluğunun yetersiz olduğu durumlarda deşarj öncesi tercihen UV veya ozon ile dezenfeksiyon uygulanması sahil suyu kalite standartlarının sağlanması gerekebilir (Öztürk, 2011).

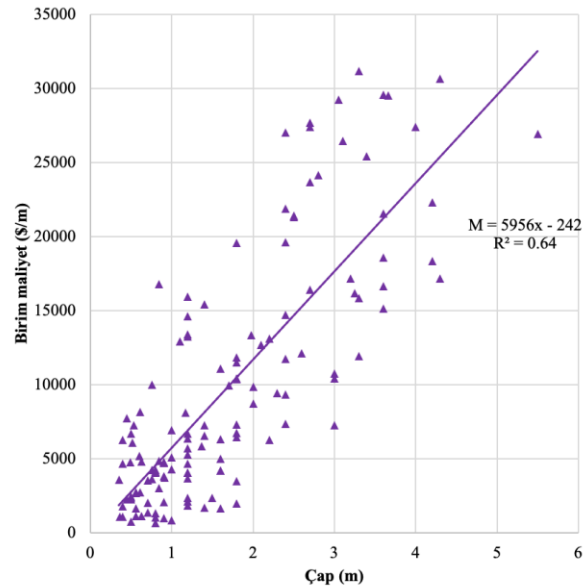
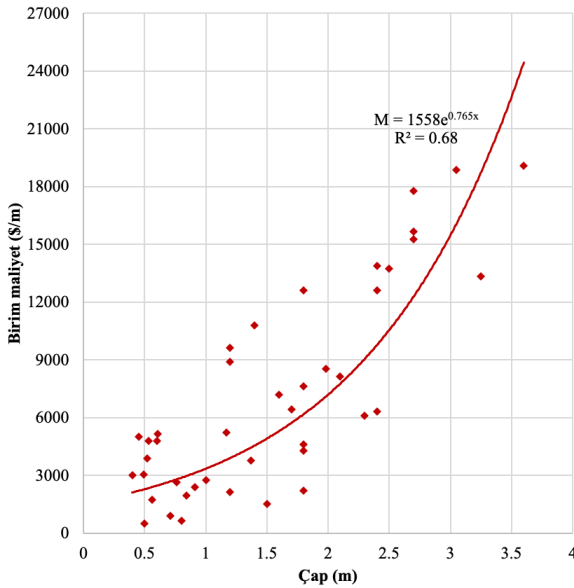
Şahinoğlu ve Öztürk (1991) tarafından yapılan bir çalışmada; İstanbul'da bulunan Yenikapı, Ahırkapı, Üsküdar, Baltalimanı ve Kadıköy Derin Deniz Deşarj Sistemleri'ne ait ihale öncesi beton kaplı çelik boru hattı (BKÇ) maliyetleri ile çeşitli boru cinsleri (cam takviyeli plastik (CTP), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), beton kaplı çelik (BKÇ)), 1300 m'lik tipik boru hattı uzunluğu zemin yapısı ve boruların deniz tabanına döşeme şekline göre incelenmiştir. Anılan çalışma kapsamında incelenen tesislere ait maliyetler, Gunnerson (1988) tarafından verilen 27 deniz deşarj sistemine ait maliyet verileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Roberts ve diğ. (2010) tarafından 145 derin deniz deşarj sistemine ait verinin toplandığı diğer bir çalışmada, derin deniz deşarj sistemlerinin metre başına birim inşaat maliyeti boru çapının bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Anılan çalışma kapsamında; Türkiye, Amerika Birleşik Devletleri ve Şili gibi birçok ülkeye ait derin deniz deşarj sistemlerine ait maliyet verileri incelenmiştir. Gunnerson (1988) ve Roberts ve diğ. (2010)'nin çalışmalarında derin deniz deşarj sistemlerine ait veriler adapte edilerek birim boy maliyetleri için grafikler çıkarılmış ve Şekil 1'de verilmiştir. Bahse konu derin deniz deşarj sistemlerine ait yatırım maliyet fonksiyonları Tablo 1'de topluca verilmiştir.

Tablo 1. Derin deniz deşarj sistemleri için yatırım maliyet fonksiyonları

Yatırım maliyeti	Açıklama	Kaynak
$M = 120 \times Q^{0,38}$	CTP boru, kumlu zemin, tam gömülü, L=1300 m	
$M = 487 \times e^{1,17 D}$, $R^2 = 0,988$	CTP boru, kumlu zemin, tam gömülü, L=1300 m	
$M = 344 \times e^{1,46 D}$, $R^2 = 0,988$	CTP boru, kumlu zemin, %30 gömülü, $D \leq 2m$	
$M = 91 \times Q^{0,42}$	YYPE boru, kumlu zemin, tam gömülü, $D \leq 1400m$	Şahinoğlu ve Öztürk (1991)
$M = 101 \times Q^{0,41}$	YYPE boru, %30'u kaya zemin, tam gömülü, $Q(L/s)$, $D \leq 1400m$	
$My = 9949 \times Q^{0,47}$	CTP boru, tamamen gömülü halde, $Q(L/s)$	Roberts ve diğ. (2010)
$My = 36 \times Q^{1,12}$, $R^2 = 0,984$	BKÇ boru, tamamen gömülü halde, $Q(L/s)$	
$C = 6140 \times D$		Bu çalışma
$M = 1558e^{0,765x}$, $R^2 = 0,68$	Gunnerson (1988) adapte edilmiş birim boy maliyetleri	Bu çalışma
$M = 5956x - 242$, $R^2 = 0,64$	Roberts ve diğ. (2010) adapte edilmiş birim boy maliyetleri*	Bu çalışma

M = Birim boy maliyeti (\$/m)
 My =Yıllık yatırım maliyeti (\$/yıl)
 D = Boru çapı (m)
 Q = Debi (L/s)
 C =Maliyet (\$/m)
 D =Boru çapı (m)

*Tünel inşaatı için belirtilen veriler çıkarılarak adapte edilmiştir.



Şekil 1. Derin deniz deşarj sistemleri için adapte edilmiş birim boy maliyetleri: (a) Gunnerson (1988)'den uyarlanmış birim boy maliyetleri; (b) Roberts ve diğ. (2010)'den uyarlanmış birim boy maliyetleri

2.2 Mekanik (Ön) Arıtma Tesisleri

Evsel atıksulardaki kâğıt, plastik ve metal gibi iri katı maddeler ile cam kum ve yağ-gres gibi maddeler arıtma tesislerinde mekanik ekipmanların bozulmasına ve işletme aşamasında büyük sorunlara neden olmaktadır. Ön arıtma ile atıksuda bulunan bu tür maddelerin giderilmesi amaçlanmaktadır. Atıksu ön (mekanik) arıtma sistemleri en basit haliyle terfi merkezi,

izgara ve elek yapıları ile kum/yağ tutucu birimlerinden oluşur (Öztürk, 2011). Izgaralar, AAT'lerdeki ilk üniteler olup kâğıt, plastik ve metal gibi katı maddelerin tutunmasını sağlayarak arıtma tesisinde mevcut mekanik ekipmanların zarar görmesini ve boru hatlarının tıkanmasını engeller. Izgaralar çubuk aralıklarına göre kaba ve ince izgara olmak üzere sınıflandırılır. Kaba izgaralar atıksudaki iri katıların tutulması amacıyla ilk ünite olarak genellikle terfi merkezi önünde kullanılır. Kaba izgaralar

elle temizlemeli veya mekanik temizlemeli olabilirler ve tipik çubuk aralıkları 25-50 mm'dir. İnce ızgaralar, kaba ızgaralardan sonra kum tutuculardan önce konumlandırılırlar. Bu tip ızgaralar mekanik temizleme mekanizmalarına sahip olup, tipik çubuk aralıkları 15-25 mm'dir (Öztürk ve diğ., 2017). Döner ince elekler, elek gözenek açıklığı 0,2-2 mm, tambur çapı 0,6-3,0 m aralığında değişen, ince ızgaradan sonra kum tutucu girişi veya çıkışında konumlandırılabilen ekipmanlardır. Döner ince elek sistemi eklendiğinde mekanik (ön) arıtma sistemi verimi partiküler KOİ'de %50, toplam KOİ'de ise yaklaşık %30'lara yükseltilebilmektedir (Libhaber, 2007). Kum tutucular, atıksulara bulunan ve yoğunluğu atıksudan daha fazla olan inert maddeler (kum, taş, cam, cüruf vb.) ile yağ-gres giderimi amacıyla genellikle ızgaralardan sonra kullanılırlar. Birçok farklı türde kum tutucu mevcut olup, yaygın olarak kullanılan türleri yatay akışlı kum tutucular, havalandırılmalı kum tutucular ve vorteks akımlı kum tutuculardır (Öztürk, 2017). Terfi merkezinde, pompalar ve atıksu terfisi için gerekli mekanik ekipmanlar yer almaktadır. Ön arıtma sistemi maliyetleri; terfi merkezi, ızgara yapıları, kum tutucu, beğçi kulübesi, atölye ve işletme, saha düzenlemesi ve altyapı sistemlerinin maliyetlerini içermektedir (Öztürk, 2011). Ön (mekanik) arıtma sistemlerinin maliyeti; atıksu debisi, kullanılan teknoloji türü ve yardımcı ekipman ihtiyacına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada ön arıtma sistemi maliyetleri; ilk yatırım ve işletme ve bakım maliyetleri olarak iki ana başlık altında incelenecektir.

İstanbul'da bulunan 8 adet tam ölçekli büyük kapasiteli ön arıtma tesisine ait ilk yatırım maliyetlerinin incelendiği bir çalışmada, ilk yatırım maliyeti inşaat ve ekipman maliyetleri olmak üzere iki alt kategori altında incelenmiş ve ilk yatırım maliyetinin %29'unu inşaat maliyetinin %71'ini ise ekipman maliyetinin oluşturduğu belirlenmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). Aynı çalışma kapsamında elde edilen bulgulara göre debiye bağlı ortalama birim ilk yatırım maliyeti $0,013 \pm 0,004$ €/m³ olarak tespit edilmiştir. Anılan çalışmada, ön arıtma tesislerine ait işletme ve bakım maliyetlerine ait maliyet bileşenlerinin yüzdeleri dağılımı da incelenmiştir. Bu tesislerde, enerji maliyetinin %44'lük bir oran ile en yüksek maliyet bileşenini oluşturduğu, bakım ve onarım ile personel maliyetlerinin ise sırasıyla %25 ve %24'lük paylar ile enerji maliyetini takip ettiği görülmüştür. Diğer maliyetlerin payı ise %7 olarak tespit edilmiştir. Ön arıtma tesisleri için debiye bağlı ortalama birim işletme ve bakım maliyeti $0,011 \pm 0,007$ €/m³ olarak rapor edilmiştir. Ön arıtma tesislerinde toplam birim maliyet ise $0,024 \pm 0,009$ €/m³ olarak belirlenmiştir, toplam maliyetin %58'inin ilk yatırım maliyeti, %42'sinin ise işletme ve bakım maliyetinin oluşturduğu ortaya konmuştur (Ozgun ve diğ., 2021).

Maliyet fonksiyonları gelecekte inşa edilmesi planlanan arıtma tesisleri için maliyet tahmini yapılmaya aşamasında oldukça fayda sağlamaktadır. Ön arıtma tesisleri için ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerinin detaylı olarak irdelendiği çalışmada; iki temel maliyet bileşeni için debiye bağlı maliyet fonksiyonları çıkarılmış, sonuç olarak yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerini 2018 yılı bazında ABD doları cinsinden ifade eden maliyet fonksiyonları elde edilmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). Türkiye'deki ön arıtma sistemlerinin detaylı maliyet analizlerinin yapıldığı Şahinoğlu ve Öztürk (1991) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ön arıtma sistemleri ızgara, kum tutucu ve terfi merkezinden oluşan modüler bir sistem olarak ele alınmıştır. Anılan çalışmada; ön arıtma sistemleri için İSKİ'nin 1990 yılı birim fiyatları kullanılarak toplam yatırım maliyetleri elde edilmiş, tesis ömrü 30 yıl, faiz ve amortisman oranı %10 alınarak yıllık maliyetlere dönüştürülmüştür. Pompaların tükettiği enerji miktarı ve elektrik enerjisi bedeli dikkate alınarak yaklaşık enerji maliyetleri hesaplanmıştır. Yıllık işletme ve bakım giderlerinin

hesaplanmasında yeterli veri bulunmamasından dolayı, yıllık işletme ve bakım maliyeti enerji maliyetinin ortalama 1,35 katı alınarak hesaplanmıştır. Ön arıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan döner ince tambur elek, mikron derecesinde ince gözeneklere sahiptir ve eleğin dönme hareketi vasıtasıyla içerisindeki sıvıyı yüksek kapasitede ayırma imkânı sağlar. Bu tip elekler için, gözenek açıklıkları 0,2 ile 2 mm (maksimum 6 mm) arasında, döner tambur çapı ise 600 ile 3000 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Döner ince tambur elekler için literatürde debiye bağlı birim yatırım maliyet $0,03$ \$/m³, kişi başı yatırım maliyeti ise 5-20 \$/EN olarak verilmiştir (Roberts ve diğ., 2010). Söz konusu çalışmalar kapsamında elde edilen ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri için maliyet fonksiyonları Tablo 2'de verilmektedir.

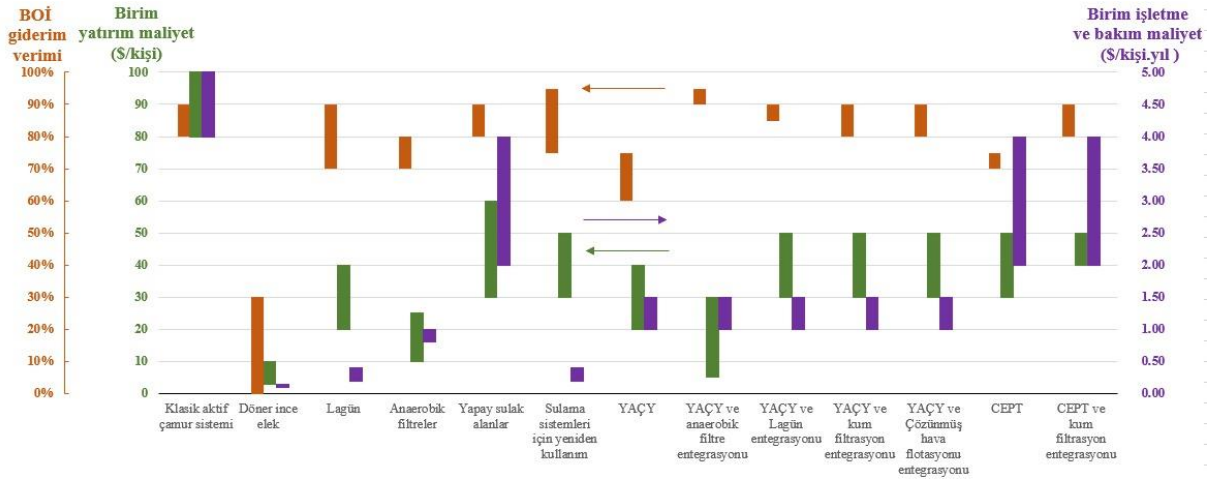
Tablo 2. Mekanik (ön) arıtma tesisleri için belirlenmiş yatırım ile işletme ve bakım maliyet fonksiyonları

Arıtma türü	Maliyet fonksiyonu	Kaynak
Mekanik (ön) arıtma	Yıllık yatırım maliyeti $=640 \times Q^{0,84}$, $R^2=0,996$	Şahinoğlu ve Öztürk (1991)
Mekanik (ön) arıtma	Yatırım maliyeti $=0,53 \times Q^{1,08}$, $R^2=0,93$	Ozgun ve diğ. (2021)
Mekanik (ön) arıtma	Yıllık işletme ve bakım maliyeti $=344 \times Q^{0,89}$, $R^2=0,977$	Şahinoğlu ve Öztürk (1991)
Mekanik (ön) arıtma	Yıllık işletme ve bakım maliyeti $=1,14 \times Q^{1,07}$, $R^2=0,83$	Ozgun ve diğ. (2021)

2.2 Basit (Sürdürülebilir) Arıtma Sistemleri

Gelişmekte olan ülkelerde su sektöründeki yatırım öncelikleri, su temini, atıksu toplama ve sonrasında atıksu arıtma şeklinde sıralanabilir. Su sektöründeki kumsal sorunlar ve finansal kısıtlar, çoğu gelişmekte olan ülkede arıtma tesisine bağlı nüfus oranının genellikle <%10 düzeyinde kalmasına yol açmaktadır. Dünya nüfus artışı ile ilgili tahminlere göre; (i) dünya nüfusu 2050'de 9 milyara ulaşacaktır, (ii) nüfus artışının tamamı yakını gelişmekte olan ülkelerde vuku bulacaktır, (iii) kırsal kesimden kentlere göç giderek hızlanacaktır. Kırsaldan kentlere göç; kentsel su ihtiyacı ile kentsel atıksu oluşumunun artmasına ve artan nüfusun ihtiyacını karşılamak için daha fazla tarım arazisi ve sulama suyuna ihtiyaç duyulmasına yol açacaktır (Libhaber, 2007).

Gelişmekte olan ülkelerdeki büyük nüfus artışı, kanalizasyona ve arıtmaya bağlı nüfus oranı üzerinde ilave olumsuz baskıya yol açacaktır. Bu yüzden gelişmekte olan ülkelerde, sanayileşmiş zengin ülkelerden daha farklı (uygun ya da sürdürülebilir) atıksu yönetim (toplama ve arıtma) stratejilerine ihtiyaç vardır (Libhaber ve Orozco-Jaramillo, 2012). Libhaber (2007) söz konusu sürdürülebilir atıksu arıtma teknolojilerini; küçük şehirler (<20.000 kişi), orta büyüklükte şehirler (20.000-300.000 kişi) ve büyükşehirler (>300.000 kişi) olmak üzere nüfusa bağlı olarak üç kategoriye ayırarak, sürdürülebilir atıksu arıtma teknolojilerini yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri; biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) giderim verimleri, klasik aktif çamur sistemiyle kıyaslanarak değerlendirmiştir. Sürdürülebilir atıksu arıtma sistemlerinin yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri; biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) giderim verimleri ile birlikte Şekil 2'de verilmiştir (Libhaber, 2007). Sürdürülebilir atıksu arıtma sistemlerinin yatırım maliyeti klasik aktif çamur sisteminin genellikle %50'sinden daha azdır. İşletme ve bakım maliyeti de çoğu durumda klasik aktif çamur sisteminin ancak %3-30'u mertebesindedir.



Şekil 2. Sürdürülebilir atıksu arıtma teknolojilerinin giderim verimleri ile maliyetleri (Libhaber, 2007)

2.4 İleri Biyolojik Arıtma Tesisleri

Atıksu arıtımında oldukça yaygın kullanılan biyolojik prosesler birçok mikroorganizma grubunun faaliyetleri sonucu gerçekleşmekte olup, oldukça karmaşık süreçler içermektedir. İleri biyolojik atıksu arıtma tesisleri (İBAAT) prensip olarak karbon, azot ve fosfor giderimi sağlayan bir prosese sahiptir. Bu prosesler arasında A2O, Bardenpho ve UCT yer almaktadır. Bu prosesler, azot ve fosfor giderimi için aerobik, anaerobik ve anoksik bölümlerin bileşiminden oluşmuş aktif çamur prosesi formundadır (Öztürk, 2017). Bu proseslerin verimliliğini etkileyen faktörler; çevresel, yapısal, işletme ve bakımla ilgili faktörler olarak sınıflandırılabilir. Çevresel faktörler; atıksu özellikleri, sistemin çözünmüş oksijen konsantrasyonu, sıcaklık ve pH'dır. Yapısal faktörler ise; reaktör hacmi, çökeltim tanklarının boyutları, tesis içi pompalama kapasiteleri, tesis hidrolik tasarımıdır. Ekipman bakım, kalite kontrol laboratuvarlarının iyi işletimi, standart metotlara uygun numune alımı ve tesis operatörlerinin eğitimi ise işletme ve bakım ile ilgili faktörlerdir (Koyuncu ve diğ., 2016).

İBAAT'lerdeki ilk yatırım maliyetlerinin büyük bir kısmını inşaat maliyeti oluşturmaktadır. Avusturya'da tipik bir AAT'de inşaat maliyetleri, arıtma tesisinin toplam yatırım maliyetinin %60-70'ini oluşturmaktadır (Zessner ve diğ., 2010). Türkiye'deki 8 adet İBAAT'nin ilk yatırım maliyetlerinin incelendiği bir çalışmada; ortalama birim ilk yatırım maliyeti $0,054 \pm 0,009 \text{ €/m}^3$ olarak tespit edilmiş olup, inşaat ve ekipman maliyetlerinin ilk yatırım maliyeti içerisindeki oranları sırasıyla %59 ve %41 olarak belirlenmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). İlk yatırım maliyeti içerisinde inşaat, elektromekanik, elektrik ve kontrol/otomasyon sistemlerinin dağılımı, tesisin hizmet ettiği nüfus ve debiye bağlı olarak değişmektedir. İsrail'de yapılan bir çalışmada (Friedler ve Pisanty, 2006); inşaat, elektromekanik, elektrik ve kontrol/otomasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyeti içerisindeki değişimi debiye bağlı olarak modellenmiş olup, debi arttıkça inşaat maliyeti oranının azaldığı, elektromekanik maliyet oranının ise arttığı belirlenmiştir.

İşletme ve bakım maliyetleri arasında en yüksek paya sahip maliyet bileşeni enerji maliyetidir. Türkiye'deki 8 İBAAT'nin incelendiği bir çalışmada bu değerlerin ortalama %39 civarında olduğu tespit edilmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). AAT'lerde kullanılan enerjinin %60'ından fazlası havalandırma ekipmanları tarafından tüketilir. Aerobik çamur çürütme olması durumunda

bu oran >%70'lere ulaşabilir. Anaerobik çamur çürütmeli ve çürütmesiz merkezi kentsel AAT'lerdeki medyan enerji kullanımları sırasıyla 22 ve 29 kWh/EN.KOİ110 olarak verilmektedir (Öztürk, 2011). İşletme ve bakım maliyetleri arasında önemli bir paya sahip olan bir diğer maliyet bileşeni ise personel maliyetidir. Tesiste bulunan personel etkinliğinin, tesis performansı üzerinde büyük bir etkisi vardır ve personel maliyeti ülkeden ülkeye değişmektedir. Personel maliyetinin işletme ve bakım maliyeti içerisindeki payı İspanya ve Fransa gibi sanayileşmiş ülkelerde sırasıyla %28 ve %24 iken, gelişmekte olan ülkelerde bu değer %52 ile %68 aralığında değişiklik göstermektedir (Abu-Madi ve Al-Sa'ed, 2005). Bu fark büyük oranda, tesisteki otomasyon seviyesi ile ilgilidir. Otomasyon seviyesi arttıkça mekanik ekipman ihtiyacı da artmakta ve enerji maliyetinin işletme ve bakım maliyeti içerisindeki payı yükselmektedir. Avusturya'daki bir İBAAT için yapılan çalışmada enerji maliyetinin işletme ve bakım maliyeti içerisindeki payı %34 olup (Haslinger ve diğ., 2016), Türkiye'deki 8 adet İBAAT incelendiği bir çalışmada ise bu değer ortalama %31 bulunmuştur (Ozgun ve diğ., 2021). Kimyasal madde maliyeti, arıtma tesisinde kullanılan polimerler, alum, kireç ve klor gibi kimyasal madde giderlerini içerir. Kimyasal madde giderlerinin toplam işletme maliyeti içerisindeki payı genellikle %5 ile %8 aralığında değişmektedir (Öztürk, 2011). Türkiye'deki küçük (>100.000 m³/gün), orta (100.000-400.000 m³/gün) ve büyük (>400.000 m³/gün) kapasiteli toplam 8 adet İBAAT'nin incelendiği çalışmada ortalama birim işletme ve bakım maliyetleri sırasıyla $0,090 \pm 0,026 \text{ €/m}^3$, $0,075 \pm 0,005 \text{ €/m}^3$ ve $0,047 \text{ €/m}^3$ olarak belirlenmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). Bu bulgu doğrultusunda, İBAAT'lerdeki işletme ve bakım maliyetlerinin büyük ölçüde tesis kapasitesine bağlı olarak değiştiği söylenebilir.

2014 yılında İspanya'da 22 adet İBAAT için ortalama birim işletme ve bakım maliyeti $0,272 \text{ €/m}^3$ olarak rapor edilmiştir (Gallego-Valero ve diğ., 2018). İspanya'da 2017 yılı değerleriyle yapılan bir diğer çalışmada İBAAT için birim işletme ve bakım maliyetinin $0,14 \text{ €/m}^3$ ile $0,27 \text{ €/m}^3$ arasında değiştiği belirtilmiştir (Moral Pajares ve diğ., 2019). Türkiye'deki 8 adet İBAAT'nin incelendiği çalışmada ise artılan m³ atıksu başına ortalama birim işletme ve bakım maliyeti $0,077 \pm 0,021 \text{ €/m}^3$ olarak bulunmuştur (Ozgun ve diğ., 2021). Türkiye ve dünyada İBAAT'lerin ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri için elde edilen maliyet fonksiyonları Tablo 3'te sunulmuştur. Nas ve Turgut (2019) tarafından yapılan bir çalışmada; Türkiye'deki 71 adet biyolojik fosfor giderimli eş zamanlı

nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesine (Bio-P+SNDP) sahip ve 16 adet 5 kademeli Bardenpho prosesine sahip İBAAT'ının ortalama birim yatırım maliyeti sırasıyla 60 €/kişi ve 27 €/kişi olarak tespit edilmiştir. Aynı çalışmada, yatırım maliyeti açısından, eşdeğer nüfusu 205.000 kişiden büyük İBAAT'lerde Bio-P+SNDP prosesinin, eş değer nüfusu 205.000 kişiden küçük İBAAT'lerinde ise 5 kademeli Bardenpho prosesinin daha avantajlı olduğu belirtilmiştir.

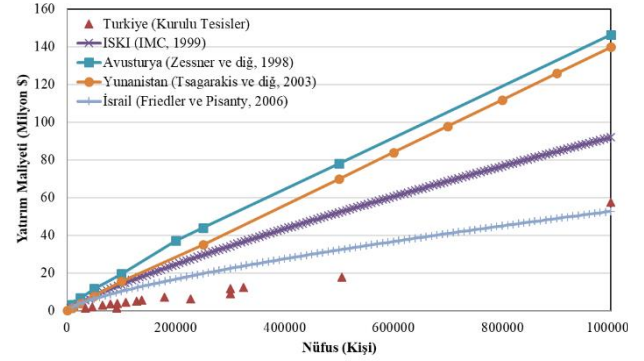
Tablo 3. İBAAT'ler için yatırım ile işletme ve bakım maliyet fonksiyonları.

Aritma türü	Proses	Maliyet fonksiyonu	Kaynak
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yatırım maliyeti= 741xEN ^{0,8313}	Öztürk ve diğ. (2011)
İleri biyolojik arıtma	A ² O+ Aerobik çamur stabilizasyonu	Yatırım maliyeti= 630xEN ^{0,8313}	Öztürk ve diğ. (2011)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yatırım maliyeti =0,116xEN ^{0,95} , R ² =0,94	UNEP (2015)
İleri biyolojik arıtma	Bio-P+SNDP	Yatırım maliyeti=47,69xEN +976.109,24 , R ² =0,76	Nas ve Turgut (2019)
İleri biyolojik arıtma	5 Kademeli Bardenpho	Yatırım maliyeti=31,14xEN +4.343.367,96 , R ² =0,76	Nas ve Turgut (2019)
İleri biyolojik arıtma	A ² O+ Anaerobik çürütücü	Yatırım maliyeti =9701*Q ^{0,76} , R ² = 0,98	Ozgun ve diğ. (2021)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yatırım maliyeti =2577*Q ^{0,83} , R ² = 0,91	Ozgun ve diğ. (2021)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yıllık işletme ve bakım maliyeti =0,022xEN ^{0,67} , R ² = 0,840	UNEP (2015)
İleri biyolojik arıtma	A ² O+ Anaerobik çürütücü	Yıllık işletme ve bakım maliyeti =14025*Q ^{0,50} , R ² = 0,86	Ozgun ve diğ. (2021)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yıllık işletme ve bakım maliyeti =294*Q ^{0,80} , R ² = 0,88	Ozgun ve diğ. (2021)

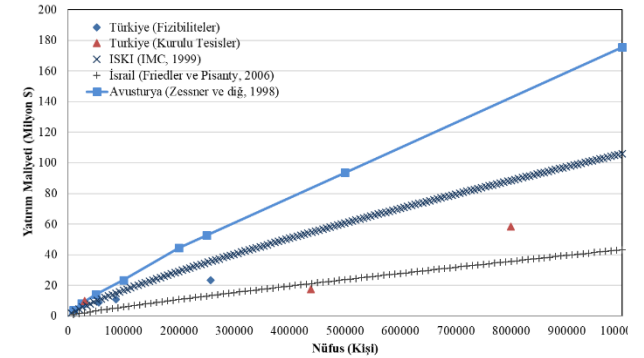
EN: Eşdeğer nüfus (kişi); Q: Atıksu debisi (m³/gün)

Türkiye ve değişik ülkelerdeki atıksu arıtma tesisi ilk yatırım maliyetleri ile karşılaştırma grafiği Şekil 3'te verilmiş olup, Avusturya ve Yunanistan'daki atıksu arıtma tesislerinin yatırım maliyetlerinin Türkiye'deki atıksu arıtma tesislerinin yatırım

maliyetlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. İsrail ve Türkiye'deki atıksu arıtma tesislerinin maliyetleri ise birbirleri ile paralellik arz etmektedir. Şekil 3(b)'de yer alan Türkiye'deki kurulu İBATT'lerinin kapasiteleri 30.500-800.000 kişi aralığında iken, fizibilite çalışması yapılmış İBATT'lerin kapasiteleri 55.500-1.540.000 kişi aralığında değişmektedir. Türkiye'deki 8 adet İBAAT'nin maliyetlerinin değerlendirildiği çalışmada (Ozgun ve diğ., 2021); toplam maliyetin %42'sini ilk yatırım maliyeti oluştururken, işletme ve bakım maliyetinin oranı %58 olarak belirlenmiştir. Aynı çalışmada ortalama birim toplam maliyet 0,132 €/m³ olarak tespit edilmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). Bu değer diğer ülkelerdeki İBAAT'lerin birim toplam maliyeti ile karşılaştırıldığında; Türkiye'deki İBAAT'lerin birim toplam maliyetinin İspanya, Çin, Senegal ve Kuveyt'teki İBAAT'lerin birim toplam maliyetlerine göre daha düşük olduğu görülmüştür (Tablo 4). İspanya'daki 18 adet İBAAT'ye ait ortalama birim toplam maliyet 0,31 €/m³tür (Moral Pajares ve diğ., 2019).



(a)



(b)

Şekil 3. Yatırım maliyetinin nüfusa göre değişimi: (a) klasik aktif çamur sistemi, (b) biyolojik azot ve fosfor giderimli aktif çamur sistemi.

Tablo 4. Farklı ülkelerde gerçekleştirilen çalışmalarda İBAAT'ler için belirlenen birim toplam maliyet değerleri

Aritma türü	Proses	Kapasite (m ³ /gün)	Ülke	Birim toplam maliyet (€/m ³)	Baz yılı	Kaynak
İleri biyolojik arıtma	Aktif çamur prosesi	1.704.784	Kuveyt	109,5 ¹	2004	Alhumoud ve diğ. (2010)
İleri biyolojik arıtma	Aktif çamur prosesi	230.000 ²	Senegal	54,64 ¹	2012	Dodane ve diğ. (2012)
İleri biyolojik arıtma	Cape Town üniversitesi tarafından geliştirilen UCT prosesi	560.000 ³	Çin	0,708 ⁴	2012	Li ve diğ. (2017)
İleri biyolojik arıtma	Uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi	<50.000 ²	İspanya	0,31	2027	Moral Pajares ve diğ. (2019)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	36.500-600.000	Türkiye	0,132	2018	Ozgun ve diğ. (2021)

¹\$/kişi, ²kişi, ³ton/gün, ⁴yuan/ton

3. Genel Değerlendirme

Atıksuların arıtılması ve deşarj standartlarına uygun hale getirilmesi ülkemizde ve dünyada alıcı ortamların su kalitesinin korunmasında önem arz etmektedir. Çevresel kirliliğin önlenmesinde önemli rol oynayan mevcut AAT'lere ait maliyetlerin analizi gelecekte inşa edilmesi planlanan arıtma tesislerinin maliyet tahminleri açısından büyük fayda sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye ve dünyadaki kurulu AAT ve derin deniz deşarj sistemlerinin maliyet bileşenleri mukayese edilmiştir. Bu kapsamda, literatürdeki çalışmalarda yer alan AAT'lere ait ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyet fonksiyonlarına yer verilmiş olup, deniz deşarjı sistemleri maliyetleri ile atıksu ön arıtma tesisleri, sürdürülebilir atıksu arıtma sistemleri ve İBAAT'lerin maliyetleri de detaylı olarak incelenmiştir. Maliyet fonksiyonları incelendiğinde; derin deniz deşarj sistemlerinin maliyeti deşarj hattı uzunluğu, deşarj borusu çapı, zemin durumu ve boru tipine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Deniz deşarjı sistemlerinin maliyet tahmini için önerilen maliyet fonksiyonlarından faydalanılabilir. Ön arıtma tesislerinde ilk yatırım maliyeti için en önemli maliyet bileşenini ekipman maliyeti oluştururken, işletme ve bakım maliyetinin en önemli maliyet bileşeni enerji maliyetidir. İleri biyolojik arıtma tesislerinde ilk yatırım maliyetleri için en önemli maliyet bileşenini inşaat maliyeti oluştururken, işletme ve bakım maliyetinin en önemli maliyet bileşenini yine enerji maliyeti oluşturmaktadır. Basit sürdürülebilir atıksu arıtma sistemlerinin yerinde ve doğru kullanımı ile özellikle gelişmekte olan ülkeler için klasik enerji ve ekipman yoğun proseslere kıyasla oldukça düşük maliyetli çözümler sunulabilmektedir. Önerilen AAT ve derin deniz deşarj maliyet fonksiyonlarıyla, özellikle Master Plan ve Fizibilite çalışmalarında, $\pm\%20$ hata ile ilk yatırım ve işletme maliyeti tahminleri yapılabilecektir. Bu çalışma kapsamında yapılan literatür incelemesi sonucunda elde edilen maliyet fonksiyonları, atıksu arıtma tesisi inşa etmeyi planlayan yerel yönetimlerce, çevre mühendislerinin denetimiyle planlanan tesislerin ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerinin karşılaştırılması olarak değerlendirilmesi amacıyla kullanılabilir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

4. Kaynaklar

- Alhumoud, J.M., Al-Humaidi, H., Al-Ghusain, I.N. and A.M. Alhumoud (2010), Cost/Benefit Evaluation of Sulaiybiya Wastewater Treatment Plant in Kuwait. *Journal of International Business & Economics Research*. 9, 23-32. <https://doi.org/10.19030/iber.v9i2.518>.
- Abu-Madi, M., and R. Al-Sa'ed (2005), Comparative Analysis of Wastewater Treatment Costs in Jordan and Tunisia. *Proc. International Conference on "Water: Values and Rights"*, May 2-4, 2005, Ramallah, Palestine.
- Dodane, P.H., Mbequefe, M., Sow, O., and L. Strande, (2012), Capital and Operating Costs of Full-Scale Fecal Sludge Management and Wastewater Treatment Systems in Dakar, Senegal. *Environmental Science and Technology*, 46, 3705-3711. <https://doi.org/10.1021/es2045234>.
- Erşahin, M.E. Dereli, R.K. Özgün, H. Akmırza, Z., ve İ. Öztürk (2017), Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliğinin

İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 21(2): 380-387.

- Friedler, E. and E. Pisanty (2006), Effects of Design Flow and Treatment Level on Construction and Operation Costs of Municipal Wastewater Treatment Plants and Their Implications on Policy Making, *Water Research*, 40, 3751-3758. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.015>.
- Gallego-Valero, L., Moral-Pajares, E., Román-Sánchez, I. M., and J.A. Sánchez-Pérez (2018), Analysis of Environmental Taxes to Finance Wastewater Treatment in Spain: An Opportunity for Regeneration? *Water*, 10, 226. <https://doi.org/10.3390/w10020226>.
- Gunnerson, C. G. (1988), *Wastewater Management for Coastal Cities*, World Bank Technical Report No:77.
- Haslinger, J., Lindtner, S., and J. Krampe (2016), Operating Costs and Energy Demand of Wastewater Treatment Plants in Austria: Benchmarking Results of the Last 10 Years. *Water Science Technology*. 74, 2620-2626. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.390>.
- İMC (1999), İSKİ Su Temini, Atıksu Toplama ve Arıtma, Yeraltısuyu Toplama ve Dere Islahları Master Planı. İstanbul Master Plan Konsorsiyumu, İstanbul.
- Koyuncu, İ., Öztürk, İ., Köse Mutlu, B. ve O. Yıldız (2016), *Atıksu Arıtma Tesisleri İşletimi El Kitabı* (2. Baskı), Türkiye Belediyeler Birliği, Ankara, Türkiye.
- Li, W.W., Yu, H.Q. and B.E. Rittmann (2015), Chemistry: Reuse water pollutants. *Nature*, 528, 29-31.
- Li, W., Li, L., and G. Qiu (2017), Energy Consumption and Economic Cost of Typical Wastewater Treatment Systems in Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production* 163, S374-S378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.109>.
- Libhaber, M. (2007), *Appropriate Technology for Wastewater Treatment and Reuse in Developing Countries*, Paper presented in the Conference "Water Supply and Sanitation for All" Huber Technology, Berching, Germany, September 27-28, 2007.
- Libhaber, M., and A. Orozco-Jaramillo (2012), Sustainable Treatment and Reuse of Municipal Wastewater: For decision makers and practising engineers. IWA publishing, London, UK.
- Moral Pajares, E., Gallego Valero, L., and I.M. Román Sánchez (2019), Cost of urban wastewater treatment and ecotaxes: Evidence from municipalities in Southern Europe, *Water*, 11, 423. <https://doi.org/10.3390/w11030423>.
- Nas, B., Turgut, S., (2019), İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesislerinin İlk Yatırım Maliyetlerinin Değerlendirilmesi, *Su ve Çevre Teknolojileri Dergisi*, Sayı 132.
- Olsson, G. (2012), *Water and Energy Threats and Opportunities*. IWA Publishing, Londra, İngiltere.
- Ozgun, H., Cicekalan, B., Akdag, Y., Koyuncu, I. and I. Ozturk (2021), Comparative Evaluation of Cost for Preliminary and

- Tertiary Municipal Wastewater Treatment Plants in Istanbul. *Science of the Total Environment*, 778 (2021), 146258, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146258>.
- Öztürk, İ. (2011), *Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- Öztürk, İ. (2017), *Atıksu Mühendisliği*, İSKİ Teknik Kitaplar Serisi, ISBN: 0000511-3, İstanbul, Türkiye.
- Roberts, P. J. W., Salas, H. J., Reiff, F. M., Libhaber, M., Labbe, A., and J.C. Thomson (2010), *Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*. SBN13: 9781843391890.
- Şahinoğlu, A. ve İ. Öztürk (1991), *Atıksu Ön Arıtma ve Deniz Deşarjı Tesislerinin Maliyeti Üzerine Bir Araştırma*, Türk İnş.Müh. XI. Teknik Kongresi, 8-11 Ekim, İstanbul.
- Tsagarakis, K.P., Mara, D.D. and A.N. Angelakis (2003), *Application of Cost Criteria for Selection of Municipal Wastewater Treatment Systems*. *Water, Air, and Soil Pollution* 142, 187–210. <https://doi.org/10.1023/A%3A1022032232487>.
- UNEP (2015), *Economic Valuation of Wastewater - The Cost of Action and The Cost of No Action*, United Nations Environment Programme, ISBN: 978-92-807-3474-4
- Zessner, M., Lampert, C., Kroiss, H. and S. Lindtner (2010), *Cost Comparison of Wastewater Treatment in Danubian Countries*. *Water Science and Technology* 62, 223-230. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.271>.

DERLEME MAKALE

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Modeline Genel Bir Bakış ve Modelin Türkiye'deki Uygulamaları

İsmail Bilal PEKER¹, Gökhan CÜCELOĞLU²

Yazışma yazarı:

İsmail Bilal PEKER,
pekerbilal@iuc.edu.tr¹İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0001-9133-6797²Oxford Üniversitesi, Environmental Change Institute, Oxford, Birleşik Krallık. ORCID: 0000-0002-9534-250X

Referans:

Peker, İ.B. ve Cüceloğlu, G., (2022), Makale Başlığı, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 1(1) 9–26.

Makale Gönderimi : 13 ARALIK 2021
Online Kabul : 10 ŞUBAT 2022
Online Basım : 30 MAYIS 2022

Özet USDA (Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı) tarafından yaklaşık 40 yıldır geliştirilmekte olan SWAT (Soil and Water Assessment Tool) dünyanın farklı bölgelerinde yaygın olarak kullanılan bir havza modelleme aracıdır. SWAT ile ilgili literatürde yer alan makaleler ve uluslararası konferans bildirileri modelin dünya çapında kabul gördüğünü göstermektedir. Son yıllarda, SWAT modelinin ülkemizde yapılan araştırmalardaki uygulamaları da giderek hız kazanmıştır. Bu araştırmalar çoğunlukla bilimsel makaleler ve tezler ile yayınlanmaktadır. Mevcut çalışmanın amacı SWAT modeli hakkında genel bir bilgi vererek modelin Türkiye'deki uygulamalarını içeren bir literatür taramasına ait analizleri paylaşmaktır. Bu çalışma ile araştırmacılar için SWAT modelinin 2008 - 2022 yılları arasında ülkemizin farklı havzalarında yapılan uygulamalarına kolay erişilebilir bir kaynak hazırlanması hedeflenmektedir. Bu kapsamda 46 makale ve 19 tez çalışması olmak üzere toplam 65 çalışma incelenmiş olup bu çalışmalarda kullanılan farklı veri setleri ve kaynakları sunulmaktadır. İncelenen çalışmalar, genel kapsamı bakımından hidroloji (%69) ve su kalitesi (%31) odaklı çalışmalar olarak iki sınıfta ele alınmaktadır. Bu sınıflar mevcut durum (günümüz veya geçmiş tarihli) ve gelecek dönem (iklim ve arazi kullanımı değişikliği) için yapılan yüzey suyu, yer altı suyu, kirlilik ve sediment ile ilgili çalışmalar olarak alt sınıflarda incelenmektedir. Çalışmalarda, SWAT modelinin ihtiyaç duyduğu sayısal yükseklik haritası, arazi kullanımı ve toprak çeşidi mekânsal girdileri için sırasıyla SRTM (%31), CORINE (%43) ve FAO-UNESCO (%60) verileri en çok tercih edilen veri kaynaklarıdır. Çoğunlukla, zamansal model girdisi olan iklim verileri için MGM (%65), model kalibrasyonunda kullanılan akım verileri için ise DSİ (%65) kurumuna ait veri kaynakları tercih edilmektedir. Çalışmalarda gerçekleştirilen kalibrasyon ve validasyonların çoğunda yaygın olarak tanınan performans göstergelerine dayalı olarak tatmin edici sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: SWAT, Türkiye, Havza modelleme, Hidroloji, Su Kalitesi.

An Overview of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Model and Its Applications in Turkey

Abstract SWAT (Soil and Water Assessment Tool) is a hydrological modeling tool widely used in different parts of the world developed by the USDA (United States Department of Agriculture) for nearly 40 years. Numerous papers in the literature and international conference papers on the SWAT model show that the model is accepted worldwide. In recent years, the applications of the SWAT model in Turkey have also gained momentum. These studies are published as scientific articles and theses. The main objective of the present study is to provide general information about the SWAT model and share the results of a literature review, including the applications of the model in different basins of Turkey. In this context, a total of 65 studies, including 46 articles and 19 theses, were examined between the years 2008 and 2022, and different data sets and sources used in these studies are presented. In terms of their scope, the reviewed studies are generally in two categories as hydrology (69%) and water quality (31%) focused studies. These categories are examined in sub-classes as studies on surface water, groundwater, pollution and sediment for the current situation (present and past date) and future period (climate or land use change). In the studies, SRTM (31%), CORINE (43%) and FAO-UNESCO (60%) data are the most preferred data sources for the digital elevation map, land use, and soil type spatial inputs required by the SWAT model, respectively. For the climate data, which is the temporal model input, data sources belonging to MGM (65%) are mostly used. Also, DSI data source is the most preferred (65%) one for flow data to calibrate the model. Most of the calibration and validation results for these studies show satisfactory results based on widely recognized performance indicators.

Keywords: SWAT, Turkey, Watershed modelling, Hydrology, Water Quality.

1. Giriş

Su havzaları içerisindeki toprak-su-hava ilişkisini ortaya koymak, havzanın iyi tanınması ve geleceğe yönelik yönetim planlarının belirlenebilmesi açısından önemlidir. Bir havzadaki hidrolojik süreçlere ait mekanizmaları açıklamak ve havza sisteminin farklı girdiler altında vereceği tepkileri tahmin edebilmek için matematiksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır (Fıstıkoğlu, 1999). Hidrolojik modeller, bir su havzasındaki hidrolojik döngüyü ve buna bağlı fiziksel süreçleri doğru analiz edebilmek için kullanılan en önemli araçlardır. Bu ihtiyaca yönelik oluşturulan modeller karmaşık bir yapıda olan havza sistemini basitleştirmek için kullanılmaktadır. 19. yüzyılda Mulvaney (1850) tarafından ortaya atılan rasyonel metot hidrolojik modellerin en eski türlerinden birisidir. Havza sisteminin bilgisayar ortamında matematiksel ifadelerle temsil edilmesi 1960'lı yıllarda Crawford ve Linsley (1966) tarafından geliştirilen SWM (Stanford Watershed Model) ile başlamıştır. Sonraki yıllarda ise havza sistemini farklı amaç ve metotlar ile temsil edebilmek için birçok bilgisayar destekli hidrolojik model geliştirilmiştir (Singh ve Woolhiser, 2002).

Hidrolojik modeller, literatürde farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Chow ve diğ. (1988) hidrolojik modelleri, deterministik ve stokastik olarak iki ana sınıfa ayırarak bunları da kendi içerisinde tümsel, dağılımlı, kararlı akım, kararsız akım, zaman ve yere bağlılık olarak gruplandırmıştır. Bir başka sınıflandırma da tümsel, yarı dağılımlı ve tam dağılımlı olarak Cunderlik (2003) tarafından yapılmıştır. Devia (2015) tarafından ampirik (kapalı kutu), kavramsal ve fiziksel tabanlı modeller olarak genel bir sınıflandırma yapılmıştır. Günümüzde, dünyanın farklı bölgelerinde farklı hidrolojik modeller kullanılarak yapılan çok sayıda araştırma çalışması bulunmaktadır.

Su kaynaklarının planlanması ve tasarımı aşamalarında, geçmişte geniş bir kullanım alanına sahip olan istatistiksel modellerin yerini günümüzde bilgisayar destekli matematiksel modeller almıştır. Literatüre bakıldığında birçok farklı matematiksel model, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamlarında çalıştırılıp kullanılabilir (Singh ve Woolhiser, 2002). Ayrıca, uzaktan algılama metotlarının bu modeller ile bütünleşik kullanımı da son zamanlarda sıkça uygulanmaktadır (Thakur ve diğ., 2016). Fiziksel tabanlı girdiler ile CBS ortamlarında çalışabilen bir yazılıma sahip SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modeli, içerisinde çeşitli bütünleşme uygulamaları geliştirilebilen bir havza modeli örneğidir.

SWAT modeli gerek hidrolojik süreçlerin modellenmesinde gerekse havzadaki kirlilik taşınımına ait süreçleri içermesi sebebiyle son yıllarda en yaygın kullanılan modellerden biri olmuştur. Literatürde SWAT modeli kullanılarak farklı ülkelerdeki su havzalarında yapılan birçok modelleme çalışması farklı odaklarda birleştirilerek değerlendirilmiştir. Gassman ve diğ. (2007) yaptıkları geniş çaplı derlemede 250 farklı makale çalışmasının analizi ile bu çalışmaları kapsamları bakımından özetleyerek SWAT'ın üstünlük ve eksikliklerini ortaya koymaktadır. Bressiani ve diğ. (2015) Brezilya'da, Tan ve diğ. (2019) Güneydoğu Asya'da, Akoko ve diğ. (2021) Afrika kıtasında yapılan SWAT ile ilgili çalışmaları değerlendirmiştir. Van Griensven ve diğ. (2012) Nil Nehri havzaları özelindeki SWAT çalışmalarının başarısını analiz etmiştir. Francesconi ve diğ. (2016), daha önce yapılan SWAT inceleme çalışmalarını göz önünde bulundurarak çalışma kapsamlarını sistematik olarak tartışmıştır. Brighenti ve diğ. (2019) günlük zaman adımından daha küçük zaman adımında gerçekleştirilen 28 farklı SWAT çalışmasını kapsamları bakımından incelemiştir. Tan ve diğ. (2021) farklı küresel iklim verilerinin SWAT modelinde kullanılabilirliğini

126 farklı makale çalışmasını inceleyerek değerlendirmiştir. Böylece, çalışmalarda kullanılan küresel iklim girdisinin ülkelerdeki dağılımını ortaya koyarak, verilerin kullanımına ilişkin gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur. Yapılan tüm derleme çalışmalarında, SWAT modelinin dünya üzerinde farklı özellikteki birçok havzada, farklı birçok çalışma kapsamı için başarılı bir şekilde uygulanabilir olduğu görülmektedir.

Dünya genelinde yaygın bir kullanıma sahip olan SWAT modelinin ülkemizde yapılan havza modelleme çalışmalarındaki kullanımı da giderek artmaktadır. Bu makalede SWAT modelinin Türkiye'deki uygulamaları dikkate alınmıştır. Makale kapsamında öncelikle SWAT modelinin tarihçesi, genel özellikleri ve kullanıma yardımcı araçlar tanımlanmış daha sonra modelin ülkemizdeki uygulamaları değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, modelin uygulandığı havzalar, kullanılan veri setleri, kalibrasyon yardımcı yazılımları ve çalışma kapsamı bakımından incelenmiştir. İncelenen modelleme çalışmalarına ait kalibrasyon ve validasyon (model performans) sonuçları yaygın olarak tanınan ve literatürde önerilen (Moriasi ve diğ., 2007) performans göstergeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, SWAT modelinin Türkiye'deki uygulamalarının genel çerçevesi, uygulama yöntemi ve çalışma kapsamı çeşitliliği açısından modelin üstünlük ve eksiklikleri tartışılmıştır. Bu çalışmanın bir diğer amacı ise SWAT modeli hakkındaki genel bilgilerin ana dilimizde verilerek modelin Türkiye'de yapılmış uygulamalarını içeren sistematik bir kaynak oluşturulmasıdır.

2. SWAT Modeli

2.1 Modelin tarihsel gelişimi

SWAT modeli USDA (Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı) tarafından geliştirilmiş fiziksel tabanlı, sürekli (ıslak ve kurak dönemleri kapsayan uzun bir periyotta sonuçlar veren) ve yarı dağılımlı (mekânsal olarak alt havza ve daha küçük işlem birimleri bazında sonuçlar verebilen) bir havza modelidir (Arnold ve diğ., 1998; Neitsch ve diğ., 2011; Neitsch ve diğ., 2012). Dünya genelinde SWAT modelinin, farklı iklim kuşaklarındaki değişik coğrafi koşullara sahip, tarla ölçeğinden havza ölçeğine değişen boyutlardaki alanlarda farklı disiplinlerce başarılı uygulamaları ortaya konulmuştur. SWAT modeli, su kaynakları modellemesi, iklim ve arazi kullanımı değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkisinin incelenmesi, yayılı yük hesaplamaları ve en iyi yönetim uygulamaları ile su kalitesi odaklı araştırmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Gassman ve diğ., 2007).

SWAT yaklaşık 40 yıldır geliştirilmekte olan bir model olup modelin temeli daha önce USDA tarafından geliştirilmiş olan CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel, 1980), GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) (Leonard ve diğ., 1987) ve EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) (Williams, 1990; Izaurrealde ve diğ., 2006) modellerine dayanmaktadır. Mevcut SWAT modelinin temeli ise akım gözlem istasyonu bulunmayan kırsal havzalardaki uygulamaların havza hidrolojisi üzerine etkilerinin ve sediment hareketlerinin incelenmesi amacıyla geliştirilen SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) modeline (Arnold ve Williams, 1987) dayanmaktadır. Modele Arnold ve diğ. (1995) tarafından geliştirilen öteleme bileşeni ROTO (Routing Outputs to the Outlet) ve su kalitesi bileşeni QUAL2E (Enhanced Stream Water Quality Model) (Brown ve Barnwell, 1987) eklenmiştir. SWAT modelinin tarihsel gelişimi Şekil 1'de gösterilmektedir (Gassman ve diğ., 2007). SWAT modeli havzadaki akım ve kirlenim taşınımının ve en iyi yönetim uygulamalarının daha başarılı

modellenebilmesi için yeniden yapılandırılarak SWAT+ adı altında geliştirilmeye devam etmektedir (Bieger ve diğ., 2017).

2.2 Modelin genel özellikleri

SWAT modeli temel girdileri mekânsal ve zamansal olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Topoğrafya, arazi kullanımı ve toprak haritaları mekânsal veri setleri olup HİB (Hidrolojik İşlem Birimi) adı verilen en küçük model bileşenlerini oluşturmak için kullanılmaktadır. HİB, bu üç mekânsal girdiye bağlı olarak oluşturulan, modelin su bütçesi hesaplarını yaptığı en küçük alansal bileşendir. Bunun yanında SWAT modeli iklim zaman serilerine ihtiyaç duymaktadır. Bu veriler yağış, en yüksek/en düşük sıcaklık, nispi nem, güneş ışınımı ve rüzgâr hızıdır. Bahsi geçen dört temel veri (topoğrafya, arazi kullanımı, toprak haritası ve iklim) modelin çalıştırılabilmesi için gereklidir.

SWAT modeli, kara süreçleri ve öteleme fazı olmak üzere temel olarak iki kısımda hidrolojik süreçleri simüle etmektedir. Modelde dikkate alınan hidrolojik döngüye ait fiziksel süreçler Şekil 2'de gösterilmektedir.

SWAT modelinde hidrolojik döngüyü temsil eden su dengesi eşitliği Denklem 1'deki gibidir (Neitsch ve diğ., 2011). Modelde dikkate alınan temel hidrolojik süreçler Şekil 3'te basitleştirilerek gösterilmektedir.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - \omega_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

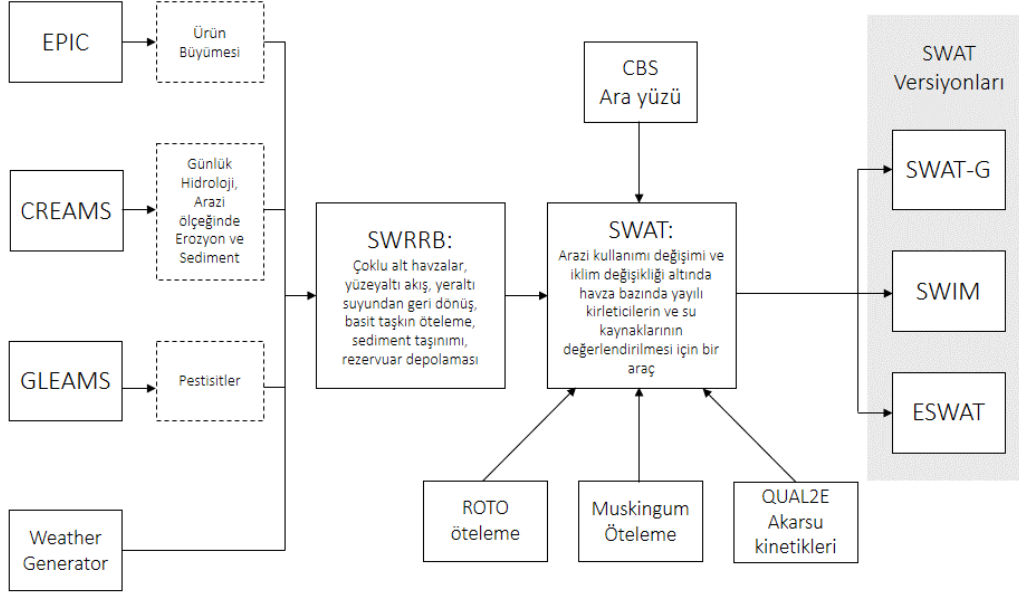
Bu eşitlikte yer alan SW_t toprağın su içeriğini (mm); SW_0 başlangıçtaki toprağın su içeriğini (mm); R_{day} yağış miktarını (mm); Q_{surf} yüzeyel akışa geçen su miktarını (mm); E_a evapotranspirasyon (terleme ve buharlaşma) miktarını (mm); ω_{seep} vadoz zona sızan su miktarını (mm); Q_{gw} yer altı su beslemesini (mm) ifade etmektedir.

SWAT modeli yüzeyel akışı SCS (Soil Conservation Service) yöntemi veya Green-Ampt sızma denklemi ile hesaplayabilmektedir (Neitsch ve diğ., 2011). Modelde süzülme (perkolasyon) her bir toprak tabakası için hesaplanmaktadır. SWAT yanal yüzey altı akışı ve sığ akiferden akarsuya katılan akışı simüle edebilmektedir. SWAT modelinde potansiyel evapotranspirasyon

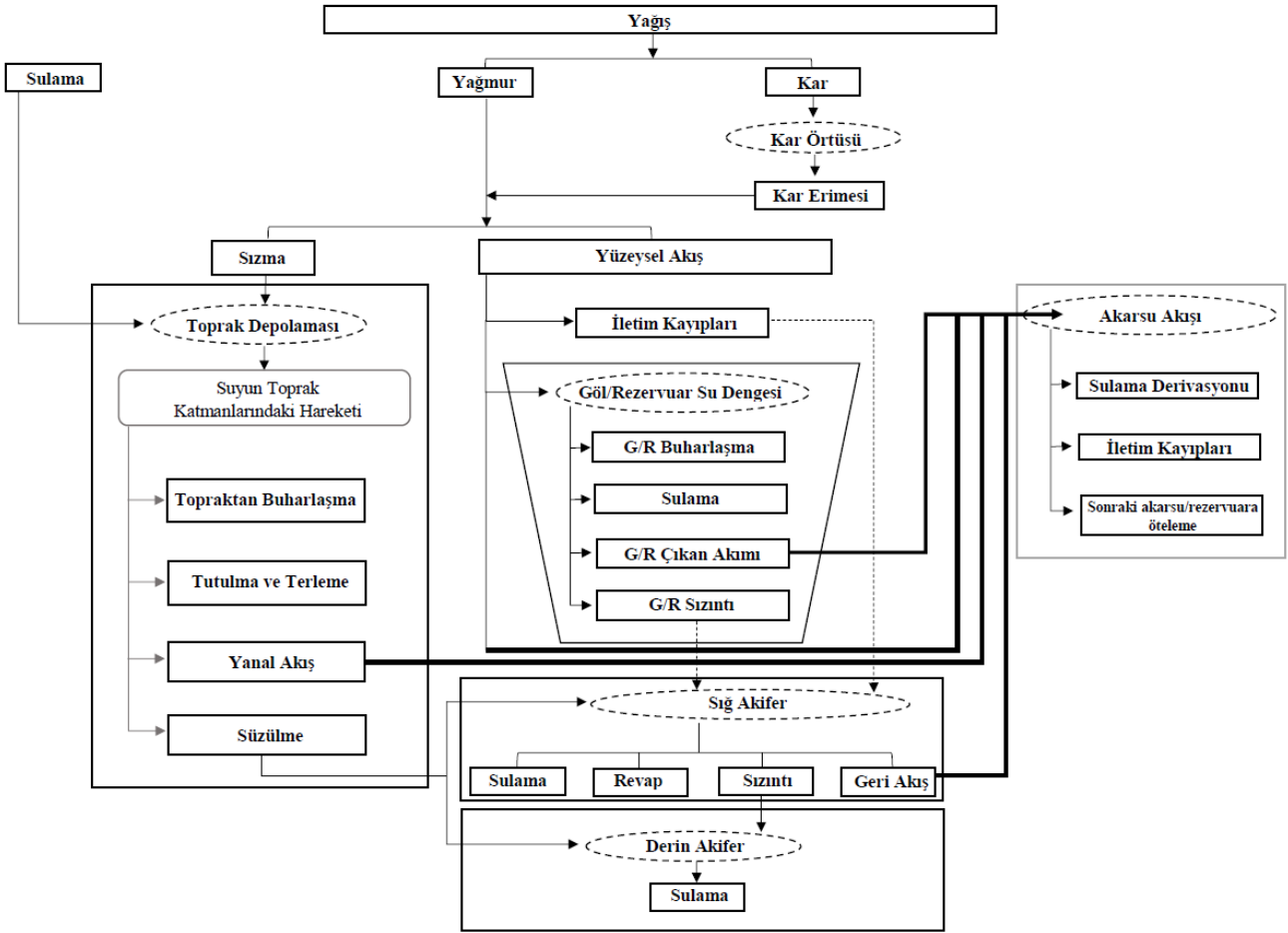
hesaplamaları için Hargreaves (Hargreaves ve diğ., 1985), Priestly-Taylor (Priestly ve Taylor, 1972) ve Penman-Monteith (Monteith, 1965) yöntemleri bulunmaktadır. SWAT kar erimesi, akarsu kanalından sızma, su biriktirme ve göletlerden sızma süreçlerini de modelleyebilmektedir. SWAT modeli ile ilgili daha fazla bilgi ve ayrıntı modelin teorik dokümantasyonu (Neitsch ve diğ., 2011) ve kullanım kılavuzunda (Neitsch ve diğ., 2012) verilmektedir.

SWAT modeli, su bütçesi hesaplamalarının (yüzeysel ve yer altı suyu bileşenleri) yanında nütrient (azot ve fosfor gibi), sediment ve pestisit değişkenlerini de modelleme kapasitesine sahip bir modeldir. Azot döngüsü su, atmosfer ve toprak fazlarında gerçekleşen dinamik bir sistem olup özellikle bitki büyüme süreçlerinde önemli bir yer tutmaktadır. SWAT modelinde azot döngüsüne ait biyokimyasal süreçler toprakta ve sığ akiferde hesaplanmaktadır. Modelin dikkate aldığı azot döngüsü Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu kapsamda nitrifikasyon, denitrifikasyon, mineralizasyon, amonyak uçuculuğu, azot fiksasyonu, gübreleme, yer altı suyuna sızma süreçleri dikkate alınmaktadır. Bitki büyüme süreçlerinde fosfor, en az azot kadar önemli ve gerekli bir besin elementi olup özellikle enerji elde edilmesi ve depolanmasında kritik bir rol oynamaktadır. SWAT modeli fosfor döngüsü ve süreçleri Şekil 5'te gösterilmektedir. Nütrient (azot ve fosfor) ve pestisit modelleme süreçlerine ait matematiksel denklemler model teorik dokümantasyonu (Neitsch ve diğ., 2011) ve kullanım kılavuzunda (Neitsch ve diğ., 2012) ayrıntıları ile verilmektedir.

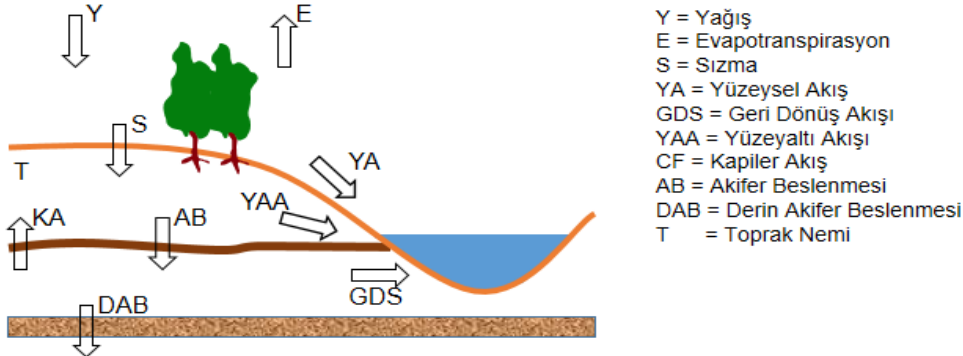
SWAT modeli için gerekli olan iklim girdileri saatlik veya günlük zaman periyodunda olabilmektedir. Ancak modelde çoğunlukla tercih edilen SCS yöntemi model için gerekli olan yağış verisini günlük zaman adımında kullanmaktadır. Model, yağış ve sıcaklık verilerinin yanında isteğe bağlı olarak nispi nem, güneş ışınımı ve rüzgâr hızı verilerine de ihtiyaç duymaktadır. Bu veri setleri potansiyel evapotranspirasyon hesaplama seçeneklerinden Penman-Monteith yönteminin tercih edilmesi durumunda gereklidir. Diğer yöntemler (Priestly-Taylor ve Hargreaves) yalnızca minimum ve maksimum sıcaklık girdileri ile çalışabilmektedir. Bu model girdileri, her havza modelinde olduğu gibi SWAT modeli için de çalışma alanlarındaki hidrolojik çevrim süreçlerini temsil edecek matematiksel denklemlerin ortaya konulmasında gereklidir.



Şekil 1. SWAT modelinin tarihsel gelişimi ve modelin bazı adaptasyonları.

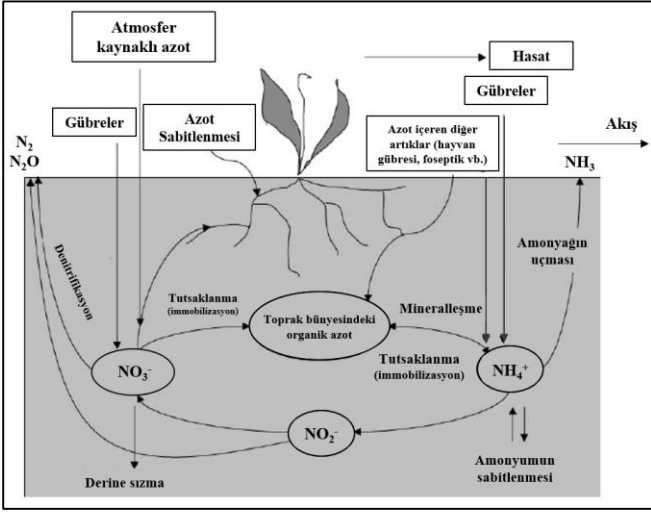


Şekil 2. SWAT modelinde dikkate alınan fiziksel süreçler (Neitsch ve diğ., 2011).



Şekil 3. SWAT modelinde dikkate alınan temel hidrolojik süreçler (Cüceloğlu, 2019).

(Geographic Resources Analysis Support System) (Srinivasan and Arnold, 1994) yazılımının ardından MWSWAT, ArcSWAT ve QSWAT kullanıcılara sunulmuştur. MWSWAT arayüzü açık kaynak kodlu ve ücretsiz olarak dağıtılan MapWindow CBS yazılımı üzerinde çalışmaktadır. Ancak bu arayüzün geliştirilme süreci durdurulmuştur ve yazılım güncellenmemektedir. MWSWAT'ın özellikleri QSWAT arayüzüne aktarılmış olup model geliştiricileri tarafından bu sürümün kullanılması önerilmektedir. ArcSWAT ve QSWAT günümüzde en sık tercih edilen grafiksel kullanıcı arayüzleridir. ArcSWAT, ESRI (Environmental Systems Research Institute) tarafından geliştirilen ve ücretli bir yazılım olan ArcGIS CBS programı üzerinde bir eklenti olarak çalışmaktadır. Bir diğer yazılım QSWAT (Dile ve diğ., 2016), QGIS ortamı üzerinde çalışmaktadır. QGIS ortamının açık kaynak kodlu ve ücretsiz olması, ayrıca son yıllarda bu arayüzde karşılaşılan problemlerin azaltılması ile birlikte QSWAT'ın geniş bir kullanıcı kitlesi olmuştur. Söz konusu arayüzlerden ArcSWAT yalnızca Windows işletim sistemi üzerinde çalışırken QSWAT hem Windows hem de diğer (Linux ve Mac-OS) işletim sistemleri üzerinde çalışmaktadır.

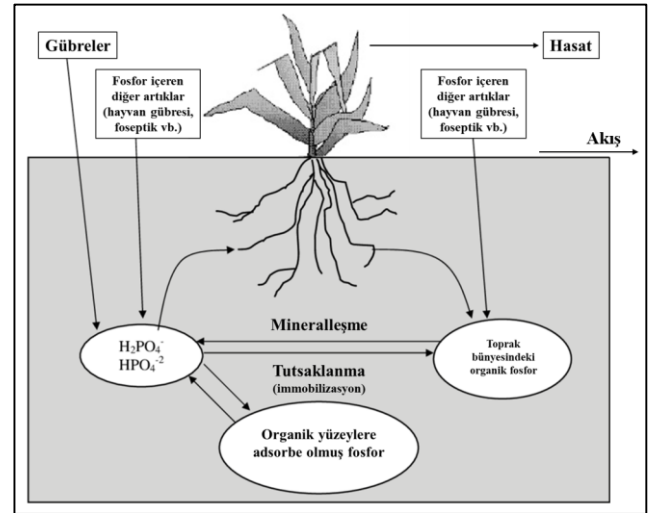


Şekil 4. SWAT modelinde dikkate alınan azot döngüsü (Neitsch ve diğ., 2011).

2.3 Model arayüzleri ve kalibrasyon yardımcı yazılımları

SWAT modeli FORTRAN (FORMula TRANslation) dilinde yazılmış olup bu dildeki kodların derlenmesi sonucu oluşturulan .exe uzantılı dosya ile çalıştırılabilmektedir. Sözü edilen .exe uzantılı dosya ise gerekli girdi dosyaları (file.cio, .fig, .mgt, .hru vb.) ile birlikte çalıştırılmaktadır. Bu girdi dosyalarının içerikleri, formatları ve model parametreleri ile ilgili ayrıntılar modele ait girdi/çıkış dokümantasyonunda verilmektedir (Neitsch ve diğ., 2012). SWAT modelinin çalıştırılabilmesi için gerekli girdi dosyaları bir metin düzenleyicisi aracılığı ile oluşturulabilir. Bunun yanı sıra geliştirilen yazılım veya araçlar ile model girdi/çıkış dosyalarına müdahale edilebilmektedir. Cercosova ve diğ. (2018) tarafından geliştirilen MATLAB kodları (SWAT-LAB) ile HİB'ler oluşturabilmekte, ayrıca model kalibrasyonu sırasında ilgili parametreler bu araç yardımı ile değiştirilebilmektedir. SWAT modelinin metin dosyaları üzerinden oluşturulması kodlama becerisi ve SWAT modeli girdi/çıkış düzenine üst derecede hâkim olmayı gerektirmektedir.

Gelişen coğrafi bilgi sistemi teknolojilerine paralel olarak SWAT modelinin CBS ortamlarında kolaylıkla kullanımına olanak sağlayan çeşitli yazılımlar geliştirilmiştir. Kolay kullanılabilir arayüzleri sayesinde model kurulumu, parametre değişiklikleri ve model sonuçlarının gösterimi CBS ortamları üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Bu yazılımlar kullanıcıdan aldıkları verileri SWAT modeli (.exe dosyası) için uygun formatta yazabilmektedir. Kullanım kolaylığı ve görselleştirme işlemlerine olanak sağlaması sebebi ile modelin kullanıcıları çoğunlukla bu arayüzleri tercih etmektedirler. İlk CBS arayüzü olan SWAT/GRASS



Şekil 5. SWAT modelinde dikkate alınan fosfor döngüsü (Neitsch ve diğ., 2011).

SWAT modelinin kalibrasyonu manuel veya otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Kullanıcılar, model parametrisasyonunu model girdi dosyaları üzerinden veya arayüz seçeneklerini kullanarak el ile yapabilmektedir. Ancak SWAT modelinin çok sayıda parametre ve model girdi dosyasına sahip olması otomatik olmayan yöntemlerle model kalibrasyonunu güçleştirmektedir. Bu güçlüklerin önüne geçebilmek amacıyla, model kalibrasyonunu otomatik gerçekleştirebilen yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımların büyük kısmı kullanıcıların kendi yazılım tekniklerini ve

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

optimizasyon algoritmalarını kullanarak geliştirdikleri programlar olup genellikle diğer kullanıcıların kullanımına açık olmamaktadır.

SWAT-CUP (SWAT-Calibration and Uncertainty Program) (Abbaspour ve diğ., 2007; Abbaspour, 2015), SWAT modeline özel kalibrasyon, parametre hassasiyeti ve belirsizlik analizleri yapılmasına olanak sağlayan bir programdır. Bu program kullanıcı dostu arayüzü, detaylı dokümantasyonu, birden çok optimizasyon algoritmasını bünyesinde barındırması ve ücretsiz olması sebebi ile (2020 yılına kadar) kullanıcılar tarafından en çok tercih edilen programdır. SWAT-CUP, SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting 2) (Abbaspour ve diğ., 2004; Abbaspour ve diğ., 2007), ParaSol (Parameter Solution) (van Griensven ve Meixner, 2006), PSO (Particle Swarm Optimization), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) (Beven ve Binley, 1992) ve MCMC (Markov Chain Monte Carlo) (Kuczera ve Parent, 1998; Vrugt ve diğ., 2003; Marshall ve diğ., 2004; Yang ve diğ., 2007) optimizasyon algoritmaları ile çalışabilmektedir. SWAT-CUP programı kaynak kodları açık kaynak kodlu olmamakla birlikte yazılım yalnızca Windows işletim sisteminde çalışmaktadır.

Son yıllarda kullanımı yaygınlaşan SWATplusR programı (Schuerz, 2019) R dilinde geliştirilmiş hem SWAT2012 (temel SWAT sürümü) hem de SWAT+ (güncel sürüm) modelinin kalibrasyonunda ve hassasiyet analizlerinde kullanılan bir yazılımdır. Yazılım açık kaynak kodlu ve ücretsiz dağıtılmaktadır. SWAT+ modeli ile birlikte varsayılan bir kalibrasyon aracı da sağlanmaktadır. Söz konusu son iki kalibrasyon aracının birden çok işletim sisteminde çalışabilmesi ve diğer kullanıcılar tarafından da geliştirilebilmesi gibi özellikler sayesinde yaygın kullanıma ulaşacağı beklenmektedir.

SWATshiny (<https://github.com/tamnva/SWATshiny>) interaktif web tabanlı geliştirilen açık kaynak kodlu, ücretsiz bir diğer kalibrasyon yazılımıdır. Yazılımın grafik arayüzü kullanıcılara kolaylık sağlamaktadır. SWATshiny başlangıç seviyesindeki kullanıcılardan ileri seviyedeki kullanıcıların kullanabileceği şekilde tasarlanmıştır. 2022 yılı itibarı ile program ile ilgili bir makale bulunmamaktadır. SWAT modeline ait internet sayfasındaki yardımcı araçlar kısmından programa ulaşabilmektedir.

IPEAT+ (Integrated Parameter Estimation and Uncertainty Analysis Tool Plus), SWAT2012 ve SWAT+ programları için geliştirilen bir diğer otomatik kalibrasyon ve belirsizlik analiz programıdır (Yen ve diğ., 2019). Yazılım açık kaynak kodlu ve ücretsizdir. IPEAT+ yazılımının en önemli üstünlüğü SWAT modeli geliştirici ekibi ile birlikte SWAT+ modeline bütünlük bir biçimde geliştirilmiş olmasıdır. Bu kapsamda yazılım FORTAN dilinde yazılmış, model kodlarının içine bütünlüklerle ve SWAT+ modeli ile birlikte derlenerek tek bir yürütülür dosya ile çalıştırılmaktadır. Bu da model kalibrasyonunun oldukça hızlı gerçekleştirilebilmesine olanak sağlamaktadır. IPEAT+ ile ilgili daha fazla ayrıntı Yen ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada verilmektedir.

2.4 Model sürümleri

SWAT modelinin temelinde SWAT2012 ve SWAT+ olmak üzere iki ana sürümü bulunmaktadır. Bu sürümlere ait alt sürümler de bulunmaktadır ancak bu alt sürümlerde yapısal ve formatsal büyük farklılıklar vardır. SWAT modeli sürümlerinin gelişmeleri modele ait web sayfası (<https://www.swat.tamu.edu/>) üzerinden takip edilebilmektedir. SWAT2012 ve SWAT+ sürümlerinin model girdi/çıkı düzeni tamamen farklıdır. SWAT+ modelinde havza sisteminin mekânsal temsili daha ayrıntılı hale getirilmiştir. SWAT+ modelinde veri girdi yapısı değiştirilmiş ve algoritma kodları optimize edilerek model hızı artırılmıştır (Bieger ve diğ., 2017). Model arayüzü (QSWAT+) mevcut durumda yalnızca QGIS

programı üzerinde çalışmaktadır. SWAT+ modeli ve model kalibrasyon sürecine yardımcı programların geliştirilme süreci devam etmektedir (Arnold ve diğ., 2018; Yen ve diğ., 2019; Bieger ve diğ., 2019).

3. Literatür Araştırması

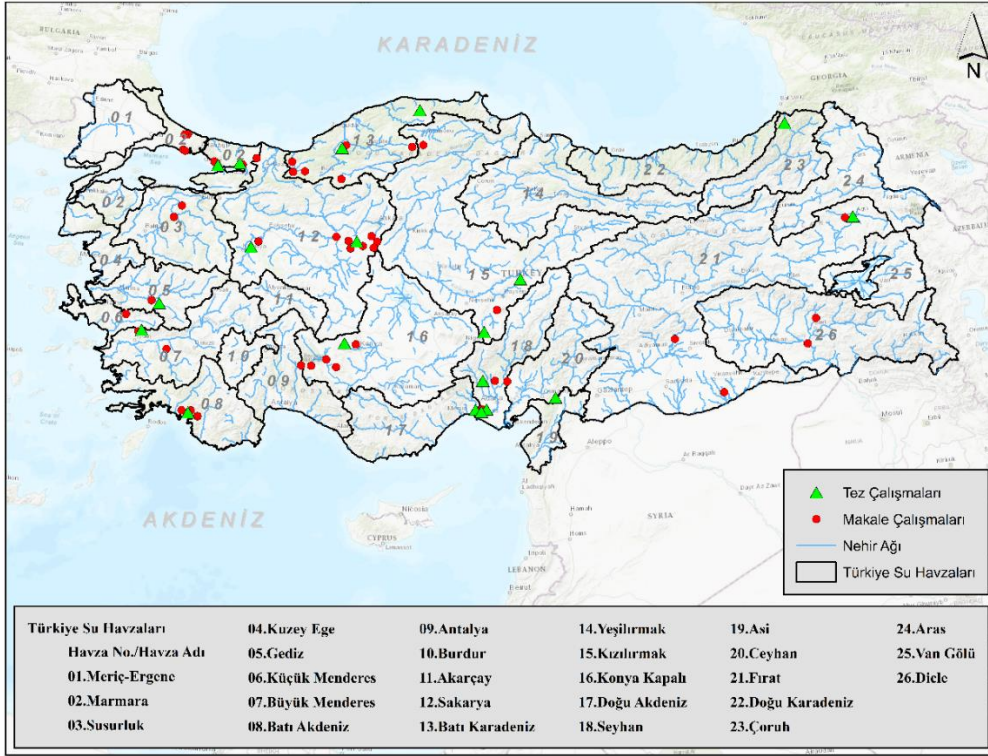
Bu çalışmada SWAT modelinin Türkiye'deki uygulamaları, ulusal tez veri tabanında yer alan çalışmalar (yüksek lisans veya doktora tezleri) ile ulusal/uluslararası hakemli bilimsel dergilerde yayınlanmış makaleler olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Farklı kapsam ve amaçları olan bu yayınların tümünde havza modelleme aracı olarak SWAT tercih edilmiştir. Akademik tarama indeksleri dışındaki yayınlar ve çeşitli bölgesel konferans ve toplantılarda yapılan bildirimler bu çalışma kapsamında dikkate alınmamıştır. Şekil 6'da Türkiye'deki 26 ana su havzasına ait sınırlar ve incelenen tüm çalışmalara ait uygulama alanları gösterilmektedir. Şekil 7'de yıllara göre dağılımı gösterilen bu çalışmalar, 2008 ve 2022 yılları arasında yayınlanan 46 makale ve 19 tez çalışması olmak üzere toplam 65 bilimsel çalışmadan oluşmaktadır (Tablo 1). Literatür araştırmasında dikkate alınan yayınlar kullanılan veri kaynakları, modelleme çalışmalarının kapsamı ve model performansı olmak üzere üç ana başlık altında incelenmiştir.

3.1 Kullanılan veri kaynakları

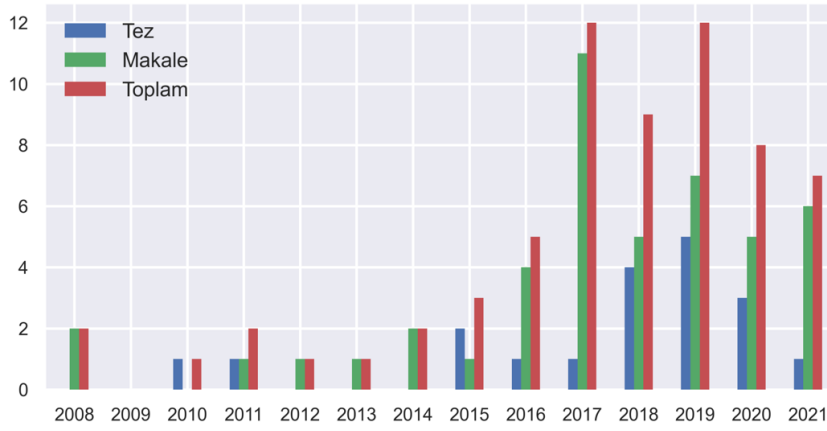
Temel olarak mekânsal (topoğrafya, arazi kullanımı ve toprak tipi) ve zamansal (yağış, en yüksek/en düşük sıcaklık, nispi nem, güneş ışınımı ve rüzgâr hızı) SWAT modeli girdileri için araştırmacılar, uygulama alanlarında özel ölçümler yapmanın yanı sıra küresel veya bölgesel çapta üretilmiş açık kaynaklı veri setlerinden de faydalanmıştır (Tablo 2). Ayrıca, Türkiye'deki çeşitli bakanlık ve kuruluşlar tarafından üretilmiş, bilimsel çalışmalarda kullanılmak üzere temin edilebilen veri setleri de bu çalışmalarda model girdisi olarak kullanılmıştır (Tablo 3). Ancak kullanılan verilerin çoğunluğunun özellikle küresel veya bölgesel çapta üretilmiş açık kaynaklı veriler olduğu görülmüştür. SWAT modeli için hazırlanmış veya daha önce başarı ile kullanılmış veri setleri hem kullanım kolaylığı hem de daha az ön işlem gerektirmesi sebebi ile kullanıcılar tarafından tercih edilmiştir. Bu bölümün alt başlıklarında model kurulumu için gerekli olan veri setleri incelenmiştir.

3.1.1 Sayısal yükseklik verisi

SWAT model kurulumunda, havza drenaj ağının belirlenebilmesi (akarsu çizgileri, eğim ve uzunlukları vb.) ve buna bağlı olarak alt havzalara bölünme şeklinin ortaya konabilmesi için bir SYM (Sayısal Yükseklik Modeli) verisi gereklidir. Ayrıca, modelin su bütçesi bileşenlerini hesaplamak için kullandığı HİB'lerin oluşturulmasındaki katmanlardan birisi, modele girilen SYM'den üretilen eğim haritasıdır. Bu katman sayesinde her bir HİB için eğim hesaplanabilmektedir. Türkiye'ye ait açık kaynaklı ve ücretsiz bir SYM veri tabanının bulunmayışı araştırmacıları farklı ülkeler tarafından sağlanan kaynaklara yönlendirmiştir. Ülkemizdeki SWAT modeli uygulamalarında, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ASTER-GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model) ve USGS (United States Geological Survey) verilerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (Şekil 8-a). Bu sayısal yükseklik modelleri ücretsiz paylaşılmaktadır. Çözünürlükleri 30 m ve 90 m olan bu verilerin çoğunun çalışma alanında yeterli olduğu görülmüştür. Genellikle yüz ölçümü küçük olan çalışma alanlarında ise kullanılan SYM verisinin çözünürlüğü nehir drenaj ağını doğrudan etkilemektedir. Bu tür çalışma alanlarında araştırmacılar kendi ürettikleri veriyi veya yerel belediyeler tarafından üretilmiş verileri tercih etmektedirler. Bu verilerin haricinde, HGM (Harita Genel Müdürlüğü) tarafından üretilmiş çözünürlüğü yüksek dijital arazi modeli de bazı



Şekil 6. Türkiye'de SWAT kullanılarak yapılan inceleme dahilindeki çalışmaların konumları.



Şekil 7. Dikkate alınan çalışmaların yıllara göre dağılımı (2008'den günümüze).

3.1.2 Arazi kullanımı ve toprak tipi verisi

SWAT modeli kurulumunda topoğrafyaya bağlı eğim verisinin yanında arazi kullanımı ve toprak tipi verileri, modele ait HİB'lerin oluşturulması için gereklidir. Yüzeysel akış, sızma, yer altı suyu akışı gibi önemli hidrolojik süreçleri doğrudan etkileyecek olan arazi kullanımı ve toprak özellikleri, çalışma alanının SWAT modeli ile temsil edilebilme kabiliyetini artıran fiziksel tabanlı model girdileridir. İncelenen çalışmalarda araştırmacıların SWAT modeli kurulumunda arazi kullanımı verisi elde edebilmek için çeşitli uzaktan algılama yöntemlerini kullandıkları görülmüştür. Bunlar arasında, LANDSAT, IKONOS (Yunanca 'imge') ve SPOT7 (Satellite Pour l'Observation de la Terre) gibi uyduların sağladıkları görüntüler kullanılmıştır (Şekil 8-b). Ayrıca, CORINE (Coordination of Information on the Environment), GLC2000 (Global Land Cover 2000) ve GLOBCOVER (Global Land Cover Map) verileri sıkça tercih edilen açık kaynaklı arazi kullanımı verileridir. TOB (Tarım ve Orman Bakanlığı), OSİB

(Orman ve Su İşleri Bakanlığı) veya KHGM (Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü) tarafından temin edilmiş arazi örtüsü haritaları da bazı çalışmalarda girdi olarak tercih edilmiştir. Göz önünde bulundurulmuş modelleme uygulamalarında, arazi kullanımı bilgisi için en sık tercih edilen veri kaynağının EEA (European Environment Agency) tarafından sağlanan CORINE verisi olduğu belirlenmiştir (Şekil 8-b).

Dikkate alınan çalışma alanlarındaki toprak özelliklerinin incelenmesinde ise en sık kullanılan açık kaynaklı veri FAO-UNESCO (Food and Agricultural Organization-United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) tarafından üretilmiş HWSD (Harmonized World Soil Database) verisidir. Bazı çalışmalarda ise araştırmacılar, çalışma alanlarında kendi yaptıkları özel ölçümler ile toprak özelliklerini belirlemişlerdir. Ayrıca TOB, OSİB veya KHGM ve Büyükşehir Belediyeleri tarafından üretilmiş haritaların da çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir (Şekil 8-c). Her ne kadar Türkiye'de bulunan BTG (Büyük Toprak Grupları) ülke düzeyinde haritalanmış ve alansal dağılımları hesaplanmış olsa da

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

(Karabalut ve diğ., 2011), araştırmacıların SWAT modeli için bu veri kaynağı yerine FAO tarafından sağlanan veriyi tercih ettikleri görülmüştür. FAO verisine ait toprak özelliklerinin

SWAT modeline entegrasyonunun nispeten daha kolay yapılıyor olması bu durumun sebebi olarak düşünülmektedir.

Tablo 1. İncelenen çalışmalara ait bilgiler.

Yazar(lar) ve yayın yılı	Tür	Çalışma Alanı	Ana Havza
Dogan ve Karpuzcu (2021)	Makale (Uluslararası dergi)	Terkos Havzası	Marmara Havzası
Oruç (2021)	Yüksek Lisans Tezi	Saz Deresi Havzası	Marmara Havzası
Özdemir (2021)	Makale (Ulusal dergi)	Yuvacık Havzası	Sakarya Havzası
Koycegiz ve diğ. (2021)	Makale (Uluslararası dergi)	Çarşamba Çayı Havzası	Konya Kapalı Havzası
Swalih ve Kahya (2021)	Makale (Uluslararası dergi)	İkizdere Havzası	Doğu Karadeniz Havzası
Peker ve Sorman (2021)	Makale (Uluslararası dergi)	Murat ve Karasu Havzaları	Fırat Havzası
Cuceloglu ve diğ. (2021)	Makale (Uluslararası dergi)	Ömerli Barajı Havzası	Marmara Havzası
Esen ve Hein (2020)	Makale (Uluslararası dergi)	Büyük Menderes Havzası	Büyük Menderes Havzası
Coppens ve diğ. (2020)	Makale (Uluslararası dergi)	Mogan Gölü Havzası	Sakarya Havzası
Yalçın, E. (2020)	Makale (Ulusal dergi)	Bitlis Çayı Havzası	Dicle Havzası
Akbas, M.A.A. (2020)	Makale (Uluslararası dergi)	Susurluk Havzası	Susurluk Havzası
Donmez, C. ve diğ. (2020)	Makale (Uluslararası dergi)	Aşağı Seyhan Havzası	Seyhan Havzası
Dutal, H. (2020)	Doktora Tezi	Körsulu Deresi Havzası	Ceyhan Havzası
Peker, İ.B. (2020)	Yüksek Lisans Tezi	Murat ve Karasu Havzaları	Fırat Havzası
Askar, M.A.A. (2020)	Yüksek Lisans Tezi	Seyhan Havzası	Seyhan Havzası
Ajaaj, A.A. ve diğ. (2019)	Makale (Uluslararası dergi)	Dicle Havzası	Dicle Havzası
Özdemir, K. ve Güngör, Ö. (2019)	Makale (Ulusal dergi)	Filyos Çayı Havzası	Batı Karadeniz Havzası
Cuceloglu, G. ve Ozturk, I. (2019)	Makale (Uluslararası dergi)	Melen Havzası	Sakarya Havzası
Saddiği, M.M. ve Karpuzcu, M.E. (2019)	Makale (Ulusal dergi)	Küçük Menderes Alt Havzası	Küçük Menderes Havzası
Yalcin, E. (2019)	Makale (Uluslararası dergi)	Garzan Çayı Havzası	Dicle Havzası
Sertel, E. ve diğ. (2019)	Makale (Uluslararası dergi)	Büyükçekmece Gölü Havzası	Marmara Havzası
Koycegiz, C. ve Buyukyildiz, M. (2019)	Makale (Uluslararası dergi)	Çarşamba Havzası	Konya Kapalı Havzası
Kabal, C. (2019)	Yüksek Lisans Tezi	Gürdük Havzası	Gediz Havzası
Cüceloğlu, G. (2019)	Doktora Tezi	İstanbul Su Havzaları	Marmara Havzası
Baltacı, E. (2019)	Yüksek Lisans Tezi	İnebolu Havzası	Batı Karadeniz Havzası
Saddiği, M.M. (2019)	Yüksek Lisans Tezi	Küçük Menderes Alt Havzası	Küçük Menderes Havzası
Jouma, N. (2019)	Yüksek Lisans Tezi	Develi Havzası	Kızılırmak Havzası
İrvem, A. ve El-Sadek, A. (2018)	Makale (Ulusal dergi)	Seyhan Havzası	Seyhan Havzası
Jouma, N. ve Dadaşer-Çelik, F. (2018)	Makale (Ulusal dergi)	Develi Havzası	Kızılırmak Havzası
Duru, U. ve diğ. (2018)	Makale (Uluslararası dergi)	Ankara Çayı Havzası	Sakarya Havzası
Ozdemir, A. ve Leloglu, U.M. (2018)	Makale (Uluslararası dergi)	Sarısu-Eylıklar Havzası	Konya Kapalı Havzası
Bucak, T. ve diğ. (2018)	Makale (Uluslararası dergi)	Beyşehir Gölü Havzası	Konya Kapalı Havzası
Sarı, Ö. (2018)	Yüksek Lisans Tezi	Aşağı Seyhan Havzası	Seyhan Havzası
Yıldırım, S. (2018)	Yüksek Lisans Tezi	Borçka Barajı Havzası	Çoruh Havzası
Köyceğiz, C. (2018)	Yüksek Lisans Tezi	Çarşamba Havzası	Konya Kapalı Havzası
Güngör, Ö. (2018)	Doktora Tezi	Filyos Çayı Havzası	Batı Karadeniz Havzası
Tufekcioglu, M. ve diğ. (2017)	Makale (Ulusal dergi)	Bayam Ormanı Drenaj Alanı	Kızılırmak Havzası
Ozcan, Z. ve diğ. (2017a)	Makale (Uluslararası dergi)	Mogan Gölü Havzası	Sakarya Havzası
Cuceloglu, G. ve diğ. (2017)	Makale (Uluslararası dergi)	İstanbul Su Havzaları	Marmara Havzası
Ertürk, A. ve diğ. (2017)	Makale (Uluslararası dergi)	Köyceğiz-Dalyan Havzası	Batı Akdeniz Havzası
Kaya, S. ve Kutukcu, A. (2017)	Makale (Uluslararası dergi)	Büyük Menderes ve Gediz Havzaları	Büyük Menderes ve Gediz Havzaları
Elçi, A. (2017)	Makale (Uluslararası dergi)	Nif Çayı Havzası	Gediz Havzası
Duru, U. ve diğ. (2017)	Makale (Uluslararası dergi)	Ankara Çayı Havzası	Sakarya Havzası
Özcan, Z. ve diğ. (2017b)	Makale (Uluslararası dergi)	Mogan Gölü Havzası	Sakarya Havzası
Ozdemir, A. ve diğ. (2017)	Makale (Uluslararası dergi)	Sarısu-Eylıklar ve Namazgah Baraj Gölü Havzaları	Konya Kapalı/Sakarya Havzaları
Daggupati, P. ve diğ. (2017)	Makale (Uluslararası dergi)	Fırat Havzası'nın bir kısmı	Fırat Havzası
Bucak, T. ve diğ. (2017)	Makale (Uluslararası dergi)	Beyşehir Gölü Havzası	Konya Kapalı Havzası
Gölpınar, M.S. (2017)	Yüksek Lisans Tezi	Aşağı Seyhan Havzası	Seyhan Havzası
Özcan, Z. ve diğ. (2016)	Makale (Uluslararası dergi)	Mogan ve Eymir Gölü Havzaları	Sakarya Havzası
Zaimes, G.N. ve diğ. (2016)	Makale (Uluslararası dergi)	Bayam Ormanı Drenaj Alanı	Kızılırmak Havzası
Gungor, K. ve diğ. (2016)	Makale (Uluslararası dergi)	Yeniçağa Gölü Havzası	Batı Karadeniz Havzası
Coppens, J. ve diğ. (2016)	Makale (Uluslararası dergi)	Mogan ve Eymir Gölü Havzaları	Sakarya Havzası
Özcan, Z. (2016)	Yüksek Lisans Tezi	Mogan Gölü Havzası	Sakarya Havzası
Bar, R. ve diğ. (2015)	Makale (Uluslararası dergi)	Karadeniz Bölgesi Havzaları	Karadeniz Bölgesi Havzaları
Akgül, M.A. (2015)	Yüksek Lisans Tezi	Aşağı Seyhan Havzası	Seyhan Havzası
Azgin, Ş.T. (2015)	Doktora Tezi	Palas Ovası	Kızılırmak Havzası
El-Sadek, A. ve İrvem, A. (2014)	Makale (Ulusal dergi)	Seyhan Havzası	Seyhan Havzası
Ertürk, A. ve diğ. (2014)	Makale (Uluslararası dergi)	Köyceğiz-Dalyan Havzası	Batı Akdeniz Havzası
Güngör, Ö. ve Gönçü, S. (2013)	Makale (Uluslararası dergi)	Aşağı Porsuk Çayı Havzası	Sakarya Havzası
Akiner, M.E. ve Akkoyunlu, A. (2012)	Makale (Uluslararası dergi)	Melen Havzası	Sakarya Havzası
Ekdal, A. ve diğ. (2011)	Makale (Uluslararası dergi)	Köyceğiz-Dalyan Havzası	Batı Akdeniz Havzası
Güngör, Ö. (2011)	Yüksek Lisans Tezi	Aşağı Porsuk Çayı Havzası	Sakarya Havzası
Güzel, Ç. (2010)	Yüksek Lisans Tezi	Köyceğiz-Dalyan Havzası	Batı Akdeniz Havzası
Jones, C. ve diğ. (2008)	Makale (Uluslararası dergi)	Fırat ve Dicle Havzaları	Fırat ve Dicle Havzaları
Bulut, E. ve Aksoy, A. (2008)	Makale (Uluslararası dergi)	Uluabat Gölü Havzası	Susurluk Havzası

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Tablo 2. İncelenen çalışmalarda kullanılan açık kaynaklı girdi veri setleri ve kaynakları.

Veri Sağlayıcı	Veri İsmi	Veri Tipi	Veri Kaynağı
NASA (National Aeronautics and Space Administration)	SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)	Topoğrafya	https://srtm.csi.cgiar.org/
USGS (United States Geological Survey)	ASTER-GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model)	Topoğrafya	https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp
USGS (United States Geological Survey)	USGS (United States Geological Survey)	Topoğrafya	https://earthexplorer.usgs.gov/
FAO-UNESCO (Food and Agricultural Organization-United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)	HWSD (Harmonized World Soil Database)	Toprak	http://www.fao.org/soils-portal/
USGS (United States Geological Survey)	LANDSAT	Arazi kullanımı	https://earthexplorer.usgs.gov/
ESA (European Space Agency)	SPOT7 (Satellite Pour l'Observation de la Terre)	Arazi kullanımı	https://earth.esa.int/eogateway/missions/spot
ESA (European Space Agency)	RAPIDEYE	Arazi kullanımı	https://earth.esa.int/eogateway/missions/rapideye
SIC (Satellite Imaging Corporation)	IKONOS (Yunanca "imge")	Arazi kullanımı	https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos/
EEA (European Environment Agency)	CORINE (Coordination of Information on the Environment)	Arazi kullanımı	https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/
EC-JRC (European Commission-Joint Research Center)	GLC2000 (Global Land Cover 2000)	Arazi kullanımı	https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php
ESA (European Space Agency)	GLOBCOVER (Global Land Cover Map)	Arazi kullanımı	http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php
USGS (United States Geological Survey)	GLCC (Global Land Cover Characterization)	Arazi kullanımı	https://earthexplorer.usgs.gov/
NCDC-NOAA (National Climatic Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration)	CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)	Meteoroloji	https://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/
UEA (University of East Anglia)	CRU (Climate Research Unit)	Meteoroloji	https://sites.uea.ac.uk/cru/

Tablo 3. İncelenen çalışmalarda sıkça kullanılan bakanlık/kuruluş kaynaklı ver setleri.

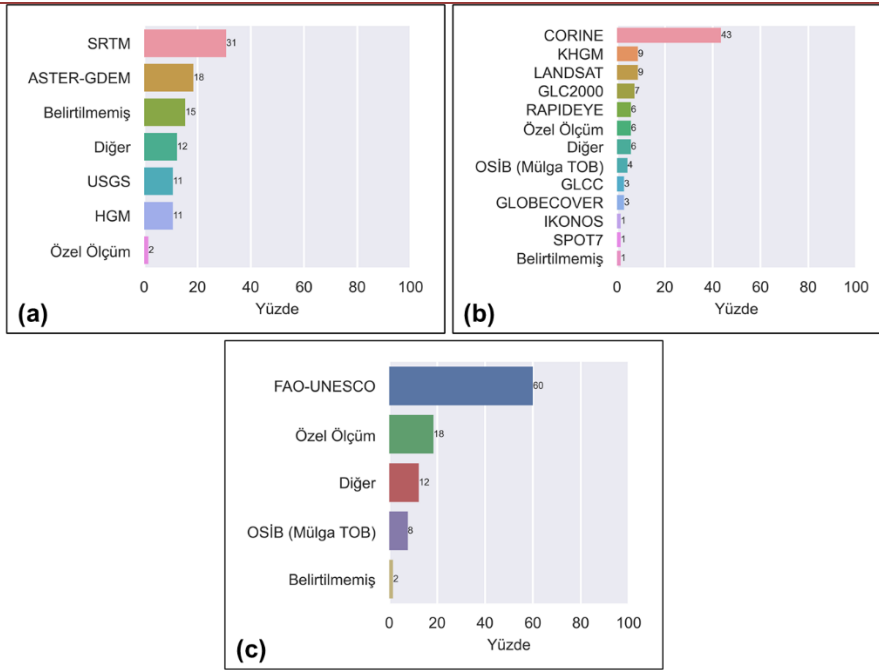
Bakanlık/Kuruluş İsmi	İnternet sitesi	Veri Tipi
HGM (Harita Genel Müdürlüğü)	https://www.harita.gov.tr/	Topoğrafya
TOB (Tarım ve Orman Bakanlığı)	https://www.tarimorman.gov.tr/	Arazi kullanımı/Toprak
OSIB (Orman ve Su İşleri Bakanlığı)	Mülga TOB sitesi	Arazi kullanımı/Toprak
KHGM (Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü)	İl Özel İdareleri ile birleştirildi.	Arazi kullanımı/Toprak
MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü)	https://www.mgm.gov.tr/	Meteoroloji
DSİ (Devlet Su İşleri)	https://www.dsi.gov.tr/	Akım

3.1.3 Hidro-meteorolojik veriler

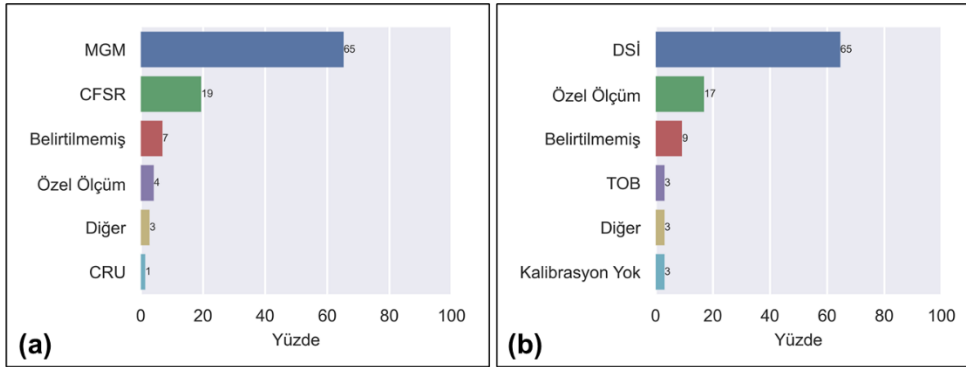
İncelenen çalışmalardaki iklim verileri için genellikle çalışma alanlarına yakın konumlandırılmış ölçüm yapan meteoroloji gözlem istasyonlarından elde edilen veriler tercih edilmiştir. (Şekil 9-a). Yayınlarda kullanılan yerel iklim gözlem verileri MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) tarafından sağlanmakta olup modelin uygulamalarında en çok tercih edilen veri kaynağı olduğu görülmektedir. MGM verilerinin yanı sıra açık kaynaklı olarak paylaşılan iklim verileri de Türkiye'deki SWAT modeli çalışmalarında sıklıkla girdi olarak kullanılmıştır. Bu veriler uydu gözlemlerine veya yer gözlem istasyonlarına ait veriler baz alınarak çeşitli interpolasyon yöntemleri ile türetilmiştir. Bu veri setlerinin çalışmalardaki havzalar için kullanılabilir olduğu görülmektedir. Bunlar arasında en sık kullanılan veri kaynağı CFSR (Climate Forecast System

Reanalysis) verisidir (Şekil 9-a). Bu veri kaynağının kullanılmasındaki en büyük etken veriye erişim kolaylığı ve SWAT modeline uygun formatta kullanıma hazır olarak elde edilebilir olmasıdır (<https://globalweather.tamu.edu/>).

Çalışmalarda yapılan hidrolojik modelin başarısını gözetmek için araştırmacıların modellenen akım çıktılarına gözlenmiş akım verileri ile kıyaslaması gerekmektedir. İncelenen çalışmalarda, SWAT modeline ait akım çıktılarının ölçüm verileri ile karşılaştırılmasında, ağırlıklı olarak DSİ (Devlet Su İşleri) tarafından paylaşılan akım gözlem verilerinin kullanıldığı görülmektedir (Şekil 9-b). Bununla birlikte, önemli sayıda yayında, kalibrasyon için çalışma kapsamında ölçülen akım verilerinin kullanılması dikkat çekmektedir. Bazı çalışmalarda ise akım için model kalibrasyon verisine çalışma kapsamı gereği ihtiyaç duyulmadığı belirtilmiştir.



Şekil 8. İncelenen çalışmalarda (a) SYM, (b) arazi kullanımı ve (c) toprak tipi için kullanılan veri kaynaklarının dağılımı.



Şekil 9. İncelenen çalışmalarda (a) meteoroloji ve (b) akım için kullanılan veri kaynaklarının dağılımı.

3.2 Çalışmaların kapsamları

Tablo 1’de verilen SWAT modelinin Türkiye’deki uygulamaları kapsamı bakımından hidroloji ve su kalitesi olmak üzere iki ana sınıfta incelenmiştir. Hidroloji odaklı yapılan çalışmalar yüzey suyu ve yer altı suyu olarak alt sınıflarda incelenirken su kalitesi odaklı çalışmalar sediment ve kirlilik alt sınıflarına ayrılarak kategorize edilmiştir. Ayrıca, her bir alt sınıf mevcut durum (geçmiş dönem) ve iklim değişikliği (gelecek dönem) çalışmaları olarak sınıflandırılmıştır. Buna göre, SWAT modeli kullanılarak yapılan hidroloji odaklı mevcut durumdaki yüzey suyu ile ilgili çalışmalar tüm çalışmaların %66’sını oluşturmaktadır (Şekil 10).

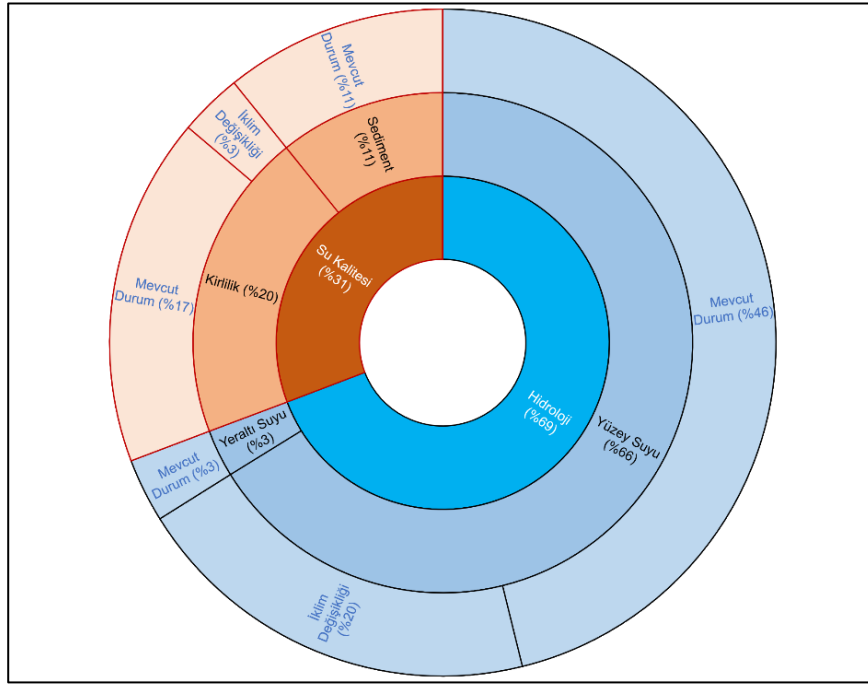
Çalışmalar kapsamı bakımından değerlendirildiğinde hidroloji odaklı çalışmalar %69, su kalitesi üzerine yapılan çalışmalar %31 oranındadır. Araştırmacılar tarafından en fazla yapılan çalışma (%66) yüzey suyu modellemesidir (Şekil 10). Yer altı suyu odaklı ve iklim değişikliğinin kirlilik üzerine etkileri ile ilgili yapılan çalışmalar en azdır (%3). Mevcut durum için yapılan çalışmalar iklim değişikliği üzerine yapılan çalışmalara göre daha fazladır. Fakat son yıllarda iklim değişikliği üzerine yapılan çalışmaların sayıca arttığı gözlemlenmiştir.

Ülkemizde hidro-meteorolojik verilere ilgili kaynaklardan hızlı bir şekilde ulaşılabilmesi ve SWAT modelinin güçlü bir yeraltı

su akım modeline sahip olmaması (Bailey ve diğ., 2016) sebepleriyle modelin ülkemizdeki uygulamalarının daha çok yüzey suyu araştırmaları kapsamında kaldığı düşünülmektedir. Çalışma kapsamı bakımından yapılan sınıflandırmada (Şekil 10) görülebileceği üzere yer altı suyu ile ilgili çalışmalar oldukça azdır. İncelenen çalışmalar arasında iklim değişikliğinin yer altı suyuna etkisini konu alan bir çalışma bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra gözlemi ve ölçümü daha zor olan nütrient, pestisit veya sediment gibi su kalitesi verileri ile ilgili erişilebilir kaynaklar kısıtlıdır. Bu durum araştırmacıları su kalitesi kapsamında çalışmalar yapmak için zahmetli ve uzun süren arazi çalışmalarına yönlendirmektedir. Bu sebeple su kalitesi ile ilgili çalışmaların daha az olduğu düşünülmektedir.

3.3 Model performansı

SWAT modelinin ülkemiz havzalarındaki performansı, çalışmaların kalibrasyon ve validasyon sonuçları incelenerek değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamı gereği akım veya su kalitesi çıktıları için model kalibrasyonuna ihtiyaç duyulmadığı belirtilen dört makale performans için yapılan analizde yer almamaktadır. Ayrıca, makale çalışmaları ile ilişkili olan ve dolayısıyla tekrar eden sonuçlara sebep olacak tez çalışmaları da bu analize dahil edilmemiştir. Böylece, model performansı için yapılan analiz 42 makale çalışmasını kapsamaktadır.



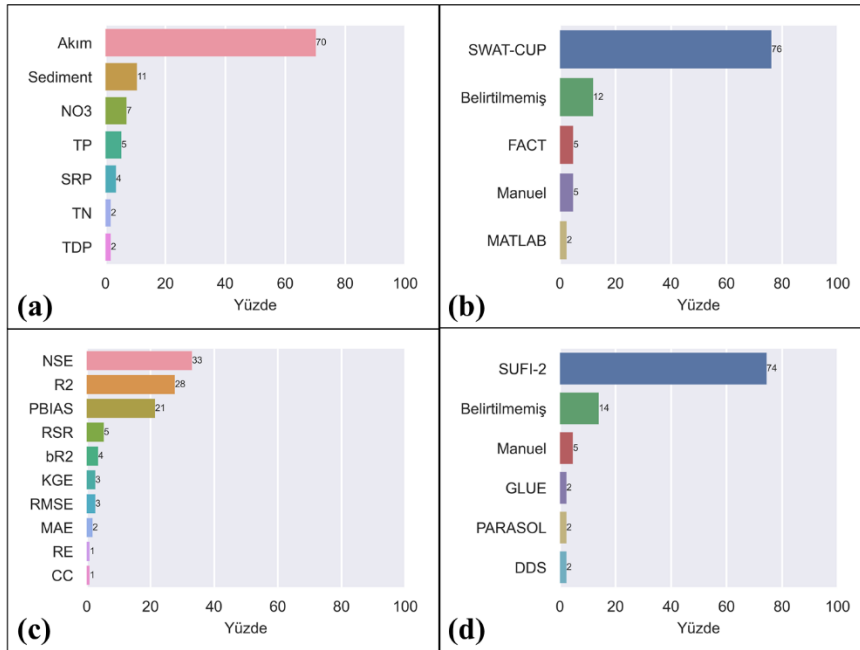
Şekil 10. İncelenen çalışmaların kapsamı.

İncelenen çalışmalarda kalibrasyon için en fazla kullanılan model çıktısının akım olduğu görülmektedir (Şekil 11-a). Bunun yanında bazı çalışmalarda sediment, NO₃, TN (toplam azot), TP (toplam fosfor) ve SRP (çözünbilir reaktif fosfor) gibi su kalitesi değişkenleri de kalibre edilen diğer model çıktılarıdır.

Kalibrasyon işlemi için araştırmacıların büyük çoğunlukla SWAT-CUP programını tercih ettikleri görülmektedir (Şekil 11-b). Ayrıca, bazı araştırmacılar kendi geliştirdikleri kalibrasyon yazılımını kullanırken bazıları ise kalibrasyon işlemi manuel olarak gerçekleştirmiştir. En sık kullanılan kalibrasyon yöntemi SUFI-2 algoritmasıdır (Şekil 11-d). Kalibrasyonlarda GLUE, ParaSol ve DDS (Dynamically Dimensioned Search) yöntemleri de kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda kalibrasyon

için kullanılan yazılım ve algoritmaların belirtilmediği dikkat çekmektedir.

Model performansının değerlendirilmesinde en sık kullanılan performans göstergesinin NSE (Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı) ve R² (determinasyon katsayısı) olduğu görülmektedir (Şekil 11-c). PBIAS (yüzde eğilim), bR² (ölçüm verileri ile simülasyon sonuçlarının keşimi sıfıra eşit olan lineer regresyon çizgisinin eğiminin çarpımı), RSR (RMSE'nin gözlem verisi standart sapmasına oranı), KGE (Kling-Gupta verimlilik katsayısı), RE (rölatif hata), CC (korelasyon katsayısı), RMSE (kök ortalama kare hata) ve MAE (ortalama mutlak hata) kalibrasyonlarda gözetilen diğer performans göstergeleridir.



Şekil 11. İncelenen çalışmalarda (a) kalibre edilen model çıktıları, (b) kullanılan kalibrasyon yazılımları, (c) performans göstergeleri ve (d) kalibrasyon yöntemleri.

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Bu bölümde, su kalitesi ile ilgili yapılan çalışmaların ve sonuçların az olması sebebi ile kalibrasyonda en sık kullanılan model çıktısı olan akıma ait göstergeler dikkate alınmıştır. İncelenen SWAT uygulamalarına ait kalibrasyon ve validasyon için kullanılan toplam istasyon sayıları ve bu istasyonlara ait NSE ve R² değerlerinin dağılımları Tablo 4'te sunulmaktadır. Tablo 4 değerlendirilirken, bazı çalışmalarda birden fazla akım istasyonu kullanıldığı, bazı çalışmalarda ise bir istasyonun birden fazla optimizasyon algoritması ile kalibre edildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, Tablo 4 SWAT modelinin kalibrasyon ve validasyon performansında kullanılan tüm gözlem istasyon sonuçlarını toplu bir şekilde sunmakta olup genel bir değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Bu tabloda verilen istatistikler aylık ve günlük zaman adımı olmak üzere iki ayrı kategoride değerlendirilmiştir. Genel olarak, SWAT modelinin Türkiye'deki uygulamalarının aylık zaman ölçeğinde daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Bu durum uluslararası literatürdeki diğer çalışmalara ait bulgularla da benzerlik göstermektedir (Gassman ve diğ., 2007; Douglas-Mankin ve diğ., 2010; Gassman ve diğ., 2014; Tan ve diğ., 2019).

SWAT modeli performansının değerlendirilmesinde Moriasi ve diğ. (2007) tarafından önerilen parametre aralıkları (aylık zaman) dikkate alındığında, ülkemizde gerçekleştirilen SWAT modeli uygulamalarına ait kalibrasyon sonuçlarının yaklaşık %75'i tatmin edici seviyenin üzerindedir (NSE>0.5).

Tablo 4. NSE ve R²'ye göre belirlenen değer aralıklarında model kalibrasyon ve validasyon sonuçlarının dağılımı.

Değer Aralığı	Aylık				Günlük			
	Kalibrasyon		Validasyon		Kalibrasyon		Validasyon	
	NSE	R ²	NSE	R ²	NSE	R ²	NSE	R ²
0.90–1.00	4	2	3	1	1	0	0	0
0.80–0.89	14	14	14	15	2	3	8	7
0.70–0.79	40	31	28	24	4	3	1	4
0.60–0.69	51	34	40	15	9	4	9	3
0.50–0.59	33	21	21	18	6	6	4	1
0.40–0.49	20	2	14	3	6	5	2	2
0.30–0.39	11	5	10	4	2	3	1	2
0.20–0.29	3	0	6	0	6	6	1	2
0.10–0.19	4	0	3	0	3	2	3	2
0.00–0.09	5	0	0	0	1	2	1	3
<0	3	0	3	0	3	0	5	0
Toplam	188	109	142	80	43	34	35	26

3.4 Modelin tercih edilme sebepleri

SWAT modeli son yıllarda araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Model ile ilgili yayınlanan tüm çalışmalar sitesinde yer alan güncel veri tabanından erişilip incelenebilir (CARD, 2022). SWAT açık kaynaklı bir hidrolojik modeldir. Diğer havza modellerine kıyasla SWAT, düzenli bir kullanıcı kılavuzuna sahiptir ve sistemli teknik raporları kolaylıkla elde edilebilmektedir. Ayrıca, model kullanıcıları için çevrimiçi tartışma ortamları bulunmaktadır. Tüm bunlar SWAT modelinin dünya genelinde tercih edilmesindeki temel nedenler olarak gösterilebilir. Bahsedilen üstünlükleri sayesinde SWAT modelinin ülkemizdeki uygulamalarında da bir artış görülmektedir (Şekil 7).

SWAT modeli diğer havza modelleri ile kıyaslandığında birçok üstünlüğe sahiptir. Modelin üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir (Fontaine ve diğ., 2002; Gassman ve diğ., 2007; Neitsch ve diğ., 2011; Neitsch ve diğ., 2012; Abbaspour, 2015):

- ❖ Açık kaynaklı yazılım oluşu
- ❖ CBS ortamları ile bütünleşik çalışabilmesi
- ❖ Yeni kullanıcılar için sistemli teknik dokümanlara sahip olması
- ❖ Kullanıcıların tartışabildiği aktif internet gruplarının bulunması
- ❖ Topoğrafya verisi ile modelin orografik etkileri daha iyi temsil edebiliyor olması
- ❖ Uzun dönemli analizler için istatistiksel üretilmiş meteoroloji verisinin bulunması
- ❖ Yıllık, aylık, günlük veya daha küçük zaman adımları ile çalıştırılabilmesi
- ❖ Tarla ölçeğinden havza ölçeğine dek çalışma alanlarında iyi sonuçlar vermesi
- ❖ Hem su bütçesi hem de su kalitesi modelleme

kapasitesinin olması

- ❖ Birden fazla yağış-akış ve evapotranspirasyon yöntemlerini içermesi
- ❖ Tarımsal arazileri mevcut havzalarda yönetim uygulamalarına müsaade etmesi
- ❖ Model özelinde geliştirilen otomatik kalibrasyon yazılımlarının bulunması

Birçok üstünlüğe sahip olmasına rağmen SWAT modelinin bazı eksiklikleri de mevcuttur. Modelin çok fazla parametreye sahip olması, kalibrasyon aşamasında kabul edilebilir ve anlamlı sonuçlar elde edilebilmesi için zorlaştırıcı bir süreç gerektirmektedir. Modelin birbiri ile ilişkili, kalibre edilebilecek çok fazla parametreye sahip olması bu süreci zorlaştırmaktadır. SWAT modelinin bir diğer eksikliği verinin yetersiz olduğu havzalarda model kurulmasının zor olmasıdır. Genellikle SYM, arazi kullanımı ve toprak tipi veri setlerine ulaşımın kısıtlı olduğu çalışma alanlarında SWAT model çatisının oluşturulması güçtür. Ayrıca SWAT, iklim verilerine günlük zaman adımında ihtiyaç duyduğu için güvenilir ve sık ölçüm yapılan istasyon verilerine ulaşılması gerekmektedir.

Hidrolojik işlem birimlerinin (HİB) mekânsal dağılımının gerçekçi olmaması da özellikle havzada yayılı yük kaynaklarının kontrolünde uygulanan en iyi yönetim uygulamalarının gerçeğe yakın bir şekilde uygulanmasını güçleştirmektedir. SWAT+ modelinde HİB'lerin topolojik ilişkileri ve modelin mekânsal çözünürlüklerinin artırılarak bu durumun giderilmesi amaçlanmaktadır. Buna ek olarak SWAT eski sürümleri model için gerekli girdileri (zaman serileri, parametreleri vd.) çok sayıda dosya üzerinden okumaktadır. Bu durum model çalışma süresini ve dolaylı olarak model kalibrasyon sürecini uzatmaktadır. Bu eksiklik SWAT+ modelinde girdi dosya düzeninin değiştirilmesi ile giderilmiştir.

Model verilerinin elde edilmesi gelişmiş ülkelerde sistemli ve düzenli bir şekilde gerçekleştirilip kullanıcılara sunulmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde ise SWAT modeli girdilerine ulaşmakta zorluk yaşanmaktadır. Bu durumda araştırmacılar zorlu ve maliyetli özel ölçümlere ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanında, en sık kullanılan CBS arayüzü ArcGIS'in ücretli olmasının özellikle öğrenci statüsündeki araştırmacılar üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu söylenebilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada havza modelleme çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılan, ülkemizde de uygulama çalışmaları artmakta olan SWAT modeline ait genel bilgiler verilmiş ve ülkemizde gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu derleme çalışması ile özellikle modeli kullanmak isteyen araştırmacılara kısa bir ön bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Modelin ülkemizdeki uygulamaları bu makalede incelenerek SWAT modeli ile ilgili literatür taraması çalışmalarına yardımcı olması hedeflenmiştir. Ayrıca İngilizce ve Türkçe yayımlanan eserlerin toplu bir analizi yapılarak genel bir değerlendirme sunulmuştur.

Yapılan derleme sonucunda kullanılan veriler açısından genel olarak yurtdışı kaynaklı mekânsal verilerin (SYM, toprak ve arazi kullanımı) tercih edildiği görülmektedir. Sayısal yükseklik haritası için SRTM (%31), arazi kullanımı için CORINE (%43) ve toprak haritası için FAO-UNESCO (%60) verileri en çok kullanılan yurt dışı kaynaklı verilerdir. İklim verileri için çoğunlukla (%65) MGM tarafından üretilmiş meteorolojik zaman serilerinden faydalanılmıştır. Model kalibrasyonunda kullanılan akım verileri için ise DSI'ye ait akım rasatları en çok (%65) tercih edilen veri kaynağıdır.

Çalışma kapsamı bakımından mevcut durumdaki yüzey suyu ile ilgili çalışmaların en fazla (%66) olduğu görülmektedir. Mevcut durum için yer altı suyu ile ilgili (%3) ve iklim değişikliğine bağlı kirlilik üzerine yapılan çalışmalar (%3) sayıca en azdır.

Kalibrasyon çalışmalarında 2021 yılına kadar ücretsiz dağıtılan ve yaygın kullanıma sahip olan SWAT-CUP yazılımı en çok tercih edilen kalibrasyon aracı olmuştur. SWAT-CUP gibi modele özgü bir programın oluşu SWAT modelinin tercih edilme sebepleri arasında sıklıkla belirtilmektedir. Ancak son yıllarda kalibrasyon ve belirsizlik analizi yapan birçok yeni program geliştirilmiştir. Bu programların SWAT-CUP'a kıyasla farklı işletim sistemlerinde çalışabilmesi, ücretsiz ve açık kaynak kodlu olması gibi bazı üstünlükleri bulunmaktadır. Dolayısıyla yakın gelecekte SWAT-CUP programından daha yaygın bir kullanıma sahip olmaları beklenmektedir. Ayrıca, SWAT-CUP'ın 2020 yılı itibari ile yalnızca ücretli sürümünün dağıtılıyor olması bu program için bir eksiklik olarak düşünülmektedir.

Çalışmalarda en çok kalibre edilen model çıktısı akımdır. Buna göre yapılan kalibrasyon ve validasyon sonuçlarının çoğu tatmin edici seviyenin üzerindedir (0,5'in üzerinde R² ve NSE değerleri). Bu durum, Türkiye'de bu çalışma kapsamındaki havzalar için SWAT modelinin kabul edilebilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Araştırmacıların ülkemize ait havzalarda gerçekleştirdikleri modelleme çalışmalarında yurt dışı kaynaklı veri setlerine yöneldiği görülmektedir. Ülkemiz havzalarında kullanılan SWAT modelinin performansının artırılabilmesi için mevcut çalışmalarda söz edilen bazı eksiklerin giderilmesi ve mekânsal çözünürlüğü daha yüksek olan yerel veri setlerinin üretilmesi büyük önem taşımaktadır.

Analiz edilen bazı çalışmalarda model kurulumunda kullanılan

veri setlerinin kaynağının belirtilmediği görülmüştür. Bununla birlikte, bazı makalelerde kalibrasyon ve validasyon süreçleri iyi bir şekilde bildirilmemiştir. Güvenilir verilerin mevcudiyeti, SWAT kullanıcılarının karşılaştığı ana sorunlardan biridir, çünkü bu veriler bazı ülkelerde ya serbestçe erişilebilir değildir ya da kamu erişiminden kısıtlanmıştır. Bu nedenle, SWAT modellemesi için güvenilir girdi verilerinin belirlenmesi ve geliştirilmesi konusunda gelecekteki çalışmalar düşünülmelidir. Bu belirsiz durum, çalışmada oluşturulan modelin detayı hakkında yeterli kadar bilgi vermeyerek, model başarısı ve sonuçlarının kullanılabilirliği ile ilgili kaygılara yol açabilmektedir. Konu ile ilgili gerçekleştirilecek çalışmalarda, model kurulumu için kullanılan veri kaynaklarının açıkça belirtilmesi diğer araştırmacılara ve havzada yapılacak diğer çalışmalara da faydalı olacaktır.

Bu makale kapsamında toplanan çalışmaların gelecekte de değerlendirilerek güncel bir veri tabanının oluşturulması önerilmektedir. Bu veri tabanının ilgili yayınlara erişmek için harcanan sürenin azaltılmasında önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, Türkiye'de yapılan havza çalışmalarında kat edilen yolun belirlenmesinde etkili olacaktır. Bu kapsamda gelecek yıllarda bu veri tabanının ve çalışmanın güncellenerek ilgili eserlere ulaşım bağlantılarının sağlanacağı bir internet ortamının geliştirilmesi planlanmaktadır.

SWAT modeli, geliştirilen tüm diğer modeller gibi bazı üstünlükleri ve eksikleri olan bir modeldir. Tüm havza modellemesi çalışmalarında istenilen bütün çözümleri sunamayacağı da bir gerçektir. Ancak genel itibari ile eksiklikleri ve üstünlükleri belirtilerek kendini dünyada kanıtlamış bir model olduğu görülmektedir. Ülkemizdeki araştırmacıların diğer havza modelleme araçlarının seçiminde olduğu gibi SWAT modelini tercih ederken de modelin üstün ve zayıf yanlarını dikkatli bir şekilde analiz etmesi ve çalışmanın amacı doğrultusunda karar vermesi tavsiye edilmektedir.

Son olarak, SWAT gibi diğer havza modelleri için de ilgili araştırmacıları bilgilendirmek amacıyla yapılacak derleme çalışmalarının faydalı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, bu kapsamdaki çalışmaların ülkemizdeki havza modelleme yönetim çalışmalarında karşılaşılan güçlüklerin çözümüne önemli ölçüde katkı sunacağı düşünülmektedir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

5. Kaynaklar

- Abbaspour, K.C. (2015) *SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs user manual*. Dübendorf, Zürich: EAWAG.
- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A. and van Genuchten, M. T. (2004) Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340 - 1352. doi:10.2136/vzj2004.1340
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 413-430. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.014
- Ajaaj, A.A., Mishra, A.K. and Khan, A.A. (2019) Evaluation of Satellite and Gauge-Based Precipitation Products through Hydrologic Simulation in Tigris River Basin under Data-Scarce Environment, *Journal of Hydrologic*

- Engineering, 24(3), 05018033. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001737
- Akbas, A., Freer, J., Ozdemir, H., Bates, P.D. and Turp, M.T. (2020) What about reservoirs? Questioning anthropogenic and climatic interferences on water availability. *Hydrological Processes*, 34(26), 5441–5455. doi:10.1002/hyp.13960
- Akgül, M.A. (2015) Aşağı Seyhan Ovası Sol Sahil Sulaması, Su ve Nitrat Bütçesinin Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Akiner, M.E. and Akkoyunlu, A. (2012) Modeling and forecasting river flow rate from the Melen Watershed, Turkey. *Journal of Hydrology*, 456-457, 121-129. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.031
- Akoko, G., Le, T.H., Gomi, T. and Kato, T. (2021) A Review of SWAT Model Application in Africa. *Water*, 13(9),1313. doi:10.3390/w13091313
- Arnold, J.G. and Williams, J.R. (1987) Validation of SWRRB— Simulator for Water Resources in Rural Basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 243-256. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1987)113:2(243)
- Arnold, J.G., Srinivasan R., Mutiah R.S. and Williams J.R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Arnold, J.G., Williams, J.R. and Maidment, D.R. (1995) Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), 171-183. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:2(171)
- Arnold, J.G., Bieger, K., White, M.J., Srinivasan, R., Dunbar, J.A. and Allen, P.M. (2018) Use of Decision Tables to Simulate Management in SWAT+. *Water*, 10(6), 713. doi:10.3390/w10060713
- Askar, M.A.A. (2020) İklim değişikliğinin Seyhan havzası su kaynakları üzerindeki etkilerinin SWAT modeli ile değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Azgin, Ş.T. (2015) Palas ovasında arazi örtüsü değişimlerinin belirlenmesi ve yayılı kirlenici yüklerin SWAT ile modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Bailey, R.T., Wible, T.C., Arabi, M., Records, R.M. and Ditty, J. (2016) Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrological Processes*, 30(23), 4420 - 4433. doi:10.1002/hyp.10933
- Baltacı, E. (2019) İnebolu havzasında yüzeysel akış ve sediment yükünün tahmin edilmesinde SWAT modelinin uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Bär, R., Rouholahnejad, E., Rahman, K., Abbaspour, K.C. and Lehmann, A. (2015) Climate change and agricultural water resources: A vulnerability assessment of the Black Sea catchment. *Environmental Science & Policy*, 46, 57-63. doi:10.1016/j.envsci.2014.04.008
- Beven, K. and Binley, A. (1992) The Future of Distributed Models - Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279-298. doi:10.1002/hyp.3360060305
- Bieger, K., Arnold, J.G., Rathjens, H., White, M.J., Bosch, D.D., Allen, P.M., Volk, M. and Srinivasan, R. (2017) Introduction to SWAT+, a Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115– 130. doi:10.1111/1752-1688.12482
- Bieger, K., Arnold, J.G., Rathjens, H., White, M.J., Bosch, D.D. and Allen, P.M. (2019) Representing the Connectivity of Upland Areas to Floodplains and Streams in SWAT+. *Journal of the American Water Resources Association*, 55(3), 578– 590. doi:10.1111/1752-1688.12728.
- Bressiani, D.A., Gassman, P.W., Fernandes, J.G., Garbossa L.H.P., Srinivasan, R., Bonumá, N.B. and Mendiando, E.M. (2015) Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 9–35. doi: 10.3965/j.ijabe.20150803.1765
- Brighenti, T.M., Bonumá, N.B., Srinivasan, R. and Chaffe, P.L.B (2019) Simulating sub-daily hydrological process with SWAT: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 64(12), 1415-1423. doi: 10.1080/02626667.2019.1642477
- Brown, L.C. and Barnwell, J.T.O. (1987) *The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user manual*. Athens, Ga.: USEPA.: EPA.
- Bucak, T., Trolle, D., Andersen, H.E., Thodsen, H., Erdoğan, Ş., Levi, E.E., Filiz, N., Jeppesen, E. and Beklioğlu, M. (2017) Future water availability in the largest freshwater Mediterranean lake is at great risk as evidenced from simulations with the SWAT model. *Science of the Total Environment*, 581-582, 413-425. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.149
- Bucak, T., Trolle, D., Tavşanoğlu, Ü.N., Çakıroğlu, A.İ., Özen, A., Jeppesen, E. and Beklioğlu, M. (2018). Modeling the effects of climatic and land use changes on phytoplankton and water quality of the largest Turkish freshwater lake: Lake Beyşehir. *Science of the Total Environment*, 621, 802-816. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.258
- Bulut, E. and Aksoy, A. (2008) Impact of fertilizer usage on phosphorus loads to Lake Uluabat. *Desalination*, 226(1–3), 289-297. doi:10.1016/j.desal.2007.02.112
- CARD (2020) SWAT Literature Database for Peer-Reviewed Journal Articles. Center for Agricultural and Rural Development: Iowa State University, Ames, IA, USA.
- Cerkasova, N., Umgieser, G. and Ertürk, A. (2018) Development of a hydrology and water quality model for a large transboundary river watershed to investigate the impacts of climate change – A SWAT application. *Ecological Engineering*, 124, 99-115. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.09.025

- Coppens, J., Özen, A., Tavşanoğlu, U.N., Erdoğan, Ş., Levi, E.L., Yozgatlıgil, C., Jeppesen, E. and Beklioğlu, M. (2016) Impact of alternating wet and dry periods on long-term seasonal phosphorus and nitrogen budgets of two shallow Mediterranean lakes. *Science of the Total Environment*, 563-564, 456-467. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.04.028
- Coppens, J., Trolle, D., Jeppesen, E. and Beklioğlu, M. (2020) The impact of climate change on a Mediterranean shallow lake: insights based on catchment and lake modelling. *Regional Environment Change*, 20(2), 62. doi:10.1007/s10113-020-01641-6
- Crawford, N.H. and Linsley, R.K. (1966) Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. *Contemporary Hydrology*, Technical report 39, 158-160.
- Cuceloglu, G. and Ozturk, I. (2019) Assessing the Impact of CFSR and Local Climate Datasets on Hydrological Modeling Performance in the Mountainous Black Sea Catchment. *Water*, 11(11), 2277. doi:10.3390/w11112277
- Cuceloglu, G., Abbaspour K.C. and Ozturk, I. (2017) Assessing the Water-Resources Potential of Istanbul by Using a Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrological Model. *Water*, 9(10), 814. doi:10.3390/w9100814
- Cunderlik, M.J. (2003) Hydrologic model selection for the CFCAS project: Assessment of water resources risk and vulnerability to changing climatic conditions. Project report 1, 38.
- Cüceloğlu, G., Şeker, D., Tanık, A. and Öztürk, İ. (2021) Analyzing Effects of Two Different Land Use Datasets on Hydrological Simulations by Using SWAT Model. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8(2), 172-185. doi:10.30897/ijegeo.828112
- Cüceloğlu, G. (2019) İklim değişikliğinin İstanbul'un yüzeysel su kaynaklarına etkisi ve kuraklık dirençli bütünleşik su yönetimi, *Doktora Tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Daggupati, P., Srinivasan, R., Dile, Y.T. and Verma, D. (2017) Reconstructing the historical water regime of the contributing basins to the Hawizeh marsh: Implications of water control structures. *Science of the Total Environment*, 580, 832-845. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.029
- Devia, G.K., Ganasri, B.P. and Dwarakish, G.S. (2015) A review on hydrological models. *Aquatic Procedia, International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering*, 4, 1001-1007. doi:10.1016/j.aqpro.2015.02.126
- Dile, Y.T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., and Arnold, J. (2016) Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling & Software*, 85, 129-138. doi:10.1016/j.envsoft.2016.08.004
- Dogan, F.N. and Karpuzcu, M.E. (2021) Effect of land use change on hydrology of forested watersheds. *Ecology*, e2367. doi:10.1002/eco.2367
- Douglas-Mankin, K.R., Srinivasan, R. and Arnold, J.G. (2010) Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: Current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1423-1431. doi:10.13031/2013.34915
- Donmez, C., Sari, O., Berberoglu, S., Cilek, A., Satir, O. and Volk, M. (2020) Improving the Applicability of the SWAT Model to Simulate Flow and Nitrate Dynamics in a Flat Data-Scarce Agricultural Region in the Mediterranean. *Water*, 12(12), 3479. doi:10.3390/w12123479
- Duru, U., Arabi, M. and Wohl, E.E. (2018) Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey. *Physical Geography*, 39(3), 264-289. doi:10.1080/02723646.2017.1342199
- Duru, U., Wohl, E. and Ahmadi, M. (2017) Factors Controlling Sediment Load in The Central Anatolia Region of Turkey: Ankara River Basin. *Environmental Management*, 59(5), 826-841. doi:10.1007/s00267-016-0818-8
- Dutal, H. (2020) Körsulu deresi yağış havzasının WEPP (Water Erosion Prediction Project) and SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modelleri kullanılarak havza amenajmanı bakımından planlanması üzerine araştırmalar, *Doktora Tezi*. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Ekdal, A., Gurel, M., Guzel, C., Ertürk, A., Tanik, A. and Gönenç, İ.E. (2011) Application of WASP and SWAT models for a Mediterranean Coastal Lagoon with Limited Seawater Exchange. *Journal of Coastal Research*, 64, 1023-1027.
- Elçi, A. (2017) Evaluation of nutrient retention in vegetated filter strips using the SWAT model. *Water Science & Technology*, 76(10), 2742-2752. doi:10.2166/wst.2017.448
- El-Sadek, A. and İrvem, A. (2014) Evaluating the impact of land use uncertainty on the simulated streamflow and sediment yield of the Seyhan River basin using the SWAT model. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38(4), 515-530. doi:10.3906/tar-1309-89
- Ertürk, A., Ekdal, A., Gurel, M., Karakaya, N., Cuceloglu, G. and Gönenç, E. (2017) Model-based assessment of groundwater vulnerability for the Dalyan Region of southwestern Mediterranean Turkey. *Regional Environment Change*, 17(4), 1193-1203. doi:10.1007/s10113-017-1106-8
- Ertürk, A., Ekdal, A., Gurel, M., Karakaya, N., Guzel, C. and Gönenç, E. (2014) Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. *Science of the Total Environment*, 499, 437-447. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.07.001
- Esen, S.E. and Hein, L. (2020) Development of SEEA water accounts with a hydrological model. *Science of the Total Environment*, 737, 140168. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140168
- Fıstıkoğlu, O. (1999) Hidrolojik Modeller. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 15. Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 799-809, Ankara.

- Francesconi, W., Srinivasan, R., Pérez-Miñana, E., Willcock, S.P. and Quintero, M. (2016) Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. *Journal of Hydrology*, 535, 625-636. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.034
- Fontaine, T., Cruickshank, T., Arnold, J. and Hotchkiss, R. (2002) Development of a snowfall - Snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology*, 262, 209-223.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G. (2007) The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 40(4), 1211-1250. doi:10.13031/2013.23637
- Gassman, P.W., Sadeghi, A.M. and Srinivasan, R. (2014) Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 1-8. doi:10.2134/jeq2013.11.0466
- Gölpınar, M.S. (2017) Yüzev akışlarının SWAT modeli ile belirlenmesi: Akarsu Sulama Birliği Sahası örneği, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Gungor, K., Karakaya, N., Evrendilek, F., Akgul, S., Baskan, O., Cebel, H., Farhoud, H.J., Turkecan, O., Yasar, S. and Gumus, O. (2016) Spatiotemporal modeling of watershed nutrient transport dynamics: Implications for eutrophication abatement. *Ecological Informatics*, 34, 52-69. doi:10.1016/j.ecoinf.2016.04.012
- Güngör, Ö. (2011) Aşağı Porsuk çayı havzasında askıda katı madde taşınımının belirlenmesi ve modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Güngör, Ö. (2018) SWAT modeli kullanılarak Filyos çayı havzasının hidrolojik analizi, *Doktora Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Güngör, Ö. and Göncü, S. (2013) Application of the soil and water assessment tool model on the Lower Porsuk Stream Watershed. *Hydrological Processes*, 27(3), 453-466. doi:10.1002/hyp.9228
- Güzel, Ç. (2010) Application of SWAT model in a watershed in Turkey, *M.Sc. Thesis*. Istanbul Technical University Institute of Science and Technology, Istanbul.
- Hargreaves, G.H. and Allen, R.G. (2003) History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129, 53-63. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)
- Izaurrealde, R.C., Williams, J.R., McGill, W.B., Rosenberg, N.J. and Jakas, M.C.Q. (2006) Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 192(3-4), 362-384. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.07.010
- İrvem, A. and El-Sadek, A. (2018). Evaluation of Streamflow Simulation By SWAT Model for The Seyhan River Basin. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 33(2), 99-110.
- Jones, C., Sultan, M., Yan, E., Milewski, A., Hussein, M., Al-Dousari, A., Al-Kaisy, S. and Becker, R. (2008) Hydrologic impacts of engineering projects on the Tigris-Euphrates system and its marshlands. *Journal of Hydrology*, 353(1-2), 59-75. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.01.029
- Jouma, N. (2019). Sultan Sazlığı'nda iklim değişikliği ve arazi kullanımı/örtüsü değişimlerinin etkilerinin SWAT ile modellenmesi, *Doktora Tezi*. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Jouma, N. and Dadaser Celik, F. (2018) Develi Ovası'nda Sulama ve Rezervuar Depolamasının SWAT ile Simülasyonu. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1. *Uluslararası Tarımsal Yapılar ve Sulama Kongresi Özel Sayısı*, 468-476.
- Kabal, C. (2019). Evaluation of the alternatives to improve water quality in gürdük watershed using SWAT model, *M.Sc. Thesis*, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Karabulut, A., Elbaşı, F., Ustaoglu S. and Yatman, D. (2011) Türkiye büyük toprak grubu haritası, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü Toprak Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Mekanizasyon ve Bilişim Teknolojileri Bölümü, Ankara.
- Kaya, S. and Kutukcu, A. (2017) Investigation of morphometric and hydrological characteristics of a water basin using numerical models. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(1), 360-368.
- Knisel, W.G. (1980) CREAMS, a field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Washington, D.C.: USDA.
- Koycegiz, C., Buyukyildiz, M. and Kumcu, S.Y. (2021) Spatio-temporal analysis of sediment yield with a physically based model for a data-scarce headwater in Konya Closed Basin, Turkey. *Water Supply*, 21 (4): 1752-1763. doi:10.2166/ws.2021.016
- Koycegiz, C. and Buyukyildiz M. (2019) Calibration of SWAT and Two Data-Driven Models for a Data-Scarce Mountainous Headwater in Semi-Arid Konya Closed Basin. *Water*, 11(1), 147. doi:10.3390/w11010147
- Köyceğiz, C. (2018) SWAT ve yapay zekâ metotları ile akım tahmini, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kuczera, G. and Parent, E. (1998) Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 211(1-4), 69-85. doi:10.1016/S0022-1694(98)00198-X
- Leonard, R.A., Knisel, W.G. and Still, D.A. (1987) GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE*, 30, 1403-1418. doi:10.13031/2013.30578
- Marshall, L., Nott, D. and Sharma, A. (2004) A comparative study of Markov chain Monte Carlo methods for conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 40(2). doi:10.1029/2003WR002378
- Monteith, J.L. (1965) Evaporation and the Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 205-234.

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

- Mulvaney, T.J. (1850) On the use of self-registering rain and flood gauges. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 4(2), 1-8.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. (2011) Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Temple, Texas 76502: USDA-153 ARS Grassland Soil and Water Research Laboratory, and Texas A&M University, Blackland Research and Extension Center.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R. and Williams, J.R. (2012) Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation. Temple, Texas: USDA-ARS: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Oruç, H.N. (2021) Evaluating the effects of soil data quality on the swat model runoff prediction performance in a highly industrialized catchment; case study in Saz-Çayırova stream, Turkey, *M.Sc. Thesis*, Gebze Technical University Institute of Earth and Marine Science, Gebze.
- Ozdemir, A. and Leloglu, U.M. (2018) A fast and automated hydrologic calibration tool for SWAT. *Water and Environment Journal*, 33(4), 488-498. doi:10.1111/wej.12419
- Ozdemir, A., Leloglu, U.M. and Abbaspour, K.C. (2017) Hierarchical approach to hydrological model calibration. *Environmental Earth Sciences*, 76, 318. doi:10.1007/s12665-017-6560-6
- Özcan, Z. (2016) Evaluation of the best management practices to control agricultural diffuse pollution in lake Mogan watershed with SWAT model. *M.Sc. Thesis*, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Özcan, Z., Kentel, E. and Alp, E. (2016) Determination of unit nutrient loads for different land uses in wet periods through modelling and optimization for a semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 540, 40-49. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.05.074
- Özcan, Z., Başkan, O., Düzgün, H.Ş., Kentel, E. and Alp, E. (2017a) A pollution fate and transport model application in a semi-arid region: Is some number better than no number? *Science of the Total Environment*, 595, 425-440. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.240
- Özcan, Z., Kentel, E. and Alp, E. (2017b) Evaluation of the best management practices in a semi-arid region with high agricultural activity. *Agricultural Water Management*, 194, 160-171. doi:10.1016/j.agwat.2017.09.007
- Özdemir, A. (2021) İklim Değişikliğinin Havza Ölçeğinde Akım ve Sediman Miktarına Etkilerinin Değerlendirilmesi: Yuvacık Baraj Gölü Havzası, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 45(1), 129-154, doi:10.24232/jmd.941528
- Özdemir, K. and Güngör, Ö. (2019) Filyos Çayı Havzasında SWAT Modelinin Uygulaması. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(2), 90-102.
- Peker, I.B. and Sorman A.A. (2021) Application of SWAT Using Snow Data and Detecting Climate Change Impacts in the Mountainous Eastern Regions of Turkey. *Water*, 13(14), 1982. doi:10.3390/w13141982
- Peker, I.B. (2020) Türkiye'deki dağlık havzalarda uygulanan SWAT modeli ile iklim değişikliğinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. doi: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2
- Saddiği, M. and Karpuzcu, M. (2019) Küçük Menderes Alt Havzası'nın SWAT ile Modellenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 55-70. doi:10.21605/cukurovaummfd.702065
- Saddiği, M.M. (2019) Modelling Küçük Menderes watershed using Soil and Water Assessment Tool (SWAT), *M.Sc. Thesis*, Istanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul.
- Sarı, Ö. (2018) Aşağı Seyhan Havzası hidrolojik dinamiklerinin SWAT model yaklaşımı ile modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Schuerz, C. (2019) chrisschuerz/SWATplusR: SWATplusR 0.2.7 (0.2.7). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.3373859
- Sertel, E., Imamoglu, M.Z., Cueloglu, G. and Erturk, A. (2019) Impacts of Land Cover/Use Changes on Hydrological Processes in a Rapidly Urbanizing Mid-latitude Water Supply Catchment. *Water*, 11(5), 1075. doi:10.3390/w11051075
- Singh, V.P. and Woolhiser, D.A., (2002) Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270)
- Srinivasan, R. and Arnold, J.G. (1994) Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*, (30)3, 453-462. doi:10.1111/j.1752-1688.1994.tb03304.x
- Swalih, S.A. and Kahya, E. (2020) Hydrological model optimization using multi-gauge calibration (MGC) in a mountainous region. *Journal of Hydroinformatics*, 23 (2): 340–351. doi:10.2166/hydro.2020.034
- Tan, M.L., Gassman, P.W., Srinivasan, R., Arnold, J.G. and Yang, X. (2019) A Review of SWAT Studies in Southeast Asia: Applications, Challenges and Future Directions. *Water*, 11(5),914. doi:10.3390/w11050914
- Tan, M.L., Gassman, P.W., Liang, J. and Haywood, J.M. (2021) A review of alternative climate products for SWAT modelling: Sources, assessment and future directions. *Science of The Total Environment*, 795, 148915 doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148915
- Thakur, J.K., Singh, S.K. and Ekanthalu, V.S. (2016) Integrating remote sensing, geographic information systems and global positioning system techniques with hydrological modeling. *Applied Water Science*, 7(4), 1595–1608. doi:10.1007/s13201-016-0384-5
- Tufekcioglu, M., Yavuz, M., Zaimes, G.N., Dinc, M., Koutalakis, P. and Tufekcioglu, A. (2017) Application of Soil Water Assessment Tool (SWAT) to suppress wildfire at Bayam Forest, Turkey. *Journal of*

- Environmental Biology*, 38(5), 719-726. doi:10.22438/jeb/38/5/MRN-331
- van Griensven, A. and Meixner, T. (2006) Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Science & Technology*, 53(1), 51-59. doi:10.2166/wst.2006.00
- van Griensven, A., Ndomba, P., Yalew, S., and Kilonzo, F. (2012) Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3371–3381, doi: 10.5194/hess-16-3371-2012
- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bouten, W. and Sorooshian, S. (2003) A shuffled complex evolution metropolis algorithm for estimating posterior distribution of watershed model parameters. In Q. Duan, H. V. Gupta, S. Sorooshian, A. N. Rousseau, & R. Turcotte (Eds.), *Calibration of Watershed Models* (pp. 105-112): Washington DC: American Geophysical Union.
- Williams, J.R. (1990) The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: A Case History. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 329(1255), 421-428. doi:10.1098/rstb.1990.0184
- Yalcin, E. (2019) Estimation of irrigation return flow on monthly time resolution using SWAT model under limited data availability. *Hydrological Sciences Journal*, 64(13), 1588-1604. doi:10.1080/02626667.2019.1662025
- Yalçın, E. (2020) Karlı Dağlık Bir Havzada Günlük ve Aylık Akım Değerlerinin SWAT Modeliyle Değerlendirilmesi: Bitlis Çayı Havzası Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4). doi:10.35414/akufemubid.710126
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K. C. and Yang, H. (2007) Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference. *Journal of Hydrology*, 340(3-4), 167-182. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.04.006
- Yen, H., Park, S., Arnold, J.G., Srinivasan, R., Chawanda, C.J., Wang, R., Feng, Q., Wu, J., Miao, C., Bieger, K., Daggupati, P., Griensven, A.v., Kalin, L., Lee, S., Sheshukov, A.Y., White, M.J., Yuan, Y., Yeo, I.-Y., Zhang, M. and Zhang, X. (2019) IPEAT+: A Built-In Optimization and Automatic Calibration Tool of SWAT+. *Water*, 11, 1681. doi:10.3390/w11081681
- Yıldırım, S. (2018) Borçka barajı havzasında su rejimi, su kalitesi ve sediment veriminin SWAT kullanarak belirlenmesi ve modellenmesi, *Doktora Tezi*, Artvin Çoruh Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Artvin.
- Zaimes, G.N., Tufekcioglu, M., Tufekcioglu, A., Zibtsev, S., Corobov, R., Emmanouloudis, D., Uratu, R., Ghulijanyan, A., Borsuk, A. and Trombitsky, I. (2016) Transboundary Collaborations to Enhance Wildfire Suppression in Protected Areas of the Black Sea Region. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9(1), 108-114. doi:10.25103/jetsr.092.18

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Türkiye'nin En Kapsamlı Çevresel Restorasyon ve Endüstriyel Kümelenme Uygulaması: Ergene Nehri Havzası Çevre Koruma ve Havzalar Arası Atıksu Transferi Projesi

Yazışma yazarı: Mahmut Ekrem Karpuzcu, karpuzcu@itu.edu.tr

Referans:

Akça, L. vd., (2022), Türkiye'nin En Kapsamlı Çevresel Restorasyon ve Endüstriyel Kümelenme Uygulaması: Ergene Nehri Havzası Çevre Koruma ve Havzalar Arası Atıksu Transferi Projesi, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23(1) 27-40.

Makale Gönderimi : 18 ARALIK 2021

Online Kabul : 22 ŞUBAT 2022

Online Basım : 30 MAYIS 2022

Lütfi AKÇA¹, Cumali KINACI², Mahmut Ekrem KARPUZCU³, Mehmet CEYHAN⁴, Murat AKTAŞ⁵, Erdem GÖRGÜN⁶, Ali Fuat AYDIN⁷, Yakup KARAASLAN⁸ ve İzzet ÖZTÜRK⁹

¹Türkiye Su Enstitüsü, Üsküdar, İstanbul, Türkiye. DSİ Genel Müdürü.

ORCID: 0000-0003-4098-9442

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.

ORCID: 0000-0003-1775-3466

³İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.

ORCID: 0000-0002-6245-9621

⁴Özel Sektör – Serbest Mühendis Müşavir.

ORCID: 0000-0003-0714-4130

⁵Tekirdağ Ergene Derin Deniz Deşarj A.Ş., Tekirdağ, Türkiye.

ORCID: 0000-0002-7520-8047

⁶İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.

ORCID: 0000-0001-8086-8747

⁷İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.

ORCID: 0000-0002-6362-1782

⁸Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

ORCID: 0000-0001-8993-4771

⁹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.

ORCID: 0000-0002-8274-5326

Özet Ergene Havzası'nda çok yüksek sayı ve yoğunluğa ulaşan sanayi tesislerinden kaynaklanan yeterli oranda arıtılmamış endüstriyel ve arıtılmamış evsel atıksu deşarjları dolayısıyla Ergene Nehri su kalitesi tamamen bozulmuştur. Havzada belirlenen diğer temel baskılar ise tarımdan gelen yayılı kirlilik, belediye katı atık depolama sahalarından yerüstü ve yeraltı sularına gelen sızıntı suları ve hidromorfolojik değişikliklerdir. Bu makalede, havzada mevcut ve yeni kurulan Organize Sanayi Bölgesi (OSB) Atıksu Arıtma Tesisleri (AAT) çıkış sularının Marmara Denizi'ne deşarjının Ergene Nehri ve Marmara Denizi su kalitesine muhtemel etkileri incelenmiştir. Havzalar arası arıtılmış atıksu aktarma sistemi bütünüyle devreye alındığında, Ergene Nehri'nde KOI₅≤125 mg/L, elektriksel iletkenlik (EC) ~3000 µs/cm seviyelerinde bir su kalitesine (3. sınıf sulama suyu kalitesi) ulaşılacağı öngörülmektedir. Marmara'ya gelen toplam kirlilik yüklerinde ise KOI, TN ve TP parametreleri bakımından sırası ile %2,2, %1,3 ve %1'lik bir artış olacağı belirlenmiştir. Bu orandaki yük artışının Marmara Denizi su kalitesini sınırlı ölçüde etkilemesi beklenmektedir. Çalışmada ayrıca yapımları büyük ölçüde tamamlanan OSB AAT'leri, arıtılmış atıksu toplama boru hatları ve tünelleri ile havza dışına iletim tünel/boru hattı ve Marmara'ya derin deniz deşarj sistemi maliyet verileri sunulmaktadır. Yatırımlarla ilgili finansman modeli açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ergene Havzası, Endüstriyel Kümelenme, Çevresel Restorasyon, Havzalar Arası Atıksu Aktarımı, Derin Deniz Deşarjı

Turkey's Most Comprehensive Environmental Restoration and Industrial Clustering Implementation: Ergene River Basin Environmental Protection and Inter-Basin Wastewater Transfer Project

Abstract The water quality of the Ergene River has completely been deteriorated due to the untreated domestic wastewater discharges and insufficiently treated industrial wastewater discharges originating from industrial facilities which have reached a very high number and density in the Ergene Basin. Other main stress factors identified in the basin are diffuse pollution from agriculture; leachate from municipal solid waste landfills and hydromorphological changes. In this paper, the effects of transferring wastewater from the existing and newly established Organized Industrial Zone (OIZ) Wastewater Treatment Facilities (WWTP) to the Marmara Sea on the water quality of the Ergene River and the Marmara Sea is evaluated. When the inter-basin treated wastewater transfer system

is fully activated, it is predicted that Class III irrigation water quality will be achieved in the Ergene River, with a COD of ≤ 125 mg/L and an electrical conductivity (EC) of around 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$. The total pollution load to the Marmara Sea in terms of COD, TN and TP parameters is anticipated to increase by 2.2%, 1.3% and 1%, respectively. This increase is expected to have a limited impact on the water quality. Finally, the financing model related to the investments is explained by presenting the cost data of OIZ WWTPs, treated wastewater collection pipelines and tunnels, out-of-basin transmission tunnel/pipeline and the deep sea discharge system to Marmara.

Keywords: Ergene Basin, Industrial Clustering, Environmental Restoration, Inter-basin Wastewater Transfer, Deep Sea Discharge

1. Giriş

Ergene Nehri Türkiye'nin Avrupa (Trakya) kesiminde yer alan Arda ve Tunca ile birlikte Meriç Nehri'nin en önemli 3 kolundan biridir. Ergene, Trakya'nın Karadeniz kıyılarındaki Istranca (Yıldız) dağlarından doğan çok sayıda kolla beslenir. Türkiye-Yunanistan sınırını oluşturan Meriç Nehri ile birleştikten sonra Ege Denizi'ne dökülen Ergene'nin uzunluğu ve havza alanı sırası ile 283 km ve 2.438 km^2 'dir (Şekil 1). Ergene Havzası toplam su potansiyeli 1.71×10^9 $\text{m}^3/\text{yıl}$ olup, bunun %78'i yüzeysel su, %22'si ise yeraltı suyundan oluşmaktadır. Ergene Havzası'nda yer alan 3 ile (Tekirdağ, Kırklareli ve Edirne) ait 43 ilçe ve kasabada 1.450.000 kişi yaşamaktadır.

Ergene Havzası, çevresel standartların sıkılaştırılması dolayısıyla İstanbul'dan (özellikle 1985-2000 yılları arasında) taşınarak ağırlıklı olarak Tekirdağ ili Çerkezköy, Çorlu ve Muratlı ilçelerine yerleşen çok sayıda sanayi tesisinin adeta istilasına uğramıştır. Bu durum 1994 yılından itibaren Ergene Nehri akımlarının zaman içinde hızla artmasına (Şekil 2) sebebiyet vermiştir. Ergene Nehri'nin ortalama akımı, Ergene Nehri'nin Meriç Nehri'ne karışımından önceki akım gözlem istasyonundaki (Yenicegörece İstasyonu) ölçümlerden de görüldüğü gibi 1994 yılından sonra doğal debisinin 6 katına ulaşmıştır.

1.1 Ergene Havzası'ndaki sanayi tesisleri ve OSB uygulamaları

Endüstriyel kümelenme kavramı, bölgesel kalkınma stratejilerinin bir parçası olarak özellikle son yıllarda ön plana çıkmıştır. Ülkemizde de Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) içinde kümelenmenin teşvik edilmesi önem kazanmıştır. OSB kavramı ilk olarak sanayinin belirli bir plan dâhilinde yerleştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla 19. yüzyıl sonlarında İngiltere'de uygulanmış, daha sonra Amerika Birleşik Devletleri ve diğer sanayileşen ülkelerde de yaygınlaşmıştır. Ülkemizde ilk OSB uygulaması 1961 yılında Bursa'da kurulan OSB ile gerçekleşmiştir. 1962-2002 yılları arasında 70 adet OSB projesi hayata geçirilirken, 2003-2020 yılları arasında 131 adet OSB projesi tamamlanmıştır (STB, t.y.). 2019 yılında Resmi Gazete'de yayınlanan Organize Sanayi Bölgeleri Uygulama Yönetmeliği OSB'leri İhtisas OSB'ler, İslah OSB'ler ve Karma OSB'ler olmak üzere üç kategoriye ayırmıştır. İhtisas OSB'ler aynı sektör grubunda ve bu sektör grubuna dâhil alt sektörlerde faaliyet gösteren tesislerin yer aldığı OSB'yi, İslah OSB'ler 1/7/2017 tarihinden önce mer'i plana göre yapılaşan sanayi tesislerinin bulunduğu alanların ıslah edilmesi suretiyle oluşacak OSB'yi, Karma OSB'ler ise farklı sektörlerde faaliyet gösteren tesislerin yer aldığı OSB'leri ifade etmektedir (STB, 2019).

Kentlerde uygun yerlerde kurulan OSB'ler, şehir içinde dağınık halde bulunan sanayi kuruluşlarının tek bir bölgede toplanmasını sağlayarak şehrin planlı gelişmesine katkıda bulunur. Üretimde verimliliğin ve kar artışının sağlanması ve sanayinin az gelişmiş bölgelerde yaygınlaştırılması da OSB uygulamalarının hedefleri arasında yer alır. OSB uygulamalarının çevre kirliliğini azaltmak açısından da önemli fonksiyonları vardır. Sanayinin şehir merkezi dışına taşınması ile merkezde meydana gelebilecek hava kirliliği ve gürültü gibi çevre sorunlarının önüne geçilmiş olur. Ayrıca, OSB'lerde kurulan müşterek atıksu arıtma tesisleri ile daha etkili ve daha az maliyetli şekilde endüstriyel atıksuların bertarafı mümkün olmaktadır. TÜİK tarafından yayınlanan Organize Sanayi Bölgeleri Su, Atıksu ve Atık İstatistiklerine göre, 2018 yılında OSB atıksu arıtma tesislerinde 252 milyon m^3 atıksu arıtılmıştır. Bu oran, deşarj edilen 268 milyon m^3 atıksuyun %94,3'üne karşılık gelmektedir. Arıtılan atıksuyun %79,5'i akarsuya, %8,7'si kuru dere yatağına, %5,1'i şehir kanalizasyonuna, %6,7'si ise diğer alıcı ortamlara deşarj edilmiştir (TÜİK, 2019).

Ergene Havzası'ndaki sanayi kuruluşlarının sektörel dağılımları Şekil 3'te görülmektedir. Havzadaki sanayi tesislerinde, Türkiye'deki tekstil, margarin, kâğıt ve ambalaj ile işlenmiş deri üretiminin sırası ile %10, 25, 40 ve 37'si gerçekleştirilmektedir. Özellikle 1985 sonrası dönemde havzaya yerleşen sanayi kuruluşlarının büyük çoğunluğu Organize Sanayi Bölgeleri (OSB'ler) dışında, dağınık tekil tesisler halinde dağılım göstermektedir. OSB konseptiyle planlı endüstriyel alanlar Çerkezköy OSB ve Çorlu Deri OSB ile sınırlı kalmıştır.

Havzadaki 3000'in üzerinde sanayi tesisinin ~%80'i Tekirdağ ili sınırları içinde bulunmaktadır. Havzada sıra dışı bir sayı ve yoğunluğa ulaşan sanayi tesislerinde açığa çıkan, yeterli oranda arıtılmamış, endüstriyel ve arıtılmamış evsel atıksu deşarjları dolayısıyla Ergene Nehri'nin su kalitesi tamamen bozulmuştur. Havzada ortaya çıkan atıksu miktarları Şekil 4 ile verilmiştir. Özellikle yaz aylarında, orta kirlilikte evsel atıksu karakterinde, çok koyu renkte ve yüksek tuzlulukta kesif kokulu bir atıksu kütlesi görünümündeki Ergene Nehri, yakınındaki yerleşimlerde yaşayanlar ile sulu tarım yapan çiftçilerin çok yoğun şikâyetine maruz kalmıştır. Şiddeti giderek artan tepkiler üzerine, 2003 yılında TBMM'de teşkil edilen "Ergene Araştırma Komisyonu" konuyu geniş bir şekilde inceleyerek tespit ve önerilerini içeren Ergene Raporu'nu Meclis Başkanlığı ve Hükümete sunmuştur (TBMM Ergene A.K., 2002). Bu rapor sonrası, Ergene Havzasıyla ilgili çalışmalar hız kazanmış, Meriç-Ergene Havzası Endüstriyel Atıksu Yönetimi Ana Planı (Mülga Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010) ile Ergene Havzası Koruma Eylem Planı (Mülga

Çevre ve Orman Bakanlığı, 2011) hazırlanmıştır.

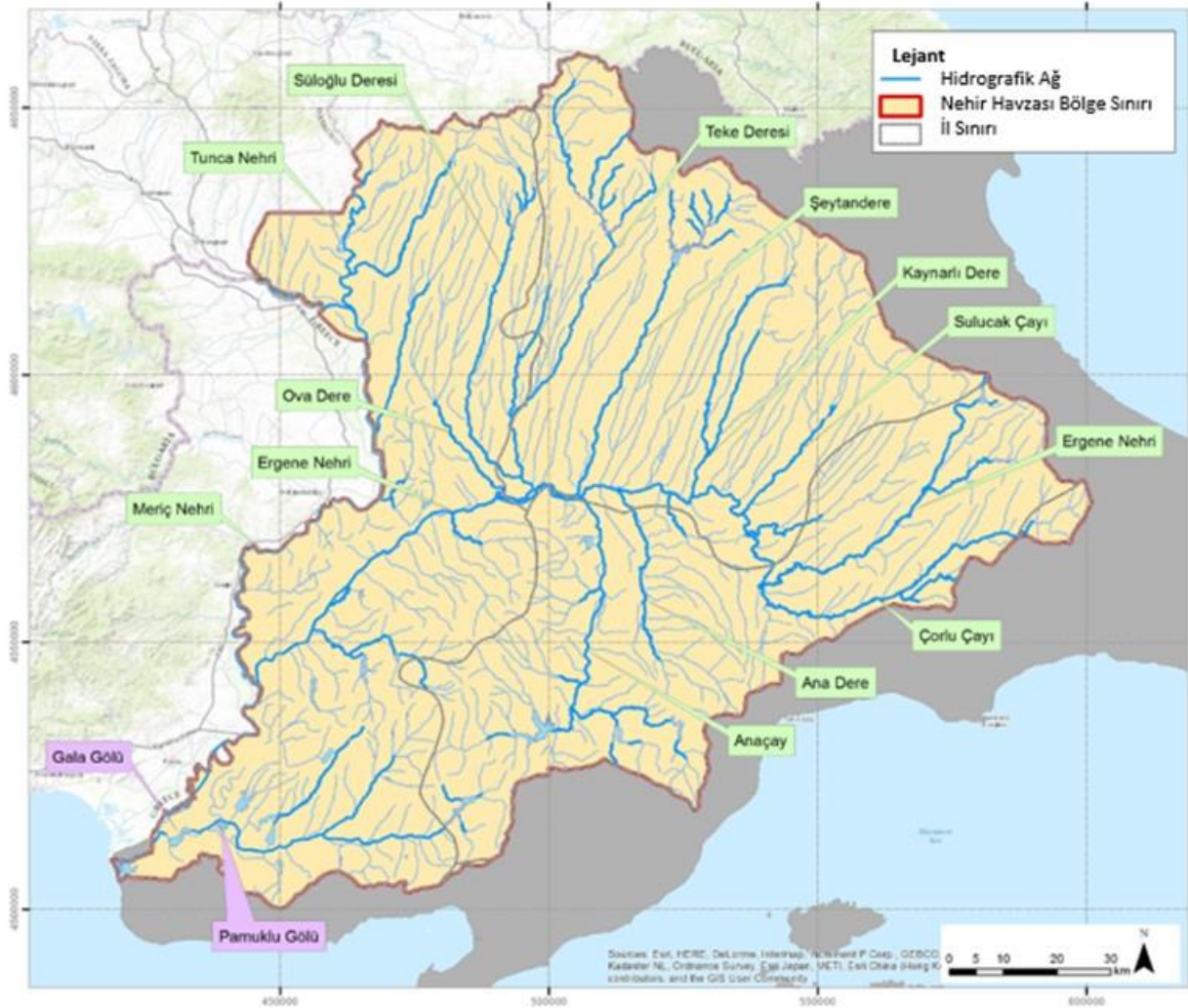
1.2 Ergene Havzası koruma eylem planı

Mülga Çevre ve Orman Bakanlığı (şimdiki Tarım ve Orman Bakanlığı) öncülüğünde Mayıs 2011’de uygulaması başlatılan Ergene Havzası Koruma Eylem Planı ile havza bütününde gerekli kirlilik kontrol tedbirleri alınarak, Ergene Nehri Su Kalitesinin ilk etapta III. Sınıf sulama suyu kalitesine yükseltilmesi hedeflenmiştir. Dağınık sanayilerin ıslah OSB çatısı altında toplanması için Türkiye de ilk defa 12.04.2011 tarihinde OSB Kanunu’nda, 04.08.2011 tarihinde ise OSB Yönetmeliği’nde değişikliğe gidilmiştir.

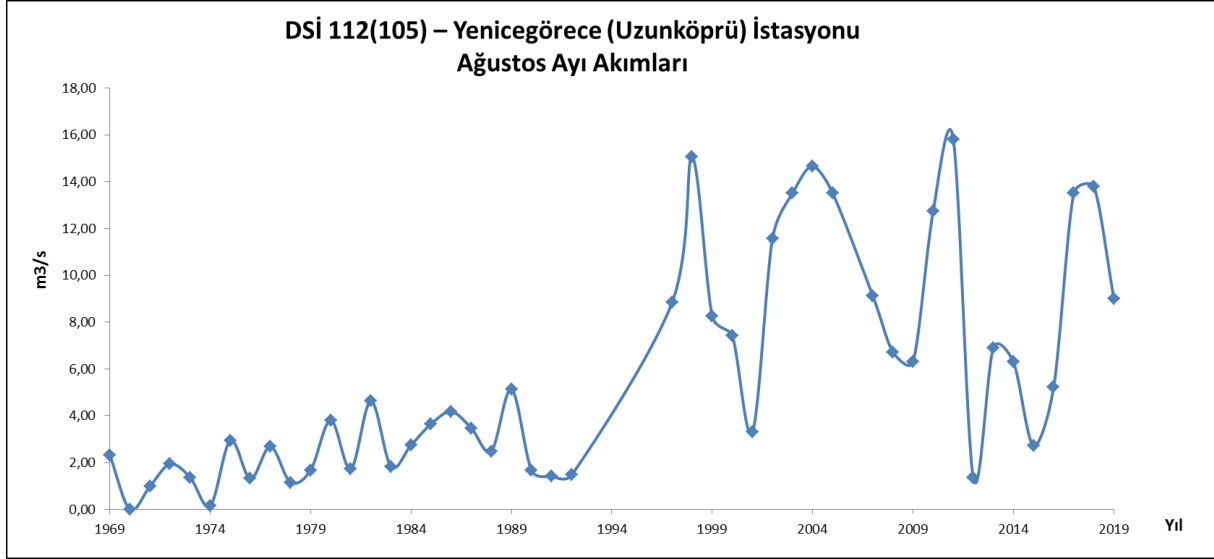
Trakya Çevre Düzeni Plan değişikliği ile kirlenici vasfı yüksek tesislere ve OSB’lerde doluluk oranı %75 seviyesine ulaşmadan münferit sanayi yatırımlarına izin verilmemiştir. DSİ’nin kuruluş kanunda değişikliğe gidilerek Belediye Atıksu Arıtma Tesislerinin (AAT) DSİ tarafından inşa edilmesine karar verilmiştir. Bu Eylem

Planı kapsamında 2011-2020 döneminde başlıca aşağıdaki projelerin gerçekleştirilmesi öngörülmüştür:

- Havzadaki 3 ildeki 12 Belediyede, kentsel atıksuları arıtacak ileri biyolojik atıksu arıtma tesislerinin (AAT) DSİ tarafından genel bütçe ödenekleri ile inşa edilmesi
- Tekirdağ’ın Çerkezköy-Muratlı ilçeleri arasında dağınık vaziyetteki tekil endüstri tesislerinin, yeni kurulacak 10 adet OSB bünyesinde kümelendirilmesi ve proses atıksularını arıtacak büyük kapasiteli ortak AAT’leri kurulması
- Büyük kapasiteli OSB AAT Çıkış sularının bir toplama sistemi (boru hatları ve tüneller) ile birleştirilerek ortak bir ana iletim ve derin deşarj boru hattı ile komşu Marmara Denizi havzasına aktarılması
- Yeni oluşturulan 10 OSB’de, gerekli dâhili atıksu, yağmur suyu ve içme/kullanma suyu şebeke sistemlerinin kurulması
- Aşırı su çekimi dolayısıyla tuzlanma riski taşıyan Çorlu Deresi alt havzasındaki Çorlu akiferinin restorasyonu



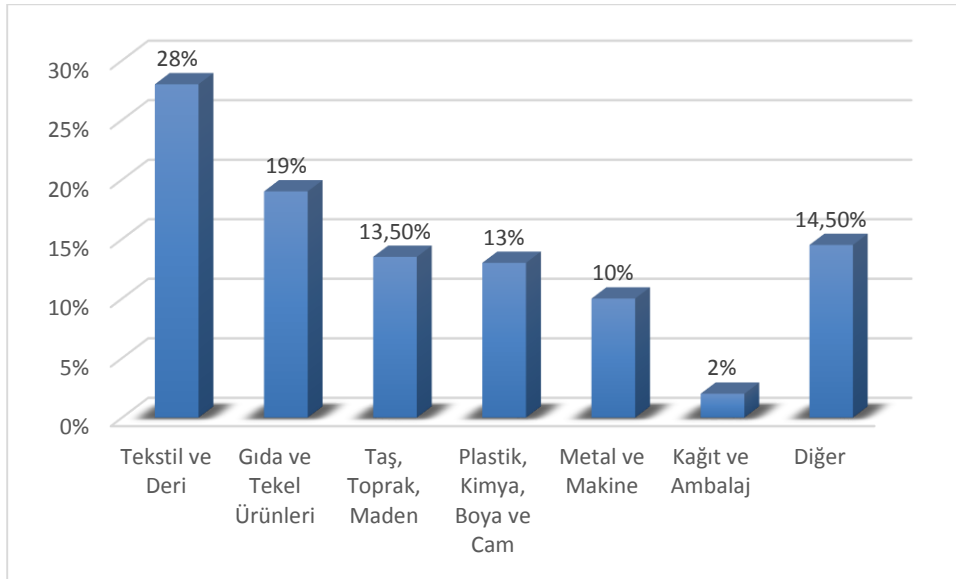
Şekil 1. Meriç-Ergene Havzası (TOB-SYGM, 2017).



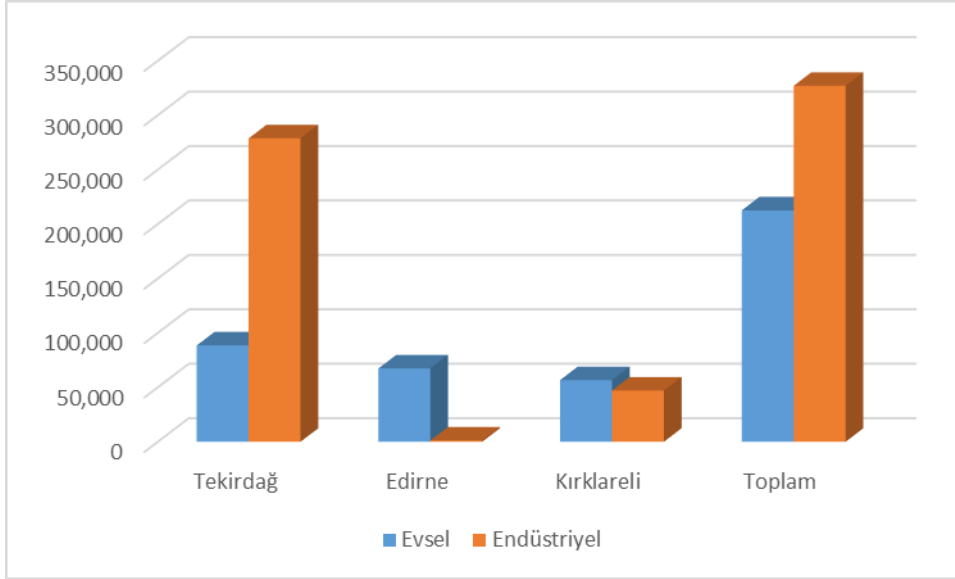
Şekil 2. Ergene Nehri debisinin zamanla değişimi.

Toplam 4×10^9 TL (1,1 Milyar \$ (2017)) bütçe öngörülen söz konusu Master Plan ve Havza Koruma Planları İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünün de katkılarıyla hazırlanmıştır. Bu makalede, Meriç-Ergene Havzası Endüstriyel Atıksu Yönetimi Master Planı (2010) kapsamında yürütülen, havzada mevcut 2 ve yeni kurulan 6 OSB AAT çıkış sularının havzalar arası transfer yoluyla Marmara Denizi'ne aktarılması (deşarj) sonrası, Ergene

Nehri ve Marmara Denizi su kalitesine muhtemel etkileri ile ilgili tespit ve değerlendirmeler sunulmaktadır. Çalışmada ayrıca yapımları büyük ölçüde tamamlanan OSB AAT'leri, artırılmış atıksu toplama boru hatları ve tünelleri ile havza dışına iletim tünel/boru hattı ve Marmara'ya derin denizdeşarj sistemi maliyet verileri verilerle yatırım ile ilgili finansman modeli açıklanmıştır.



Şekil 3. Ergene'de sanayi tesislerinin sektörel dağılımı (DSİ, 2010).



Şekil 4. Havzada ortaya çıkan atıksu miktarları.

2. Ergene'yi Kirleten Kaynaklar ve Kirlenmenin Boyutları

Ergene Havzası'nda bulunan Tekirdağ, Edirne ve Kırklareli illerinde yer alan sanayi tesislerinin su kullanımları ile atıksu debilerinin tam olarak tespiti, izinsiz kuyulardan yeraltı suyu çekiminin tam olarak önlenemeyişi, kapasite/üretim prosesleri bilgilerindeki çelişkili ve yanlış beyanlar dolayısıyla zorluklar içermektedir. Bu konudaki en güncel veriler, Ergene Havzası Çevre Yönetimi Master Planı (ÇOB, 2008) kapsamında derlenmiştir (Tablo 1). Tablodan görüldüğü üzere Ergene Havzası'ndaki endüstriyel debinin %85'i, KOİ ve TN yüklerinin ise ~%90'ı Tekirdağ ilinde kurulu tesislerden kaynaklanmaktadır. Havzadaki evsel yerleşimler ile sanayi tesislerinden kaynaklanan atıksu debileri de Tablo 2'de ayrıca verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde, havzadaki endüstriyel atıksu debisinin ağırlıklı (toplamın %60'ı) olduğu açıktır. Havzada belirlenen temel baskılar; yerüstü sularına endüstriyel deşarjlar ve artırılmamış kentsel deşarjlar, yerüstü ve yeraltı sularına tarımdan gelen yayılı kirlilik;

belediye katı atık depolama sahalarından yerüstü ve yeraltı sularına gelen kirlilik deşarjları veya sızıntı suları; ve hidromorfolojik değişikliklerdir. Havzada önemli noktasal kaynaklı baskı altında 46 kıta içi yerüstü suyu kütlesi ve geçiş suyu kütlesi (toplamın %38.7'si) bulunmaktadır. Önemli yayılı kaynaklı baskı altında 111 su kütlesi (toplamın %93'ü) bulunmaktadır. Meriç-Ergene Havzası'nda yerüstü sularının bütün baskılar açısından risk durumu Şekil 5'te gösterilmiştir (TOB-SYGM, 2017).

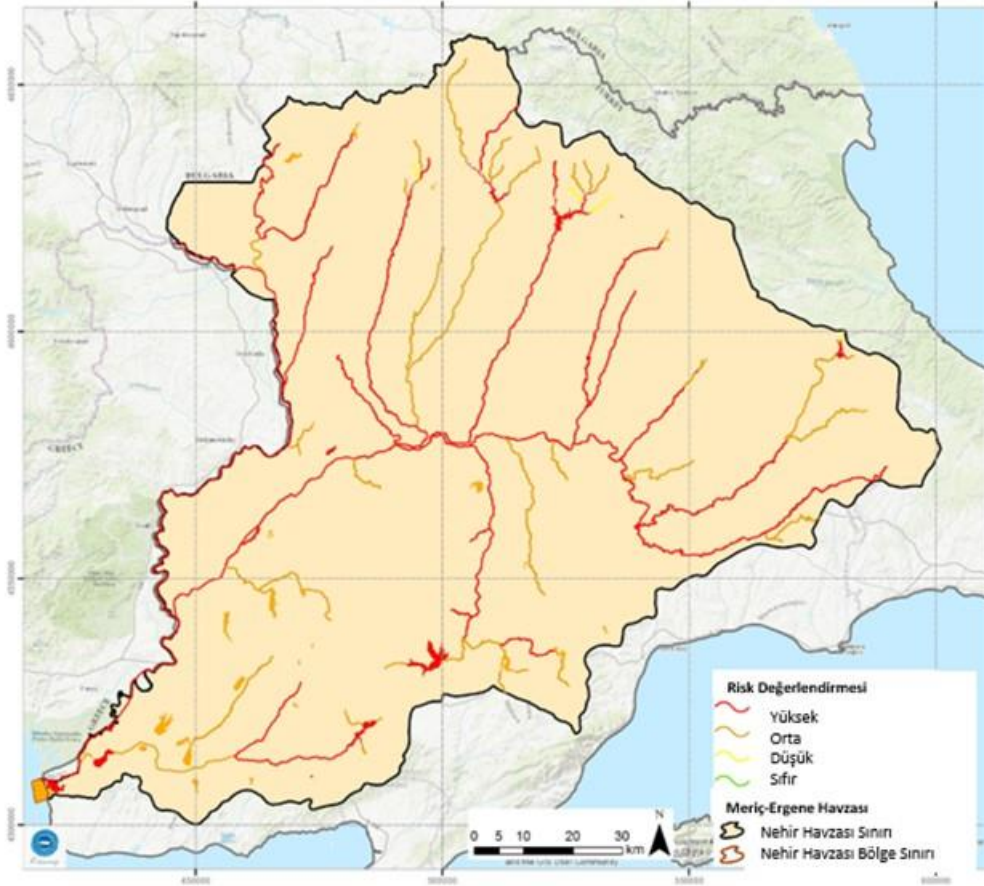
1980 öncesinde, Ergene Nehri ve iki ana kolunda (Ergene ve Çorlu Dereleri) su kalitesi, fiziko-kimyasal parametreler bakımından II. Sınıfın altında değildi. İstanbul'daki sanayi tesislerinin, 1985 sonrası yoğun bir şekilde Çerkezköy – Muratlı arasındaki bölgeye (E5 Karayolu boyunca) gelmesi sebebiyle Çorlu Deresi'nden başlayarak Ergene'nin su kalitesinde hızlı bir kötüleşme gözlemlendi. Bu durum özellikle 2000 yılı sonrası havzada yürütülen çeşitli projeler kapsamında gerçekleştirilen su kalitesi izleme çalışmalarında net bir şekilde vurgulanmaktadır (ÇOB, 2008; TÜBİTAK – İTÜ HKEP Projesi, 2008; İO Çevre 2010).

Tablo 1. Havzanın il bazında kirlilik yükleri (ÇOB, 2008).

HAVZAYA ULAŞAN KİRLİLİK YÜKÜ						
Şehir	Atıksu Debisi (m³/gün)	KOİ (kg/gün)	BOİ ₅ (kg/gün)	AKM (kg/gün)	TN (kg/gün)	TP (kg/gün)
Tekirdağ	278.780 (%85)	193.283 (%92)	68.309 (%94)	75.600 (%92)	7.803 (%91)	2.206 (%81)
Kırklareli	47.090 (~%14)	15.302 (~%7)	3.999 (~%6)	6.478 (%8)	711 (%8)	486 (%18)
Edirne	1.183 (<%1)	510 (<%1)	207 (<%1)	210 (<%1)	48 (~%1)	16 (%1)
Toplam	327.053	209.095	72.515	82.288	8.562	2.708

Tablo 2. Havzada oluşan toplam atıksu miktarı (SYGM, 2011).

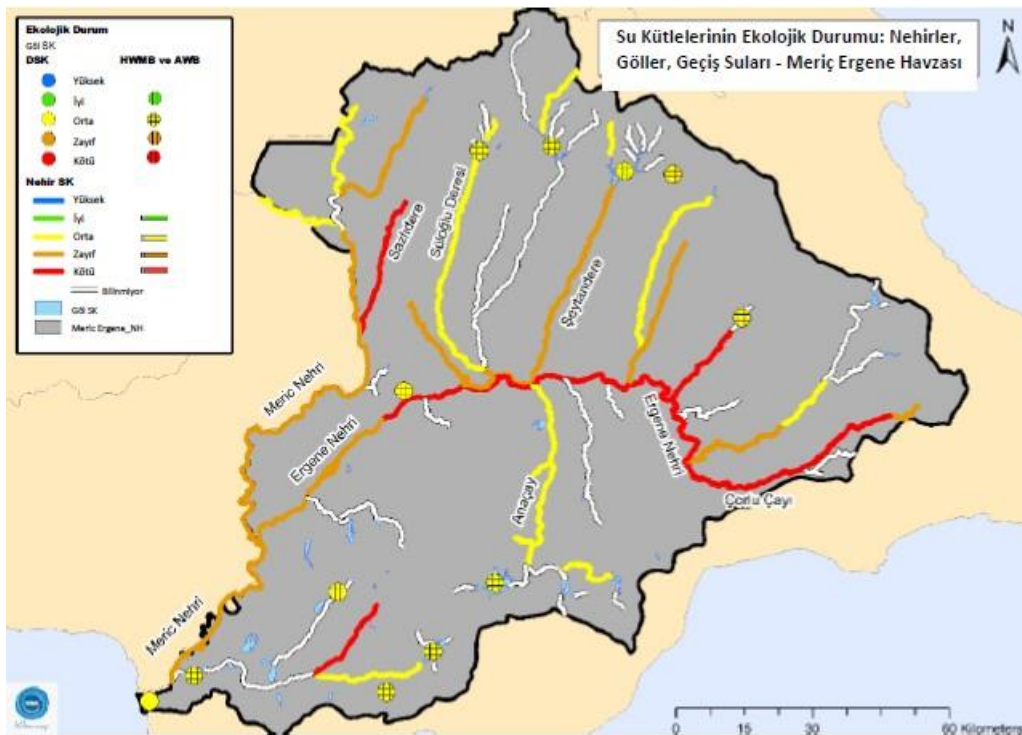
İl	Evsel Atıksu m³/gün	Endüstriyel Atıksu m³/gün	Toplam
Tekirdağ	88.553	278.780	367.333
Edirne	67.395	1.183	68.578
Kırklareli	56.651	47.090	103.741
Toplam	212.599 (%40)	327.053 (%60)	539.652



Şekil 5. Yerüstü Suyu Kütlelerinde Riski Durumu (TOB-SYGM, 2017).

Son olarak AB finansmanı ile yürütülen Ergene Havzası Nehir Havzası Yönetim Planı Projesinde de, Ergene Nehri su kütlelerinin ekolojik durumu, Çorlu Deresi'nden itibaren ana kolun ~%60'ında "kötü" olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 6) (ÇOB, 2008). Bu sınıflama Türkiye'deki Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (EK5 Tablo 2)'nde IV. Sınıf (zayıf) su kalitesi durumuna tekabül etmektedir. Temel kalite parametrelerinden olan KOİ ve iletkenlik değerlerinin de sırası ile >600 mg/L ve >5000 µS/cm seviyelerine ulaştığı Ergene Nehri

suyunun, sulama dâhil neredeyse hiçbir maksatla kullanılmayacak ve canlı yaşamına imkân tanımayacak derecede riskli bir hal alması üzerine konu TBMM ve Hükümetin en öncelikli Çevre Sorunu olarak gündeme gelmiş ve 2011 yılından itibaren, Çevre ve Orman Bakanlığı'nca 15 projeden oluşan ~1 milyar \$'lık bir Mega Proje halinde Ergene Havzası Koruma Eylem Planı'nın uygulanması kararlaştırılmıştır.



Şekil 6. Su Kütlelerinde Ekolojik Durum (TOB-SYGM, 2017).

3. Meriç - Ergene Havzası Koruma Eylem Planı Kapsamında Yürütülen Eysel ve Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Çalışmaları

Kırklareli, Edirne ve Tekirdağ illerini içine alan Trakya Bölgesini sosyo-ekonomik yönden etkileyen Ergene Nehri ve havzasının kirliliğinin ve çevreye verdiği olumsuz etkilerinin araştırılıp, çözüm için gereken acil tedbirlerin alınması maksadıyla 12.12.2002 tarihinde bir Meclis Araştırma Komisyonu kurulmuştur. Araştırma Komisyonu çalışmaları kapsamında Sivil Toplum Kuruluşları ve ilgili kamu ve özel kuruluş temsilcileri ile görüşülmüş, Ergene Havzası'nda incelemelerde bulunulmuştur. Dört buçuk aylık detaylı bir çalışma gerçekleştiren Meclis Komisyonu, "Ergene Havzası'na Ait Sorunlar ve Çözüm Önerileri" isimli rapor hazırlamıştır. Rapor doğrultusunda Ergene'nin neden kirlendiği ve havzanın geleceğinin kurtarılması için yapılması gerekenler ortaya koyulmuştur. 2006 yılında başlayan çalışmalar sonucunda Ergene Havzası Çevre Yönetimi Master Planı hazırlanmıştır. Bu çalışma ile Ergene'deki mevcut su kalitesi tespit edilmiş olup, Ergene'de kirliliğe sebep olan sanayilerin sektörel listesi oluşturulmuştur. Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2008 yılında hazırlanmıştır. Söz konusu eylem planı ile evsel AAT'lerin mevcut durumu ortaya konulmuş olup, müşterek atıksu altyapı sistemlerinin (kanalizasyon) yapılıp yapılamayacağı değerlendirilmiştir. Eylem Planı kapsamında, evsel atıksular, sanayi atıksuları, tarım alanlarından gelen yayılı yükler ve düzensiz Katı Atık Depolama Tesislerinden gelen sızıntı suları dâhil havzadaki kirlenme kaynakları ortaya konulmuştur.

Mülga Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından Ekim 2010'da, "Meriç-Ergene Havzası Endüstriyel Atıksu Yönetimi Ana Plan Çalışması" hazırlanmıştır. Söz konusu çalışmanın maksadı, havzada yer alan endüstrilerden kaynaklanan atıksular için yönetim sistemi geliştirilerek havzanın mevcut su kalitesinin iyileştirilmesidir. Proje kapsamında; Ergene Nehri'nin alıcı ortam özellikleri dikkate alınarak hâlihazır durumu incelenmiş, gelecekte planlanan yararlı kullanımları için gerekli kalite ölçütleri saptanmış ve deşarj standartlarına ilişkin stratejiler belirlenmiştir. Ergene Havzası'nda kirliliğin önlenmesi maksadıyla, 06.05.2011 tarihinde Mülga Çevre ve Orman Bakanı Prof. Dr. Veysel EROĞLU tarafından Tekirdağ ili Çerkezköy ilçesinde kamuoyuna açıklanan "Ergene Havzası Koruma Eylem Planı" ile Ergene Havzası ıslahı ve su kalitesinin iyileştirilmesi çalışmaları ivme kazanmıştır.

Ergene Havzası'nda evsel atıksuların kontrol altına alınması maksadıyla nüfusu 10.000'den büyük 13 belediyenin 12 tanesinin Atıksu Arıtma Tesisleri (AAT), 2872 sayılı Çevre Kanunu ve 5393 sayılı Belediye kanununa göre Belediyelerin görevleri arasında olmasına rağmen, DSİ Genel Müdürlüğü tarafından yapılmıştır. Lüleburgaz AAT'si Avrupa Birliği hibesi ile inşa edilmiştir. 13 atıksu arıtma tesisi "Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği" gerekliliklerini karşılayacak şekilde karbon giderimine ilave olarak azot ve fosfor giderimli yapılmıştır (Şekil 7). Diğer belediyelerin atıksu toplama ve arıtma sistemleri Başbakanlık SUKAP Projesi kapsamında İLBANK A.Ş tarafından tamamlanmaktadır.



Şekil 7. Ergene Havzası'nda evsel atıksu arıtma tesislerinin yerleri.

Ergene Havzası'nda özellikle Çerkezköy – Muratlı arasında E5 (İstanbul – Tekirdağ – Edirne) karayolu çevresinde dağınık şekilde yerleşen sanayi tesislerini belli sayıda tesisten oluşan kümeler halinde bir araya getirebilmek için OSB Kanunu'nda 2010 yılında yapılan bir değişiklikle gerekli yasal altlık hazırlanmıştır (STB, 2010). Bu değişikliğe istinaden, dağınık vaziyetteki tesisler 2012 yılında toplam 10 adet (Velimeşe, Ergene 1, Ergene 2, Muratlı, Çorlu 1, Veliköy, Kapaklı, Yalıboyu, Büyükkarıştıran ve Evrensekiz)

Islah OSB haline getirilmiştir. Bu Islah OSB'ler 1 yıl içerisinde OSB Kanunu'nda öngörülen kriterleri yerine getirerek (OSB'ler için gerekli şartların sağlanması) 2013 yılında OSB statüsüne kavuşturulmuşlardır. Bunlardan Büyükkarıştıran ve Evrensekiz dışındakiler ortak arıtma tesisi kurmuş veya kurmak için çalışma başlatmışlardır (Tablo 3). Muratlı OSB ortak arıtma tesisi deşarjı Ergene Nehri'ne verildiği için tabloya eklenmemiştir.

Tablo 3. Bölgedeki OSB'ler.

OSB	Kuruluş Yılı	Tesis Sayısı	Doluluk (%)	Oranı	Toplam (ha)	Alan
Ortak Arıtmaları	Çerkezköy OSB	1976	251	%76	1.234	
Mevcut Olanlar	Çorlu Deri OSB	1997	95	%75	120	
	ASB*	1996	50	%80	190	
Ortak Arıtma Tesisleri Kurulanlar	Ergene 1 OSB	2012	61	%47	408	
	Ergene 2 OSB	2012	131	%33	718	
	Velimeşe OSB	2012	178	%34	988	
	Veliköy OSB	2012	80	%43	400	
	Çorlu 1 OSB	2012	53	%35	341	
	Kapaklı Avrupa OSB	2012	35	%33	187	
	Yalıboyu IOSB	2013	19	%33	38	
Ergene Havzası Toplam			953	%49	4.624	

*Avrupa Serbest Bölgesi

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Bu şekilde OSB'ler halinde kümelenen ~950 adet tekil sanayi tesisindeki 350'nin üzerindeki tekil endüstriyel AAT'nin de belli bir süreçte kapatılarak inşa edilecek müşterek AAT'ler ile 4 büyük tesiste toplanması ve çıkış sularının komşu Marmara Denizi havzasına aktarılması öngörülmüştür. OSB AAT çıkış sularının Ergene'den (Çorlu Deresi Alt Havzası'ndan) Marmara'ya transferinde başlıca aşağıdaki etkenler dikkate alınmıştır (Odakent-İTÜ, 2012):

- OSB proses atıksularındaki "çok yüksek renk ve tuzluluk/iletkenlik" parametrelerinin bilinen İleri Biyolojik Arıtma Prosesleri (A2O Prosesi) ile giderilemeyişi,
- İleri Biyolojik Arıtma Sonrası renk ve iletkenlik giderimi maksatlı ilave membran arıtma (mikrofiltrasyon + UF + NF ± TO sistemi) uygulanması halinde birim maliyetin ~ 0,7 \$/m³ gibi çok yüksek değerlere ulaşması ve ayrıca giriş debisinin ~%50'sine varan TO konsantrasyonunun Ergene'ye deşarjının mümkün olmayışı,
- İleri Biyolojik Arıtma sonrası ozonla oksidasyon teknolojisi uygulanması halinde (~0,13 \$/m³ maliyetli) de, renk giderilmekle birlikte tuzluluk/iletkenliğin giderilemeyişi ve bu sebeple ozonlama

sonrası çıkış suyunun yine Ergene'ye verilemeyecek olması;

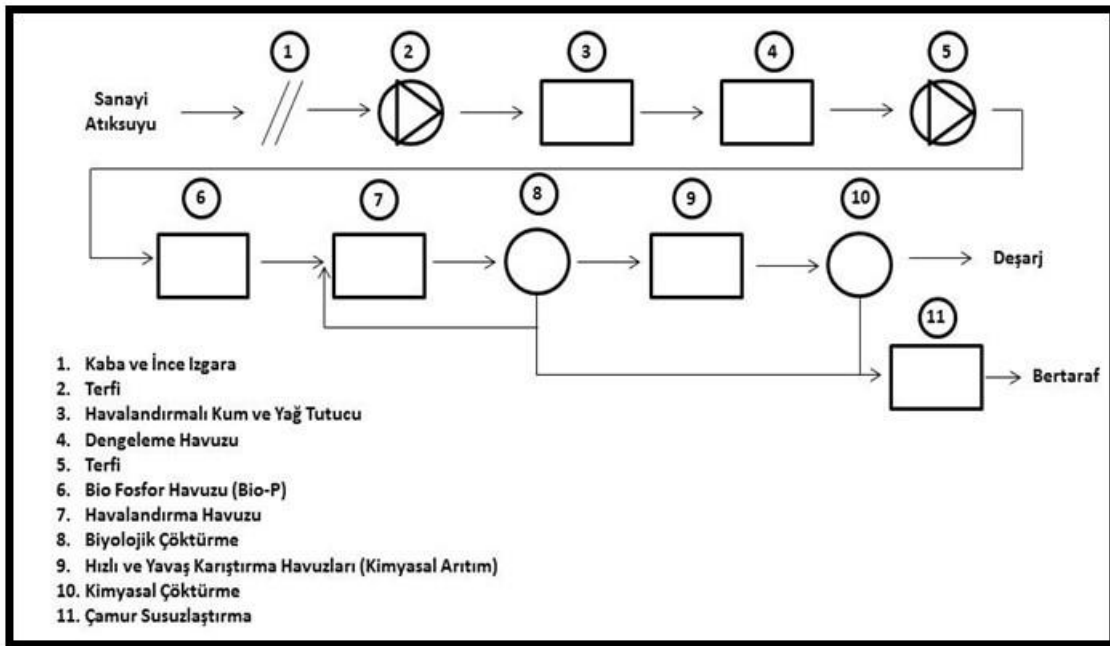
- Ergene Havzası'ndaki OSB'lerin İleri Biyolojik AAT çıkışlarının Marmara'ya aktarılması (Derin Deniz Deşarjı) projesi sayesinde, sorun teşkil eden renk ve tuzluluk/iletkenlik parametrelerinin ~0,12 \$/m³ birim maliyetle (ve Marmara Denizi'nin su kalitesi ve sucul ekosistemine asgari etki ile) gideriminin mümkün oluşu.

Endüstriyel Atıksu Yönetimi Master Planı (İO Çevre A.Ş., 2010) ve Meriç-Ergene Havzası Müşterek OSB AAT Çıkış Sularının Marmara'ya Derin Deşarj Sistemi Fizibilite Raporu (Odakent AŞ - İTÜ, 2012) doğrultusunda, tiplendirilmiş A2O ve kimyasal son çöktürme prosesi olarak tasarlanan (Şekil 8) Müşterek AAT'ler ile Ergene Havzası dışına aktarılarak -47,5 m derinlikten Marmara Denizi alt tabakasına deşarjı öngörülen atıksu miktarı ilk aşamada ~5 m³/s'dir (Tablo 4). OSB Müşterek AAT'leri proses tasarım kriterleri için aynı bölgede 1976 yılından beri faal durumdaki tekstil ağırlıklı tipik sektörel profile sahip Çerkezköy OSB AAT'de (Q = 50.000 m³/gün) tecrübe edilen ham atıksu değerleri (KOI=1500 mg/L, AKM=350 mg/L, TKN=75 mg/L, TP=5 mg/L, Renk= 1500-2000 Pt-Co) esas alınmıştır.

Tablo 4. Ergene Havzası'ndaki (Çorlu Deresi Alt Havzası) endüstriyel AAT çıkış debi miktarları.

OSB'ler	1.Kademe, Q _{AAT} (m ³ /gün)	2. Kademe, Q ₂₀₃₀ (m ³ /gün)
Ergene 1 OSB AAT	60.000	90.000
Ergene 2 OSB AAT	60.000	90.000
Velimeşe	150.000	200.000
Çorlu 1 OSB AAT	15.000	30.000
Çorlu Deri İhtisas ve Karma OSB AAT	36.000	48.000
Çerkezköy OSB AAT*	80.000	120.000
TOPLAM	401.000	578.000

*Çerkezköy OSB AAT deşarj debisi 2021 yılı itibarıyla yaklaşık 50.000 m³/gün düzeyindedir.



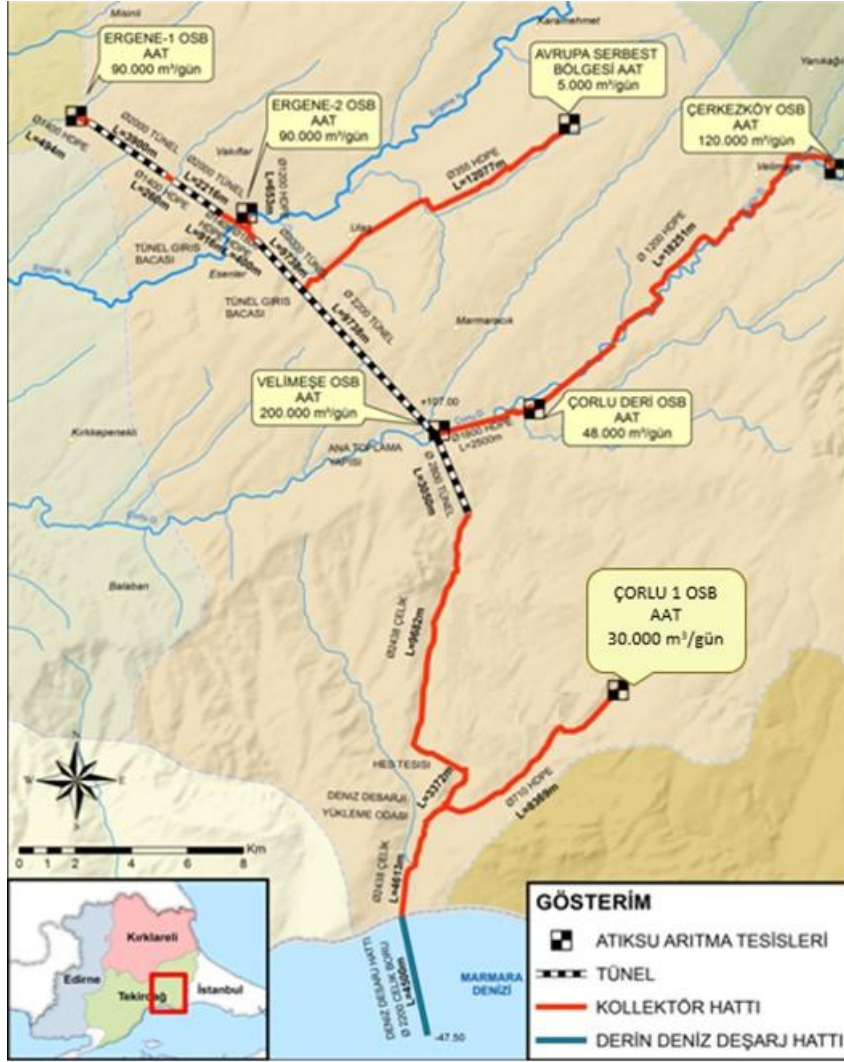
Şekil 8. Müşterek AAT akım şeması.

Ergene'den (Çorlu Deresi Alt Havzası'ndan) Marmara'ya aktarılacak OSB AAT çıkış suları için Tablo 5'teki deşarj limitleri esas alınmıştır. Seçilen arıtma prosesi (A2O + FeCl₃ ile Kimyasal Çöktürme) ile giderilemeyen renk parametresinin derin deniz

deşarjı ile -47,5 m'den Marmara Denizi'ne deşarj sonrası seyrelme yoluyla (asgari 45 misli seyrelme) gözle fark edilmeyecek seviyeye getirileceği öngörülmüştür (Odakent A.Ş. - İTÜ 2012). Ergene Derin Deniz Deşarj Sistemi Haritası Şekil 9'da gösterilmektedir.

Tablo 5. Baz alınan deşarj standartları (Odakent A.Ş. – İTÜ, 2012).

Parametre	Birim	Ergene Nehrinde Deşarj Standartlarına Kısıtlama Genelgesi (2019)	SKKY (2004) Kompozit Numune 2 saatlik	Tasarıma Esas Kriterler
AKM	mg/L	-	200	100
KOİ	mg O ₂ /L	200	400	200
TN	mg N/L	-	20	15
TP	mg P/L	-	2	1
Renk	Pt-Co	-	280	260



Şekil 9. Ergene derin deniz deşarj sistemi.

Kavramsal tasarım ve ihale dokümanları Mülga Orman ve Su İşleri Bakanlığı koordinasyonunda İTÜ tarafından hazırlanan OSB AAT'leri (5 tesis), arıtılmış atıksu ana toplama ve derin deniz deşarj sistemi ve OSB'lerin atıksu/yağmursuyu şebekeleri 2014-2015 döneminde ayrı paketler halinde ihale edilmiştir. Bu yatırımlarla ilgili

faaliyetleri sahada yürütmek üzere ilgili OSB yönetimlerinin ortaklığı ile kurulan Tekirdağ Ergene Derin Deniz Deşarj A.Ş., inşaat işlerinin kontrol ve denetimini sağlamıştır. Söz konusu ihale işlerinin mali portresi Tablo 6'da topluca verilmiştir.

Tablo 6. Ergene Havzası (Çorlu Alt Havzası) OSB ortak AAT ve Marmara'ya derin deniz deşarjı sisteminin mali portresi.

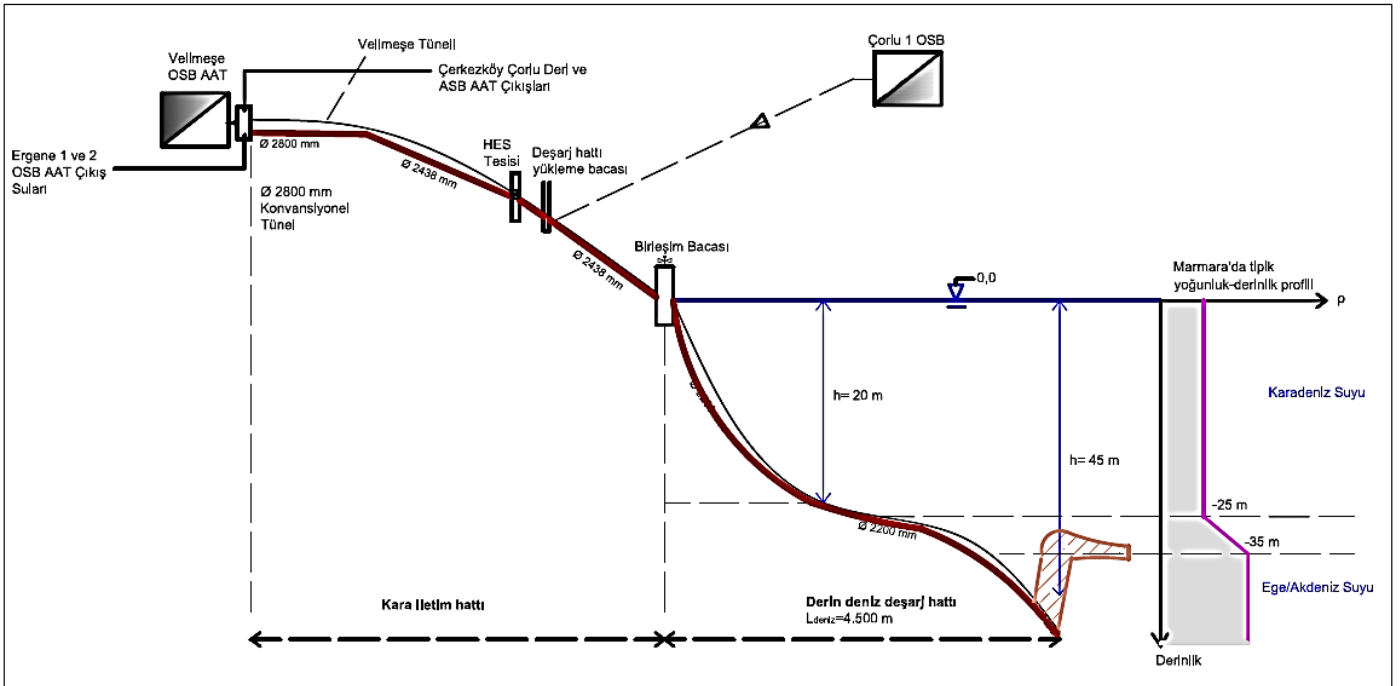
	Milyon Dolar (2018 Yılı)
OSB Ortak AAT'leri (4 Tesis)	97,6
Atıksu Kanalizasyon Şebekeleri	38,6
Arıtılmış Atıksu Toplama ve Derin Deniz Deşarj Sistemi	117,0
Kalan Eksik İşler (~%20)	47,0
Toplam	~300,2

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Tablo 6'daki ~300 x 10⁶ \$'lık yatırım bedeli, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nca ilgili OSB Yönetimlerine sağlanan (%2'lik faizle 3 yıl (ödemesiz) +17 yılda kredinin tamamı ödemeli) kredi ile finanse edilmiştir. Toplam 456.000 m³/gün (5,3 m³/s) kapasiteli söz konusu tesislerin yıllık birim yatırım maliyeti yeni OSB'ler için 0,12~0,20 \$/m³, mevcut OSB'ler için debi ile orantılı ortalama yatırım maliyeti ise ~0,12 \$/m³'tür. Bu AAT'inde m³/gün tasarım kapasitesi başına ilk yatırım maliyeti 260~340 \$/m³/gün, eşdeğer nüfus başına toplam yatırım maliyetleri 21-23 \$/EN (maksimum 52) aralığında değişim göstermiştir.

Ergene (Çorlu Alt Havzası) Bölgesi OSB AAT çıkış sularını Marmara'ya aktaran basınçlı kara boru hattında, derin deniz deşarj hattı yüklemesi öncesi ~43 m'lik bir hidrolik yük bulunmaktadır (Şekil 10). Bu yükü değerlendirmek üzere, derin deniz deşarj hattı yüklemesi girişinden önce ~2,4 MW kurulu güçte bir HES kurulabileceği öngörülmüştür. İlk yatırım maliyeti 2,6 milyon \$ olarak hesaplanan bu HES tesisinden (i = 0,08, n=20 yıl ve elektrik satış fiyatı ~0,1 \$/kWh) elde edilebilecek net gelirin ~0,015 \$/m³ olacağı tahmin edilmektedir (Odakent A.Ş.-İTÜ, 2012).

Ergene Havzası'ndaki OSB AAT çıkış sularının Marmara Havzası'na aktarılmasını sağlayacak olan projenin (Şekil 10) Ergene 1 (Ø2000 mm, L=6,380m), Ergene 2 (Ø2000 mm, L=9,740 m) ve Velimeşe (Ø2800 mm, L=3,600 m) tünelleri ile Çerkezköy (YYPE, DN1200 mm, L= 17,750 m), ortak hat çelik boru (ST44, Ø2438 mm, L=16,300 m) ve muhtelif çap ve malzemeden (L=12,200 m) betonarme boru hatlarının ayrıca Deniz hattının (BA kaplı ST52, Ø2200 mm L=4,500 m) yapımı tamamlanmıştır. Çerkezköy ve Çorlu Deri İhtisas ve Karma OSB arıtılmış atıksularını toplayan Doğu hattı, 13 Kasım 2020'de Çorlu Deri İhtisas ve Karma OSB Arıtılmış Atıksuları ile (12.500 m³/gün debi) devreye alınmıştır. Çerkezköy OSB Deşarj bağlantı hattı tamamlandıktan sonra bu yıl içinde ilave 75.000 m³/gün'lük ileri biyolojik arıtma uygulanmış atıksuyun da sisteme bağlanması sağlanacaktır. Ergene 1 ve Ergene 1-2 tünelleri ile Çorlu 1, Ergene 2 ve Velimeşe OSB AAT'lerinin de 2021 yılı sonuna kadar tamamlanarak Ergene'den Marmara'ya Arıtılmış Endüstriyel Atıksu Aktarma sisteminin tamamının 2022 yılı itibarı ile işletmeye alınması öngörülmektedir.



Şekil 10. Ergene Derin Deniz Deşarj Sistemine bağlı OSB AAT'ler ile Marmara Denizi arası planlanan kara iletim ve derin deniz deşarj hattı şematik profili.

4. Ergene'de Yeni Master Plan Sonrası Beklenen Su Kalitesi

Ergene'deki mevcut durumda (2021 yılı sonu itibarı ile),

Marmara'ya ~4 m³/s arıtılmış endüstriyel atıksu debisi aktarımı sonrası yaz dönemi (Temmuz-Eylül) debi dağılımının Tablo 7'deki gibi olması beklenmektedir.

Tablo 7. Ergene'de 2021 Sonrası Yaz Dönemi Debi Miktarları.

Debi	Mevcut Durum	Marmara'ya atıksu aktarımı sonrası durum
Q _{end}	6 m ³ /s (KOİ = 400 mg/L)	~2 m ³ /s (KOİ = 200 mg/L)
Q _{Ergene (doğal akım)}	2 m ³ /s (KOİ = 50 mg/L)	2 m ³ /s (KOİ = 50 mg/L)
Q _{toplam}	8 m ³ /s	4 m ³ /s (5 m ³ /s*)

*Kentsel AAT çıkış sularının da katılımı sonrası ulaşılacak azami değer

Tablodan görüldüğü üzere, arıtılmış OSB atıksularının Derin Deşarj Sistemiyle Marmara'ya aktarılması sonrası Ergene'nin yaz dönemi toplam akımının 8 m³/s seviyesinden 2021 yılı sonrası 4-5 m³/s'lere düşmesi beklenmektedir. Ergene'den Marmara'ya havzalar arası arıtılmış atıksu aktarma sistemi bütünüyle devreye alındığında (2021 sonrasında) KOİ≤125 mg/L, elektriksel iletkenlik (EC) ~3000 µs/cm seviyelerinde (3. Sınıf sulama suyu kalitesi) bir

su kalitesine ulaşabileceği öngörülmektedir (Tablo 8). Ergene'nin proje öncesi ve sonrası su kalitesi parametreleri Tablo 8'de gösterilmektedir. Havzada kalan diğer sanayi tesislerinde uygulanacak temiz üretim programlarının başarısına bağlı olarak su kalitesinde daha büyük oranda iyileşmeler sağlanması da mümkündür.

Tablo 8. Ergene Su Kalitesi Durumu.

Parametreler	Mevcut Durum	Planlanan Projenin Uygulanması Durumu
KOİ (mg/L)	313	225
KOİ* (mg/L)	163	125
KOİ** (mg/L)	158	125
EC (µs/cm)	~5.000	≈3.000 (*)

KOİ*: Ergene Tebliği sonrası

KOİ**: Ergene Tebliği + ~1 m³/s artırılmış kentsel atıksu katılımı sonrası

EC (*): Ergene Tebliği Uygulanması + OSB AAT çıkışlarının Marmara'ya deşarjı sonrası iletkenlik

5. Ergene Havzası'ndan Marmara Havzası'na Artırılmış Atıksu Aktarımının Marmara Denizi Su Kalitesine Etkileri

Artırılmış OSB atıksularının Ergene Havzası'ndan Marmara'ya aktarılmasıyla Marmara'ya ilave edilen KOİ, N ve P yükleri, deşarj debisi 5 m³/s için;

$KOİ_{top} = 5 \times 86400 \times 0,125 \times 10^{-3} = 54$ t/gün; $TN = 5 \times 86400 \times 0,015 \times 10^{-3} = 6,5$ t/gün ve $TP = 5 \times 86400 \times 0,001 \times 10^{-3} = 0,4$ t/gün

olacaktır. Toplam 54 t/gün yavaş/zor ayrışan karbonlu organik madde ile ~6,5 tN/gün ağırlıklı olarak oksitlenmiş (NO₃ + NO₂) azot yükünün, üzerinde 20 adet φ500 mm delik bulunan 380 m boyunda bir difüzör ile -45 m'den denize deşarjı öngörülmüştür. Piknoklin (-25 m) seviyesindeki ~0,10 m/s'lik akıntı yoluyla sağlanacak ilk seyrelme S₁= 45 olarak hesaplanmıştır (Odakent A.Ş. - İTÜ, 2012). Bu durumda ilk karışım bölgesindeki kritik kirlenici parametre konsantrasyonları;

Tablo 9. Marmara Denizi için 2030 sonrası su kalitesi değerleri.

Parametre	Uzun Vadeli Hedefler	
	Daha az sıkı	Daha sıkı
Klorofil-a (µg/L)	10	5
Toplam N (mgN/L)	0,1	0,05
Toplam P (mgP/L)	0,02	0,01
Çözünmüş Oksijen (mg/L) <20 m altı derinlik için	6	7
Çözünmüş Oksijen (mg/L) 40-100 m arası derinlik için	2	3

İstanbul'da İSKİ tarafından inşa edilen atıksu ön arıtma ve derin deniz deşarjları, İstanbul Boğazı ile İstanbul'un Marmara ve Adalar sahillerindeki plajlarda su kalitesinin yürürlükte olan Yüzme Suyu Kalitesi Yönetmeliği'nde (76/160/AB) yer alan kriterlere ulaşmasını sağlamıştır. Ancak, alt tabakada çözünmüş oksijen azalmasının durdurulması ve ötrifikasyon riskinin azaltımında yeterli başarı sağlanamamıştır. Bunun için İstanbul başta olmak üzere Marmara'ya yapılacak tüm evsel/endüstriyel atıksu deşarjlarında kritik besin maddesi olan N ve P'nin Hassas Su Ortamları için öngörülen limitlerin altına (TN ≤ 15 (10) mg/L, TP ≤ 2 (1) mg/L) indirilmesi gerekmektedir. Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği Tablo 2 ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo 19'da yer alan bu değerlere ulaşılabilmesi için deşarj öncesi ileri biyolojik arıtma gerekmektedir.

AB'ye katılan Tuna Havzası ülkelerinde (Orta ve Doğu Avrupa), noktasal kaynak kontrolüne yönelik olarak AB ve Dünya Bankası fonları desteği ile gerçekleştirilen uygulamalar dolayısıyla, özellikle Karadeniz'e Tuna Nehri vasıtasıyla taşınarak kısmen İstanbul Boğazı'ndan Marmara'ya gelen kirlilik yüklerinde belirgin bir iyileşme gözlenmektedir (Çiçekalan ve Öztürk, 2018). Ancak Ukrayna, Beyaz Rusya ve Rusya'dan dökülen büyük nehirlerle (Dinyeper, Dinyester, Don) Karadeniz'e taşınan ve Marmara'yı etkileyen kirlilik halen sürmektedir. Marmara'ya gelen toplam kirlilik yükünün ~%50'sinin Karadeniz kaynaklı olduğu bilinmektedir. İstanbul Boğazı üst akımı ile Marmara'ya giren söz konusu kirliliğin

$KOİ = 125 / 45 \approx 3,0$ mg/L; Renk = 1000 Pt-Co/45 \approx 22 Pt-Co < 280 Pt-Co ve TN = 15/45 = 0,3 mg/L

düzeylerinde olacaktır. Ergene Havzası'ndan gelen bu yük, ağırlıklı olarak Marmara Denizi'nin Ege/Akdeniz orijinli alt tabakası ile İstanbul Boğazı üzerinden Karadeniz'in dip kesimine (-180 m altına) taşınacaktır (Bora vd.,2013; Tanık vd., 2013).

Marmara Denizi ve Boğazlar sisteminin hidrodinamik yapısı, Tekirdağ açıklarından Marmara alt tabakasına yapılacak atıksu deşarjlarındaki korunan kirlenicilerin İstanbul Boğazı üzerinden ~%40'ünün Karadeniz'e ulaşabildiğini, kalan kısmının ise Marmara'da kaldığını göstermektedir. (ÖEJV- DHI, 1994, Oğuz vd, 1990; Çiçekalan ve Öztürk, 2018). Marmara Denizi su kalitesi ve ekolojik durumu ile ilgili olarak öngörülen hedef, orta vadede (2030 yılı) Tablo 9'daki daha az sıkı su kalitesi değerlerine (Klorofil-a ≤ 10 mg/L, TN ≤ 0,1 mg/L, T ≤ 0,02 mg/L, çözünmüş oksijen: ≤ 20 m derinliklerde (üst tabaka) 6 mg/L, ≥20 m derinliklerde (ara ve alt tabakalar) 2 mg/L) ulaşılmasıdır (MEMPIS, 2006).

%80-85'ini sınır aşan kirlenici kaynaklar oluşturmaktadır. Marmara Havzası'ndaki noktasal ve yayılı kirlilik yükleri azami ölçüde kontrol edilse bile, Karadeniz kaynaklı kirlilik girişi mevcut haliyle sürdüğünde, Marmara için öngörülen Tablo 9'daki daha iyi ekolojik duruma ulaşılması mümkün görülmemektedir (MEMPIS, 2006).

Tamamına yakını Ergene Havzası'nda yer alan Çerkezköy OSB, Çorlu Deri İhtisas ve Karma OSB ile yeni OSB (Ergene I, Ergene II, Velimeşe, Çorlu 1, atıksularının C, N, P giderimi ileri biyolojik arıtma uygulandıktan sonra, derin deşarj boru hattı ile Marmara Denizi'ne verilmesi öngörülmektedir (Odakent AŞ – İTÜ, 2012). Özellikle Başbakanlık'ın 2013/6 sayılı Ergene Havzası Koruma Eylem Planı yürürlüğe girdikten sonra, havzada yeraltı suyu kullanımının kısıtlanması ve endüstride temiz üretim uygulamalarının teşviğe dayalı takibi ile zaman içinde OSB'lerde doluluk oranları artsa bile, atıksu oluşumunun 450.000~500.000 m³/gün'ü aşmayacağı beklenmektedir (ÇŞB, 2012; 2014). Dolayısıyla, Ergene'den Marmara'ya endüstriyel deşarj sisteminin kirlilik yükü hesaplarında 2030~2045 dönemi toplam itibari ortalama atıksu debisi 450.000 m³/gün (~ 5,2 m³/s) alınmaktadır. Bu durumda 2030 yılına kadar söz konusu deşarj sistemi ile Marmara'ya verilecek toplam kirlilik yükü; KOİ yükü = 29.200 t/yıl; AKM yükü = 14.600 t/yıl; TN yükü = 2.190 t/yıl; TP yükü = 292 t/yıl alınabilir. Bu kirlilik yükünün MEMPIS (2006) Projesi'nde Marmara Havzası geneli için öngörülen toplam kirlilik yükü ile mukayesesi Tablo 10'da verilmektedir (MEMPIS,2006).

Tablo 10. Marmara Denizi için 2030 sonrası Su Kalitesi Değerleri.

Kirlilik Yükü Bileşeni (t/yıl)	Marmara Denizi Havzası (MEMPİS, 2006)	Ergene'den Marmara'ya Deşarj Sistemi ile gelen	Kirlilik Yükü Artışı (%)
KOİ*	660.009	29.200	~4,4
TN	85.625	2.190	~2,6
TP	14.900	292	~2,0

* KOİ ≈2,67 x TOK alınmıştır.

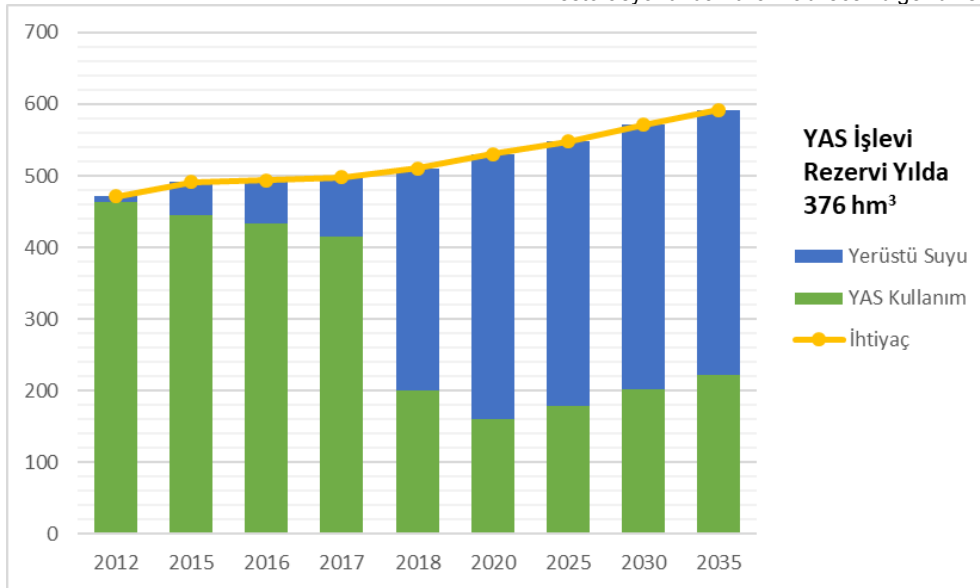
Tablodan da görüldüğü üzere, Ergene'den Marmara'ya atılmış atıksu deşarjı ile Marmara Denizi Havzası'ndan gelen mevcut kirlilik yüklerine ilave olarak KOİ, TN ve TP parametreleri bakımından (Karadeniz kaynaklı sınıraşan kirlilik hariç, Marmara Havzası toplam kirlilik yükü itibariyle) sırası ile ~%4,4, ~%2,6, ~%2,0 oranlarında yeni bir kirlilik yükü girişi beklenmektedir. Karadeniz'den Marmara'ya giren sınır aşan kirlilik yükünün de Marmara Havzası kirlilik yükü civarında olduğu dikkate alındığında, Ergene'den Marmara'ya atılmış atıksu deşarjının yol açacağı kirlilik yükü artışlarının KOİ, TN ve TP bazında sırasıyla, Marmara Denizi'ne gelen toplam kirlilik yükünün %2,2, %1,3 ve %1,0 düzeylerinde gerçekleşmesi beklenir. Marmara Denizi'nde bugüne kadar yürütülen çalışmalar, ötrofikasyon kontrolü bakımından TOK ve TP yüklerinin TKN'ye göre çok daha sınırlı oranda önem taşıdığını ve bu yüzden prensip olarak Marmara Denizi'ne deşarj edilecek evsel ve endüstriyel atıksularda C ve N giderimli biyolojik arıtma uygulanması gerektiğini ortaya koymuş bulunmaktadır.

Marmara'ya yapılan atıksu deşarjları öncesi C+N+(P) giderimli ileri biyolojik arıtma uygulandığında, noktasal kaynaklardan gelen kirlilik yüklerinde, karbonlu maddeler (KOİ) bazında ≥ % 90, azotlu maddeler (TN) bazında ≥ % 75 ve fosforlu maddeler (TP) bazında ≥ % 70 düzeylerinde azaltım sağlanmış olacaktır. *Denize deşarj edilen arıtılmış atıksulardaki KOİ ~%90 oranında inert yapıda olup alıcı ortamda oksijen tüketimi ihmal edilebilecek düzeydedir. Aynı şekilde azotlu bileşikler de en az %90 oranında oksitlenmiş (NO₃) yapıda olduklarından Marmara alt tabakasında oksijen kullanımları son derece sınırlıdır.* Bu suretle, Marmara ekosistemi üzerindeki kirlilik yükü baskısının çok büyük oranda ortadan kaldırılmasıyla su kalitesinde belirgin iyileşme beklenmektedir.

6. Ergene Havzası'nda Akifer Restorasyonu

İstanbul'daki sanayi tesislerinin 1985 sonrası Çerkezköy – Muratlı arasındaki Çorlu Deresi civarında yerleşmesinde, bölgedeki zengin YAS rezervlerini kolay ve ücretsiz olarak kullanabilmesinin de çok önemli etkisi olmuştur. Mevcut durumda sanayi tesislerince, ruhsatlı kuyularla, Ergene Havzası'ndaki (Çorlu Alt Havzası'nda) akiferlerin yenilenebilir (dinamik) rezervinin (~211 milyon m³/yıl) %35 üzerinde (~285 milyon m³/yıl) YAS çekilmektedir (DSİ, 2015) (Ancak izinsiz kuyularla bu çekimin ~470 milyon m³/yıl'a ulaştığı bilinmektedir). Meriç Ergene Havzası Çevre Koruma Eylem Planı'nda (2011), akifer restorasyonu kapsamında, özellikle Çerkezköy-Çorlu Bölgesine, Meriç Nehri'nden ve yakındaki depolamalı tesislerden 2020 yılından itibaren 370 milyon m³/yıl yüzeysel su kaynağı sağlanarak YAS çekiminin dinamik rezerv seviyesi olan 211 milyon m³/yıl altına indirilmesi planlanmaktadır. Böylece, aşırı YAS düşümü dolayısıyla tuzlanma riski taşıyan Ergene Havzası akiferlerinin restorasyonu sağlanacaktır. Bu kapsamda, YAS çekimini daha etkin denetlemek amacıyla bölgedeki sanayi kuyularına 2015'ten itibaren 1100 adet uzaktan kumandalı ön yüklemeli su sayacı takılmıştır. YAS çekiminden ücret alınmadığı halde, sayaç takımının sanayide YAS kullanımını ~%30 civarında düşürdüğü tespit edilmiştir (Şekil 11) (DSİ, 2010).

İleri derecede arıtılan OSB atıksularının, (gerektiğinde) prostele kullanım amacına uygun ilave arıtma (MF + NF + TO) ile temiz üretim teknolojilerinin (sektörel bazda mevcut en iyi teknolojiler) teşviki ile de bölgede bilhassa YAS kullanımı azaltılabilir. DSİ tarafından hazırlanan YAS Master Planında önerilen, yağışlı (yüksek debili) aylarda yukarı kesimden bir regülatör yapısı ile çevrilen Ergene suyuyla suni besleme de Çorlu Akiferinin restorasyonunda kullanılabilir diğer bir seçenektir (DSİ, 2015).



Şekil 11. YAS çekim değerleri (DSİ, 2010).

7. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmanın başlıca sonuçları ile ileriye yönelik bazı öneriler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Ergene Nehri'nin Çorlu Deresi Alt Havzası'ndaki 950 den fazla tekil sanayi tesisinin, 7'si yeni kurulan toplam 9 OSB bünyesinde kümelenerek proses atıksularının

toplam 6 adet (2'si mevcut tesis) büyük kapasiteli ileri Biyolojik AAT'de arıtıldıktan sonra komşu Marmara Denizi Havzası'na aktarılması, Ergene Nehri su kalitesinin III. Sınıf sulama suyu (orta kalitede su) kalitesine yükselmesine imkan vermektedir.

- Toplam 5 m³/s'lik arıtılmış atıksuyun bir derin deniz deşarj sistemi ile -47,5 m derinlikten Marmara Denizi dip tabakasına verilmesi sonucu elde edilen 45 misli ilk

seyrelme ile, OSB atıksularındaki KOI, renk ve TN parametrelerinin sırası ile 3 mg/L, 22 Pt-Co ve 0,3 mg/L seviyelerine inmesi sağlanmaktadır.

- OSB AAT çıkışlarının Marmara Denizi Havzası'na aktarılması ile Marmara'ya gelen toplam kirlilik yüklerinde KOI, TN ve TP parametreleri bakımından sırası ile %2,2, %1,3 ve %1'lik bir artış olacağı belirlenmiştir. Bu orandaki yük artışının Marmara Denizi su kalitesini sınırlı ölçüde etkilemesi beklenmektedir.
- Ergene Havzası Çevresel Restorasyon ve Endüstriyel Kümeleme Projesi kapsamında gerçekleştirilen ~300 milyon dolarlık yatırımın birim maliyeti (i:0,02, n=15-30 yıl için) 0,12-0,20\$/m³/gün aralığında kalmıştır. Marmara'ya derin deniz deşarj sistemindeki ~43 m'lik hidrolik yükü değerlendirmek üzere önerilen HES tesisinden elde edilebilecek net gelirin de ~0,015 \$/m³ olması öngörülmektedir.
- Ergene Havzası'ndaki sanayi tesislerinin aşırı yeraltı suyu çekimleri dolayısıyla statik su seviyesinde 150 m'lere varan düşüş gözlenen Çorlu Akiferinin restorasyonu için; ruhsatsız kuyuların kapatılması, izinli kuyulardan su çekimlerinin sayaç takılarak izlenmesi, yeraltı suyu kullanımının ücretlendirilmesi, sanayide temiz üretim ve su/kimyasal geri kazanımının teşviği vb. uygulamalarıyla YAS çekiminin yenilenebilir YAS besleniminin (~211 milyon m³/yıl) altına çekilmesi önerilmektedir. Bu husus, özellikle Çorlu Alt Havzası'nda yoğunlaşmış durumlardaki OSB'lerde iklim değişimi etkilerine dirençliliğinin artırılması bakımından

da kritik önem taşımaktadır.

- OSB ve tekil endüstriyel AAT deşarjlarında konvansiyonel parametreler yanında öncelikli kirleticilerin de izlenmesinde yarar görülmektedir.

"Türkiye'nin En Kapsamlı Çevresel Restorasyon Ve Endüstriyel Kümeleme Uygulaması: Ergene Nehri Havzası Çevre Koruma Ve Havzalar Arası Atıksu Transferi Projesi" dağınık sanayilerin bir araya getirilmesi ve sürdürülebilir bir üretimin temin edilmesi bakımlarından emsal teşkil etmektedir.

8. Teşekkür ve Bilgi

Bu projenin hayat bulmasındaki çok değerli emek ve katkıları dolayısıyla dönemin Orman ve Su İşleri Bakanı Sayın Prof. Dr. Veysel Eroğlu'na şükranlarımızı arz ederiz. Dönemin Tekirdağ Valisi Sayın Ali Yerlikaya'ya, projenin her aşamasındaki çok yoğun emek ve destekleri dolayısıyla teşekkür ederiz. Ayrıca projenin çeşitli süreç ve bileşenlerindeki katkıları dolayısıyla; Başta koordinasyonu temin eden Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, DSİ Genel Müdürlüğü, İSKİ Genel Müdürlüğü, MİMKO A.Ş., İO Çevre Çözümleri A.Ş., Odakent A.Ş., Enta Mühendislik A.Ş., Ergene Derin Deniz Deşarjı A.Ş., OSB Yönetim Kurulları, Yapım Firmaları ve ilgili diğer tüm kurum ve kuruluşlara şükranlarımızı sunarız.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9. Kaynaklar

Bora, O., Varol, Ö. E., Baykuş, M. B. ve Kabdaşlı, S. (2013). Ergene'den Marmara'ya İleri Arıtma Uygulanmış OSB/IOSB Atıksuları Deşarj Sistemi ile İlgili Çevresel Değerlendirme Çalışması Deniz Deşarjı Uzak Alan Taşınım Modeli Raporu

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2011). Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Tebliği, 14.12.2011 tarihinde 28142 sayılı Resmi Gazete'de yayınlandı.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2014). Ergene Nehrinde Deşarj Standartlarında Kısıtlama Genelgesi, 22.04.2014, Ankara.

Çiçekalan, B., Öztürk, İ. (2018). Tuna'nın Marmara Denizi Üzerindeki Hidrolik ve Organik Yük Baskıları, III. Marmara Denizi Sempozyumu Bildirileri ve Çalıştay Raporları Kitabı, 72-91.

ÇOB (2008). Ergene Havzası Çevre Yönetimi Master Planı

DSİ (2010). Ergene Havzası Sorunları ve Çözüm Önerisi Toplantısı. Ankara: Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, ÇED ve Planlama Genel Müdürlüğü, DSİ Genel Müdürlüğü, Tekirdağ İl Çevre ve Orman Müdürlüğü, İMP Koordinatörlüğü, 02.06.2010.

DSİ (2015). Meriç Ergene ve Kuzey Marmara (Trakya Kesimi) Havzaları Master Planı Hidrojeoloji Raporu (Ergene Alt Havzası), Alter Uluslararası Müh. Müş. Hiz.&Fugrosial Yerbilimleri Müh. ve Müh. Ltd. Şti.

İO Çevre Çözümleri AŞ. (2010) Meriç-Ergene Havzası Endüstriyel Atıksu Yönetimi Ana Plan Çalışması Final Raporu, Kasım 2010, OSİB Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.

MEMPIS Consortium (2006). Environmental Master Plan and Investment Strategy for the Marmara Sea Basin - Turkey, Water Quality Modeling of the Sea of Marmara, Model Development and Scenario Simulations. European

Investment Bank and Turkish Ministry of Environment & Forestry.

Mülga Çevre ve Orman Bakanlığı (2010) Meriç-Ergene Havzası Endüstriyel Atıksu Yönetimi Ana Planı.

Mülga Çevre ve Orman Bakanlığı (2011). Ergene Havzası Koruma Eylem Planı.

Odakent AŞ - İTÜ (2012) Meriç-Ergene Havzası OSB Müşterek Atıksu Arıtma Tesislerinde, İleri Biyolojik Arıtma Uygulanmış Atıksuların Renk Giderimi Sonrası Ergene'ye veya Renk Giderimsiz Havza Dışına (Marmara) Deşarjını Sağlayacak İlave Toplama Arıtma ve Derin Deşarj Sistemi, T.C. OSİB Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.

Oğuz, T., Özsoy, E., Latif, M. A., Unluata, U. (1990). Modelling of the Hydraulic controlled exchange flow in the Bosphorous state. J. Physical Oceanography, 20,945-965.

ÖEJV-DHI (1994). Ömerli-Elmalı Joint Venture / Protection Ömerli and Elmalı Environmental Protection Project, Feasibility Study, Progress Report, İstanbul Water and Sewerage Administration, Turkey.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB) (t.y.). Organize Sanayi Bölgeleri Hizmetleri, <https://www.sanayi.gov.tr/sanayi-bolgeleri/organize-sanayi-bolgeleri-hizmetleri> adresinden alınmıştır.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB) (2010). Organize Sanayi Bölgeleri Kanununda Değişiklik Yapan Kanun Tasarısı Taslağı, 31.08.2010, Ankara.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB) (2019). Organize Sanayi Bölgeleri Uygulama Yönetmeliği, 02.02.2019 Tarihinde 30674 Sayılı Resmi Gazete'de yayınlandı.

Tanık, A., Övez, S., Altınbaş, M. (2013). Ergene Havzası Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Arıtma Tesisi Çıkışlarının Marmara

- Denizindeki Çevresel Etkileri, Tekirdağ Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'ne sunulmuştur.
- TBMM Ergene A.K. (2002). Ergene Nehri'ndeki Kirliliğin ve Çevreye Etkilerinin Araştırılarak Alınması Gereken Önlemlerin Belirlenmesi Amacıyla Kurulan (10/2,6) Esas Numaralı Meclis Araştırması Komisyon Raporu.
- TOB-SYGM (2017). Meriç-Ergene Havzası Nehir Havası Yönetim Planı
- TÜBİTAK MAM- İTÜ (2008). Havza Koruma Eylem Planları Projesi: Meriç-Ergene Havzası Koruma Eylem Planı.
- TÜİK (2019). Organize Sanayi Bölgeleri Su, Atıksu ve Atık İstatistikleri,2018,
<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Organize-Sanayi-Bolgeleri-Su,-Atiksu-ve-Atik-Istatistikleri-2018-30671> adresinden alınmıştır.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Sıfır Emisyonlu bir
Yelkenli Tekne Tasarımı ve Seyir SimülasyonlarıHamdi Sena NOMAK¹, İsmail ÇİÇEK²

Yazışma yazarı:

Hamdi Sena NOMAK,
senanomak@gmail.com¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-8469-2339.²İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Tuzla, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0003-4850-1747.

Referans:

Nomak, H.S. ve Çiçek, İ., (2022), Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Sıfır Emisyonlu bir Yelkenli Tekne Tasarımı ve Seyir Simülasyonları, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23(1) 41–54.

Makale Gönderimi : 29 ARALIK 2021
Online Kabul : 23 ŞUBAT 2022
Online Basım : 30 MAYIS 2022

Özet Mevcut bir yelkenli deniz aracının karbon salınımı yapan sistemleri incelenmiş, tekne performans değerleri belirlenmiş ve "sıfır emisyon" hedefi ile yelkenli deniz aracına entegre yenilenebilir enerji sistemleri ve tasarım değişiklikleri çalışılmıştır. Gerçek meteorolojik şartlar ve işletim senaryoları ile enerji üretimi, depolanması ve tüketimi simülasyon analizleri ile gösterilmiştir. Yenilenebilir enerji üretim birimleri iki kaynak grubu olarak değerlendirilmiştir. İlk grupta, statik enerji üretim sistemleri olarak adlandırılan ve teknenin seyir, demirde bekleme veya limanda bağlı iken enerji üretebilen sistemleri içermektedir. Bu kısımda güneş enerji panelleri ile iki rüzgâr türbini tasarımda kullanılmıştır. Dinamik enerji üretim sistemleri olarak adlandırdığımız ikinci guruptaki birimler, teknenin yelkenli seyri esnasında su akışı enerjisinden faydalanmak amacıyla. Bunlar, iki adet su türbini ile itici ve aynı zamanda enerji üretici birimi olarak da çalışabilen bir elektrik motorunu içermektedir. Her bir enerji üretim sistemi tasarımları performans ve 3-boyutlu yerleşim bakımından değerlendirilmiştir.

Önerilen sistemin doğrulaması üç ayrı senaryo analizi ile gerçekleştirilmiştir. İlk iki senaryo ile Marmara denizinde tipik yelkenli tekne operasyonlarının yapılabilirdiği gösterilmiştir. Üçüncü senaryo olan acil durum senaryosu ile gün içerisinde, rüzgâr şiddeti sıfır iken ve tamamen dolu bataryalar ile, seyir senaryosu programı yürütülmüş ve bataryaların %35 enerji kullandığı hesaplanmıştır. Bu senaryo çalışmaları ile normal yat tipi bir teknenin tüm operasyonlarının tasarımı çalışılan yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılandığı gösterilmiştir. Teknenin tüm operasyonlarında karadan elektrik bağlantısı gerekmediği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deniz Araçları, Sıfır Emisyon, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Sevk Sistemi, Su Türbinleri

Design and Navigation Simulation of a Zero Emission
Sailboat Utilizing Renewable Energy Resources

Abstract The carbon emission systems of an existing sailing vessel were examined, the boat performance values were determined, and additional renewable energy systems and design changes were studied for obtaining "zero emission". Real meteorological conditions and operating scenarios have been determined and accordingly, energy production, storage and consumption have been demonstrated by simulations. Renewable energy production units are evaluated as two resource groups. In the first group, there are systems called static energy generation systems and that can generate energy both while the boat is underway, at anchor or in port. In this section, solar energy panels and two wind turbines are evaluated in the design. These units, called dynamic energy generation systems, are intended to benefit from the energy of the water flow during the sailing of the boat. These include two water turbines and an electric motor that can act as a propulsion and also an energy generating unit. Each power generation system has been evaluated for both performance and 3-dimensional positioning.

The verification of the proposed system was carried out with three different scenario analyses. With the first two scenarios, it has been shown that typical sailboat operations can be performed in the Sea of Marmara. With the third "emergency scenario", a navigation program was developed and simulated during the day, when the wind speed was zero and with fully charged batteries, and it was calculated that only 35% of battery energy was used. With these scenario studies, it has been shown that all operations of a normal yacht are covered by the renewable energy sources studied. It has been shown that no shore connection is required in any boat operation.

Keywords: Marine Vehicles, Zero Emission, Renewable Energy Resources, Propulsion System, Water Turbines.

1. Giriş

Fosil yakıt tüketiminin azaltılması konusunun her geçen gün önem kazanması, yenilenebilir enerji kaynakları üzerindeki çalışmaları hızlandırmaktadır. Deniz araçları işletiminde çevreye duyarlılık da finansal sebepler kadar önceliklidir. Ulusal ve uluslararası otoriteler içten yanmalı motorlardan kaynaklanan emisyonlar için çeşitli kural ve düzenlemeler ile NO_x, SO_x, CO_x gibi emisyonların en aza indirgenmesini sağlamaya çalışmaktadır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) Deniz Çevresini Koruma Komitesi tarafından MEPC 280(70) sayılı karar ile (Yang, et.al., 2018), 1 Ocak 2020 tarihinden itibaren gemilerde kullanılan yakıttaki kükürt içeriğinin en fazla %0,5 sınırına düşürülmesi, alınan önlemlere bir örnektir.

Yenilenebilir enerji, doğa tarafından sürekli olarak yenilenen ve doğrudan güneşten (termal, foto-kimyasal ve foto-elektrik gibi), dolaylı olarak güneşten (rüzgâr, hidroelektrik ve biokütlede depolanan fotosentetik enerji gibi) veya çevrenin diğer doğal hareketlerinden veya mekanizmalarından (jeotermal ve gelgit enerjisi gibi) üretilen enerji kaynaklarıdır (Ellabban vd., 2014). Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak fosil yakıt tüketiminin azaltılması üzerine çalışmalar pek çok sektörde gözlenmektedir. Gemiler için içten yanmalı makinelerden kaynaklı emisyonların azaltılması hedefiyle geliştirilen teknoloji çalışmaları hız kazanmıştır. Balestra ve Schjøberg (2020) sıfır emisyonlu bir geminin yakıt hücresi ve bataryalar ile modellemesini ve simülasyon çalışmasını yapmıştır. Bu çalışma ile mevcut dizel-elektrik sevk sistemi olan gemi için alternatif bir hibrit sevk modeli önerilmiştir. Yayınlanan çalışmadaki boyutlandırma ve simülasyon, geminin güvenlik regülasyonunu irdelemeyip, basitçe güç gereksinimi bakımından değerlendirilmiştir. Şenol (2020) gemi kökenli emisyonlara dayalı alternatif sevk sistemlerini değerlendirdiği çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı alternatif sistemlerin geliştirilmesinin, gemilerin ana makine ve güç sistemlerinde emisyon değerlerinin düşürüldüğü yeni nesil tasarımlara öncülük etmesi gerektiğini tespit etmiştir.

Bu çalışmada ise kara ile elektrik bağlantısı olmayan bir tekne hedeflenerek tamamen doğada bulunan rüzgâr ve güneş enerji kaynakları ile enerji elde edilmesi ve işletilebilmesi gösterilmiştir.

Yelkenli bir yat teknesinin ana sevk sistemi rüzgâr enerjisinden faydalanan yelkenlerdir. Ancak, yelkenli teknelerde de rüzgâr olmadığı durumlarda kullanım için ve manevra seyirlerinde geleneksel olarak kullanılan içten yanmalı motor ile seyir yapabilmeye kabiliyeti dolayısı ile çevreye zarar verilmektedir. Yelkenli tekneler için doğada bulunan güneş ve rüzgâr enerji kaynakları mevcut olduğu gibi, teknenin hareketinden dolayı oluşan akıntı da yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Modern yat tasarımlarında da artık güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik elde edilmesi ve depolanması için akademik çalışmalar yanında sektöre ait uygulamalar sıklıkla görülmektedir. Bu uygulamalara ait güneş fotovoltaik (FV) panelleri, rüzgâr türbinleri, yakıt hücresi kullanımı gibi enerji kaynaklarından elektrik elde eden sistemlere ek olarak bataryalar, batarya yönetim sistemleri, DC motorlu iticiler gibi bileşenler de sıklıkla yenilikçi ürünler olarak görülmeye başlanmıştır. Alfonsin vd. (2015) içten yanmalı motorlu (ICE) ticari bir yelkenlinin yakıt hücresi ve pilli bir hibrit tahrik sistemine dönüştürülmesi konusunda teknik bir çalışma sunmuşlardır. Malla (2020) lüks yatlar ve feribotlar için li-ion teknolojisini kullanan pil sistemi tasarımının kriterlerini ele almıştır.

Rüzgâr ve güneş gibi diğer enerji kaynaklarının da eklenmesiyle bir yatın tüm enerji ihtiyacı karbon emisyonlu motorlara ihtiyaç duymadan karşılanabilmektedir. Düzgün tasarlandığında bu uygulamalar güvenilir ve aynı zamanda ekonomik de olabilir. Reddy, J.B. ve Reddy, D.N. (2004) mevcut yerel rüzgâr/güneş ve yük verilerine dayalı bir rüzgâr ve güneş fotovoltaik (FV) hibrit enerji sisteminin istatistiksel performans değerlendirmesi hakkında bir rapor sunmuştur. Denizcilik alanında uygulanabilen FV panelleri ve dönüştürücüleri için merkezi (centralized), sicim (string), çoklu-sicim (multi-string) ve modüle entegre konvertör

(Module-integrated converter) olmak üzere dört teknoloji vardır (Kobougias vd., 2013). Aküler, rüzgâr ve FV panelleri, saatler boyunca kesintisiz güç sağlamak için tasarlanabilir (Reddy, 2004).

Yat uygulamalarına ve bu çalışma ile karşılaştırılabilecek bir çalışma örneği olarak, Bucci, vd. (2020) tarafından yapılan yelkenli bir yat için hibrit-elektrik çözümlerinin tartışıldığı çalışma görülmektedir. Bu çalışma, dizel-elektrik sevk sistemi olan lüks bir yatın seyir durumlarına göre enerji gereksinimlerini göstermesi bakımından değerlidir; ancak bu makalede sunulan yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji ihtiyacı karşılanması konusunda analiz ve simülasyon çalışmasını içermemektedir. Diğer bir örnek çalışma ise Eastlack vd. (2019) tarafından yelkensiz bir süper yat için yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılması için önerileri içermektedir. Özbay vd. (2020) yatların enerji ihtiyaçlarının güneş enerjisi sistemleri sayesinde karşılanması konusunda ele almıştır. Tercan (2021) ise gerekli elektrik ihtiyacını güneş enerjisinden sağlayan bir tur teknesinin çevresel etkilerini önce simülasyon sonuçlarına göre sonra da teknenin 1 yıllık işletme süresi sonuçlarına göre değerlendirilmiş ve %16 yakıt tasarrufu gerçekleştiğini hesaplamıştır. Güç üretiminde rüzgâr enerjisinden faydalanan uçurtma yapısı ile hidrojen yakıt hücreleri, FV paneller, dikey kanatlı rüzgâr pervanesi, hidro-türbin ile mevcut dizel sevk sistemi birlikte değerlendirilmiştir ve tartışılmıştır. Eastlack vd. (2019)'nin yayınlandığı çalışmada, genel değerlendirme yapılmış olmakla birlikte, tasarım ve yat işletim senaryo analizleri yapılmamıştır. Mauro vd. (2018) ise bir yelkenli tekne için çevreye duyarlı farklı bir tasarım çalışması yaparak dizel motor sevk sistemi olan teknenin hibrit-elektrik amaçlı güç gereksinim çalışması Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile yapılmıştır. Yayınlanan bu çalışma ile bu makalede çalışılan HAD yöntemi ile güç gereksinim analizi benzerlik göstermektedir; ancak bu makale çalışmasında, diğer çalışmalardan farklı olarak, işletim senaryolarına göre tekneye ait hem sevk bakımından hem de diğer tüketicilerin içerildiği güç gereksinim değerlendirilmiş, su türbini ilave edilmiş ve yat işletim senaryoları ile uygulama gösterilmiştir.

Seyir halinde olan bir yelkenli için teknenin altındaki su akışı da bir başka yenilenebilir enerji kaynağıdır. Suyun hareketi kinetik enerji yaratır. Bu enerjinin bir kısmı elektrik üretmek ve depolamak için kullanılabilir. Su gücü yaklaşık 2000 yıldır kullanılmaktadır (Bredariol vd., 2010). İlk zamanlarda en ilkel kullanımlarından birisi tahıl üretmekti ancak o günden bu yana su gücü kullanım teknolojisinin verimi artarak ve boyutları küçülerek gün geçtikçe yaygınlaştı. 1933 yılında, bir teknenin kıç tarafında suyun içerisine yerleştirilen bir jeneratör ile ilk defa bir deniz aracında su gücü elektrik enerjisine çevrilmiştir (Lansing, 1933). 1978 yılında yelkenli bir tekne için elektrik jeneratörü Sebald (1978) tarafından patentlendi. Bu jeneratör, elektrik üretmek için yelkenli teknenin su içerisindeki hareketinden kaynaklı oluşan akıntıyı kullanmaktaydı. Bu türbin bugün LVM firması tarafından Aquagen 24 volt "aqua4gen" ve "aqua6gen" olmak üzere iki farklı modelde kullanılmaktadır (Bredariol vd., 2010). Modern türbin tasarımlarında değişken hızlı makineler kullanılmaya başlamıştır. Değişken hızlı tasarımlar türbinin dönen kütlelerini elektrik sisteminden ayırarak daha önceki türbin tasarımlarına göre bir dizi güç kalitesi avantajı sunarak gerçek ve reaktif gücün yanı sıra, operasyonel olarak arıza durumlarından geçiş kolaylığı sağlayabilmektedir (Ellabban vd., 2014). Literatürde son yıllarda HAD yöntemleri ile su türbini ve sevk sistemi tasarım ve analizlerinde önemli ilerlemeler görmekteyiz. Bal vd. (2015) yatay eksenli türbinlerin performans tahminlemesi konusunda çalışarak örnekler vermiştir. Literatürdeki çalışmalardan bazıları Moody 41 DS teknesi için su türbini tasarımı çalışmasıdır (Alvar, 2016; Ekinci ve Alvar, 2017). Bu makalede su türbini seçim ve entegrasyonu konusunda Ekinci ve Alvar (2017)'in çalışma yöntemi incelenmiş ve makale sonuçlarından faydalanılmıştır. Ayrıca, HAD uygulamasının metodolojisi, Carlton (1994), Bal ve Güner (2009), Çelik vd. (2010), Ekinci (2011), Alvar (2016), Ekinci ve Alvar (2017), Yılmaz ve Çiçek (2018), Sukas vd. (2019), Soydan ve Bal (2021) gibi çeşitli yazarlar tarafından sunulan çalışmalar, su altı sevk ve su türbini çalışmaları için bu çalışmaya örnek teşkil

etmiştir.

Bu çalışmada ise mevcut bir yelkenli tekne için, sıfır emisyonlu işletim ile tüm tekne operasyonlarının yapılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak bir sistem tasarımı geliştirilmesi hedeflenmiştir. Kaynak olarak rüzgâr ve güneş enerjisinden faydalanılarak elektrik enerjisi üretimi daha geleneksel olarak görülebilir ancak bu çalışmada ilave olarak, tekne altında suyun dinamik hareketinden faydalanılarak elektrik üretimi ile yenilikçi bir çalışma yapılması da düşünülmüştür. Deniz araçları için farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının ayrı ayrı ele alındığı çalışmalar sıklıkla görülmesine rağmen, mevcut bir yatın rüzgâr, güneş ve akıntı enerjisi ile başarılı bir sıfır emisyonlu tekne işletimi göstermesi bakımından bu makale literatürdeki diğer çalışmalardan farklı entegre bir sistem sunmuştur. Ayrıca, bu çalışmada yapılan seyir senaryoları ile enerji kullanımı analizleri sonraki çalışmalara da örnek olabilecek niteliktedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretimi ve teknenin operasyonu için gerekli enerji ihtiyacı iki farklı rotada gösterilmiştir. Bu iki senaryo ile tasarlanan elektrik üretim ve yine bu çalışma ile önerilen motor-itki sistemi üretim ve tüketim analizleri ile gösterilmiştir. İşletim senaryolarında tarihsel meteorolojik verilere bağlı olarak enerji kaynak seviyelerine göre senaryo analizleri ile tasarım doğrulaması yapılmıştır. Üçüncü senaryo olarak acil durum senaryosu yürütülmüş ve rüzgârsız deniz ortamında tekne ile ne kadar seyir yapabileceği gösterilmiştir.

2. Metot

2.1 Ana Hedefler

Bu çalışmada Moody 41DS adlı geleneksel yat tipi bir yelkenli teknenin mevcut tasarımı incelenmiş ve 'sıfır emisyonlu' tekne genel amacı için 3 boyutlu bir tasarım modeli oluşturulmuştur (bkz. Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Moody 41DS yelkenlisinin yandan görünüşü.

Enerji bileşenlerinin tasarım ve analiz çalışmalarının başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki ana hedefler ile çalışma yapılmıştır. Bunlar, mevcut deniz aracı karakteristiklerine göre doğru tasarım oluşturma, itme sisteminin analizi ve raf ürünü birim seçimlerinde kullanılacak teknik kriterleri belirlemede kullanılmıştır. Belirlenen bu maddeler aynı zamanda bu tasarım çalışmasının anahtar başarı ölçütlerini belirler. Çalışmanın analiz sonuçlarına göre tasarım girdisi oluşturabilmek için ve simülasyon sonuçlarının değerlendirilebilmesi amacıyla bu ölçülebilir ana hedefler kullanılmıştır. Bu hedefler tasarım kısıtları ve performans kriterleri olarak iki kısımda değerlendirilmiştir. Performans kriter veya ölçütleri, tasarım sonucu ürünün analizler ile doğrulanmasında kullanılacak kriterler; tasarım kısıtları ise yapılacak olan tasarımdaki limitleri belirler. Bunlar aşağıda gruplandırılarak listelenmiştir:

A) Performans Ölçütleri

- Tüm tekne operasyonlarında emisyon sıfır olmalıdır.
- Enerji üretim ve depolama sistemi ile minimum deniz şartlarında (rüzgârsız ve pürüzsüz deniz şartları veya Marmara Denizi yıllık çevre şartları ortalamasına göre) en

az 2 saat kesintisiz yelkensisiz seyir, 3,1 m/s (6 knots) nominal tekne hızı ile sağlanabilmelidir.

- Manevra esnasında sıfır emisyonlu yeni sevk sistemi yukarıda belirtilen performans özelliğini sağlamalıdır.
- Enerji kaynaklarından faydalanarak bataryalar şarj edilmeli ve tüketiciler için yeterli enerji gerektiğinde sadece bataryalardan en az 2 saat süre ile sağlanabilmelidir.
- Yapılacak değişiklikler ile önerilen bileşenler, rüzgâr türbini ve su türbinleri, tekne seyirinde oluşturacakları dirençlerinden dolayı, mevcut tekne performans değerlerini en fazla %25 oranında etkilememelidir.

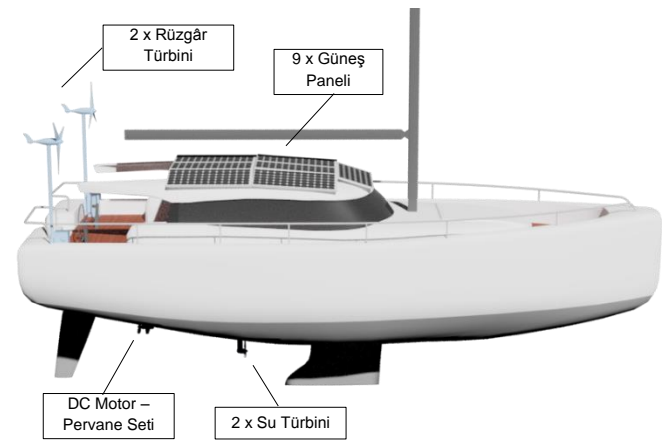
B) Tasarım Kısıtları

- Enerji depolamada kullanılacak bataryalar, kara tarafından şarj edilmemeli, sahil bağlantısı devre dışı bırakılmalıdır.
- Tüm elektrik enerjisi gereksinimi, rüzgâr, güneş ve seyir esnasında tekne altında oluşan akıntıdan faydalanılarak sağlanmalıdır.
- Yerleştirilecek sistemlerin toplam ağırlığı, önceki sistemde bulunan tam dolu yakıt miktarına karşılık gelen ağırlıktan daha fazla olmamalıdır.
- Yerleştirilecek sistemler ve bileşenleri, tekne içi insan hareketlerini kısıtlamayacak özelliklerde olmalıdır.
- Bataryalar, şarj eden enerji kaynakları ve DC Motor-Pervane seti bileşenleri, 48 DC ana voltaj hattına bağlanabilecek özelliklerde seçilmeli, buna göre dönüştürücü ve benzeri devre elemanları kullanılmalıdır.
- Enerji yönetim sistemi, üretilebilen enerjinin depolanmasını ve aynı anda batarya gruplarından elektrik enerjisi kullanımını sağlayabilmelidir.

2.2 Yöntem

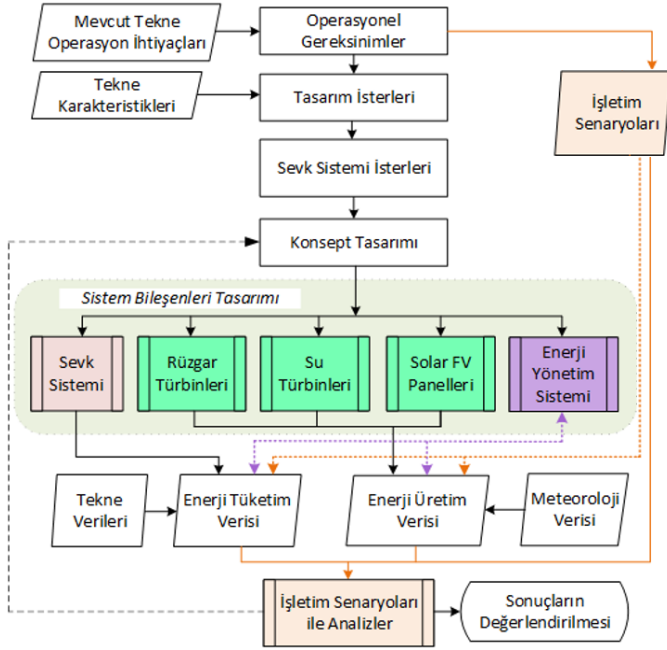
Yukarıda belirtilen hedeflere ulaşabilmek için bu makalede sunulan çalışmalar için izlenen yöntem ve çalışma basamakları Şekil 2'de gösterilmiştir. Enerji bileşenleri tasarımlarında mevcut tekneye ait direnç analizleri yapılmış ve buna göre itme sistemi tasarlanmıştır (bkz. Bölüm 3.1). İtme sisteminin analizleri bataryalardan sağlanan enerji ile seyir amaçlı enerji kullanım özelliklerini tanımlamıştır.

Ana hedefler doğrultusunda tasarım çalışması için güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve seyir esnasında su altı akıntısından faydalanılması en temel yöntem olarak değerlendirilmiştir (bkz. Bölüm 3.2). Bu bileşenlerin tekne uygulaması için ön tasarım, tasarım ve analiz çalışmaları Bölüm 3'te gösterilmiştir. Oluşturulan işletim senaryoları ile (Bölüm 4) seyir simülasyonları gerçekleştirilmiş ve üç ayrı senaryo analizi koşturulmuştur.



Şekil 2. Tasarlanan bileşenlerin mevcut tekne üzerinde görünümü.

Teknede bulunan tüm tüketici enerji ihtiyaçları ile itme amaçlı DC motor-pervane enerji gereksinimleri hesaplanarak analizlerde kullanılmıştır.



Şekil 3. İzlenen yöntem ve çalışma aşamaları.

Şekil 3'te gösterilen akış yolları, bir çalışma ile elde edilen verilerin diğer bir çalışma veya analizde nasıl kullanıldığını göstermektedir. Mevcut teknenin operasyon ihtiyaçları ile şekillenen gereksinimler, tekne karakteristiklerinden kaynaklanan tasarım isterlerini belirlemekte; bunun sonucunda ortaya çıkan sevk sistemi isterleri ile birlikte konsept tasarım ortaya çıkmaktadır. Tasarlanan sistem bileşenlerinin toplamı, tekne ve meteoroloji verilerinden etkilenerek enerji tüketim ve enerji üretim verilerini ortaya çıkartmakta; bu veriler ise işletim senaryoları ve analizlerde kullanılmaktadır.

2.3. Mevcut Sistem Tanımı

Moody 41 DS, 12,52 m tam boya ve 4,20 m genişliğe sahip; 11,2 ton ortalama deplasmanda; 41,9 kW gücünde dizel yakıtlı ana sevk sistemi motoruna sahip güverte-salon tipinde bir yelkenli teknedir.

Çalışmada kullanılmak üzere Moody 41 DS teknesinin seçilmesinin birincil nedeni güneş panellerinin yerleştirilebileceği geniş güverte alanlarının olmasıdır. Teknenin adındaki DS'nin tanımladığı "Güverte Salon" kavramı yeni bir yaklaşım değildir. Bu tasarım ile geniş ve ferah iç mekanlar ortaya çıkarılabilmektedir. Teknenin, keskin köşeli, neredeyse dik bordalı, dolgun baş kesitleri olan, geniş kış aynalı formu, su altına yerleştirilmesi planlanan su türbinleri için de tekneyi son derece uygun hale getirmektedir.

Moody 41 DS teknesine ait içten yanmalı motor YANMAR 4JH57 üzerinde yakıttan elde edilen kimyasal enerji, mekanik düzenlemeler vasıtası ile hareket enerjisine dönüştürülmektedir.

Hareket enerjisi, şaft ve dişliler ile pervane sistemine aktarılmaktadır. Teknenin mevcut konfigürasyonunda ana sevk sistemi için 3000 rpm maksimum devire sahip 57 beygir gücünde (41,9 kW) bir dizel motor kullanılmaktadır. Motor seyirinde durgun denizde 1500 rpm devirde 6.3 knot hız, 2100 rpm devirde ise 7 knot hız elde edilmektedir. Tekneye ait performans verileri çalışmada değerlendirilmiş ve kullanılan veriler Bölüm 3.1'de sunulmuştur. Yelkenli tekne performans verileri Tablo 1'de sunulmuş olup, çalışmadaki işletim senaryoları planlamasında faydalanılmıştır.

Tablo 1. Tekne performans verileri.

Seyir Pozisyonu	GRA* (derece)	GRH** (knot)	Tekne Hızı (knot)
Orsa (Close Hauled)	400	20 - 23	6,4 - 6,6
Dar Apaz (Fetch or Close Reach)	600	16-20	6,8 - 7,3
Apaz (Beam Reach)	900	13-15	7,7 - 8,2
Geniş Apaz (Broad Reach)	1200	10-13	S7,1 - 7,5

*GRA: Görünür Rüzgâr Açısı

**GRH: Görünür Rüzgâr Hızı

2.4. Önerilen Sistem Tanımı ve Ön Tasarım

Bu tekne tasarımına uygun olarak enerji bileşenleri iki ayrı grupta değerlendirilmiş olup dört ayrı yenilenebilir enerji kaynağı alt sisteminden faydalanılmıştır. Bunlar Şekil 3'te görsel olarak gösterilmiş ve aşağıda listelenmiştir:

Statik Enerji Üretim Bileşenleri Grubu:

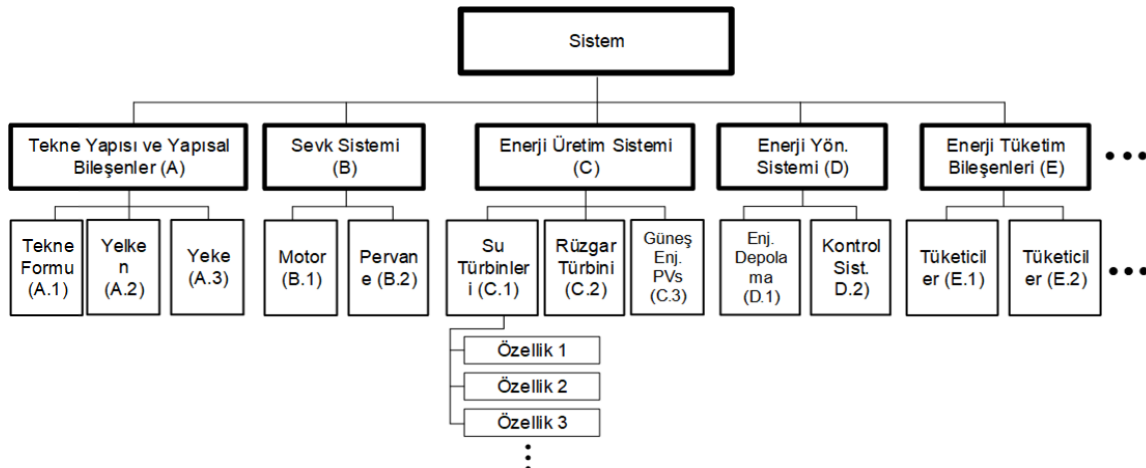
- FV panel grubu
- 2 adet rüzgâr türbini

Dinamik Enerji Üretim Bileşenleri Grubu:

- 2 adet su türbini
- İki kullanım amaçlı (itici veya yelkenli seyir esnasında elektrik üreten) 1 adet DC motor / su türbini

Yukarıdaki listede 'statik enerji üretim grubu' olarak belirtilen yenilenebilir enerji kaynağı sistemleri, seyir, liman ve demirde bekleme esnasında bahsedilen enerji kaynaklarından enerji üretebilen sistemlerdir. Dinamik grup ile adlandırılan grup ise su altındaki akıntı enerjisinden faydalanmak için ilave edilecek su türbinleridir.

Bu çalışmada önerilen yenilenebilir enerji bileşenleri ile sıfır atık konseptini içeren deniz aracı sistemi yapısal bileşenleri, mekanik, elektrik ve yazılım bileşenlerinden ve bunların çalışmalarını destekleyici alt bileşen veya elemanlardan oluşmakta ve birçok dinamik değişken içermektedir. Ana hedefler ile belirtilen gereksinimlerin başarılı bir şekilde alt sistem, bileşen, birim veya elemanlara uygulanabilmesi için Sistem Mühendisliği yaklaşımı ile Şekil 4'te gösterilen Kırılım Diyagramı oluşturulmuştur. Özellikle karmaşık yapıda olan sistemlerin geliştirilmesi çalışmalarında



Şekil 4. Sistem kırılım diyagramı.

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

sistemi basitleştirerek gereksinimlerin çalışmasına imkân tanıması bakımından kırılım diyagramları çok önemlidir (NASA, 2007; INCOSE, 2015; Steward, 1981). Şekil 4'te, uygulanacak tüm bileşenler ve buna bağlı ekipmanlar 'Sistem' olarak tanımlanmış ve sistem alt sistem ve bileşenlerine ayrılarak kırılım diyagramı ile gösterilmiştir. Şekil 2'de gösterilen bileşenlere ait alt kırılım diyagramları hazırlanmış, bu makalede sadece en üst kırılım seviyesi gösterilmiştir.

Sisteme ait alt sistemler veya alt bileşenler arasında etkileşimler veya diğer bir adıyla arayüz bağlantıları bulunmaktadır. Sistem mühendisliği yaklaşımı ile kavramsal tasarım ve sistem mimarisi ön tasarımı geliştirilmesi aşamalarında bu diyagramın tanımlanarak kullanılması ve bundan sonraki aşamalarda da tutarlı olarak diyagramın bileşenler için detaylandırılması yapılabilmektedir. Yeni konulacak bataryalardan motora elektrik sağlanması için elektrik arayüzü, güneş enerji panellerinin yerleştirilmesi için mekanik bağlantı arayüzleri, yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji yönetim sistemi arasındaki elektrik arayüzü, enerji yönetim sistemi ile sistemlerin durumunu bilgilendiren algılayıcı veya iletilicilerden gelen bilgileri içeren veri arayüzleri bu etkileşimlere veya arayüzlere örnek olarak gösterilebilir.

Sistem bileşenleri ile mevcut tekne ve bileşenlerinin aralarındaki arayüz tanımları yapılmış; mekanik veya yapısal ara bağlantı, elektrik veya elektronik donanım arayüzü ile data veya sayısal veri iletim arayüzü olarak tüm etkileşimler belirlenmiştir.

2.5 Tekne operasyonları ve enerji üretim bileşenleri

Sistem için ana ister olan sıfır emisyon gereksinimini sağlamak amacıyla, mevcut deniz aracındaki karbon emisyonlu içten yanmalı motor çıkartılarak, rüzgârdan faydalanan geleneksel yelken ile seyir haricinde, enerji beslemesi bataryalardan gerçekleştirilen motor-pervane itki sistemi ile diğer elektrik tüketicilerinin taleplerini karşılayabilmek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarını içermesi gerekmektedir. Bölüm 2.1'de belirtilen ana gereksinimler dikkate alınarak, liman durumunda, seyir esnasında veya demirde bekleme durumlarında mevcut olan yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulanması çalışılmış ve Tablo 2'de alt ister tanımları yapılmıştır. Bileşen tasarımları, analizleri veya raf ürün seçimleri aşağıdaki belirtilen ve Tablo 2'de tanımlanan operasyonları içerecek şekilde yapılmıştır:

L: Limanda Bekleme M: Manevra
D: Açıkta Demirde Bekleme S: Yelken Seyri

Tablo 2. Enerji üretim sistemi bileşenleri ve tekne operasyonları.

No	Enerji Kaynağı	Alt Bileşen	Enerji Üretimi Yapılan Tekne Operasyonu
C.1	Güneş	Güneş (fotovoltaik) panelleri	L, M, S, D
C.2	Rüzgâr	2 adet (iskele- sancak) rüzgâr türbini	L, M, S, D
C.3	Akıntı	2 adet su türbini	S
C.4	Akıntı	İtici pervane, aynı zamanda seyir esnasında su türbini	S

2.6. 3-boyutlu görsel tasarım

Sistemin ön tasarımı olarak, SolidWorks kullanılarak sistem ve alt bileşenlerinin gerçek ölçülerinde 3 boyutlu tekne modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada 3 boyutlu tasarım aşağıda belirtilen faydalarından dolayı önemli olmuştur:

- Görsel yerleşimin endüstriyel tasarım bakımından genel değerlendirilebilmesi (görüntü bakımından uygunluk, uygulanacak kısımda monte edilebilirlik, hareket alanının daraltılması, vb.)

- Seçilecek güneş enerji paneli sayısının belirlenmesi
- Analiz çalışmalarında 3 boyutlu modelin analiz ortamına aktarılabilmesi
- 3 boyutlu çizimden sonradan yapılabilecek üretim için 2 boyutlu üretim çizimlerine geçilebilmesi

3-boyutlu görsel tasarım, Bölüm 3'te sunulan bileşen tasarım ve analizlerinin anlatımlarında görsel olarak kullanılmıştır.

3. Tasarım ve Analiz

3.1 Sevk sistemi

Sevk sistemi bu çalışma kapsamında 2 ayrı bakımdan değerlendirilmiştir, bunlar:

- Mevcut gereksinimlere göre raf ürün teknoloji çözümü, ve
- Seçilen teknoloji çözümüne bağlı pervane tasarımı ve analiz çalışmasıdır.

Tasarımda kullanılan sevk sistemi 1 adet DC motor-pervane pod sisteminden oluşmaktadır. Bu sistem elektrik motoru ile döndürülen sabit kanatlı bir pervaneyi içerir. Podlu tipte L-transmisyon dişlileri ile elektrik motorundan pervaneye aktarılan dönme gücünü itmeye dönüştüren sistemin bu özelliği, yelkenli bir tekne için yer tasarrufu sağlamasından dolayı tercih edilmiştir.

3.1.1 DC Motor-Pervane Seti Seçimi

Benzer tekneler için itme amaçlı geliştirilen ve aynı zamanda teknenin yelken seyrinde geri dönüş sağlayan pervanesi sayesinde türbin olarak çalışarak elektrik üretme özelliğine sahip (hydrogeneration) bir raf ürünü sistem seçilmiştir. Pod Drive 6.0 Evo adı verilen bu sisteme ait bir görüntü Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Sevk sistemi: Pod Drive 6.0 Evo (ePropulsion, 2021)

Sistemde motor hareketlerini kontrol eden bir ünite vardır. Bağlantı arayüzü CAN Bus iletişimi kullanacak ve diğer bileşenler ile haberleşecektir (Gaz kolu, göstergeler, vb.). Seçilen sevk sistemi teknik özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Pod Drive 6.0 Evo teknik özellikleri.

Özellik	Tanım
Anma Voltajı	48 Volts
Anma Akımı	125 Amper
Pervaneye İletilen Güç	9.9 HP
Maksimum Genel Verim	%55
Nominal Devir Sayısı	1500 rpm
Kontrol Sistemi	Uzaktan Kontrol Modülü
İletişim Mesafesi	Kablosuz ≤ 10m / Kablolu ≤ 15m
Net Ağırlık	31 kg
Pervane (Çap / Hatve)	320 mm / 8.73"

3.1.2 Sevk Sistemi: 2-Kanatlı Pervane Tasarım ve Analizi

Moody 41 DS tipi mevcut yelkenli teknenin halihazırda içten yanmalı motora entegre sevk sistemi incelenmiştir. Kullanılan içten yanmalı motor ve Z-drive sevk sistemi genel görünümü Şekil 6'da, genel özellikleri Tablo 4'te, performans karakteristiği ise Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Moody 41DS teknesinde mevcut dizel motor ve sevk sistemi.

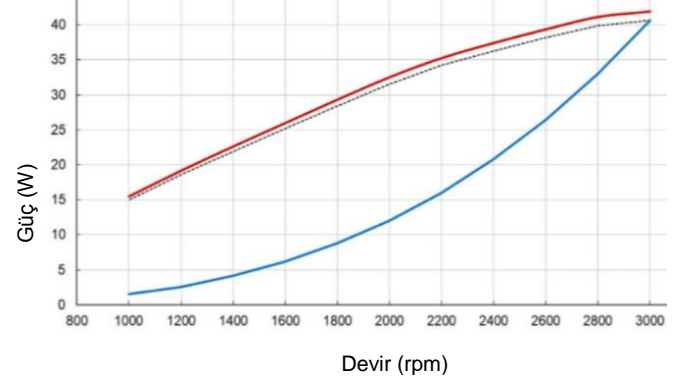
Bu çalışma kapsamında montaj kolaylığı, tekne iç hacminde yer kazanma gibi nedenler ile içten yanmalı motorun yerini elektrik motoru alacak olup elektrik motorunun konumunun pod içinde olması düşünülmüştür. Sonuç olarak pod içindeki elektrik motorunun mili doğrudan pervaneye bağlanacak olup arada devir değiştiren bir düzenek olmayacak, bu da mekanik verimi olumlu yönde etkileyecektir.

Tablo 4. Moody 41 DS sevk sistemi özellikleri.

Güç	41.9 kW
Devir	3000 rpm
Motor Hacmi	2.19 L
Silindir Sayısı	4
Havalandırma	Doğal
Alternatör	12 V. – 125 A.
Ağırlık	220 kg
Ana Boyutları	870 x 589 x 627 mm

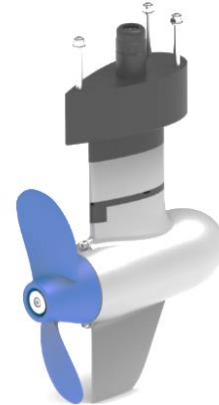
Hali hazırda var olan sistem gücü 41.9 kW olup makine devri 3000 rpm'dir. Buna karşılık kullanılan yelkenli sevk sisteminde devir düşürme oranı 2,49 olup bu da pervane devrinin 1204 rpm olduğunu göstermektedir. Tekne, durgun denizdeki motor seyirinde 533 mm çapındaki 3 kanatlı pervane ile 1500 rpm devir ile 6.3 knot hıza, 2100 rpm devirde ise 7 knot hıza ulaşmaktadır. Şekil 8 ile verilen motora ait bu grafik, 1500 rpm devir için yaklaşık 6 kW güç ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Bu devirde elde edilen hız, teknenin gerek manevra operasyonu için gerekse de acil durumlarda güç ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir. Bu nedenle sevk sistemi tasarımında, bu devire ulaşmasını sağlayacak 6 kW güç değeri kullanılmıştır. Bu bilgiler ile pervane tasarımındaki en kritik bilginin yani tasarlanacak pervanenin tüketmesi gereken en yüksek tork değerininin 38 Nm olması gerektiği hesaplanmıştır. Devrin elektrik motorunun pervaneye doğrudan bağlanacağı bilgisi ile 1500 rpm olacağı düşünüldüğünde çapı daha küçük ve kanat sayısı 2 olan bir pervane ile ön tasarıma başlanması uygun görülmüştür. Bu bilgiler ile pervane ön tasarımı için seri pervane tasarımı yöntemi kullanılarak bir başlangıç pervane tasarımı yapılmıştır. Wageningen seri pervanesi kullanılarak pervane ön tasarımı gerçekleştirilmiş, pervanenin performans kontrolleri ön tasarımda kaldırıcı yüzey metodu, detay tasarımda ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup her iki aşamada da geometrik değişiklikler yapılarak verimi yaklaşık %54 olan pervane geometrisine ulaşılmıştır. Pervane tasarımı sonrası elektrik motoru doğrudan pervaneye bağlı olan pod tipinde bir sevk sistemi önerilmiştir.

Şekil 5'te gösterilen DC motor tahrik ünitesini kullanan ve 2-kanatlı bir pervaneden oluşan bu sevk sistemi görsel tasarım görünümü Şekil 8'de gösterilmiştir. Yapılan tasarım ve optimizasyon çalışmasında, aynı çap ve hatvede ve sadece 2 kanattan oluşan pervane tasarlanmış ve analizleri ile performans karakteristikleri gösterilmiştir. Ön tasarım için kullanılan pervane tasarım parametreleri Tablo 5'te sunulmuştur.



Şekil 7. Moody 41 DS, performans (güç -devir) grafiği.

2-kanatlı pervane için bu çalışmada yapılan analiz ve optimizasyon çalışması, literatürde son yıllarda yapılan pervane analiz çalışmaları (Yılmaz ve Cicek, 2018; Ekinci ve Alvar, 2018; Ekinci ve Alvar, 2016; Soydan ve Bal, 2021) ile çok benzer bir metodoloji ve hesaplama yöntemlerini içermiştir. Bu sebeple bu makalede pervane tasarım, analiz ve optimizasyon detayları verilmeyerek, çalışmanın diğer kısımlarında gerekli olan sonuç grafikler sunulmuştur. Özet olarak, mevcut 3-kanatlı pervaneye ait kanat ölçüleri baz alınarak ve NACA 16 profili kullanılarak 2-kanatlı pervane tasarımı yapılmış, Tablo 6'da gösterilen pervane tasarım parametreleri oluşturulmuştur.



Şekil 8. Önerilen sevk sistemi, 2-kanatlı pervane görsel tasarımı ile örnek görüntü.

Tablo 5. Pervane ön tasarım parametreleri.

Özellik	Değer	Birim
Kanat Sayısı	2	[-]
Pervane Çapı	0.34	[m]
Göbek Çapı	0.08	[m]
EAR	0.22	[-]
Ortalama Hatve	0.226	[m]
Ortalama Hatve Oranı	0.666	[-]

Elde edilen tasarım modeli, Ansys Fluent kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ortamına aktarılmış pervanenin tekne üzerindeki hidrodinamik analizleri yapılmıştır. Ansys Fluent, kütle korunumu ve momentum korunumu prensipleri ile Navier-Stokes denklemlerini kullanmakta olup Ekinci ve Alvar (2018)'in çalışmalarında detaylı olarak anlatılmıştır.

Tablo 6. Pervane tasarım parametreleri.

r/R	c/D	P/D	F _{max} /c	T _{max} /c	Skew ₀	Rake/D	rLe/c
0.2	64.75	226.35	2.69	12.53	-18.46	0.00	1.34
0.3	68.96	226.35	2.93	11.79	-19.89	0.00	1.11
0.4	76.15	226.35	3.41	9.99	-20.92	0.00	0.72
0.5	81.42	226.35	3.77	8.32	-19.57	0.00	0.47
0.6	84.44	226.35	3.71	6.77	-15.08	0.00	0.30
0.7	84.59	226.35	3.05	5.36	-6.97	0.00	0.19
0.8	80.26	226.35	2.21	4.13	5.51	0.00	0.12
0.9	67.68	226.35	1.37	3.14	22.75	0.00	0.08
0.95	56.58	226.35	0.96	2.42	34.49	0.00	0.06
0.98	44.46	226.35	0.72	1.96	42.33	0.00	0.05
1	22.59	226.35	0.53	1.72	48.09	0.00	0.07

Tablo 6'da kullanılan kısaltmalar şunlardır:

- r/R: Kesit yarıçap oranı
- c/D: Kesit kord boyunun çapa oranı
- P/D: Kesit hatvesinin çapa oranı
- F_{max}/c: Kesit maksimum sehim değerinin kord boyuna oranı
- T_{max}/c: Kesit maksimum kalınlık değerinin kord boyuna oranı
- Skew₀: Açılacak olarak kesitin çalıklık değeri (kesit orta noktasının dik eksene göre açısı)

Çözüm ağ yapısı oluşturulmasında 2.773.350 eleman kullanmış, ağ yapısı kalite değerleri ise Skewness 0.829, Orthogonal Quality 0.20, ve aspect ratio 11,925 olarak ayarlanmıştır. Sınır koşulları için k- ω SST türbülans modeli kullanılarak akışkan hızı 3.086 m/s girilmiştir. Bu değer, tekne hız istemleri olarak çalışma başında gereksinim olarak belirlenen değerdir. Çıkış basıncı 0 Pascal olarak tanımlanmış ve pervane ve shaft yüzeylerinin tümü wall (duvar) sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Analizler, DC motorun nominal açılacak hızı olan 1500 devir/dakika için yapılmıştır ve sonrasında 1250, 1000 ve 750 devir/dakika dönüş hızlarında tekrar edilerek Tablo 7'de gösterilen akışkan analiz sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 7. Akışkan analizi sonuçları.

Devir	Hız (Va)	İtme	Tork	$\mu 0$	J	10KQ	KT
[rpm]	[knot]	[N]	[Nm]	[%]	[-]	[-]	[-]
1500	1	1495	53	9,2	0,061	0,174	0,0182
	2	1419	50	18,6	0,121	0,166	0,0172
	3	1347	48	27,6	0,182	0,157	0,0165
	4	1250	45	36,4	0,242	0,146	0,0154
	5	1142	42	44,5	0,303	0,133	0,0144
	6	1025	38	54	0,363	0,12	0,013
1250	1	1097	37	11,7	0,073	0,184	0,0183
	2	1013	35	22,7	0,145	0,17	0,0173
	3	917	32	33,8	0,218	0,154	0,0158
	4	823	29	44,6	0,291	0,138	0,0143
	5	686	26	51,8	0,363	0,115	0,0129
	6	579	23	59,4	0,436	0,097	0,0114
1000	1	707	23	15,1	0,091	0,186	0,0178
	2	630	21	29,5	0,182	0,165	0,0162
	3	521	19	40,4	0,272	0,137	0,0147
	4	439	17	50,7	0,363	0,115	0,0131
	5	354	15	58	0,454	0,093	0,0116
	6	265	12	65,1	0,545	0,07	0,0093
750	1	365	12	19,9	0,121	0,17	0,0165
	2	307	11	36,6	0,242	0,143	0,0151
	3	247	9	53,9	0,363	0,115	0,0124
	4	182	8	59,6	0,484	0,085	0,011
	5	115	6	62,8	0,605	0,054	0,0082
	6	43	4	42,2	0,726	0,02	0,0055

Analizler sonucunda elde edilen itme ve tork değerleri kullanılarak, pervanenin performans karakteristiklerini simgeleyen itme katsayısı (KT), tork katsayısı (KQ) ve pervane verimi ($\mu 0$) değerleri hesaplanmıştır.

HAD analizlerinde ayrıca, tekne altına yerleştirilecek olan 2 adet türbin ilavesinin tekne direncine etkisi çalışılmış ve direnç artışının yaklaşık %10 seviyelerinde olduğu görülmüştür (bkz. Tablo 8).

Tablo 8. Değişik tekn e hızlarında türbin ve tekne dirençleri.

Hız (Va)	Türbin Direnç	Tekne Direnç	Tekne + Türbinler	Artış
[knot]	[N]	[N]	[N]	%
1	1,3	26,6	29,3	10,14
2	5,4	114,3	125,2	9,48
3	11,7	248,8	272,2	9,42
4	20,3	439,1	479,6	9,23
5	31,0	675,2	737,3	9,19
6	44,0	964,8	1052,9	9,13
7	59,3	1293,6	1412,2	9,17

3.2 Enerji üretim bileşenleri

3.2.1 Güneş Enerji Panelleri

Güneş fotovoltaik elektrik üretim prensibine dayanan bu sistem için Moody 41DS teknesinin üst kısmında bulunan gölgelik alan yaklaşık 10 metrekare olarak hesaplanmış ve bu alan için güneş enerji panelleri Solidworks kullanılarak 3 boyutlu tasarım ortamında yerleştirilmiştir.

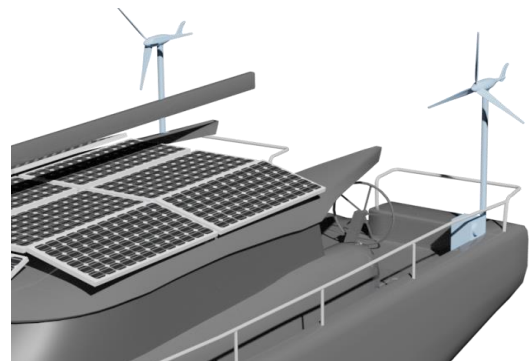
Güneş enerjisi panel seçimi, 3-boyutlu tasarım üzerinde yerleşim çalışması ile toplamda en fazla enerji kapasitesi sağlayabilmek ve aynı zamanda konumlanacak alan dışına çıkmayacak geometri düşünülerek seçilmiştir. Panel boyutları 674 mm ve 1504 mm olup ağırlığı 12 kg olan 150 WP kapasitesi olan 9 adet polikristal hücreli güneş paneli teknenin salon üstü kısmına yerleştirilmiştir. Standart testler sonucu panel verimi, üreticisi tarafından %14,6 olarak verilmiştir.

Güneş panellerinden elde edilen güç (P), Denklem 1 ile verilmiştir. Direkt Normal Işıma (DNI), birim alana gelen güneş ışınlarının enerjisini ifade eder. Güneş panel verimi (η) üreticinin belirlediği verim olup, toplam güneş panel alanı (A) tekne üzerine yerleştirilen panel alanını ifade eder.

$$P = DNI * \eta * A \quad (1)$$

3.2.2 Rüzgâr Türbinleri

Benzer uygulamalarda kullanılan 2 ayrı rüzgâr türbini; D400 (Electric Energy Ltd., 2021) ve Ruthland 1200 (Marlec Engineering, 2021) bu çalışmada da değerlendirilmiştir. Ruthland 1200'ün daha küçük dönme açısına sahip olması, düşük rüzgâr hızlarında da elektrik üretebilir olması ve özellikle 0-20 knot arası güç eğrisi ve güç üretim karakteristiği değerlendirilerek daha düşük rüzgâr hızlarında da enerji üretmesi tercih sebepleri olmuştur.



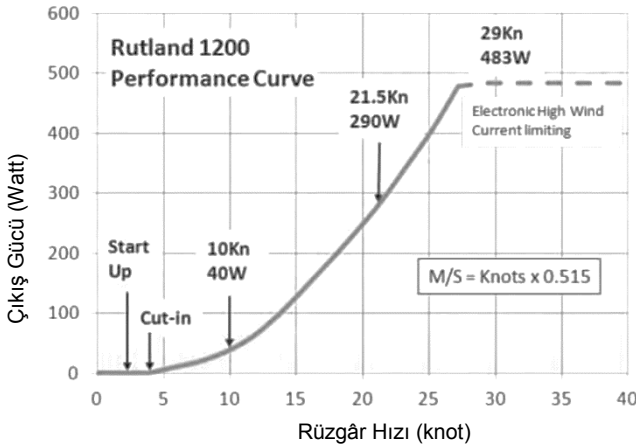
Şekil 9. Rüzgâr türbinlerinin tekne güvertesi üzerinde yerleşimi.

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Tasarımda, rüzgâr türbini teknenin kış kısmında güverte üzeri iskele ve sancak olmak üzere 2 adet yerleştirilmiştir. Şekil 9'da gösterildiği gibi, türbin yapıları insan hareketlerini kısıtlamayacak şekilde, güvertenin köşe kısımlarına yerleştirilmiştir.

Şekil 10, kullanılan bu türbine ait performans eğrisini göstermektedir. Performans eğrisi MS Excel kullanılarak sayısal tabloya dönüştürülmüş ve 3. dereceden polinom ile denklem (2) elde edilmiştir. Bu denklem, tekne operasyon senaryolarının programlanmasında kullanılmıştır.

$$P(x) = -0.0125 x^3 + 1,34 x^2 - 11,1 x + 32,3 \quad (2)$$



Şekil 10. Ruthland 1200 rüzgâr türbini performansı (Marlec Engineering, 2021).

3.2.3 Su Türbinleri

Literatürde mevcut olan benzer su türbini çalışmaları incelenmiştir. Bal, vd. (2015) yatay eksenli türbinlerin performans tahminlemesi konusunda çalışarak örnekler vermiştir. Literatür çalışmalarından bazıları Moody 41DS için su türbini tasarımı çalışması olup bu çalışma öncesi tamamlanmıştır (Alvar, 2016; Ekinci ve Alvar, 2017). Önerilen sistemde kullanılmak üzere, Alvar (2016) ve Ekinci ve Alvar (2017) tarafından çalışılan yatay eksenli su türbini tasarımı değerlendirilmiştir.

Türbinlerin tekne üzerinde konumlandırılması Şekil 11'te gösterilmiştir. Önerilen sistemde bu türbinden tekne altında 2 adet iskele ve sancak konumlarında kullanılacak şekilde tasarım ve analiz çalışması yapılmıştır. Genel konsepti anlatıldığı şekli ile yatay eksenli su türbinlerinin teknik istekleri, Alvar (2017)'in çalışmasından da faydalanılarak aşağıda listelenmiştir:

i. Uygulanacak türbinlerin çapı tekne boyutları, gövde tasarımı ve montaj kısıtları dikkate alınarak 700 mm.'yi geçmeyecek şekilde, tekne üzerindeki konumu; tekne içi yerleşim, su altındaki akışta türbinlerinin diğer takıntılar ile etkileşimi (sevk sistemi, salma vb.) dikkate alınarak belirlenmiştir.

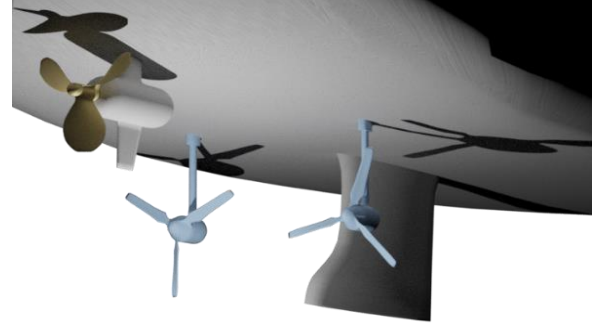
ii. Türbinlerin çalışması sırasında tekne yelken seyri yapmaktadır. Türbin kanatlarının dönmelerinden dolayı sürtünme ve itme kaynaklı ek direnç oluşturmakta ve aracın hızını düşürme eğiliminde olmaktadır. Yapılan analiz çalışması, türbinlerin oluşturduğu ek direncin tekne direnç değerinin %25'sini geçmediğini göstermektedir.

iii. Türbin, teknenin tasarım hızında (3.1 m/s) en az 750 W elektrik üretecek şekilde tasarlanmıştır.

iv. Türbin kullanımda olmadığı durumda en az takıntı direnci oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Bir adet türbin için toplam takıntı direnci motor seyriinde tekne direncinin %5'ni geçmeyecek şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir.

Alvar, M. (2016) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen veriler ve bu çalışmada hesaplanan değerler sonucunda, bu su

türbininin, sektörde yaygın olarak bulunan Watt & Sea Cruising modeline göre 2,5 m/s akış hızında 3 kat, 4 m/s akış hızında ise 5 kata kadar daha iyi bir güç üretim karakteristiği sağladığı görülmüştür.



Şekil 11. Türbinlerin tekne üzerindeki konumu.

Su türbinlerinden her biri teknenin 6 knot (3,1 m/s) seyir hızında 890 W enerji üretmektedir. Bu da çift türbin için 1780 W güç elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Sistem ağırlığı DC motor dahil toplamda 33 kg olarak bulunmuş olup bu boyutlarda bir tekne için makul bir ağırlık olarak değerlendirilmiştir. Su jeneratörünün detaylı üretim verileri kullanılarak oluşturulan genel güç üretim grafiği Şekil 21 ve 22'de verilmiştir. Genel güç üretim veri grafiği MS Excel Trendline fonksiyonu ile üçüncü dereceden polinom olarak ifade edilmiştir. Tekne hızına bağlı su akış hızı, v (knot), ve üretilen enerji üretim büyüklüğü, $P(x)$ (watt), ilişkisini gösteren bu ifade aşağıdaki gibi bulunmuştur ve işletim senaryolarında kullanılmıştır:

$$P(x) = 1,647 v^3 - 54,509 v^2 + 863,65 v - 2681 \quad (3)$$

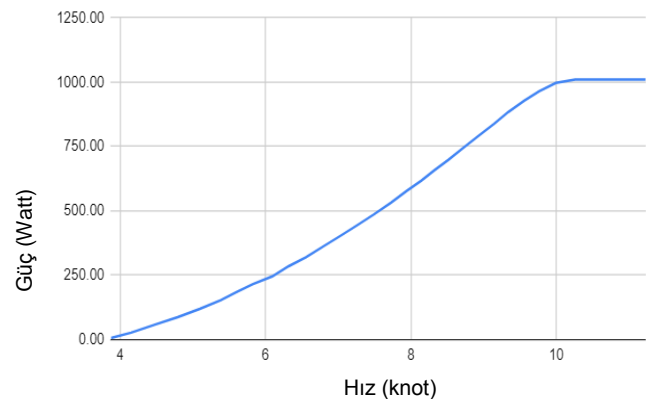
3.2.4 Sevk Motoru: Su Jeneratörü Fonksiyonu

DC Motor - Pervane seti (Pod Drive 6.0 Evo), motor seyri sırasında itici motor olarak kullanılmasının yanı sıra teknenin yelken seyri esnasında türbin görevi görecektir şekilde kullanılabilir. Sıfır emisyon amacı bu seçimin yapılmasının başlıca nedenidir. Su jeneratörü fonksiyonlu sevk motoru teknenin altında, diğer su jeneratörlerini ortalayacak ve 1 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Söz konusu 1010 W kapasiteli su jeneratörü fonksiyonu sevk motorunun üretici firma tarafından verilen enerji üretim grafiği (Şekil 12) sayısallaştırılarak hız ve güç tablosu elde edilmiş, sonrasında bu tablo MS Excel Trendline fonksiyonu ile dördüncü dereceden polinom ile aşağıda verilen denklem ile ifade edilmiştir:

$$P(x) = -1,22 x^4 + 31,7 x^3 - 285 x^2 + 1187 x - 1886 \quad (4)$$

Denklem (4), tekne senaryoları yürütme programında güç üretim hesaplamalarında kullanılmıştır. Denklem 4'te " x " akıntı hızını (knot), " $P(x)$ " ise güç üretimini (Watt) ifade etmektedir.



Şekil 12. Su jeneratörü fonksiyonlu sevk motoru güç üretim eğrisi.

3.3 Enerji Yönetim Sistemi

Enerji yönetim sistemleri benzer uygulamalarda son yıllarda en fazla ilgi odağı olan ve aynı zamanda en fazla çözüm üretilen sistemlerdir. Enerji yönetim sistemi, enerji üretim, depolama ve tüketim trafiğini sağlayacak sistemdir. Bu tasarım konsepti ile teknolojinin gelişimine paralel olarak yüksek verimli enerji çeviricilerin yanında elde edilen enerjinin doğru yönlendirilmesi, kayıplar düşük seviyelerde tutulacak şekilde depolanması ve ihtiyaç duyulduğunda gerek itki gerekse diğer tüketicilere elektrik enerjisi verilebilmesi sağlanacaktır. Bahsedilen bu sistem birden fazla enerji üreten sistemlerden gerektiğinde enerji depolanabilmesi ve aynı zamanda tüketicilere şarj edilen veya anlık üretilen enerjinin sağlanabilmesi gereksinimlerini karşılaması gerekir. Bu amaçla bu çalışmada, enerji yönetim sistemi ön tasarım çalışması yapılmıştır.

Tasarlanan enerji yönetim sistemi, tasarım yöntemi, çalışma prensibi ve diğer teknik detay çalışmaların gösterilmesi sonraki makale çalışmalarına bırakılarak, bu makalede enerji gereksinimlerinin senaryo analizleri ile sağlanması konusuna odaklanılmıştır.

Üretilen enerjinin depolanmasında klasik kurşun-asit bataryaları veya lityum batarya kullanılabilir. Özellikle son yıllarda lityum bataryaların gelişmiş olması bu tür bataryaların da kullanılmaya başlandığını göstermektedir. Modülerlik sağlamak bakımından yapılan tasarım her iki tür batarya kullanımına uygun olarak ve gruplara ayrıştırılarak oluşturulmuştur. Harici akü gereksinimi, DC motorlu sevk sistemi için 48V lityum batarya ile sağlanmaktadır.

Senaryo çalışmalarında ise ePropulsion E175 8960 Wh kapasiteli, Lityum-iyon batarya kullanılmıştır. Batarya sayısının bulunmasında ise önceden teknede var olan 210 litre kapasiteli yakıt tankının artık boş olmasından dolayı kazanılan 189 kg'lık ağırlık hesaplanmış ve tasarımı bu ağırlığı geçmeyen acil durum bataryaları dahil olmak üzere toplam 4 adet batarya grubu kullanılmıştır.

4. Senaryo Analizleri

Tasarımı yapılan sistemler ile sıfır emisyonlu tekne, aşağıdaki listede belirtilen denizcilik operasyonlarını içerecek şekilde gösterilmiştir:

- L: Limanda Bekleme
- M: Manevra
- D: Açıkta Demirde Bekleme
- S: Yelken Seyri

Marmara Denizi'nin seyir yapılacak bölgelerinde Ağustos ayı gün içerisindeki ölçülen verilere göre teknenin gerçek ortamda maruz kalacağı rüzgâr ve güneş verileri kullanılmış ve Tablo 10'da genel özellikleri gösterilen 3 senaryo yürütme programı oluşturulmuş ve bu programlar yürütülerek enerji üretim ve kullanım analizleri yapılmıştır. Senaryo programını oluşturmada Google Sheets kullanılmış ve tüm detay tablolar her bir senaryo için Tablo 10'da referansı verilen bölümde verilmiştir. Rota planlaması çalışmasında, OpenSeaMap yazılımının Trip Planner fonksiyonu kullanılmıştır.

Senaryo 1, Tuzla-Büyükada Gidiş, Bekleme ve Dönüş; Senaryo 2, Tuzla-Büyükada Gidiş, Bekleme ve Dönüş olmak üzere 23'er saatlik tipik yelkenli seyir senaryolarıdır. Senaryo 3 ise tekne Marmara denizi Büyükada mevkiinde bulunurken rüzgârın olmadığı, yani yelken seyri yapılamayacak olup, DC motor-pervane setinin sevk sistemi olarak bataryalardaki enerji ile Tuzla'ya kadar 1 saat 26 dakikalık seyir senaryosudur. Bu senaryo ile buna benzer acil durumlarda tekne ile yaklaşık ne kadar mesafe seyir yapılabileceği gösterilmiştir. Alt bölümlerde her bir senaryo sonuçları grafikler ile gösterilmiş, bu senaryolar esnasında enerji üretim, batarya şarj-deşarj, ve enerji kullanım durumları sunulmuştur.

Senaryolarda kullanılan meteorolojik rüzgâr hızı ve yön verileri 1 Ocak – 31 Aralık 2018 tarih aralığına ait olup saatlik bazda İTÜ Tuzla Güney Mendirek Feneri Veri İstasyonu için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden MS Excel formatında alınmıştır.

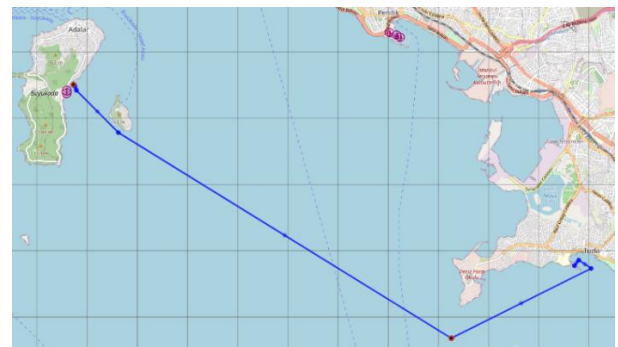
Deniz aracı elektrik güç tüketicileri Tablo 9'da gösterilmiştir. Bu tüketicilerin programlanmasında deniz aracı işletim durumu ile, gün içindeki saatin gece-gündüz olması durumlarına göre tüketici sarfiyatı olup olmaması 1 ya da 0 olarak belirlenmiş (Tablo 10) ve simülasyon programlanması buna göre yapılmıştır.

Tablo 9. Elektrik güç tüketicileri.

Tüketiciler	Güç (W)	Gündüz				Gece			
		M	S	L	D	M	S	L	D
Buzdolabı	310	1	1	1	1	1	1	1	1
Ana Yelken Sarma Donanımı	1.500	0	1	0	0	0	1	0	0
Cenova Sarma Donanım	1.500	0	1	0	0	0	1	0	0
Elektrikli Cenova Irgatlar	3.000	0	1	0	0	0	1	0	0
Irgat	1.000	0	0	0	1	0	0	0	1
Seyir Fenerleri	48	0	0	0	0	1	1	0	0
Demirleme Lambası	10	0	0	0	0	0	0	0	1
Gv Aydınlatma Lambaları	130	0	0	0	0	1	1	1	1
Kabin Aydınlatma	30	1	1	1	1	1	1	1	1
Radar	30	1	1	0	0	1	1	0	0
Anten	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gösterge Tablosu Ekipmanları	100	1	1	0	0	1	1	0	0
Su Pompaları	46	1	1	1	1	1	1	1	1
Kirli Su Pompası	72	1	1	1	1	1	1	1	1
Atık Su Pompası	72	1	1	1	1	1	1	1	1
Tuvalet Vakum P.	250	1	1	1	1	1	1	1	1
Duş Tahliye Pompası	48	1	1	1	1	1	1	1	1
Sintine Pompası	200	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektrik Panosu	50	1	1	1	1	1	1	1	1
İklimlendirme Sistemi	1.700	1	1	1	1	1	1	1	1
Su Isıtıcısı	2.200	1	1	1	1	0	0	0	0
Televizyon	235	1	1	1	1	0	0	0	0
Ses sistemi	220	1	1	1	1	0	0	0	0
Fırın	2.400	0	0	1	1	0	0	0	0
Mikrodalga Fırın	1.200	0	0	1	1	0	0	0	0

4.1 Senaryo 1: Tuzla-Büyükada Gidiş-Bekleme-Dönüş Senaryosu

Tuzla-Büyükada senaryosu, Şekil 13'te gösterilmiştir. Tuzla-Büyükada senaryosu 1. gün saat 13:00'da bataryaların %50 doluluk oranı ile başlatılmış ve 2. gün saat 12:00'da, 23 saatlik senaryo sonunda %28 batarya doluluk oranı ile tamamlanmıştır.

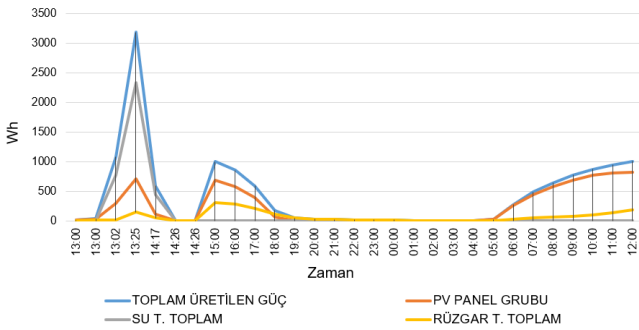


Şekil 13. Senaryo 1: Tuzla - Büyükada seyir planı.

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

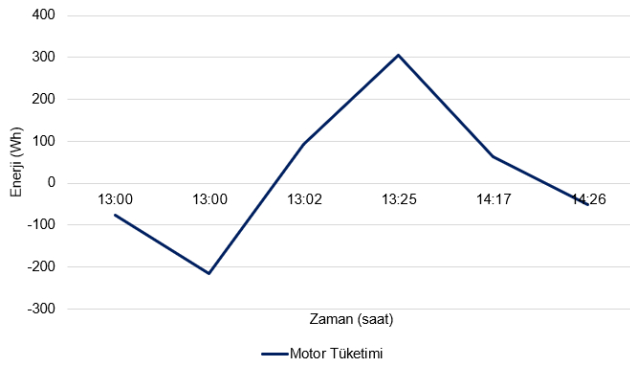
Şekil 14, 1. senaryo süresince her bir yenilenebilir enerji sistemi ile üretilen enerji miktarlarını ve toplam üretilen enerjiyi Watt-saat (Wh) birimi ile göstermektedir. Marmara bölgesinde yaz aylarında rüzgâr hızlarının düşük olmasından dolayı rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin de düşük olduğu ve gece saatlerinde güneş panellerinden elektrik üretiminin olmadığı görülmektedir.

Genel olarak rota üzerinde 1 saatlik ilerleme aralıkları ile hesaplama yöntemi kullanılmış ve rüzgâr yönü, hızı vektörel olarak hesaplanarak programda kullanılmıştır. Ancak, seyir başlangıç ve tamamlanması sırasında senaryonun ilerlemesi rota değişikliklerine göre yapıldığından, bu noktalarda çok daha kısa sürelerde hesaplama yapılmıştır. Bu sebeple, Şekil 20'nin okunmasında, bazı noktalarda çok daha kısa zamanda toplam üretimler gösterildiğinden bu zaman aralığında izafi olarak örneğin güneş enerjisi üretimi çok daha az seviyelerde olmuştur.



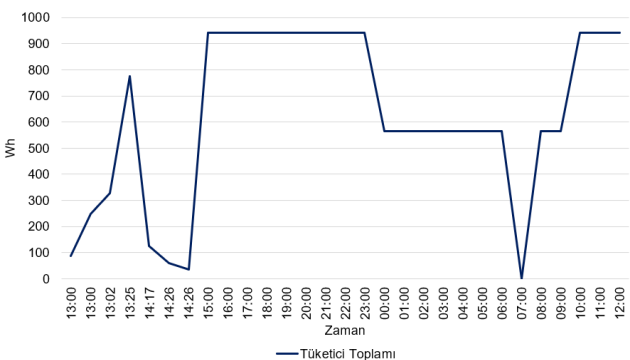
Şekil 14. Senaryo 1: Yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretimi.

Şekil 15, DC-motor pervane setinin enerji üretim ve tüketim seviyelerini göstermektedir. İlk başta manevra esnasında DC motor ile sevk yapıldığından enerji kullanımı ve yelkenli seyir esnasında bu sistemin türbin modunda çalışarak enerji üretimi yaptığı görülmektedir.



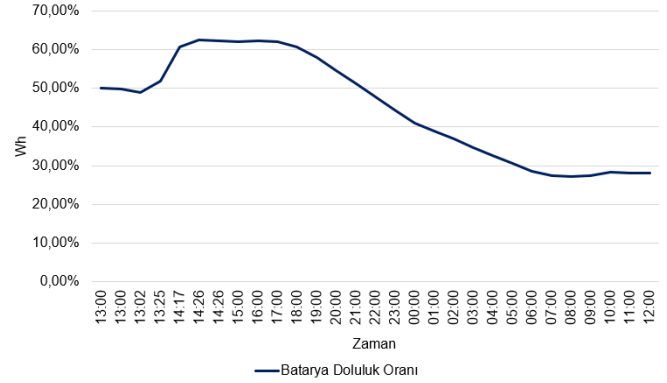
Şekil 15. Senaryo 1: Sevk sistemi enerji üretim ve tüketim değişimi.

Şekil 16, tüketicilerin toplam enerji kullanım seviyelerini göstermektedir. Senaryo programlamasında tüketicilerin güç gereksinimi Tablo 9'da gece ve gündüz ve teknenin işletim durumuna göre gösterilen değerler programlanarak senaryo yürütülmüştür.



Şekil 16. Senaryo 1: Tüketicilerin zamana göre toplam enerji kullanımı.

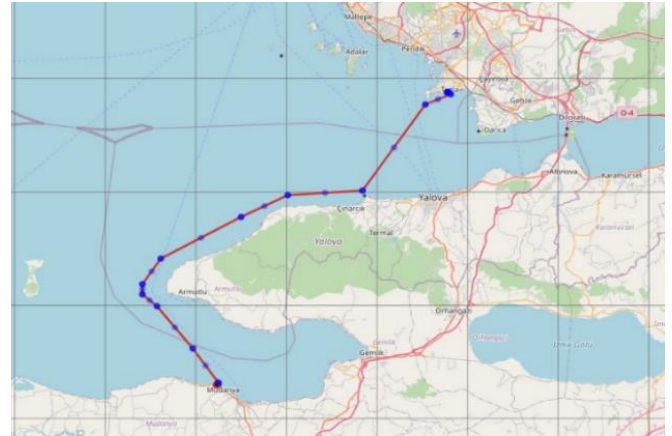
Şekil 17, Senaryo 1 sırasında zamana göre batarya gruplarının toplam yüzde doluluk seviyesini göstermektedir. %50 doluluk oranı ile başlatılan ve 23 saat devam eden senaryo sonrasında, %28 batarya doluluk oranı ile senaryo tamamlanmıştır.



Şekil 17. Senaryo 1: Zamana göre batarya gruplarının yüzde şarj seviyesi değişimi.

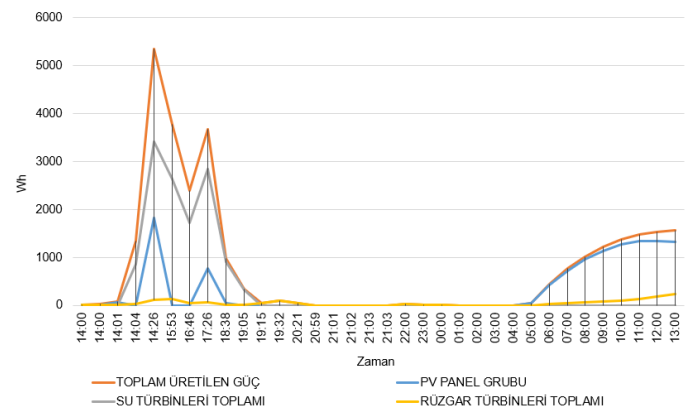
4.2 Senaryo 2: Tuzla-Mudanya Gidiş-Kalma ve Dönüş Seyri Senaryosu

Tuzla-Mudanya senaryosu, Şekil 18'de gösterilmiştir. Bu senaryo 1. gün saat 14:00'da bataryaların %60 doluluk oranı ile başlatılmış ve 22 saatlik senaryo sonunda 2. gün saat 12:00'da %44 batarya doluluk oranı ile tamamlanmıştır.



Şekil 18. Senaryo 2: Tuzla-Mudanya seyir planı.

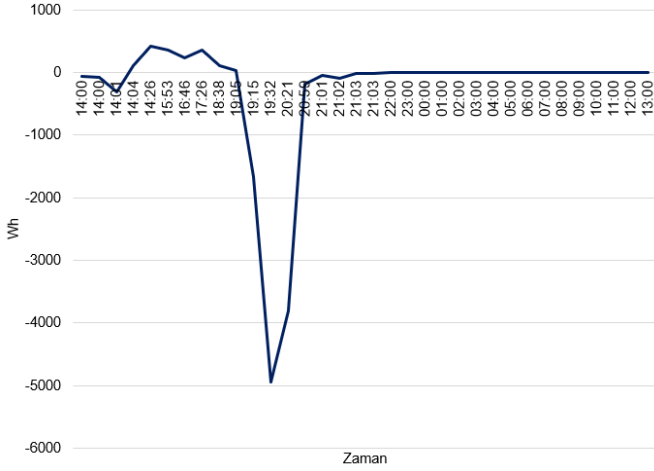
Şekil 19, 1. senaryo süresince her bir yenilenebilir enerji sistemi ile üretilen enerji miktarlarını ve toplam üretilen enerjiyi göstermektedir. Marmara bölgesinde yaz aylarında rüzgâr hızlarının düşük olmasından dolayı rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin de düşük olduğu ve gece saatlerinde güneş panellerinden elektrik üretiminin olmadığı görülmektedir.



Şekil 19. Senaryo 2: Yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretimi değişimi.

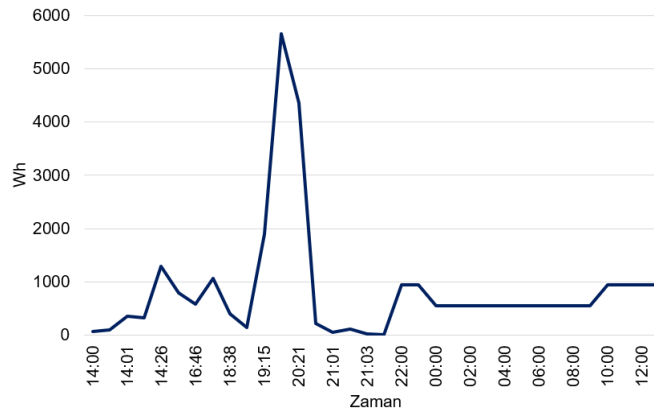
Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Şekil 20, DC-motor pervane setinin enerji üretim ve tüketim seviyelerini göstermektedir. Manevra esnasında DC motor ile sevk yapıldığından enerji kullanımı ve yelkenli seyir esnasında bu sistemin türbin modunda çalışarak enerji üretimi yaptığı görülmektedir.



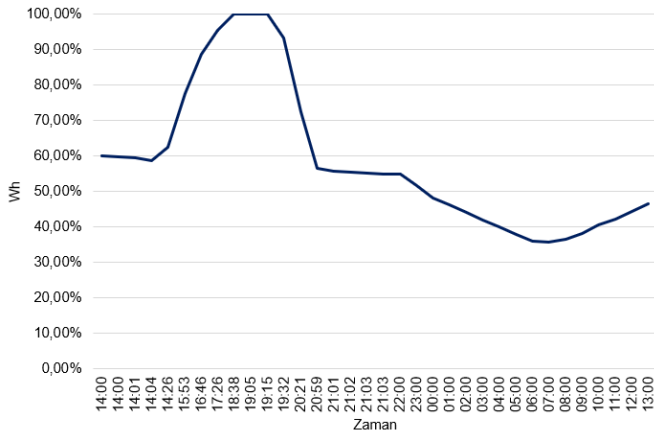
Şekil 20. Sevk sistemi enerji üretim ve tüketim değişimi.

Şekil 21, tüketicilerin tamamının toplam enerji kullanım seviyelerini göstermektedir. Senaryolara göre hangi tüketicilerin ne miktarlarda enerji kullanılacağı belirtilen tablolardan faydalanarak (Tablo 11) ve bu seviyeler programlanmış ve senaryo yürütülmüştür.



Şekil 21. Senaryo 2: Tüketicilerin zamana göre enerji kullanımı.

Şekil 22, Senaryo 2'de zamana göre batarya gruplarının toplam yüzde doluluk seviyesini göstermektedir. %60 doluluk oranı ile başlatılan ve 23 saat devam eden senaryo sonrasında, %44 batarya doluluk oranı senaryo tamamlanmıştır.



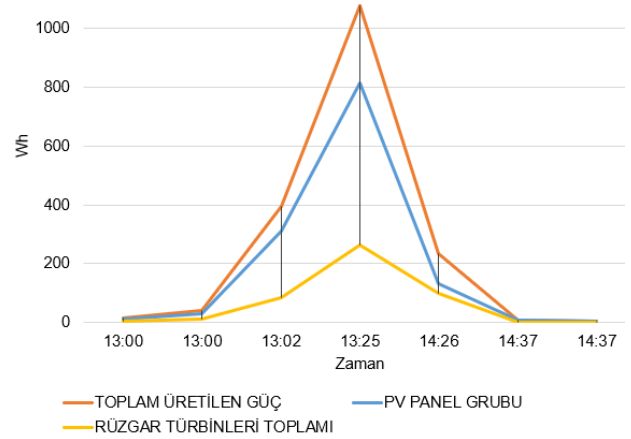
Şekil 22. Senaryo 2: Zamana göre batarya gruplarının yüzde şarj seviyesi değişimi.

4.3 Senaryo 3 - Acil Durumda, Yelkensiz Seyir (DC Motor ile) Sevk Senaryosu

Acil durum senaryosu olan Senaryo 3, tekne Marmara denizi Büyükada mevkiinde bulunurken rüzgârın olmaması durumunda, yani yelkenli seyir yapılamayacak olup, DC motor- pervane setinin sevk sistemi olarak bataryalardaki enerji ile Tuzla'ya kadar teknenin seyir yapması senaryosudur. Bu senaryo ile buna benzer acil durumlarda tekne ile yaklaşık ne kadar mesafe seyir yapılabileceği ve bu esnada batarya durumlarında azalma miktarının ne kadar olacağı hakkında fikir verilmiştir.

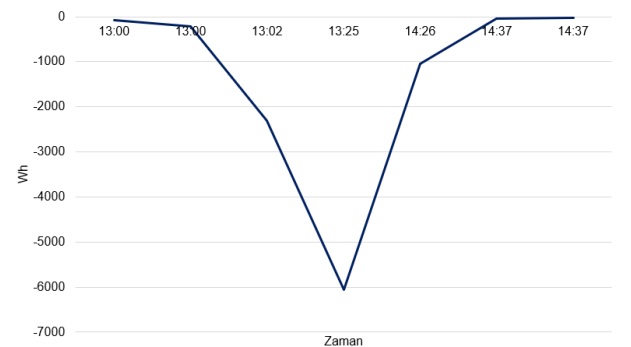
Senaryo 3, acil durum senaryosu olarak yürütülmüş; rüzgâr hızı sıfır kabul edilmiş, sadece DC motor ile sevk programlanmıştır. Senaryo, başlangıç noktası olan Büyükada bölgesinden Ağustos ayında, saat 13:00 itibari ile başlatılmış; Büyükada-Tuzla rotasından elde edilen veriler senaryo planlayıcısında işlenmiştir. Senaryo, bataryalar %100 dolu olarak başlatılmış, Tuzla'ya varış 1 Saat 26 dakikalık motor seyri ile ve bataryaların %69 doluluk oranı ile tamamlanmıştır.

Şekil 23, 3. senaryo esnasında her bir yenilenebilir enerji sistemi ile üretilen enerji miktarlarını ve toplam üretilen enerjiyi Watt-saat (Wh) birimi ile göstermektedir. DC motor sevk edici kullanım modunda olduğundan bu senaryoda DC-motor pervane setinin türbin olarak elektrik eldesi yoktur. Ayrıca, rüzgâr hızı sıfır olduğundan, rüzgâr türbinleri ile enerji üretimi de 0 olacaktır. En fazla enerjinin güneş panelleri ile elde edildiği görülmektedir. İç deniz olan Marmara denizinde Türkiye diğer bölgelerine, Karadeniz, Ege ve Akdeniz kıyılarına, göre istatistiksel olarak rüzgârın daha az olduğundan ve ağustos aylarında bu bölgede rüzgârın diğer bölgelere göre daha az olmasından dolayı bu sonuç yenilenebilir enerji kaynakları ile en verimsiz enerji üretim şartları olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 23. Senaryo 3: Tuzla-Büyükada senaryosunda yenilenebilir enerji kaynakları ile zamana ve şartlara göre enerji üretimi grafiği.

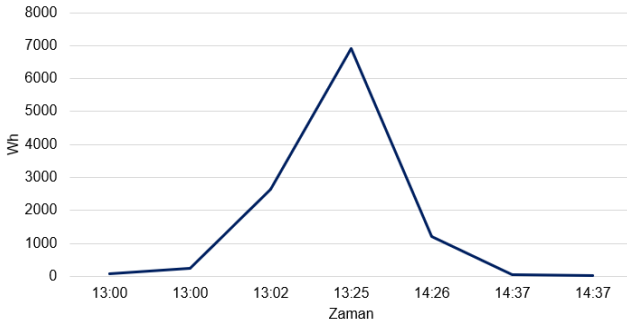
Şekil 24, DC motor-pervane setinin enerji tüketim seviyelerini göstermektedir. Tüm değerlerin negatif olması, sevk sistemi ile seyir yapılmasından dolayı senaryo süresince enerji kullanıldığını göstermektedir.



Şekil 24: DC motor-pervane sevk sistemi enerji üretim ve tüketim değişimi.

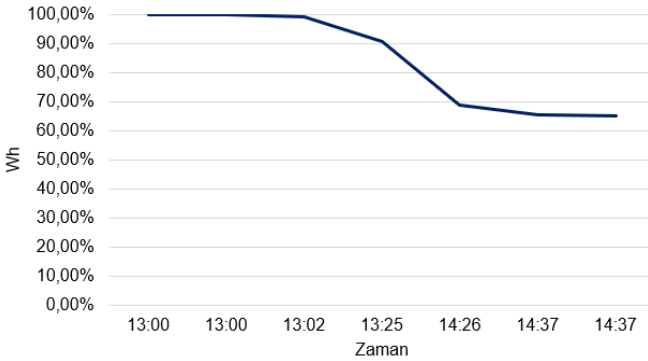
Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Şekil 25, tüketicilerin tamamının toplam enerji kullanım seviyelerini göstermektedir. Senaryo programlamasında tüketicilerin güç gereksinimi Tablo 11’de gece ve gündüz ve teknenin işletim durumuna göre gösterilen değerler programlanarak senaryo yürütülmüştür.



Şekil 25. Senaryo 3: Tüketicilerin zamana göre enerji kullanımı.

Şekil 26, zamana göre batarya gruplarının toplam yüzde doluluk seviyesini göstermektedir. %100 doluluk oranı ile başlatılan senaryo sonrasında, %65 batarya doluluk oranı ile senaryo tamamlanmıştır. 1 saat 37 dakika devam eden gündüz seyri esnasında batarya gruplarından toplam %35 enerji kullanılmıştır. Bu da göstermektedir ki, önerilen bu sistem ile acil durumda, yani rüzgârsız bir havada gün içerisinde bataryaların tam dolu olma durumunda, DC motor-pervane seti ile maksimum 4,5 saat seyir yapılabilecektir.



Şekil 26. Senaryo 3: Zamana göre batarya gruplarının yüzde doluluk seviyesi değişimi

5. Tartışma

Bu çalışmanın tasarım çalışması konusunda savunma, uzay ve havacılık sektöründe uygulanan sistem mühendisliği yöntemi uygulanmıştır. Uygulanan yöntem mantıksal olarak basit olup faydasının yüksek katkısı olduğu görülen sistemin alt bileşenlerine ayrıştırılması yöntemidir. Bu yöntem ile oluşturulan sistem tasarımı sonrasında, en son teknenin operasyonel senaryoları yürütülerek, ilk başta oluşturulan anahtar performans parametreleri doğrulanmıştır.

Önerilen sistemin sevk sistemi mevcut tekne formu ve yapısına göre çalışacak bir DC motor-pervane seti düşünülmüş ve son yıllarda benzer teknelerle uygulanabilen raf ürünü olarak piyasaya sürülen bir ürün seçilmiş ve bu sisteme ait pervane 3-kanatlı iken 2-kanatlı bir pervane tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni pervane analizleri ile tekne sevk sistemi karakteristikleri belirlenmiştir. Sevk sistemi seçimi ve tasarımında en önemli çalışma da bu analizler ile pervanenin motor dönüş hızlarında ne kadar itme sağlayacağı, teknenin oluşan dirençlere göre hangi hızlara çıktığının belirlenmesi ve bu esnada DC motor sürücüsünün sistemden ne kadar elektrik gücü harcayacağı çalışılması olmuştur. Ürün seçimleri ve tasarım çalışmalarında elde edilen performans eğrileri, denklemlere dönüştürülerek senaryo çalışmalarında teknenin DC motor ile sevkli kısımlarında kullanılmıştır.

Enerji üretim sistemi, güneş enerji panelleri, rüzgâr türbinleri, yelkenli seyir esnasında oluşan akıntı ile elektrik üreten su türbinlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, sevk sistemi seçiminde, itki ve enerji üretim modu olarak iki ayrı modda çalışabilen DC motor-pervane seti tercih edilmiştir ki bu sayede teknenin yelkenli seyri esnasında oluşan tekne altı su akıntısından faydalanarak pervanenin geri dönüşü ile yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılması sağlanmıştır. Güneş enerji panelleri seçiminde teknenin salon kısmı üzerinde bulunan gölgelik alan üzerine rijit paneller yerleşimi çalışılmış; 3 boyutlu geometrik tasarım ile 9 adet güneş enerji paneli yerleştirilmiştir. Rüzgâr türbini seçiminde, teknenin kış güverte köşe kenarlarına, 3 boyutlu görsel çalışma ile tekne üzerinde insan hareketlerini en az etkileyecek bu noktalara, 2 adet rüzgâr türbini yerleştirilmiştir. Güneş enerji panelleri ve rüzgâr türbinleri, benzer tekneler için uygun olabilecek tedarik edilebilen raf ürünlerinin geometrik yapıları ile performans karakteristikleri değerlendirilerek seçilmiştir. Bu çalışma ile raf ürünlerinin araştırma projeleri seviyesinden sahada uygulama seviyesine dönüştüğü de gösterilmiştir. Tasarımda değerlendirilen rüzgâr türbinlerinin de güneş enerji panellerinde olduğu gibi, piyasada bulunabildiği ve tasarımlarda değişik ebat ve özelliklerde seçilebilir olmaya başladığı görülmüştür.

Tekne altına yerleştirilen su türbinleri için akademik çalışmalar incelenerek aynı tip tekne için başka bir akademik çalışma (Alvar, 2016; Ekinci ve Alvar, 2017) sonuçlarından faydalanılmıştır. Su türbininin tasarımı ve analizleri gösterilen bu çalışmalarda da sistem mühendisliği yöntemi ile sistem bileşenlerine ayrıldığından ve bu çalışmada düşünüldüğü gibi 2 ayrı türbininin birlikte kullanılması değerlendirildiğinden, referansı verilen çalışma sonuçları bu çalışmanın tasarım tanımı ve senaryo analizlerinde kullanılabilmiştir. Genel konsepti anlatıldığı şekli ile yatay eksensli bu su türbinlerinin teknik istekleri, Alvar (2017)'in çalışmasından faydalanılarak tanımlanmıştır. İtici DC motor-pervane bileşenine ait pervanenin 2-kanatlı tasarım analizleri aynı zamanda bu bileşenin türbin modunda elektrik üretmesi için analizlerini de içermiştir.

Senaryo çalışmaları için İTÜ Denizcilik Fakültesi limanından çıkılarak Büyükkada'ya tekne seyri ile gidiş ve geliş ile yine aynı yerden çıkılarak Mudanya'ya gidiş geliş senaryoları gerçekleştirilmiştir. Teknenin bu senaryolar esnasında enerji üretim ve tüketimleri teknenin limanda manevraya hazır olması, DC motor-pervane sevk sistemi ile manevra, yelkenli tekne seyri, ve demirde bekleme olmak üzere 4 ayrı tekne modunda elektrik üretim ve tüketim karakteristikleri detaylandırılmıştır. Örneğin elektrik tüketicileri her bir modda farklı güç harcamaktadır. Elektrik üretim bileşenleri de bu modlarda ve bulunan coğrafya ve tarihlerdeki enerji kaynaklarının ölçülmüş verilerine göre elektrik üretmekte olduğu senaryolarda kullanılmıştır. Senaryo çalışmalarında uygulanan Marmara iç denizinde seyir senaryoları, en az enerji üretim canlandırıldığı düşünülerek seçilmiştir. Zira, istatistiklere göre, Türkiye'nin Karadeniz sahilleri Marmara iç denizine göre daha fazla rüzgâr alan, güneybatı sahilleri ise daha fazla rüzgâr ve güneş enerjisi alan kıyı bölgeleridir. Bu bakımdan seçilen bölge, istatistiklere göre, teknenin yenilenebilir enerji kaynakları ile en az elektrik üretim sağlayacağı bölgedir. Bu sebeple, yapılan senaryo sümülasyonları ile tasarımı yapılan sistemin en verimsiz olan bir bölgedeki meteorolojik verilere göre doğrulanmasını içermiştir.

6. Sonuçlar

Senaryo çalışmaları, özet olarak aşağıdaki sonuçları ortaya koymuştur:

- Çalışmanın ana amacı ile ifade edilen sıfır emisyonlu tekne hedefi, iki ayrı tipik yelkenli tekne seyir senaryoları ile gösterilmiştir.
- İstatistiksel olarak Türkiye'nin güney sahillerine göre daha az güneş ve rüzgâr enerji potansiyeli olan Marmara iç denizinde yelkenli tekne seyri esnasında önerilen tasarım ile

yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılarak enerji gereksinimlerinin karşılandığı gösterilmiştir.

- Bu senaryoların ilkinde %50 şarj durumu ile başlayan batarya grupları, 24 saatlik seyir senaryosu sonucunda %28,01 toplam şarj seviyesi ile senaryo tamamlanmıştır.
- %60 batarya şarj seviyesi ile başlayan 24 saatlik ikinci seyir senaryosunda ise senaryo, %46,48 batarya şarj seviyesi ile tamamlanmıştır.
- Tamamen dolu batarya grupları ile 4,5 saat süreli yelkensisiz sıfır emisyonlu seyir yapılabileceği gösterilmiştir.

Yapılan tasarım çalışmasında, sistem mühendisliği uygulamalarından dolayı edinilen tecrübeler, özet sonuç olarak şudur: Çalışmanın bu kısmı sistem kırılım diyagramları ile gerçekleştirilmesinin, sistemi modüler haline getirdiği ve bu modüllerin sistem isterlerini sağlaması için ürün tedariki, başka çalışmalarda akademik sonuçlar kullanılması veya mevcut çalışmada yapılan tasarım ve analizlerin kullanılması yöntemlerinden mevcut olanlarının kolaylıkla kullanılabilmesini sağlamıştır. Ayrıca, sistem yerleşim çalışmasında hangi birimlerin ne tür arayüz tasarımı yapılacağı kolaylıkla belirlenebilmiştir. Bu sebeple, benzer farklı bileşenler içeren kompleks denilebilecek çalışmalarda sistem mühendisliği yöntemi uygulanması bu çalışma ile edinilen uygulama tecrübesi ile tavsiye edilmiştir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde aşağıdaki tavsiyeler verilmiştir:

- Çalışmada, tasarım doğrulaması simülasyon analizleri ile gösterilmiştir. Yaklaşım ve tasarımlar, proje çalışmasına dönüştürülerek deneysel çalışma ile bir uygulama yapılabilir. Son yıllarda konunun artan önemi değerlendirildiğinde bir uygulama çalışmasının önemli olacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilecek bir çalışmada maliyet analizi de derinlemesine irdelenebilir.
- Yapılan araştırma çalışmalarında konu hakkında en önemli ilerleme sağlanacak kısımlardan birisi çoklu enerji üretim ve tüketimleri destekleyebilen batarya sistemidir. Elektronik ve yazılım ile bu alanda önümüzdeki yıllarda ticari gelişmelerin daha fazla görülmesi muhtemeldir.

7. Teşekkür ve Bilgi

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun ve yazarlardan Sena Nomak'ın doktora tez çalışmasının bir bölümünden türetilerek hazırlanmıştır.

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8. Kaynaklar

- Alfonsin, V., Suarez, A., Cancela, A., Sanchez, A. & Maceiras, R. (2014). Modelization of hybrid systems with hydrogen and renewable energy oriented to electric propulsion in sailboats, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 11763-11773.
- Alfonsin, V., Suar, A., Urrejola, S., Miguez, J. & Sanchez, A. (2015). Integration of several renewable energies for internal combustion engine substitution in a commercial sailboat, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 6689-6701.
- Alvar, M. (2016) Rüzgâr-elektrik hibrit konseptinde geliştirilen bir tekne için yatay eksenli su türbini tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bal, Ş., & Güner, M. (2009). Performance analysis of podded propulsors. *Ocean Engineering*, 36(8), 556-563.

- Balestra, L. & Schjøberg, I. (2021). Modelling and simulation of a zero-emission hybrid power plant for a domestic ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (18), 10924-10938.
- Bredariol, G., Garnier, A., Stevens, K. & Foley, A. (2010). SIHG Testing and Analysis. *Energy Sustainability*, 43949, 547-557.
- Bucci, V., Mauro, F., Vicenzutti, A., Bosich, D. & Sulligoi, G. (2020). Hybrid-electric solutions for the propulsion of a luxury sailing yacht. 2nd IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES), 280-286
- Can, U., Delen, C., & Bal, S. (2020). Effective wake estimation of KCS hull at full-scale by GEOSIM method based on CFD. *Ocean Engineering*, 218, 108052.
- Carlton, J. (1994). *Marine Propellers and Propulsion*. Butterworth-Heinemann.
- Eastlack, E., Klingenberg, S., Lidqvist, A., Faiss, E., Witt, M., Olsson, P., Sauter, R. & Szymanski, S. (2019). Zero Emission Super-Yacht. Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER).
- Ekinci, S. (2011). A practical approach for design of marine propellers with systematic propeller series. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 62(2), 123-129.
- Ekinci, S. & Alvar, M. (2016). Sıfır emisyonlu yenilenebilir enerji üreten yelkenli bir tekne için sualtı türbin tasarımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 537-550.
- Ekinci, S., & Alvar, M. (2017). Horizontal axis marine current turbine design for wind-electric hybrid sailing boat. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 68(2), 127-151
- Electric Energy Ltd. (2021). About D400. 21 Aralık 2021 tarihinde <https://eclitic-energy.co.uk/products/d400-wind-generator/> adresinden elde edilmiştir.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 748-764.
- ePropulsion. (2021). 26 Aralık 2021 tarihinde <https://www.epropulsion.com/pod-drive/> adresinden elde edilmiştir.
- IMO ANNEX 6 Resolution MEPC.280(70). (Adopted on 28 October 2016) Effective Date of Implementation of the Fuel Oil Standard in Regulation 14.1.3 OF MARPOL ANNEX VI.
- INCOSE. (2015) *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*. Wiley; 4. Edition. 7 Temmuz 2015.
- Kobougias, I., Tatakis, E. & Prousalidis, J. (2013). PV systems installed in marine vessels: technologies and specifications. *Advances in Power Electronics*.
- Lansing, RP. (1933). "Generator Equipment" 1898973.

- Malla, U. (2020). Design and sizing of battery system for electric yacht and ferry. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(1), 137-142.
- Marlec Engineering. (2021). About The Rutland 1200 Marine Windcharger. 26 Aralık 2021 tarihinde <https://www.marlec.co.uk/product/rutland-1200-windcharger/> adresinden elde edilmiştir.
- Mauro, F., Sorrenti, G., Bonfiglio, L., & Bucci, V. (2018). Integrated design of an eco-friendly luxury sailing super-yacht. In 2018 SNAME Maritime Convention, SMC 2018. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2007). NASA systems engineering handbook. NASA/SP-2007-6105. Rev. 1. December 2007.
- Özbay, K., & Sarıışık, M. (2020). Yatlarda kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi üzerine bir değerlendirme. *Journal of Gastronomy Hospitality and Travel*, 3(2), 234-243.
- Reddy, JB. & Reddy, DN. (2004). Probabilistic Performance Assessment of a Roof Top Wind, Solar Photo Voltaic Hybrid Energy System. *Annual Symposium Reliability and Maintainability*, 654-658.
- Sebald, R. (1978). Electrical Generator for a Sailboat. 4102291
- Steward, D.W. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1981: EM-28(3).
- Sukas, O. F., Kinaci, O. K., & Bal, S. (2019). System-based prediction of maneuvering performance of twin-propeller and twin-rudder ship using a modular mathematical model. *Applied Ocean Research*, 84, 145-162.
- Soydan, A., & Bal, S. (2021). An investigation of scale effects on marine propeller under cavitating and non-cavitating conditions. *Ship Technology Research*, 1-13.
- Tercan, Ş. (2021) Sürdürülebilir Ulaşım İçin Güneş Enerjili Teknelerin Kullanılması ve Çevresel Etkileri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 223-232.
- Şenol, S. (2020). Gemi kökenli emisyonlara dayalı alternatif sevk sistemleri. *GİDB Dergi*, (18), 31-56.
- Yang, H. N., Lee, G. U., & Shin, C. H. (2019). A Study on the Priority Analysis of Government Support Policies for SOx Emission of Ships. *Journal of Navigation and Port Research*, 43(2), 86-92.
- Yılmaz, N. & Cicek, I. (2018) Standart Test Pervanesi Analizleri ile Hesaplı Akışkanlar Dinamiği Analiz Altyapısının Doğrulanması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*,6(4), 681-690.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

İstanbul'da Şehir Isı Adası ve Kentsel Gelişim Senaryolarına Bağlı Değişimi

Deniz DİREN ÜSTÜN¹, Ebru KAPLAN², Yurdanur ÜNAL³

Yazışma yazarı:

Deniz DİREN ÜSTÜN,
dirend@itu.edu.tr

Referans:

Diren Üstün, D., Kaplan, E. ve Ünal, Y. (2022), İstanbul Şehir Isı Adası ve Kentsel Gelişim Senaryolarına Bağlı Değişimi, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23(1) 55-68.

Makale Gönderimi : 7 MART 2022
Online Kabul : 8 NİSAN 2022
Online Basım : 30 MAYIS 2022¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0000-0003-2261-2772²İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0000-0003-4320-5826³İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0000-0003-2006-1372

Özet Kentleşme ve küresel iklim değişimi çevre, toplum ve ekonomi üzerindeki en önemli insan etkilerindedir. Şehir ısı adasının (ŞIA) şiddeti, sıcak hava dalgalarının ve yağışların şiddetinin ve sıklığının artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada İstanbul'un şehir ısı adası dağılımı şehir iklim modeli MUKLIMO_3 ile analiz edilmiştir. İlk olarak, şehirleşme sonucunda arazi kullanımındaki değişimlerin ve buna bağlı olarak kırsal ve şehir arasındaki atmosfer dolaşımındaki değişimin ŞIA şiddetine etkisi incelenmiştir. İstanbul'da ŞIA etkisinin en şiddetli olduğu mevsim yaz mevsimidir. Bu nedenle ŞIA dağılımının analizleri için şehir iklim modeli yaz mevsimi ortalama meteorolojik değişkenleri ile çalıştırılmıştır. İstanbul'da şehirleşmenin hiç olmadığı ve şehir alanlarının ormanlık alanlar ile kaplı olduğu varsayımsal durumdaki sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Her ne kadar günümüz koşullarındaki gözlemsel ve modelleme çalışmaları İstanbul'daki ŞIA şiddetinin 3 °C civarında olduğunu gösterse de model simülasyonları şehirleşme ile değiştirilen kırsal ve şehir arasındaki atmosfer dolaşımının da etkisiyle 6 °C ye kadar sıcaklık farkı olabileceğini göstermiştir. Ayrıca, İstanbul için yatay ve düşey iki farklı gelişim senaryosuna göre ŞIA şiddetindeki değişimler incelenmiştir. Yatay gelişim senaryosu boş arazilerin yapılaşmasını baz almaktadır ve sıcaklık artışlarının yalnızca yapılaşmanın olduğu alanlar ile sınırlı kalmayıp civarında da artacağını ve bu artışların 3 °C'ye ulaşabileceğini göstermektedir. Buna karşın alçak ve orta yüksekliğe sahip binaların 2 kat artması ile tasarlanan düşey gelişme senaryosu sıcaklıklardaki artışları 1 °C civarında tahmin etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Şehir ısı adası, İstanbul, şehir iklim modeli, şehir gelişim senaryoları

Urban Heat Island in Istanbul and Its Variations for Urban Development Scenarios

Abstract Urbanization and global climate change are two of the most important human impacts on environment, society, and economy. The intensity of the urban heat island (UHI) causes an increase in the intensity and frequency of heat waves and precipitation. In this study, the urban heat island distribution of Istanbul was analyzed by using the urban climate model MUKLIMO_3. First of all, UHI intensity variations due to the land use and the local atmospheric circulation between the urban and rural areas are examined. In Istanbul, the UHI intensity is at the largest in summer season. For this reason, the urban climate model is driven by the summer mean meteorological observations for the analysis of the UHI distribution over Istanbul. Temperature changes in Istanbul for the hypothetical situation in which there is no urbanization and the urban areas are covered with forest areas, are simulated. Although observational and modeling studies in today's land-use conditions show that the intensity of UHI in Istanbul is around 3 °C, our results indicate that temperature differences can be 6 °C due to the effect of the atmospheric circulation changes induced by urbanization between the urban and rural areas. In addition, the changes in the UHI intensity are investigated for two different horizontal and vertical development scenarios. The horizontal development scenario is based on the urbanization over open land use areas and shows that the temperature increases will not only be limited to the areas where there is new urbanization, but will also increase around it, and these increases can reach 3 °C. On the other hand, the model simulations based on the vertical development scenario designed with a 2-floor increase in low and medium height buildings estimates the increase in temperatures around 1 °C.

Keywords: Urban heat island, Istanbul, urban climate model, urban development scenarios

1. Giriş

Şehirleşme ve iklim değişimi arasındaki etkileşim çift yönlüdür. Büyüyen, gelişen ve hızlı değişen şehirlerde iklim değişimi etkilerine yönelik sürdürülebilir stratejiler üretilmesi, planlama ve gelişim açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda şehirleşmenin iklim değişimi etkilerine yönelik hazırlanan bilimsel çalışmalar karar vericilerin ve uygulayıcıların nezdinde değer taşımaktadır. Günümüzde dünya nüfusunun %50'den fazlası şehirlerde yaşamaktadır ve bu oranın gelecekte artması beklenmektedir (UNWUP, 2018). Dolayısıyla şehirleşmenin iklim değişimi üzerindeki etkilerinin de artacağı öngörülebilir. Modern yaşam koşulları insan hayatını kolaylaştırıyor olsa da plansız ve yoğun şehirleşme beraberinde pek çok sorun getirmektedir.

İnsan faaliyetinin büyük bölümünün gerçekleştiği şehirlerde; şehirlerin küresel ısınmada oynadığı rolün anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Birleşmiş Milletler Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin Altıncı Değerlendirme Raporu sera gazları ve aerosol emisyonlarından kaynaklanan antropojenik etkilerin mevcut küresel ısınmanın en önemli nedeni olduğunu belirtmektedir. İklim değişiminin en ciddi etkilerinden biri aşırı (ekstrem) hava olaylarının sıklık ve şiddetinde gözlenen artıştır. Şehir ısı adasının etkileri; genellikle kasırgalar, hortumlar veya ani şiddetli yağışlar gibi felaket niteliğinde olmasa da yüzey yakınında sıcaklığı artırması nedeniyle özellikle sıcak hava dalgaları sırasında halk sağlığı için trajik sonuçlar yaratabilir. Örneğin, 2003 ve 2010 yıllarında Avrupa'da yaşanan sıcak hava dalgaları, on binlerce kişinin yaşamını yitirmesine yol açmıştır. Sıcak hava dalgaları gibi aşırı hava olaylarının şehirler üzerinde çok daha şiddetli hissedildiği ortaya konmuştur (Schär ve diğ., 2004; Robine ve diğ., 2008; Barriopedro ve diğ., 2011; Fischer ve diğ., 2012). Şehirleşen bölgelerde doğal arazi örtüsünün yerini alan beton, asfalt gibi geçirimsiz yüzeyler şiddetli yağışlarda emilimi azaltacağından sellere sebep olabilirken; trafik, evsel ısıtma gibi emisyon kaynakları da hava kirliliğini arttıran etkenlerin başında gelir. Yeşil alanların azalması, havanın ve su kaynaklarının kirlenmesi, hâkim rüzgâra dik konumlandırılan yüksek yapılarla şehrin havalanmasının engellenmesi hem iklim değişimine hem de şehirleşmeye bağlı olarak yağış paternindeki değişimler ve daha sık deneyimlenen ekstrem sıcaklık değerleri pek çok şehrin karşı karşıya olduğu başlıca problemlerdir. Böylece şehirleşme, pek çok açıdan lokal iklimi etkileyen bir faktör olarak ortaya çıkar. Şehir yüzeyleri, farklı ısı kapasitelerinin de etkisiyle bölgede yer alan doğal hava sirkülasyonunu bozulmasında etkili olur. Şehirleşmenin yerel iklim ve sirkülasyon üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için yer-atmosfer etkileşiminin ve atmosferik sınır tabaka içerisindeki fiziksel ve dinamik süreçlerin araştırılması gerekmektedir. Dickinson tarafından 1995 yılında yayımlanan araştırma makalesinde belirtildiği gibi yer-atmosfer etkileşiminin temel unsurları, bu iki sistem arasındaki nem, momentum ve enerji alışverişidir. Başlarda bu etkileşimin mikro-meteoroloji, tarım ve orman meteorolojisi, atmosferik sınır tabaka ve hidroloji ile ilgili alanlarda önemi ele alınsa da 1990'lı yıllarda biyojeokimyasal döngü, iklim, mezo-ölçek meteoroloji ve sayısal hava tahmini çalışmaları için de önemli olduğu ortaya konmuştur (Dickenson, 1995).

Şehirleşme pek çok meteorolojik parametreyi etkilemektedir. Örneğin yağışın şehirleşme ile değişimi araştırılırken, literatürdeki örnekler şehirleşmenin, yaz sezonunda yağış miktarını ve sıklığını özellikle şehrin rüzgâr altı kesiminde artırdığı sonucu ile karşımıza çıkmaktadır. Şehirleşme sebebiyle oluşan ısınma konvektif yağış sıklığını ve şiddetini artırabilmektedir. (Wang ve diğ., 2009). Ayrıca şehirleşmenin bulut mikrofiziğine etkileri araştırıldığında antropojenik faaliyetler sonucu açığa çıkan aerosollerin bulut çekirdeği işlevi görererek yağışı artırdığı belirtilen

çalışmalar bulunmaktadır (Han ve Baik, 2008). Şehirleşmenin, dolayısıyla geçirimsiz yüzeylerin yoğun olduğu bölgelerde yağış sonucu taşkınların ve sel riskinin daha yüksek olduğu da bilinmektedir.

Şehirleşme, yüzeyin aerodinamik karakterini değiştirmesinden ötürü özellikle yer seviyesi yakınlarında rüzgârı etkilemektedir. Şehirleşmenin yarattığı sürtünme etkisi sebebiyle azalan rüzgâr şiddeti, kirleticilerin birikmesine neden olabildiği gibi bazı durumlarda şehir ısı adası etkisini de güçlendirebilmektedir (Lee ve diğ., 2014; Ünal ve diğ., 2020). Zhou ve diğ. (2014), şehirleşmenin yatay ve düşeyde rüzgârı engelleyerek şehir ısı adası etkisini güçlendirdiğini belirtmiştir. Ünal ve diğ. (2019) rüzgârın artışı ile şehir ısı adası şiddetindeki değişimleri inceledikleri çalışmada, rüzgârın sakin koşullardan 4-5 m/s şiddetine artmasının gündüz şehir ısı adası yoğunluğunu az da olsa artırdığı ancak rüzgâr şiddeti daha da yükseldiğinde şehir ısı adasında azalma olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan, şehir ısı adası gece yoğunluğunun, rüzgâr hızı 5-6 m/s'ye ulaşana kadar sürekli aynı oranda azaldığı vurgulanmıştır. Foley ve diğ. (2005) şehirlerdeki arazi kullanım değişiminin canlı yaşamına etkisi üzerine hazırladıkları çalışmada, şehirleşmenin su ve radyasyon dengelerini değiştirdiğini ayrıca değişen rüzgârın hava kalitesini etkilediğini ve kirletici yoğunluğunu artırdığını belirtmişlerdir.

İklim değişiminin ve şehirleşmenin etkilerinden bir diğeri de yüzey yakınındaki hava sıcaklığının artışıdır. Şehirlerde sıcaklıkların artışı yalnızca küresel iklim değişimi ile değil, şehir ısı adasının da etkisiyle meydana gelir (Oke, 1995). Şehir ısı adası şehrin üzerinde sınır tabakayı etkiler ve atmosferin sirkülasyonunu değiştirir. Bu sebeple hava kalitesi ve ekolojik koşullar etkilenir (Tayanç ve Toros, 1997; Kleerekoper ve diğ., 2012). Aynı zamanda şehir ısı adası canlılar üzerinde ısı stresini artırır ve şehir ortamındaki su döngüsünü etkiler (Robaa, 2003). Büyüyen şehirler ve bunun bir sonucu olarak artan şehir ısı adası etkisi, iklim değişiminin olumsuz etkilerini şiddetlendirir. Şehir alanlarında civarda yer alan kırsal bölgelere göre yüzey ve atmosfer sıcaklıklarının daha yüksek olduğu gerçeği ilk defa Luke Howard tarafından 1800'lü yıllarda ortaya konmuştur (Stewart, 2011). Bu olaya şehir ısı adası etkisi denir. Şehirleşmenin artışıyla şehir ısı adasının etkisi de gün geçtikçe önem kazanmıştır. Şehir ısı adası etkisi, sıcak hava dalgalarının etkisini de arttırmaktadır, böylece iklim değişimiyle doğrudan alakalıdır.

Şehir ısı adaları, pek çok meteorolojik değişkeni, atmosferin lokal sirkülasyonunu ve yerel iklimi etkileyen önemli bir olaydır. İnsan kaynaklı faaliyetlerden oldukça etkilenen şehirlerde doğru stratejilerin ve planlamaların yapılabilmesi ve iklim değişimi etkilerinin anlaşılabilmesi için şehir ısı adası etkisinin araştırılması büyük önem taşır. Özellikle iklim değişimi ile birlikte şehirleşmenin yarattığı atmosferik değişimlerin aşırı hava olaylarının sıklığını ve şiddetini artırarak daha büyük ekonomik zararlara sebep olduğu bilindiğinden, şehirleşme sonucu yaşanan bu değişimlerin iyi anlaşılması, alınacak önlemler ve şehir planlamaları açısından oldukça gereklidir. Zira bu değişimler şehrin yapısı, büyüklüğü ve yerleşim alanının konumuna göre farklılaşmaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul'un Boğaz bölgesine odaklanılarak şehirleşmenin sıcaklıklar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mikro ölçek iklim modeli yardımıyla şehir ısı adası analizi yapılmış ve çeşitli senaryolar ile şehir ısı adası şiddetindeki değişimler ortaya konmuştur.

2. Şehir Isı Adası

Şehir ısı adaları, genellikle şehir merkezi ile kırsal alanlar arasındaki aşağı atmosfer katmanındaki sıcaklık farkının doğrusal bir şekilde azalmasıyla karakterize edilir. Yüksek binalar ve dar sokakların varlığı, yeşil alanların azlığı nedeniyle yoğun kentleşme alanları kırsala göre daha yüksek sıcaklıklara maruz

kalır. Örneğin, kentsel yoğunluklu farklı yerleşim alanlarına sahip olan şehirde, şehir ısı adasının dağılımının çok merkezli olduğu görülebilir.

Şehir ısı adası, tropikal ve ekvatorial alanların yanı sıra orta enlemde yüksek enlemlere kadar çeşitli coğrafi konumlardaki şehirlerde gözlemlenmektedir. Şiddeti mevsime ve günün zamanına göre değişir. Genellikle öğleden sonra veya akşamın erken saatlerinde artan ve geceleri maksimuma ulaşan günlük bir döngüyü takip eder. Yoğunluğu şafaktan sonra azalmaya başlar ve genellikle sabah saatlerinde minimuma ulaşır. Yağmurlu, bulutlu veya rüzgârlı mevsimlerde, ŞİA daha zayıf olabılırken, antisiklonik koşullar için bunun tersi geçerlidir. Genel olarak şiddeti yaz aylarında kış aylarına göre daha fazladır. ŞİA her şehrin coğrafi konumu, topoğrafyası, yapısı ve bölgesel akış özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle ŞİA analizleri şehirlere özgü olarak yapılmalıdır.

Şehir ısı adası etkisi yüzeysel ve atmosferik olarak iki farklı olguyu tanımlamaktadır. Yüzey sıcaklıkları ile ilişkili olan yüzey ısı adasını gözlemlenmek için yoğunlukla uydu verilerinden ve kızılötesi sensörlerden yardım alınmaktadır. Yüzey ısı adası azami şiddetini yaz günleri öğlen ve öğleden hemen sonra günün en sıcak saatlerinde gösterir. Toprak bir yüzey ile asfalt bir yüzeyin sıcaklık farkları 10 °C mertebesinde farklılık gösterebilir. Öte yandan atmosferik ısı adaları 2 m'de ölçülen sıcaklıklar ile ilişkilidir. Atmosferik ısı adaları her mevsim gözlenirken maksimum şiddetini bulutsuz ve sakin rüzgâr koşullarının hâkim olduğu bir günde, güneş battıktan yaklaşık 2 saat sonra gösterir. Bu durum, şehir yüzey materyallerinin ısı tutma kapasitelerinin doğal yüzeylerden farklı olmasından kaynaklanır. Gün boyu güneş radyasyonunu emen şehir yüzeyleri, gün batımından sonra bu enerjiyi uzun dalga boylu radyasyon olarak yayıp sınır tabaka içindeki atmosfer sıcaklığını etkiler. Atmosferik şehir ısı adası etkisini zamansal açıdan inceleyerek değişimi hakkında bilgi sahibi olunabilir. Şehir ısı adaları mevsimler, aylar, yıllar veya sıcak hava dalgalarının hâkim olduğu bazı günler bazında araştırılabilir (Velazquez-Lozada ve diğ., 2006). Atmosferik ısı adalarını incelemek için seçilen zaman diliminde genellikle geceler tercih edilir ve açık gökyüzü koşullarının varlığı aranır. Bu şekilde geçici etki oluşturan değişkenler göz ardı edilebilir (Kim ve Baik, 2005).

Şehir ısı adaları pek çok faktörün ortak sonucu olarak meydana gelirler. Yeşil alanlar, bina materyalleri, antropojenik ısı kaynakları insanlar tarafından kontrol edilebilir faktörlerken, rüzgâr hızı, bulut kapallılığı gibi faktörler kontrol edilemezler ve her iki grup da şehir ısı adası oluşumunu etkiler. Şehirlerde ısınmanın ana kaynakları, trafikten, elektrik santrallerinden, evsel ısıtmadan, iklimlendirme elemanlarından ve diğer pek çok kaynaktan yayılabilecek antropojenik ısıdır. Buna ek olarak karmaşık kentsel yapının ısıyı emmesi ve yeniden yayması da şehirlerde ısınmayı beraberinde getirir (Memon ve diğ., 2007). Şehirleşmiş bölgelerde doğal bitki örtüsü azdır, bundan dolayı buharlaşma/terleme gerçekleşmez ve yüzey yeterince soğuyamaz. Tüm bu etkiler birleşerek şehirlerin, etrafındaki kırsal alanlara göre daha sıcak olmasına sebep olurlar. Şehir alanlarında, gelen kısa dalga boylu radyasyonun emilmesi için etrafındaki kırsal alanlara göre daha fazla yüzey bulunur, aynı zamanda yayılan uzun dalga boylu radyasyon da bu yüzeylere çarparak geri yansır veya yüzeyler tarafından tekrar soğutulur ve yeniden yayılır. Böylece radyasyonun yer seviyesinde geçirdiği süre artar. Bu durum da kentsel alanlardaki yere yakın seviye sıcaklıkların kırsal alandakilere göre daha fazla olmasına katkı sağlar.

Çok çeşitli yüzey materyalleri barındıran şehirlerde, depolanan ısı akısının ölçümü büyük oranda imkânsızdır (Christen ve Vogt, 2004). Güneş/yer radyasyonu ile yüzey materyallerinin etkileşimi (ısı kapasiteleri, albedoları vs.) ve insan faaliyetleri sonucu ısı

yayımları yüzey enerji dengesi bileşenlerinin gündüz ve gece değişmesine neden olur. Sonuçta şehir ortamında yüzey ve atmosfer arasındaki mikro meteorolojik süreçler kırsal alanlara kıyasla farklılık gösterir. Bir alanın içerdiği ısı enerjisi hakkında bilgi veren yüzey enerji dengesinin matematiksel ifadesi Denklem 1'de görüldüğü gibidir (Oke, 1987).

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA \quad (1)$$

Bu eşitlikte Q^* net radyasyonu, QF antropojenik kaynaklardan yayılan ısıyı, QE gizli ısı akısını, QH türbülanslı hissedilir ısı akısını, ΔQS kontrol hacmi içindeki net ısı depolamasını, ΔQA kontrol hacminden ısı ve nem adveksiyonunu ifade eder. Eşitlikte yer alan antropojenik ısı, bölgedeki durgun veya hareketli sistemlerden üretilen ısıdır. Antropojenik ısı; araçlar, binalar veya insanlar tarafından üretilen ısının toplamından meydana gelir (Sailor ve Lu, 2004; Grimmond, 1992). Radyasyona, gizli ısı akısına ya da hissedilir ısı akısına dönüştürülebilir, depolanabilir (Christen ve Vogt, 2004). Oke (1988) antropojenik ısı salınımının nüfusa ve kişi başına kullanılan enerji miktarına bağlı olabileceğini belirtmiştir. Dolayısıyla şehirleşme ve insan faktörü enerji dengesinde önemli bir bileşendir.

Şehir ısı adası, günümüzde pek çok araştırmanın konusudur. Orta enlemlerde bulunan şehirlerin, şehir ısı adasının 1-3 °C arasında gözlemlendiği ve bu hadisenin yoğunlukla yaz dönemlerinde maksimum olduğu belirtilmiştir (Oke, 1987; Arnfield, 2003). Ayrıca, Akdeniz şehirlerinde şehir ısı adası şiddetinin 6 °C'ye kadar çıkabildiğini ve şehir geometrisinin ŞİA şiddetini azaltmadaki önemi literatürde yer almaktadır (Vardoulakis ve diğ., 2013). İstanbul için ŞİA etkisi de çok kez araştırılmış bir konudur (Eljadid, 1994; Karaca ve diğ., 1995; Karaca ve diğ., 2003; Ezber ve diğ., 2017; Özdemir ve diğ., 2012 ve Kaya ve diğ., 2012, Ünal ve diğ., 2018). Örneğin Eljadid (1994) İstanbul'da ısı adasının oluşumu üzerine şehir ve kırsal alanların sıcaklık, rüzgâr hızı ve bağıl nem parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Karaca ve diğ. (1995) İstanbul iklimi üzerindeki şehirleşme etkilerini araştırmışlar ve şehrin güney kesiminde sıcaklık artışlarının daha ciddi bir trende sahip olduğunu vurgulamışlardır. İstanbul'daki şehirleşmenin etkileri, Ezber ve diğ. (2007) tarafından da istatistiksel ve sayısal modellerle incelenmiş ve İstanbul'un yoğun şehir alanlarında istatistiksel olarak pozitif eğilimlerin varlığı ortaya konmuştur. Ünal ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, İstanbul için minimum sıcaklık değerleriyle hesaplanan şehir ısı adası şiddetinin, Kartal istasyonunda tüm günler için yıllık ortalama 1,38 °C iken sakin, yağışsız ve bulutsuz atmosfer koşullarının hâkim olduğu günlerde 2,70 °C olduğunu belirtmektedir. İstanbul için gece şehir ısı adası şiddetinin ortalama büyüklüğü bütün mevsimlerde pozitif değerdedir. Ayrıca, yaz gecelerinde şehir ısı adasının daha şiddetli olduğu ve şehir istasyonları Göztepe ve Florya'da 2°C, Kartal'da ise 3°C'den yüksek gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu çalışma da Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından 1960-2012 yılları arasında 6 meteoroloji istasyonunda gözlenen maksimum ve minimum sıcaklıklar ve 31 adet Afet Koordinasyon Merkezi (AKOM) istasyon verileri kullanılmıştır. Sarıyer, Göztepe, Florya ve Kartal istasyonlarının kaydedilen uzun dönem ortalama sıcaklık değerlerinin kırsal istasyon Şile'de ölçülen sıcaklıklardan farkı Tablo 1'de listelenmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek ŞİA şiddeti değerleri yaz aylarında görülmektedir. Minimum sıcaklıklarda en yüksek ŞİA değerleri Haziran ayında iken maksimum sıcaklıklarda Temmuz ayında görülmektedir. Yarı kırsal olarak adlandırılan Kilyos ile Şile arasındaki farklar 0,5 °C'nin altında kalmaktadır. Kış aylarında ise negatiftir.

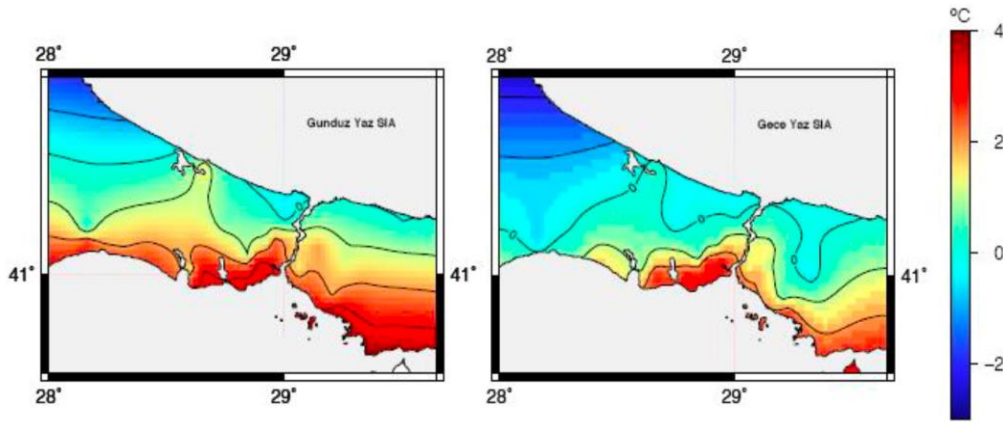
6 MGM istasyonuna ek olarak, 31 AKOM istasyonunun 2007-2012 yıllarındaki saatlik sıcaklık ölçümlerinden Şile istasyon verileri baz alınarak hesaplanan ŞİA indeksinin yaz aylarındaki ortalama değişimi alansal olarak gece ve gündüz şeklinde iki

farklı zaman aralığı için Şekil 1’de gösterilmektedir. Gündüz sıcaklıkları yerel saat ile 12:00-16:00 arasındaki ortalamalara, gece sıcaklıkları ise 20:00-24:00 saatleri arasındaki ortalamalara karşı gelmektedir. Şehir ısı adası, genellikle öğle saatlerine doğru ve gün içinde zayıflarken, güneşin batışından sonra şehir alt yapısından yayınlanan ısı nedeniyle yükselmektedir. Oke, (1987) genellikle bir milyon ve daha fazla insanın yaşadığı bir şehirde yıllık ortalama hava sıcaklığı çevresinden 1-3 °C daha sıcak olduğunu, açık ve sakin bir gecede sıcaklık farkının daha da yükselebileceğini göstermiştir. İstanbul coğrafi konumu, kara deniz dağılımı ve İstanbul Boğazi’nin varlığı nedeniyle karasal alanlardaki benzer şehirlere kıyasla daha düşük bir ŞİA şiddeti göstermektedir. Yaz aylarında İstanbul’da hâkim rüzgâr yönü

kuzey doğudur (poyraz). Şehirleşmenin İstanbul Boğazi civarında olması ve Boğazi’nin hâkim rüzgâr yönündeki konumu nedeniyle yarattığı kanal etkisi ventilasyonu destekleyerek İstanbul’da ŞİA şiddetinin düşük kalmasını sağlamaktadır. Ayrıca Karadeniz ve Marmara denizi kıyı şeridinde kara ve deniz meltemleri sıcaklıkları kısmen kontrol etmektedir. Bununla birlikte, İstanbul istasyonlarının sıcaklık dağılımı (Şekil 1) genel durumu destekleyici niteliktedir. Şile’ye göre hesaplanan gece ŞİA şiddeti binaların yoğunlaştığı alanlarda en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Gündüz sıcaklık farklarında da benzer durum gözlenmektedir.

Tablo 1. Meteoroloji istasyonlarının minimum ve maksimum sıcaklıklarının Şile istasyonundan olan farkının mevsimsel ortalama değerleri.

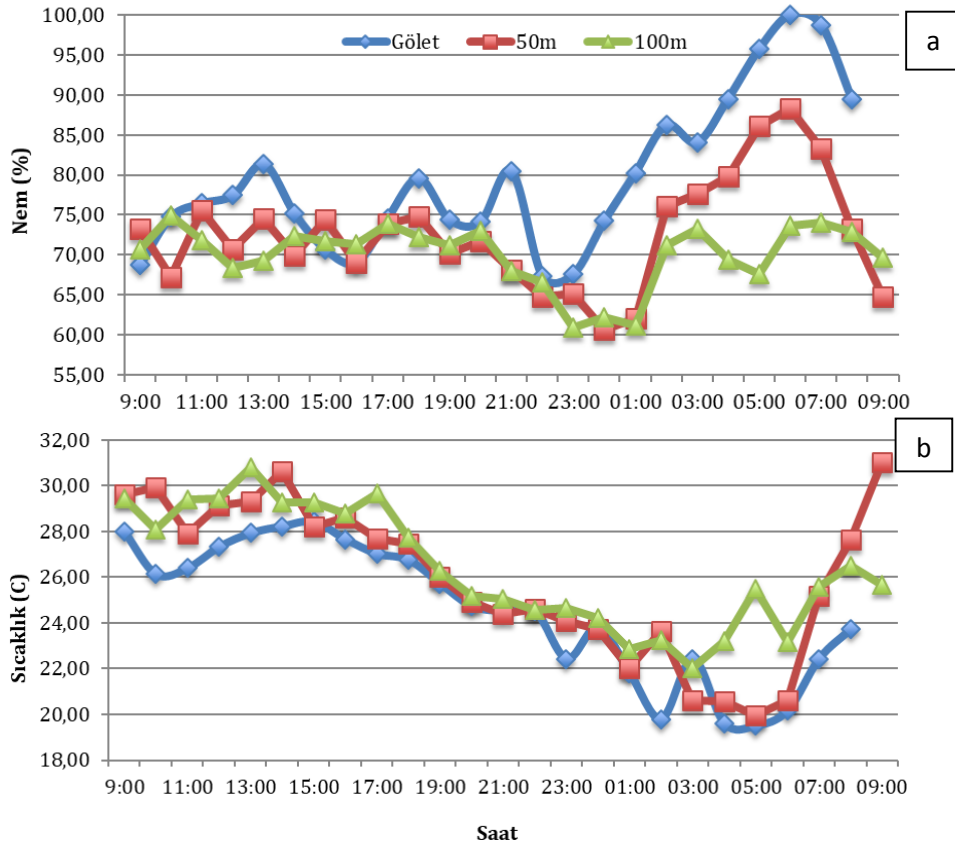
		Ortalama sıcaklık farkı (°C)					
		Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Yıllık	
Maksimum Sıcaklık	Kilyos	-0.13	0.09	0.93	0.42	0.33	
	Sarıyer	-0.46	0.15	0.46	-0.10	0.05	
	Göztepe	0.13	1.48	2.45	1.05	1.34	
	Florya	-0.29	0.90	2.13	0.77	0.93	
	Kartal	0.45	1.84	3.04	1.25	1.68	
Minimum Sıcaklık	Kilyos	0.12	0.00	0.35	0.24	0.18	
	Sarıyer	0.55	0.51	1.22	1.01	0.86	
	Göztepe	0.76	0.95	1.08	0.52	0.87	
	Florya	0.64	0.91	1.12	0.85	0.88	
	Kartal	1.43	1.88	2.17	1.64	1.80	



Şekil 1. 2007-2012 arası gündüz ve gece sıcaklıklarının ŞİA şiddeti dağılımı.

Ünal ve diğ. (2018) tarafından hazırlanan Avrupa Birliği ERAfrica LOCLIM3 / TUBITAK 1001 114Y047 no’lu proje kapsamında, İstanbul üzerinde sıcak hava dalgasının etkili olduğu 24-25 Temmuz 2017 tarihlerinde İTÜ Ayazağa Kampüsü’nde ölçüm kampanyası düzenlenmiş, farklı arazi kullanımları civarında 1,5 m yükseklikte sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr ve radyasyon ölçümleri mobil meteorolojik aletler yardımıyla yapılmıştır. Ayrıca kızılötesi termometre ile farklı yüzeylerin yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Bu ölçümler şehir ısı adası gözlemine dair önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Örneğin gölet yakınında, göletin güney batısında 50 m ve 100 m mesafede mobil ölçüm aletleri ile ölçülen sıcaklıkların 24 saatlik değişimine bakıldığında gün

içerisinde göl çevresindeki sıcaklıkların kampüsün diğer noktalarına göre 1-1,5 °C daha soğuk olduğu gözlenmiştir (Şekil 2). Gündüz gölet kıyısında %82 civarında olan bağıl nem akşam saatlerinden itibaren artmış, sabah saat 7 civarında %100 olarak kaydedilmiştir. Buna karşın 100 m uzaktaki asfalt zemin üzerinde yaklaşık %75 olarak ölçülmüştür. Her iki ölçüm noktasında fark %10 civarında iken, sabah erken saatlerde, bu farkın %25’e ulaştığı görülmüştür. Bunun yanı sıra gölet ve çevresi arasındaki mikro dolaşımın maksimum hava sıcaklığının zamanlamasını geciktirdiği görülmüştür. Su yüzeylerinin şehir ısı adası şiddetini azaltmak için bir strateji olarak kullanılabilmesi ortaya konmuştur.



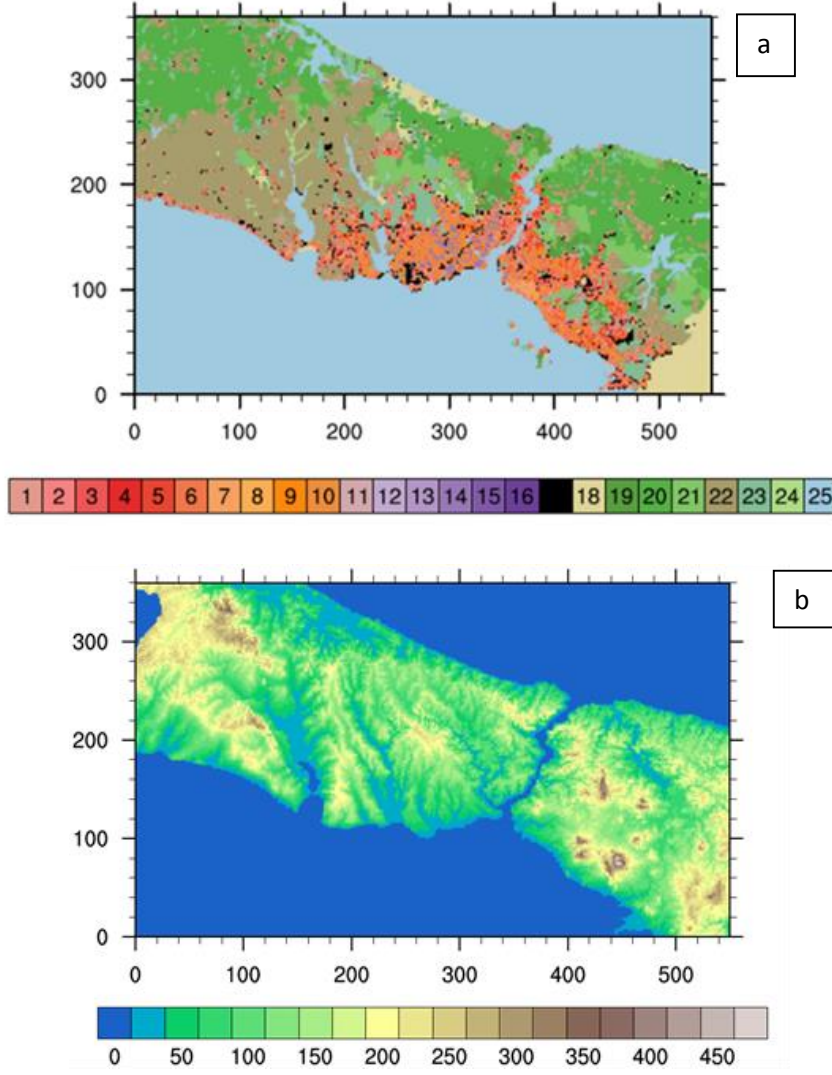
Şekil 2. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde 24-25 Temmuz 2017 tarihinde göletin yanında ve göletten 50 m ve 100 m mesafede ölçülen saatlik a) bağıl nem ve b) sıcaklık değerleri.

Ayrıca farklı yüzey tiplerinin ısınma ve soğuma hızına ve çevresel koşullara bağlı olarak gün boyunca sıcaklıklarındaki değişim de takip edilmiştir. Kızılötesi sensörler yardımıyla yapılan ölçümlerde gölet gözlem noktasındaki toprak yüzeyin güneş ışınlarını daha fazla emmesinden dolayı sıcaklık değerlerinin 14:00'da diğer yüzeylere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Çakıl yüzeyinin gün boyu sıcaklık değişimi toprak yüzeyinden az olmakla beraber, toprak yüzeyine benzerlik gösterir. Toprak yüzey sıcaklığı 47°C'ye, çakıl yüzey üzerinde ise 43°C'ye kadar yükselmektedir. Toprak, çakıl gibi malzemelerdeki ısı taşınımı kondüksiyon ile gerçekleştiğinden, bir günlük zaman ölçeğinde ısı enerjisinin nüfus ettiği derinlik sığ kalmaktadır. Bu da hızlı soğuma ve ısınmayı tetikleyerek, daha büyük günlük sıcaklık aralığının oluşmasını sağlamaktadır. Suyun ısı kapasitesi yüksek olduğundan su yüzeyi üzerindeki sıcaklık ölçümleri gün içerisinde maksimum 7°C değişim göstermektedir.

Asfalt yüzeylerin sıcaklıkları, gün boyunca diğer yüzeylerin sıcaklıklarından daha fazladır. Asfaltın albedosu 0.10-0.12 arasında olduğundan gün boyu gelen güneş ışınımının büyük bir kısmını soğurmaktadır. Ölçüm kampanyası kapsamında iki farklı asfalt yüzeyde ölçümler yapılmıştır. Gün boyu ağaçların gölgesi altında kalan asfalt yüzeyin maksimum sıcaklığı güneşin en yüksek olduğu saat 13:00 civarında 37 °C olarak ölçülürken güneşe maruz kalan asfalt yüzeyin sıcaklığı 13:00-14:00 saatleri arasında 54 °C ölçülmüştür. Direkt güneş radyasyonu alan beton yüzey ise 13:00-14.00 saatlerinde 50°C sıcaklığa ulaşmıştır. Asfalt ile beton arasında maksimum sıcaklıkların gözlemlendiği saatlerde, albedo değerlerindeki farklılıktan kaynaklanan 4 °C sıcaklık farkı gözlemlenmiştir. Açık asfalt alanındaki sıcaklığın maksimum değeri ise gün boyu gölgede kalan asfalt alanının iki katı kadardır. Bu sonuçlar yüzey materyallerinin ve şehir planlamasının şehir ısı adasını ve dolayısıyla şehirlerin yerel iklimini kontrol etmede ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

3. Veri ve Yöntem

Çalışmada İstanbul'un boğaz Boğaz bölgesine odaklanılarak şehir ısı adası etkisi incelenmiştir. Alman Meteoroloji Servisi (DWD) İklim ve Çevre Departmanı tarafından geliştirilen MUKLIMO_3 (Mikroskaliges Urbanes KLima MOdel) modeli kullanılmıştır. MUKLIMO_3 ideal atmosfer koşullarının, sıcaklık, nem ve rüzgâr alanlarının simülasyonunu yapan şehir iklimi analizi için uygun bir modeldir (Siebert ve diğ.,1992; Bokwa ve diğ., 2015; Siebert ve diğ.1992). Aynı zamanda farklı modellerle birlikte kullanılarak termal konfor çalışmalarında da tercih edilmektedir. MUKLIMO_3, yatay çözünürlüğü 20x20 m² ile 100x100 m² arasında değişen düşey çözünürlüğü ise 10-100 m arasında değişen, sınır tabaka içerisindeki lokal ölçekli meteorolojik değişkenlerin simülasyonunda kullanılan bir modeldir. (Bokwa ve diğ., 2015). Atmosferik akışı simüle etmek için Navier-Stokes denklemlerini çözen MUKLIMO modelinin ilk versiyonu, akım fonksiyonu-vortisite metodu yardımıyla üç boyutlu olarak simülasyon yapabilmektedir (Sievers, 1995). Model kodu içinde kullanılan türbülans şemasının formülasyonu Monin-Obukhov benzerlik teorisine (MOST) ve Prandtl karışma uzunluğu yaklaşımına dayanmaktadır (Sievers ve diğ., 1987; Sievers ve Fröh, 2012). Yüzey yakınındaki kısa dalga boyulu ışınım ile ilgili hesaplamalar Sievers ve Fröh (2012) tarafından tanımlanmıştır. Model, bulutların radyasyona etkisini hesaba katmaktadır, ancak yağış, yatay akış ve antropojenik ısı model içerisinde hesaba alınmamaktadır. Bu sebeple MUKLIMO_3, yağışsız atmosfer koşulları için şehir ısı adası modellemesinde kullanılmaktadır.



Şekil 3. a) İstanbul arazi kullanım haritası, b) topografyası.

MUKLIMO_3 modelinin kullanılabilmesi için arazi kullanım verisi ve yüzey karakteristiklerini tanımlayan arazi kullanım tablosunun oluşturulması gerekir. Bina-atmosfer ilişkisini incelemek için kullanılan modelde, bina yoğunluğu, duvar alanı ve ortalama yükselti gibi bilgilere ihtiyaç vardır (Bokwa ve diğ., 2015). Bu bilgiler arazi kullanım tablosu yardımı ile modele dâhil edilir. Modelde bina yüksekliği, geçirimsiz yüzeylerin alanı ve bitki örtüsü alanı gibi parametreler çeşitli sınıflarla ifade edilir. Bu sınıflar arazi kullanım verisi ile modele tanımlanır. İhtiyaç durumunda kullanıcı yeni sınıflar tanımlayabilir veya önceden tanımlanmış sınıfların özelliklerini değiştirebilir. Oluşturulan arazi kullanım dosyaları modele girdi olarak verilir. Arazi kullanım tablosu ve haritası çalışma alanına özgü olacağından her şehir için ayrı ayrı hazırlanmalıdır. Çalışma kapsamında İstanbul için arazi kullanım dosyaları oluşturulmuştur. Şekil 3a'da model alanının arazi kullanım sınıfları görülmektedir. Şekil 3b'de çalışma alanının topografyası verilmektedir. İstanbul arazi kullanım haritasının oluşturulması için üç farklı veri setinden yararlanılmıştır. Yerleşim alanlarının sınıflandırılmasında İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Coğrafi Veri Seti ve Başar Soft Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Veri Seti kullanılmıştır. Bina dışındaki arazi kullanım sınıflarını belirlemek için CORINE (2012) Arazi Örtüsü

Raster Verileri kullanılmıştır. İstanbul için arazi kullanım haritası 25 sınıfa sahiptir. İlk 17 sınıf geçirimsiz yüzeyleri ve binaları temsil ederken, diğer 8 sınıf ağaçlık alanları, açık alanları ve su alanlarını temsil etmektedir (Ünal ve diğ., 2019). Arazi kullanım sınıfları Tablo 2'de görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan ortalama düşey profil verileri, ERAInterim reanaliz verilerinin 2008-2017 yılları arasında 06 UTC saatine karşılık gelen sıcaklık, bağıl nem ve rüzgâr verileri kullanılarak elde edilmiştir. Sakin rüzgâr koşulları, açık gökyüzü ve yüksek miktarda gelen güneş radyasyonu, şehir ısı adası etkisinin yaz aylarında daha sık görülmesine neden olur. Ünal ve diğ. (2019) İstanbul'daki şehir ısı adası yoğunluğunun yaz aylarında diğer mevsimlere göre daha güçlü olduğunu bulmuştur. Bu nedenle hesaplanan yaz aylarına ait düşey profil verileri, şehir ısı adasının yoğunluğunu belirlemek ve orman senaryosu uygulandığında değişimini incelemek üzere MUKLIMO_3 modeli ile kullanılmıştır. Sıcak hava dalgasının olduğu gün için yapılan şehir gelişim senaryoları simülasyonlarında ise o tarihe ait radyozonde verilerinden yararlanılarak düşey profil elde edilmiştir.

Tablo 2. CORINE, IBB ve Başar Soft verilerinden yararlanılarak hazırlanan arazi kullanım sınıfları.

Sınıf	Bina Yüksekliği	Yoğunluk	Sınıf ismi
1	<10m		Bina
2	10m-20m	%5-%15 düşük yoğunluk	Bina
3	20m-30m		Bina
4	>30m		Bina
5	<10m		Bina
6	10m-20m	%15-%30 orta yoğunluk	Bina
7	20m-30m		Bina
8	>30m		Bina
9	<10m		Bina
10	10m-20m	%30-%50 yüksek yoğunluk	Bina
11	20m-30m		Bina
12	>30m		Bina
13	<10m		Bina
14	10m-20m	>%50 çok yüksek yoğunluk	Bina
15	20m-30m		Bina
16	>30m		Bina
17	-	-	Trafik ve otopark
18	-	-	Çıplak toprak
19	-	-	İğne yapraklı orman
20	-	-	Geniş yapraklı orman
21	-	-	Karışık orman
22	-	-	Tarım alanı
23	-	-	Otlak ve çalılık
24	-	-	Çayır
25	-	-	Su

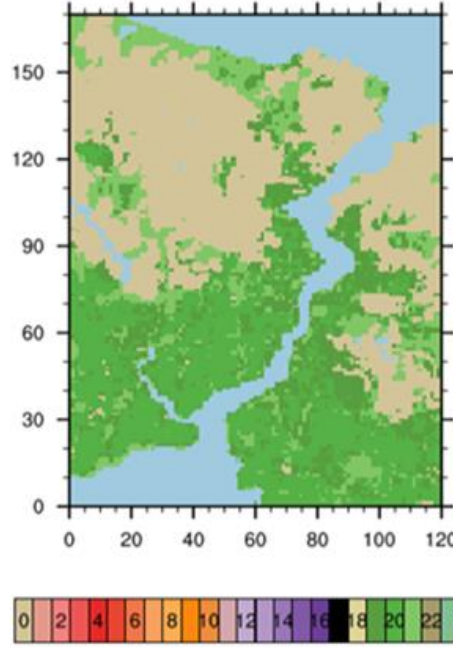
3.1 Şehir gelişim senaryoları

Çalışmada MUKLIMO_3 modeli yardımıyla İstanbul Boğazi bölgesinin şehir ısı adası şiddetinin ortaya konması amaçlanmıştır. Ayrıca model için özel olarak üretilen İstanbul arazi kullanım verisi, test edilen farklı senaryolara bağlı olarak değiştirilmiştir. Bu varsayımsal senaryolar ile şehrin yapısındaki değişimlerin şehir ısı adası şiddetine etkisi incelenmektedir. MUKLIMO_3 modeli öncelikle günümüz arazi kullanım koşulları ve ortalama yaz ayları meteorolojik veriler ile çalıştırılarak kontrol simülasyonları oluşturulmuştur.

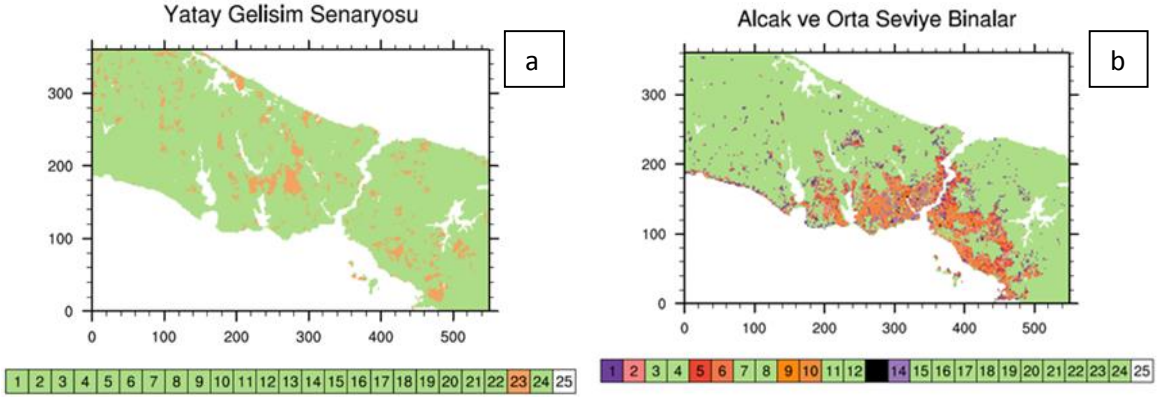
Günümüz koşulları için çalıştırılan modelde 2008-2017 yılları arasındaki 10 yıllık ERA-Interim verilerinin yaz ayları için elde edilen düşey profil verileri kullanılmıştır. Ayrıca, aynı zaman periyodunun yaz ayları için ortalama deniz suyu sıcaklığı 23.39 °C ve toprak sıcaklığı 23.47 °C olarak modele verilmiştir. Rüzgâr yönü ve hızı sırasıyla 45 °C ve 3,8 m/s olarak alınmıştır. Kontrol simülasyonunun ardından eğer model alanının tamamı ormanlık alan olsaydı sıcaklıklar nasıl değişirdi sorusunun cevabı aranmıştır. Bunun için modeldeki şehir alanı orman ile değiştirilmiş (Şekil 4) ve simülasyon tekrarlanmıştır.

Şehir ısı adası iklim değişimi ile sıklığını arttıracak sıcak hava dalgalarının şehir ortamında daha şiddetli hissedilmesini sağlayacaktır. Bu nedenle şehir gelişim senaryoları simülasyonlarında lokal iklim modeli sıcak hava dalgasına karşı

gelen meteorolojik verilerle çalıştırılmış ve tüm İstanbul'u kapsayan bir model alanı kullanılmıştır. Bu senaryolar yatay gelişim ve düşey gelişim senaryolarıdır (Şekil 5a ve Şekil 5b). Yatay gelişimli senaryoda, mevcut açık alanların (arazi kullanım verisindeki 23 numaralı sınıf) tamamı grid kutusunun %15 ile %30'unu kaplayan 20-30 m arasında yüksekliğe sahip binalarla (arazi kullanım verisindeki 7 numaralı sınıf) kaplanmıştır. Şehrin düşeyde gelişeceğini göz önüne alan senaryoda alçak ve orta yüksekliğe sahip binalar (arazi kullanım verisindeki 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14 numaralı sınıflar) 2 kat (yaklaşık 6 m) yükseltirse sıcaklıklar nasıl değişir sorusuna cevap aranmıştır.



Şekil 4. Şehir alanlarının ormanlarla değiştirildiği arazi kullanım haritası.



Şekil 5. a) Yatay gelişim senaryosunda, b) Düşey gelişim senaryosunda değiştirilen arazi kullanım alanları.

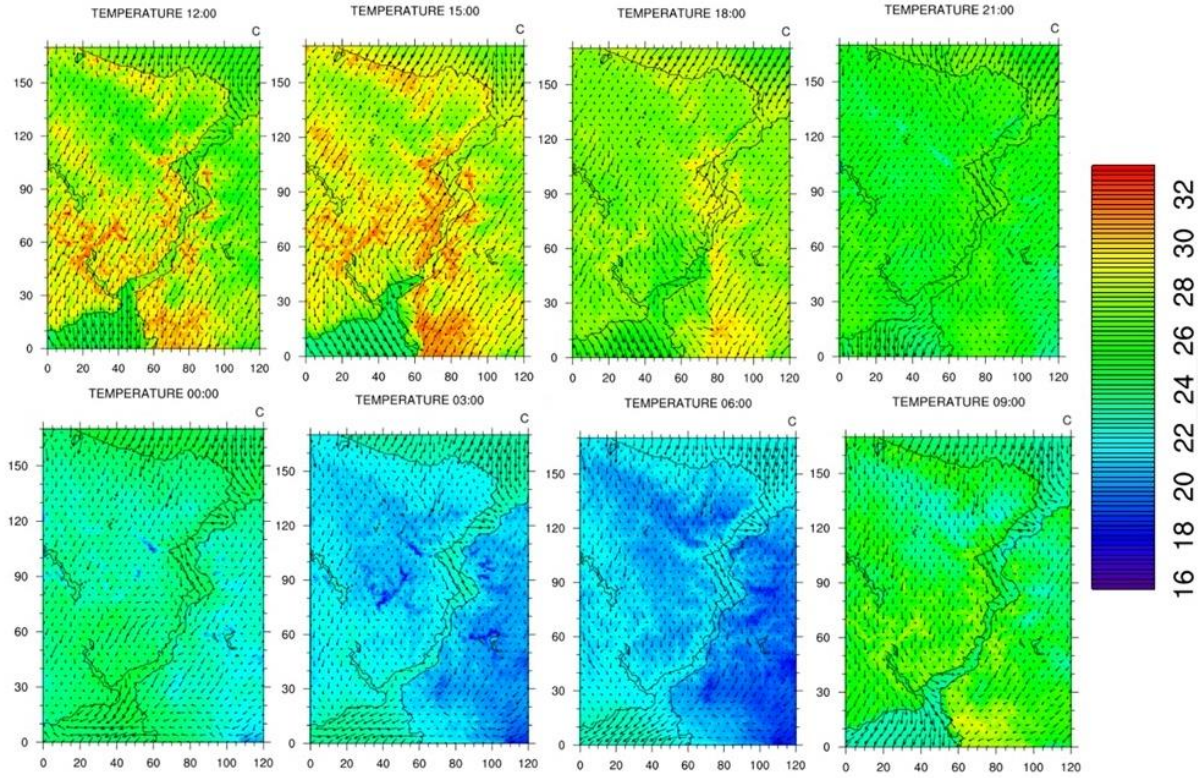
4. Senaryo Analizleri ve Tartışma

Bu çalışmada İstanbul için farklı şehir gelişim senaryolarında şehir ısı adasının değişimi MUKLIMO_3 modeli kullanılarak araştırılmıştır. Mevcut koşullar için sıcaklık ve rüzgâr alanındaki değişimler 3 saat aralıklarla Şekil 6'da gösterilmektedir. Lokal iklim modeli simülasyonunda şehir alanlarındaki sıcaklıkların kırsal alanlara göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Gün batımından sonraki görsellerde şehir alanları kırsal alanlara göre daha sıcaktır. Bunun nedeni, şehir yüzeylerinin doğal yüzeylerden farklı ısı kapasitelerine sahip olmasıdır. Gündüzleri doğal olmayan yüzeyler tarafından emilen güneş radyasyonu, geceleri uzun dalga boylu radyasyon olarak şehir yüzeylerinden atmosfere yayılmaktadır.

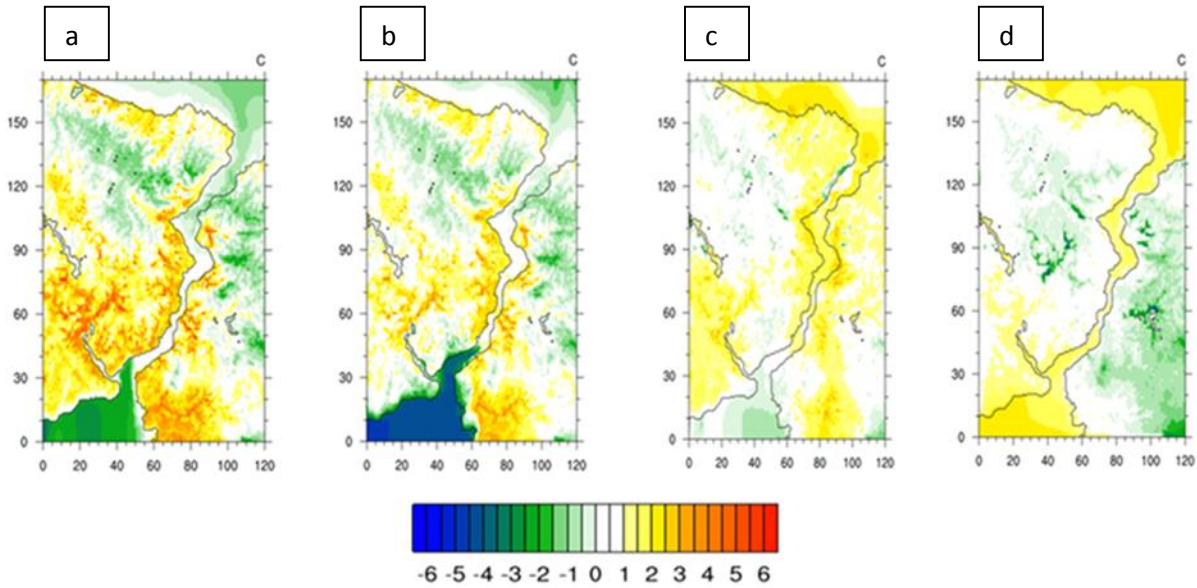
Günlük maksimum sıcaklık öğleden sonra 15:00'da 34,59 °C olarak görülmektedir. Minimum sıcaklık ise sabah 06:00'da, 15,14 °C'dir. Kontrol modeli olarak günümüz koşullarını temsil eden arazi kullanım verisi ile elde edilen bu değerler yaz aylarındaki tipik bir günün ortalamasını temsil etmektedir. İstanbul'da hâkim rüzgâr yönü kuzeydoğu olmakla birlikte; kentsel alanların yarattığı ısınma farklılıkları etkisi ile kuzey ve kuzeybatı rüzgârları da gözlenmektedir. Boğaz bölgesindeki akış, şehirleşmenin etkisiyle binaların yarattığı gölgeler ve düşük gök görüş alanı faktörü sıcaklıklarda lokal değişimlere sebep olmaktadır. Sıcaklık

gradyanını artıran bu durum yerel sirkülasyonu dolayısıyla rüzgârları etkilemektedir. Öte yandan, şehir alanlarındaki yüksek pürüzlülüğün sebep olduğu sürtünme etkisi de rüzgâr alanını zayıflatmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek binaların bulunduğu alanlarda türbülanslı bir akış olarak görülmektedir.

Mevcut durumda şehir ısı adasının etkisini görebilmek için kırsal alanı temsil eden 600x600 m²'lik bir alanın ortalama sıcaklığı hesaplanarak tüm model alanındaki sıcaklıklardan çıkarılmıştır. Böylece şehir ve kırsal bölge arasındaki sıcaklık farkı yani ŞIA yoğunluğu ortaya konmuştur. Şekil 7(a-d) şehir ve seçilen kırsal bölgenin sıcaklık farklarının zamansal olarak değişimini, yani gündüz ve gece şehir ısı adasının etkisini göstermektedir.



Şekil 6. Güncel verilerle çalıştırılan model sonuçlarına göre üçer saatlik aralıklarla sıcaklık ve rüzgâr değerlerinin alansal dağılımı.



Şekil 7. İstanbul şehir ısı adası etkisinin gün boyunca alansal ve zamansal değişimi, a) 12:00, b) 14:00, c) 20:00, d) 03:00.

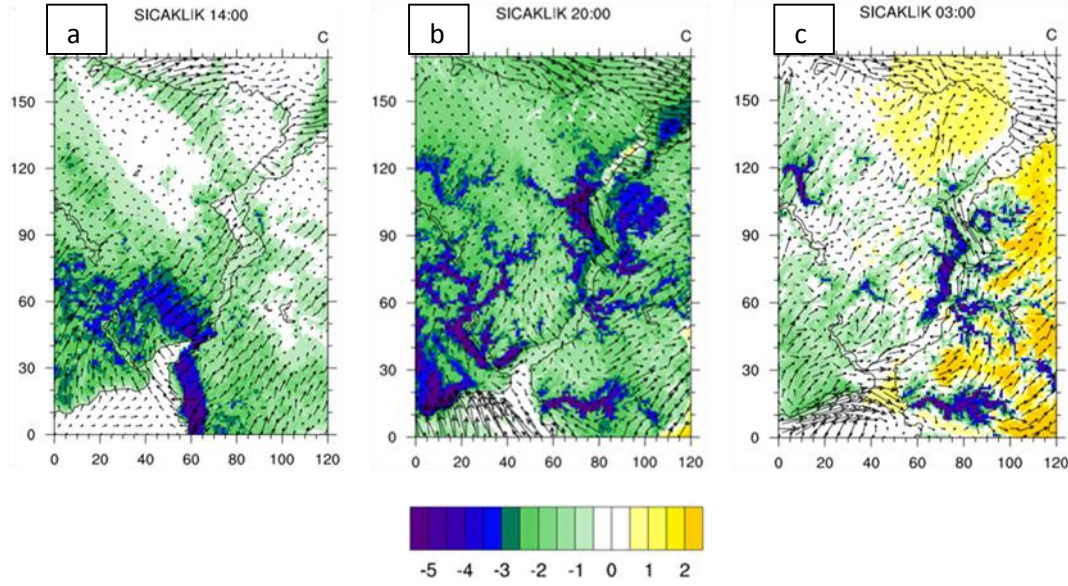
12:00 görselinde şehir alanları referans kırsal alandan ortalama 6°C daha sıcaktır. Denize yakın bölgelerde sıcaklık çevredekinden daha yüksektir, bu nedenle görselde kırsal alan olmasına rağmen referans alanından daha yüksek sıcaklıklara sahip bölgeler vardır. Kırsal alanın gece boyunca uzun dalga boylu radyasyon kaybı ile hızla soğuması ve karanın ısı kapasitesinin düşük olması nedeniyle denizler ve kırsal alanlar arasındaki sıcaklık farkı artmaktadır. Gece saat 03:00 civarında Karadeniz, İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi'nde bu farkın 2,5 °C'ye ulaştığı görülmektedir. Güneş battıktan sonra kırsal alanların şehirleşmiş bölgelere göre daha soğuk olduğu açıktır. Bu farklılıklar, gün batımından 1-2 saat sonra kıyı şeridinin iç kesimlerinde 2-3 °C civarındadır.

Model alanı içerisinde şehir sınıflarının ormana dönüştürüldüğü senaryo sonucu elde edilen sıcaklık ve rüzgâr alanının günümüz koşullarından farkı Şekil 8'de sunulmakta ve oldukça çarpıcı sonuçlara işaret etmektedir. Bu senaryo modelde her yer ormanlık alan ile kaplı olsaydı İstanbul'un mikro iklimi nasıl değişirdi sorusuna cevap vermek için test edilmiştir. Kontrol modelinde İstanbul için şehir ısı adası değerlerinin 2-3 °C civarında olduğu tespit edilmişti. Tüm şehir alanların ormanla kaplı olması durumunda, bölgenin lokal iklim sirkülasyonundaki farklılıkların kontrol modeline göre sıcaklığın -6 °C'ye kadar daha düşük olabileceğine işaret etmektedir. Sıcaklıklardaki bu azalma kontrol modelinde şehir alanı olan yerlerde ve kıyılarda en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Şehir alanı orman sınıfları ile

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

değiştirildiğinde daha yüksek pürüzlülüğe sahip bir arazi yüzeyi oluşturulmuştur. Bu sebeple denizden karaya esen rüzgâr kara yüzeyi üzerinde yavaşlamıştır. Sıcaklığı etkileyen bir diğer faktör de şehir ve kırsal arasındaki lokal ölçek atmosfer sirkülasyonu ile gerçekleşen enerji alışverişidir. Ancak şehrin olmadığı durumda

şehir ısı adasının yarattığı sirkülasyonun ortadan kalkması bazı bölgelerin günümüzden daha sıcak olmasına neden olmaktadır. Gece kırsal alan sıcaklıklarının kısmen artışı şehir-kırsal arasında meydana gelen lokal atmosfer sirkülasyonunu da zayıflatmaktadır.

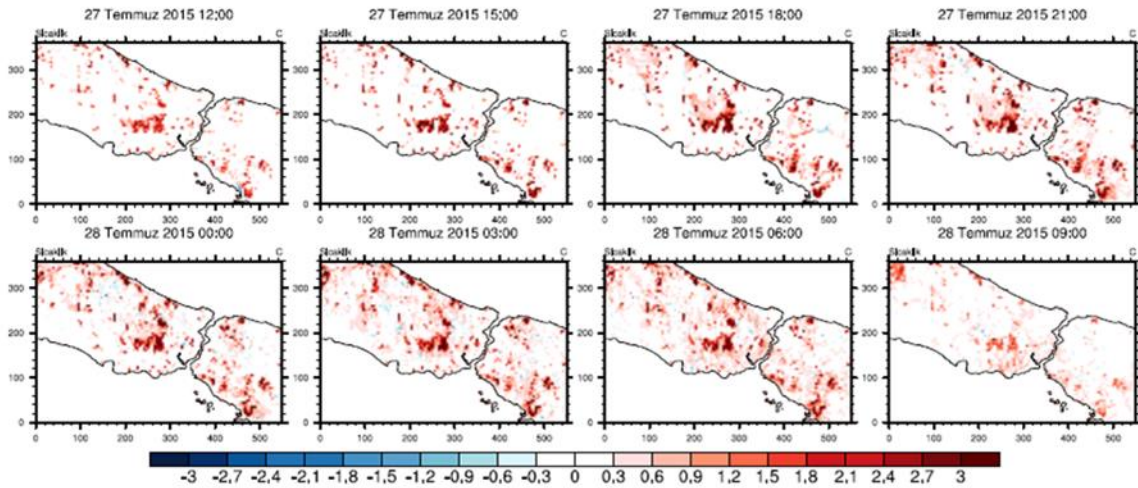


Şekil 8. Şehir alanlarının ormanlık alanlara dönüştürülmesi durumunda sıcaklık ve rüzgâr alanının günümüz koşullarından farkı a) 14:00, b) 20:00, c) 03:00.

Yatay gelişim senaryonun uygulanabilmesi için arazi kullanım tablosunda bulunan duvar alan indeksi parametresi yeniden hesaplanmıştır. Artan bina yoğunluğundan dolayı bu parametrenin tekrar hesaplanması gerekmiştir. Şekil 9'da 3 saatlik aralıklarla yatay gelişim senaryosunun kontrol simülasyonuna göre sıcaklık farklarını gösterilmektedir. Yatay gelişimli bir genişleme stratejisi

izlenecek olursa İstanbul üzerinde gözlemlenebilecek olan 3 °C'ye yaklaşan sıcaklık farkları dikkat çekmektedir ve yeni yerleşim yerleri ve civarındaki sıcaklık artışları özellikle 18-21 saatleri arasında daha yüksektir. Şehirleşmenin açık alanlara dağılması, neredeyse tüm İstanbul üzerinde sıcaklık artışına sebep olmaktadır (Şekil 9).

İstanbul Sıcaklık Farkı Href=2m (Yatay kentleşme - Kontrol)



Şekil 9. Yatay gelişim senaryosunun kontrol simülasyonundan 2 m sıcaklık farkları.

Uygulanan şehir gelişim senaryolarının nüfus artışına katkısı yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Öncelikle MUKLIMO_3 model alanı içinde bulunan tüm bina sınıfı gridleri tespit edilmiş ve bu gridlerin bina yüzdelere ve kat sayılarından yola çıkarak 2015 yılı için TÜİK'ten alınan verilere göre 14.000.000'lük İstanbul nüfusu düşünüldüğünde kişi başına düşen bina alanı hesaplanmıştır. Bina sınıfları içerisinde yalnızca konut değil iş yeri, okul, hastane gibi kurumların binaları da olduğu göz önünde bulundurulduğunda kişi başına düşen bina kullanım alanı 60 m² olarak hesaplanmıştır. Bu hesaptan yola çıkarak, arazi kullanımında açık alan sınıfının bina sınıfına dönüştürülmesi ile

MUKLIMO_3 model alanındaki mevcut bina alanı %10 değerinden %17 değerine çıkmaktadır. Bu artış yaklaşık olarak 9 milyonluk bir nüfus artışına karşılık gelmektedir.

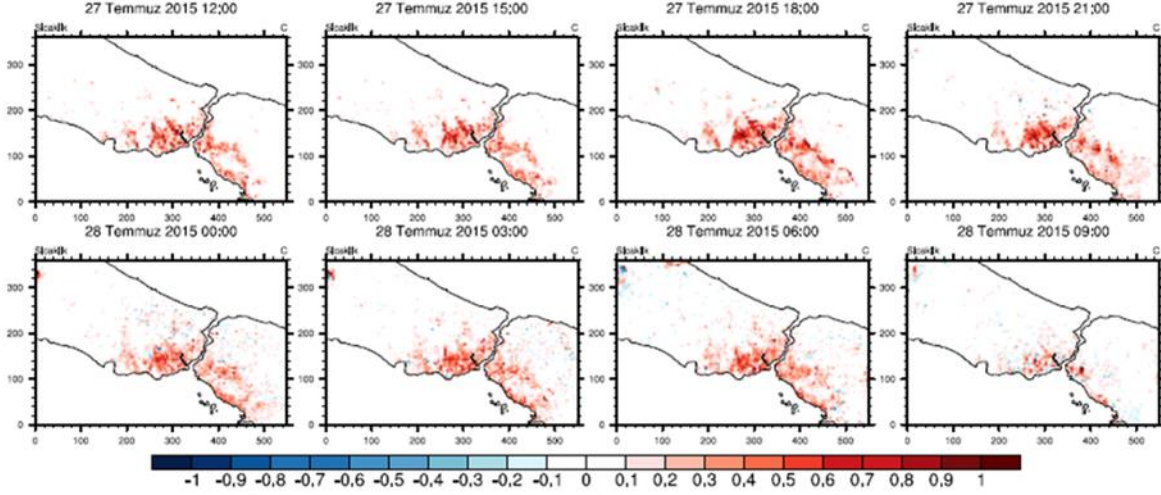
Şehrin düşeyde gelişeceği göz önüne alınan senaryoda düşük yüksekliğe sahip binalar ile orta yükseklikteki binaların yükseklikleri ikişer kat (yaklaşık 6 m) artırılmıştır. Model için arazi kullanım tablosunda bina yükseklikleri ve duvar alan indeksi parametreleri bu senaryolar için tekrar hesaplanmıştır. Alçak binaların 2 kat artırılması sonrası bina kullanım alanı %10'dan %12'ye yükselmektedir. Bu artış yaklaşık 1 milyon 900 bin kişilik nüfus

artışına karşılık gelmektedir. Hem alçak hem de orta seviye binaların 2 kat artırılması durumunda ise bina kullanım alanı %15'e çıkmaktadır ve yaklaşık 6 milyon kişinin daha İstanbul'da yaşamasına olanak vereceği öngörülmektedir.

Düşey gelişim senaryolarına göre hava sıcaklığında olası değişimler 3 saatlik aralıklar ile Şekil 10 ile gösterilmektedir.

Modelleme çalışmalarımız en fazla 1 °C civarında sıcaklık değişimleri tahmin etmektedir ve en geniş etki alanı gece saatlerinde gözlenmektedir. Bu senaryoda, boş alanların bina ile doldurulduğu senaryoya göre şehir ısı adası nedeniyle sıcaklıktaki değişim daha az olmaktadır. Bu durumun şehir atmosferindeki rüzgâr alanı açısından da daha detaylı değerlendirilmesine ihtiyaç vardır.

Istanbul Sıcaklık Farkı Href=2m (Alçak+Orta Bina(6m) - Kontrol)



Şekil 10. Düşey gelişimli senaryonun (alçak ve orta binalar) referans modelinden sıcaklık farkı.

5. Sonuç

Bu çalışmada İstanbul'un şehir ısı adası şehir iklim modeli MUKLIMO_3 ile simüle edilmiş, farklı şehir gelişim senaryolarına göre şehir ısı adası şiddetinin değişimi incelenmiştir. Şehir iklim modeli MUKLIMO_3, 24 saatlik günlük sıcaklık döngüsünü kırsal ve şehir alanlarında yaklaşık olarak temsil etmektedir. Farklılıklar arazi kullanım tablosunun gerçekte tam olarak örtüşmemesinden veya 200 m çözünürlüğün arazideki çeşitliliği doğru olarak ortaya koyamamasından kaynaklanabilir.

İstanbul'un yerleşim alanlarının sıcaklığa etkisi, tüm şehir alanlarının ormanlık alanlar ile kaplandığı şehir iklim simülasyonu ile test edilmiştir. Her ne kadar günümüz koşullarında İstanbul şehir ısı adasının şiddetinin 3 °C'ye ulaştığı gözlemler ve modelleme çalışmaları ile gösterilmiş olsa da özellikle kentsel alanlar ile kırsal alanlar arasındaki atmosfer sirkülasyonundaki değişimler sıcaklık farklarının 6 °C'ye ulaşmasını tetiklemektedir.

İstanbul'da nüfus artışına bağlı yatay ve düşey gelişim senaryolarının MUKLIMO_3 modeli ile simülasyonları, arazi kullanım tablosunda boş alan olarak tanımlanan alanlarda grid kutusunun %15 ile %30'unu kaplayan 20-30 m arasında yüksekliğe sahip binalarla kaplanmasının yaklaşık 9 milyonluk nüfus artışına ve İstanbul ikliminde de 3 °C'ye yakın sıcaklık artışına neden olacağını göstermektedir. Buna karşın düşey gelişim senaryosu dikkate alındığında, alçak ve orta yükseklikteki binaların 2 kat yükseltilmesinin 6 milyonluk nüfus artışına ve İstanbul ikliminde de 1 °C'ye yakın sıcaklık artışına neden olabileceğini ortaya koymuştur. Düşey gelişim senaryosu şehir ısı adası kontrolü için tercih edilebilir. Bununla birlikte, düşey yapılaşmanın rüzgâr alanını ve buna bağlı hava kalitesini nasıl etkileyeceği detaylı olarak incelenmelidir. Şehir ölçeğinde iklim modeli simülasyonlarının doğruluğunu arttırmak için 3 boyutlu arazi kullanım verisine ve detaylı karşılaştırmalar için şehir geneline yayılmış gözlem ağına ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada basit ve varsayımsal gelişim senaryoları test edilmiştir. Şehrin gelecekte gelişimine dair daha gerçekçi idari planlar esas alınarak senaryolar geliştirilmeli ve iklimsel etkileri analiz edilmelidir. Ayrıca yerleşim alanlarındaki değişimin şehrin havalandırılmasında yaratacağı farklılıklar da irdelenmelidir. Şehirdeki hâkim rüzgâr yönü ile yerleşim alanlarının konumuna bağlı olarak hava kalitesinde sorunlar yaşanması ve şehir ısı adası şiddetinin daha da güçlenmesi olasıdır.

Şehir ısı adası, şehirlerin sıcaklığını artırır, küresel ısınmaya olumsuz katkıda bulunur, fırtınaların/yağış olaylarının yersel, zamansal konumlarını ve şiddetini değiştirir, şehirlerin enerji talebini artırır ve sıcak hava dalgalarının şiddetini artırarak halk sağlığında tehlike yaratır. Bu nedenle öncelikle ŞIA etkisine hangi faktörlerin neden olduğunu bilmek önemli olup etkiler şehirlere özgün olarak tespit edilmelidir.

Bir şehrin iklim değişiminden etkilenebilirliği ve uyum düzeyi genellikle şehrin hangi coğrafyada yer aldığına, yerel faktörlerine ve kurumsallığına bağlıdır. Bunların bileşkesi iklim değişiminin getireceği riskleri belirler. Elbette iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlama ve iklim değişikliğini azaltma amaçlı önlemler maliyetlidir. Ancak iklim değişikliğine karşı sorumluluk ve eylemlerin ortak bir platformda buluşturulması için bilimsel çalışmalar yardımıyla şehirlerde iklim değişikliğiyle mücadelede yönelik eylemler ve planlar oluşturulmalı ve politik kararlarda bu sonuçlar göz önünde bulundurulmalıdır.

6. Teşekkür ve Bilgi

Bu çalışma Avrupa Birliği ERAfrica LOCLIM3 / TUBITAK 1001 114Y047 no'lu projesi ile desteklenmiştir. Meteorolojik veriler için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

7. Kaynaklar

- Arnfield, A. J. (2003), Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int J Climatol*, 23, 1-26.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M. and Garcia-Herrera, R. (2011), The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe, *Science*, 332, 220- 224.
- Bokwa, A., Dobrovoly, P., Gal, T., Geletic, J., Gulyas, A., Hajto, M.J., Hollosi, B., Kielar, R., Lehnert, M., Skarbit, N., Stastny, P., Svec, M., Unger, J., Vysoudil, M., Walawender, J.P., Zuvella-Aloise, M. and Burian, L. (2015), Urban climate in Central European cities and global climate change, *International Visegrad Fund, Standard Grant No. 21410222. 10.2014–.2015. Final Report. pp. 49.*
- Christen, A., and Vogt, R. (2004), Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 24, 1395-1421.
- Dickinson, R. E., (1995). Land-atmosphere interaction, *Reviews Of Geophysics*, p. 917-922.
- Eljadid, A. G. (1994), Urban heat island effect in Istanbul City. Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, Istanbul.
- Ezber, Y., Sen, O.L., Kindap, T. and Karaca, M. (2007), Climatic effects of urbanization in Istanbul: a statistical and modeling analysis", *Int. J. Climatol*, 27, 667–679.
- Fischer, E. M., Oleson, K. W. and Lawrence, D. M. (2012), Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change, *Geophys. Res. Lett.* 39: 3, L03705.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Stuart Chapin, F., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Colin Prentice, I., Ramankutty, N., and Snyder, P.K. (2005), Global consequences of land use. *Science*, 309, 570e574.
- Grimmond, C. S. (1992), The Suburban Energy Balance: Methodological Considerations and Results for a Mid-latitude West Coast City Under Winter and Spring Condition. *International Journal of Climatology*, 12, 481-497.
- Han, J. Y., and Baik, J. J. (2008), A theoretical and numerical study of urban heat island induced circulation and convection. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, 65, 1869-1877.
- Karaca, M., Tayanc, M. and Toros, H. (1995), Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara. *Atmos. Environ*, 29, 3411-3421.
- Karaca, M., Unal, Y. S., Kindap, T. and Dalfes N. (2003), Küresel iklim değişimi ve GAP bölgelerine yansımaları, DPT Projesi.
- Kaya, S., Basar, U.G., Karaca, M. And Seker, D. Z. (2012), Assessment of urban heat island using remotely sensed data. *Ekoloji*, 21, 84: 107-113.
- Kleerekoper, L., van Esch, M., Salcedo T. B. 2012. "How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect", *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30-38.
- Kim, Y. and Baik, J. (2005), Spantial and Temporal Structure of the Urban Heat Island Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 44, 5, 591–605.
- Lee, T.W., Choi, H.S. and Lee, J. (2014), Generalized scaling of urban heat island effect and its applications for energy consumption and renewable energy. *Advanced Meteorology*, 1e5.
- Memon, R. A., Leung, D., and Chunho, L. (2007), A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20, 1, 120-128
- Oke, T. R. (1987), *Boundary layer climates*. Routledge (2nd ed.).
- Oke, T. R. (1995), *The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects*. *Wind Climate in Cities*. Editors: Cermak, J. E., Davenport, A. G., Plate E. J., Viegas D.X. Kluwier Academic Publishers.
- Oke, T. R. (1998), *The Urban Energy Balance*. *Progress in Physical Geography*. PPG: Earth and Environment, 12: 471-508.
- Ozdemir, H., Unal, A., Kindap, T., Turuncoglu, U., Durmusoglu, Z.O., Khan, M., Tayanc, M. and Karaca, M. (2012), Quantification of the urban heat island under a changing climate over Anatolian Peninsula, *Theor. Appl. Climatol*, 108, 31–38.
- Robaa, S. (2003), Thermal Human Comfort in Egypt, *International Journal of Meteorology*, 283, 359-371.
- Robine, J. M., Cheung, S. L. K., LeRoy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.,P. and Herrmann, F.,R, (2008), Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biol*, 331,171-178.
- Sailor, D. J., and Lu, L. (2004), A top-down meteorology for developing diurnal and seasonal anthropogeniz heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, 38,2737-2748.
- Schär, C., Vidale, P., Lüthi, D., Frei, C., Harberli, C., Liniger, M., and Appenzeller, C. (2004), The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature volume 427*, pages 332–336 (2004)
- Siebert, J., Sievers, U., Zdunkowski W. (1992), A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere, *Boundary Layer Meteorology*, 59, 1-34.
- Sievers, U., Mayer, I. And Zdunkowski W. (1987), Numerische Simulation des urbanen Klimas mit.
- Sievers, U. (1995), Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen, *Meteorol Zeitschrift*, 4, 3-15.
- Sievers, U., Früh B. (2012), A practical approach to compute short-wave irradiance interacting with subgrid-scale buildings, *Met. Zeit.*, 21, 349-364.
- Stewart, I. D. (2011), A systematic and scientific critique of methodology in modern urban heat island literatue, *Int. J. Climatol*, 31, 200- 217.

Tayanç, M. and Toros, H. (1997), Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of Turkey, *Climatic Change*, 35, 501-524.

Unal, Y., İncecik, S., Topçu, S., Menteş, S., Güney, C., Doğru, A. O., Yürük, C., Diren, D., Bilgen, S. and Temizöz, P., (2018), Farklı nüfus, şehir yapısı, arazi kullanımı sınıflaması ve iklim karakteristiklerine sahip 3 şehrin (Kahire, Nairobi ve İstanbul) lokal iklim değişimi ve bu şehirlerdeki lokal iklim değişimine karşı farklı adaptasyon stratejilerinin karşılaştırılması, TÜBİTAK 114Y047 project final report.

Unal, Y., Sonuc, C.Y., Incecik, S., Topcu, S., Üstün, D.D. and Temizöz, P. (2020), Investigating urban heat island intensity in İstanbul, *Theo. and Appl. Climatology*, (2020) 139:175–190.

UNWUP (2018), United Nations World Urbanization Prospect 2018.

Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A., and Mihalakakou, G. (2013), The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands. *Solar Energy*, 94, 128-144.

Velazquez-Lozada, A., J E, G., and Winter, A. (2006), Urban Heat Island effect analysis for San Juan, Puerto Ric. *Atmospheric Environment*. 40, 1731-1741.

Wang, X., Wang, Z., Qi, Y., and Guo H. (2009), Effect of urbanization on the winter precipitation distribution in Beijing area, *Sci China Ser D-Earth Sci*, 52 (2), 250-256.

Zhou, W., Xiaoma, Y.Q., Weifeng, L. and Han L.L. (2014), Relationships between land cover and the surface urban heat island: seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures, *Landscape Ecology*, 29, 153–167.

DERLEME MAKALE

Avrupa Birliği (AB) ile Türkiye’de Döngüsel Ekonomi ve Sıfır Atık Yönetimi

Aybike MISIR¹, Osman Atilla ARIKAN²

Yazışma yazarı:

Aybike MISIR,
aybikehashas@gmail.com

Referans:

Mısır, A. ve Arıkan, O. A., (2022), Avrupa ve Türkiye’de Sıfır Atık Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 1(1) 69–78,

Makale Gönderimi : 8 MART 2022
Online Kabul : 11 NİSAN 2022
Online Basım : 30 MAYIS 2022

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-2342-512X

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0002-0716-1865

Özet Sıfır atık yönetimi ve döngüsel ekonomiye geçiş hususunda Avrupa Birliği (AB) ve ülkemizde belirlenen politika ve stratejiler öncelikle atığın oluşmadan önlenmesi üzerinedir. Önlenemeyen kısmın yeniden kullanımı, geri dönüştürülmesi veya enerji geri kazanımı yoluyla döngü içinde kalmasının sağlanması esastır. AB’de 2035 yılına kadar kentsel (belediye) katı atıkların %90’ının düzenli depolama sahalarına kabul edilmeyeceği belirtilirken, Türkiye için ise 2035 yılına kadar kentsel katı atıkların %60’ının geri kazanılmasına yönelik altyapının kurulması gerekmektedir. AB’de ambalaj atıkları için toplam geri dönüşüm hedefi 2025 yılında %65, 2030’da %70 iken ülkemizde bu hedeflere ulaşmak için belirlenen tarihler sırasıyla 2026 ve 2031’dir. Avrupa Komisyonu ayrıca tek kullanımlık plastiklerin piyasaya arzının kısıtlanmasına yönelik de yasal altyapı oluşturmuştur. Ülkemizde 2017 yılında Sıfır Atık Projesi başlatılmıştır. Projede atık azaltımı ve geri dönüşümün önemine dikkat çekilmesiyle döngüsel ekonomiye geçişte de yol gösterici olunmuştur. 2019 yılında yayımlanan ve son revizyonu 2021’de yapılan Sıfır Atık Yönetmeliği ile de sistemin mevzuat altyapısı oluşturulmuştur. Atıkların üretim sürecine dâhil edilmesi, kaynak kullanımının azaltılması için Avrupa Komisyonu tarafından 2015 yılında Döngüsel Ekonomi Eylem Planı yayınlanmıştır. Planda birtakım revizyonlara gidilerek 2020 yılında Yeni Döngüsel Ekonomi Eylem Planı oluşturulmuştur. 2019 yılında Avrupa Komisyonu Yeşil Mutabakat Eylem Planı’nı yayınlamıştır. Planda 2050 yılında karbon-nötr hedefinin sağlanması amaçlanmaktadır. Ülkemizde de 2021 yılında Yeşil Mutabakat Eylem Planı yayımlanmıştır. Eylem planında başta iklim değişikliği ile mücadele olmak üzere atılması gereken adımlar yer almaktadır. 2019 yılında Türkiye Depozito İade Sistemi Projesi başlatılarak sistemin ülkemize uyarlanması için fizibilite çalışması yapılmıştır. 2016 yılında yürürlüğe giren Paris Anlaşması, 2021 yılı Ekim ayında ülkemizde de onaylanmıştır. Anlaşmanın amacı küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme kıyasla 2 °C’nin, mümkünse 1,5 °C’nin altında tutulmasıdır. Sıfır atık yönetiminin uygulanması ve döngüsel ekonomiye geçiş için küresel ölçekte adımlar atılmakta ülkeler kendilerine özgü aksiyon planlarını oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sıfır atık, döngüsel ekonomi, sürdürülebilirlik, iklim değişikliği

Circular Economy and Zero Waste Management In European Union (EU) and Turkey

Abstract Policies and strategies determined in the European Union and our country regarding zero waste management and transition to circular economy are primarily about waste prevention. It is essential to ensure that waste should be utilized by reusing, recycling, or energy recovery. 90% of the municipal wastes will not be accepted into the sanitary landfills until 2035 in the EU, it is necessary to establish the infrastructure for the recovery of 60% of the municipal wastes until 2035 in Turkey. While the total recycling target for packaging waste in the EU is 65% by the end of 2025 and 70% by the end of 2030, the years for achieving these targets are 2026 and 2031, respectively, in our country. The European Commission has also established the legal infrastructure to restrict the placing on the market of single-use plastics. In our country, the Zero Waste Project was initiated in 2017. The project also guided the transition to a circular economy by drawing attention to the importance of waste reduction and recycling. With the Zero Waste Regulation published in 2019 and the last revision of which was made in 2021, the legislative infrastructure of the system was established. The Circular Economy Action Plan was published by the European Commission in 2015 to include waste in the production process and reduce raw material use. Some revisions were made in the plan and the New Circular Economy Action Plan was created in 2020. In 2019, the European Commission published the Green Deal Action Plan. The plan aims to achieve carbon neutrality

by 2050. In our country, the Green Deal Action Plan was published in 2021. The action plan includes steps to be taken, especially about climate change. The Turkish Deposit Return System Project was initiated in 2019, and a feasibility study was conducted to adapt the system to our country. The Paris Agreement, which entered into force in 2016, was also accepted in our country in October 2021. The aim of the agreement is to keep the global temperature rise below 2 °C compared to the pre-industrial period, and below 1.5 °C if possible. For the implementation of zero waste management and the transition to a circular economy, steps are being taken on a global scale, and countries are creating their own action plans.

Keywords: Zero waste, circular economy, sustainability, climate change

1. Giriş

Nüfus artışı, tüketim alışkanlıklarının değişimi ile atık üretimi de artmakta ve yeni yönetim modelleri oluşturulması ihtiyacı doğmaktadır. Sürdürülebilir atık yönetimi anlayışında atığın büyük bölümünün geri dönüşüm, enerji geri kazanımı yoluyla değerlendirilmesi mümkün olup bertarafa gönderilecek kısım büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Bu yaklaşımın sıfır atık yönetimi ve döngüsel ekonomi konseptine uyarlanması içinse öncelik verilmesi gereken husus atığın oluşmadan önlenmesi, önlenemeyen kısmının mümkün olduğunca değerlendirilmesidir. Normal şartlar altında taşınması ve bertarafı sebebiyle önemli bir maliyet yükü oluşturan atık, kaynak olarak görüldüğünde çevresel ve ekonomik yönden katma değer olmaktadır. Atıkların kaynak olarak değerlendirilmesi sayesinde birincil hammadde tüketimi azalmakta, özellikle hammadde ihtiyacının büyük bölümünü ithal eden ülkelerin ithalat oranlarının düşmesi sağlanmakta, böylece ekonomik kazanımlar elde edilmektedir. 2018 yılında AB-27 ülkelerinde yaklaşık 8.1 milyar ton hammadde kullanılmıştır. Kullanılan hammaddenin yaklaşık üçte ikisi (5.4 milyar ton) AB'den çıkarılmış, 1.7 milyar ton hammadde ithal edilmiş, yaklaşık 1 milyar ton geri dönüştürülmüş malzeme kullanılmıştır (European Commission, 2021). Ülkemiz verilerine bakıldığında ise 2018 yılında yaklaşık 1.1 milyar ton hammaddenin 0,9 milyar tonu ülkemizden çıkarılmış (%82), 0,2 milyar tonu (%18) ise ithal edilmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2021). Ayrıca ikincil hammadde ihtiyacının karşılanması için atık plastik ithalatı 2015 yılında yaklaşık 100.000 ton iken 2020 yılında 773.000 tona çıkarak 5 kattan fazla artmıştır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2021). Sera gazı emisyonunun %50'si, biyolojik çeşitlilik kaybı ve su kirliliğinin %90'dan fazlası hammadde çıkarımı ve işlenmesi sebebiyle oluşmaktadır (European Commission, 2021). Sera gazı emisyonlarının azaltılması iklim değişikliği ile mücadele açısından kritik olup tüm dünyada olduğu gibi AB ve ülkemizde de atık ve kaynak yönetimi politikaları ve stratejileri bu doğrultuda şekillenmektedir. Bu kapsamda iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması, üretim ve atık yönetimi süreçlerinde daha az kaynak kullanılması, üretim süreçlerinde kullanılacak atıkların ekonomik değerinin kaybetmesinin önlenerek ikincil hammadde kullanım oranının artması için gerekli adımlar atılmaktadır.

2. Döngüsel Ekonomi ve Sıfır Atık

Kaynakların korunması, çevre kirliliğinin önlenmesi ve sürdürülebilir atık yönetimi sisteminin kurulması için atık yönetimi hiyerarşisi önemli bir yol göstericidir. Atığın oluşmadan önlenmesinin sağlanması hiyerarşinin ilk tercih edilen basamağıdır. Önlenemeyen kısmın ise yeniden kullanılarak veya geri dönüştürülerek değerlendirilmesi

gerekmektedir. Yeniden kullanımın ve/veya geri dönüştürmenin mümkün olmadığı durumlarda ise enerji geri kazanımı alternatifi değerlendirilmektedir. Atığın hiçbir şekilde değerlendirilemeyecek kısmı ise bertaraf edilmektedir. Atık yönetim hiyerarşisine dair görsel Şekil 1 ile verilmiştir (Zero Waste, 2022). Döngüsel ekonomi, iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı, atık ve kirlilik gibi küresel zorluklarla mücadele eden bir sistem çözümü çerçevesidir (ellenmacarthurfoundation.org, 2022). Döngüsel ekonomi yaklaşımında, kaynak tüketimi ve birincil hammadde kullanımının azalması esastır. Bu doğrultuda bir ürünün üretimi sırasında su ve enerji kullanımında tasarruf sağlanması, üretimde geri dönüştürülmüş malzeme kullanım oranının artması önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra ürünün üretiminden tüketim sonrasına kadar tüm süreçlerde ortaya çıkabilecek atık miktarının mümkün olduğunca azaltılması için gerekli aksiyonların alınması gerekmektedir. Döngüsel ekonomi konseptine dair şema Şekil 2'de verilmiştir. Bu noktada sıfır atık yönetimi döngüsel ekonomi konseptine uyum ve geçiş açısından benimsenmesi gereken bir atık yönetim yaklaşımıdır. Sıfır atık yönetim sistemi Sıfır Atık Yönetmeliği'nde "Atık oluşumunun önlenmesinden başlayarak, atıkların azaltılması, kaynağında ayrı biriktirilmesi, geçici depolanması, ayrı toplanması, taşınması ve işlenmesi süreçlerinin hepsini içine alan, fayda ve maliyet unsurları göz önünde bulundurularak oluşturulan yönetim sistemi" olarak tanımlanmıştır (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2019). Atık yönetimi alternatifleri sıfır atık yaklaşımı doğrultusunda önceliklendirildiğinde dünya genelinde benimsenen atık yönetimi hiyerarşisine uygun yönetim modeli oluşturulduğu da görülmektedir.

2.1 AB'de döngüsel ekonomi ve sıfır atık

Döngüsel ekonomi konseptine uyum sağlanması ve sıfır atık yönetim sisteminin etkin bir şekilde uygulanması için, Avrupa Birliği (AB) atık yönetimi mevzuatının da dünya genelinde olduğu gibi atık yönetimi hiyerarşisi adımlarına uygun olarak şekillendiği görülmektedir.

Avrupa Birliği (AB), 2018 yılında kabul ettiği döngüsel ekonomi paketiyle atık yönetimi mevzuatında revizyonlar yapmış ve yeni hedefler belirlemiştir. Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan 99/31/AT sayılı Düzenli Depolama Direktifi'nde yapılan değişikliklerle, düzenli depolama sahasında bertaraf edilecek atık miktarının 2035 yılına kadar toplam atığın maksimum %10'u olabileceği belirtilmiştir (European Commission, 2018). Bu da atığın %90'ının değerlendirilmesi anlamına gelmekle, atığın önlenmesi ve azaltılması yönünde de itici güç oluşturmaktadır. 2008/98/AT sayılı Atık Çerçeve Direktifi'ndeki revizyonla, kentsel (belediye) katı atıkların yeniden kullanım ve geri dönüşümüne dair 2025 yılına kadar %55, 2030'a kadar %60 ve 2035'e kadar %65 hedefleri belirlenmiştir. Yine aynı

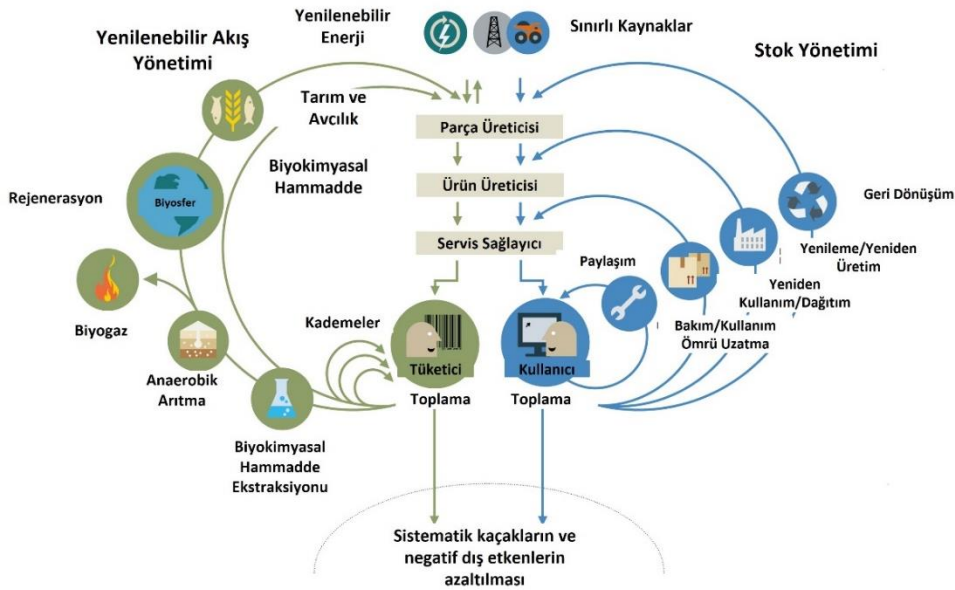
direktifte 2023 yılına kadar biyobozunur atıkların ayrı toplanması ve geri kazanılması gerektiği vurgulanmaktadır (European Commission, 2018). 94/62/AT sayılı Ambalaj & Ambalaj Atıkları Direktifi'ne göre ambalaj atıklarının geri dönüşümüne dair belirlenen yeni hedefler 2025 yılı sonuna kadar %65, 2030 yılı sonuna kadar %70'tir. Ayrıca ilk defa plastik poşet kullanımının azaltılmasına yönelik (2025 yılı sonuna kadar yıllık kişi başına kullanılan plastik poşetin 40 adedi aşmaması) maddeye de yer verilmiştir. (European Commission, 2018). Avrupa Komisyonu tek kullanımlık plastik kullanımının azaltılmasına ciddi önem vermekte olup, sadece buna yönelik 2019/904 sayılı düzenleme ile Bazı Plastik Ürünlerin Çevre Üzerindeki Etkisinin Azaltılması Direktifi'ni yayımlamıştır. Direktife istinaden PET şişe üretiminde 2025 yılına kadar en az %25, 2030 yılına kadar en az %30 oranında geri dönüştürülmüş plastik kullanılması gerekmektedir. Üç litreye kadar olan içecek ambalajlarının ise 2025 yılına kadar %77, 2029 yılına kadar %90 oranında ayrı toplanmasına yönelik maddeye yer verilmiş olup bu hedefe depozito iade sistemi ve/veya Genişletilmiş Üretici Sorumluluğunda kurulacak bir sistemle ulaşılabileceği belirtilmiştir. Yine aynı direktifte tek kullanımlık plastiklerin (tabak, bardak, çatal, kaşık, bıçak, karıştırıcı, pipet, kulak çöpü vb.) piyasaya arzına yönelik kısıtlamalar getirilmesine dair hükümler de yer almaktadır (European Commission, 2019).

AB atık yönetimi mevzuatındaki bu revizyonlar, Avrupa Komisyonu tarafından 2015 yılında kabul edilen "Döngüsel Ekonomi Eylem Planı" kapsamında yapılmıştır. Eylem planında bazı güncellemeler gerçekleştirilmiş olup, 11.03.2020 tarihinde "Yeni Döngüsel Ekonomi Eylem Planı" olarak son hali yayınlanmıştır. Planda öne çıkan maddeler (European Commission, 2020):

- Ürün dayanıklılığının, yeniden kullanılabilirliğinin, kalitesinin artırılabilirliğinin ve onarılabilirliğinin iyileştirilmesi, ürünlerdeki tehlikeli kimyasalların azaltılması, enerji ve kaynak verimliliğinin artırılması,
- Performans ve güvenliği sağlandığı takdirde ürünlerde kullanılan geri dönüştürülmüş materyal oranının artırılması,
- Yeniden üretim ve yüksek kaliteli geri dönüşüme olanak sağlanması,
- Karbon ve çevresel ayak izinin azaltılması,
- Tek kullanımlık ürünlerin kısıtlanması ve erken eskimelerinin önlenmesi,
- Satılmayan uzun ömürlü ürünlerin imhasının yasaklanması,
- Üreticilerin ürünün sahipliğini ve kullanım ömrü boyunca performansına ilişkin sorumluluğunu elinde bulundurması,
- Etiketleme, filigran vb. ürün bilgilerinin dijitalleşme potansiyelinin harekete geçirilmesi,
- Yüksek performans seviyelerine göre farklı sürdürülebilirlik performanslarına dayalı ürünlerin ödüllendirilmesidir (European Commission, 2020).



Şekil 1. Atık yönetimi hiyerarşisi (Zero Waste, 2022).



Şekil 2. Döngüsel ekonomi şeması (ellenmacarthurfoundation.org, 2022)

Döngüsel ekonomiye küresel geçişin desteklenmesi için Avrupa Komisyonu;

- Plastiklere ilişkin döngüsel ekonomi yaklaşımı için Avrupa Plastik Stratejisi oluşturmaktadır.
- Küresel ölçekte döngüsel ekonomiye geçişte bilgi ve yönetim eksikliklerinin belirlenmesi ve büyük ekonomileri de içine alan ortaklık girişimlerinin gelişmesi için Küresel Döngüsel Ekonomi İttifakı önermektedir.
- Doğal kaynakların kullanımı sırasında “Güvenli Çalışma Alanı” oluşturulması ve doğal kaynakların yönetimi için uluslararası anlaşmaların yapılması için araştırmalar yapmaktadır.
- Yeşil dönüşüm ve döngüsel ekonomiye geçişin faydalarını en üst düzeye çıkarmak için Afrika ile güçlü bir ortaklık kurmuştur.
- Serbest Ticaret Anlaşmalarının döngüsel ekonominin geliştirmiş hedeflerini yansıtmalarını sağlamaktadır.
- Uluslararası Sürdürülebilir Finans Platformu’nu katılım öncesi desteklediği gibi Batı Balkanları da iki taraflı, çok taraflı ve bölgesel politika diyalogları ve çevre anlaşmaları bağlamında döngüsel ekonomiye geçişe teşvik etmektedir.
- Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Döngüsel Ekonomi Misyonlarına göre yardım faaliyetlerini hızlandırmakta, küresel döngüsel ekonomiye geçiş için AB üye ülkeleri ile koordinasyon ve ortak çaba geliştirmektedir (European Commission, 2020).

İklim değişikliği ve çevrenin bozulması tüm dünyada olduğu gibi AB için de bir tehdittir. Bunun üstesinden gelinmesi için Avrupa Yeşil Mutabakatı stratejisi gündeme gelmiştir. Mutabakatın başlıca hedefleri; 2050 yılında karbon nötr olunması, kaynakların kullanımından bağımsız olarak ekonomik büyümenin gerçekleşmesi ve toplum refahının sağlanmasıdır. Avrupa Yeşil Mutabakatının aksiyon alanları iklim, enerji, tarım, endüstri, çevre, ulaşım, finans ve bölgesel kalkınma, araştırma ve yeniliktir (European Commission, 2019). Çevrenin korunması konusundaki öncelikler;

- Biyolojik çeşitliliğin ve ekosistemin korunması,
- Hava, su ve toprak kirliliğinin azaltılması,
- Döngüsel ekonomiye geçişin sağlanması,
- Atık yönetimi faaliyetlerinin iyileştirilmesi,
- Mavi ekonomi ve balıkçılık sektörünün sürdürülebilirliğinin sağlanmasıdır (European Commission, 2019).

Avrupa Yeşil Mutabakatı doğrultusunda belirlenen başlıca hedefler;

- AB’nin 2030 ve 2050 için yeni iklim hedefleri belirlenmesi,
- Sıfır kirlilik yönünde hedeflerin belirlenmesi ve çevreye toksik içerikli maddelerin yayılımının önlenmesi,
- Tüm süreçlerde adil, sağlıklı ve çevre dostu sistemin oluşturulması,
- Ekosistemin ve biyoçeşitliliğin korunması ve iyileştirilmesi,
- Endüstride döngüsel ekonomiye geçişin sağlanması,

- Enerji ve kaynak verimli bir sistemin oluşturulması,
- Enerjinin temiz, ulaşılabilir ve güvenli kaynaklardan sağlanması,
- Sürdürülebilirliğe geçişin hızlandırılması,
- Yeni sisteme her paydaş düşünülerek adil bir şekilde geçilmesi,
- Geçişin finanse edilmesidir (The European Green Deal, 2019).

Yeşil Mutabakatın gerekliliklerin yerine getirilmesi için Avrupa Komisyonu belirli konularda raporlar yayınlamıştır. 2021 yılında yayınlanan “Mavi Ekonomi Raporu”nda döngüsel ekonomiye geçişte mavi ekonominin önemi vurgulanmıştır. Raporu göre 2030 yılında dünya genelinde su temininde %40’lık bir boşluk oluşacağı öngörülmektedir. Artılmayan atıksuyun direkt çevreye deşarjı, biyolojik çeşitliliğin azalması başta olmak üzere su ve kara yaşamını etkilemektedir. Avrupa genelinde üretilen yaklaşık 29 milyon ton plastiğin %32,5’i toplanarak geri dönüştürülmektedir. Dünya genelinde her yıl 8-13 milyon ton plastik denizlere ulaşmaktadır. Denizlerdeki plastik atık ve mikroplastikler nedeniyle taşımacılık, balıkçılık, su ürünleri yetiştiriciliği, turizm ve rekreasyonu içeren mavi ekonomi sektörleri oldukça olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu sebeple döngüsel ekonomiye geçiş sürecinde mavi ekonomi sektörlerinde iyileştirmeler yapılması önem arz etmektedir. Özellikle denizcilik sektörüne doğru ve güvenilir veri sağlanması ile daha doğru politikalar izlenerek karbon verimli uygulamalara geçilebileceği öngörülmektedir. Küresel ölçekte su kullanımının %70’i tarımsal kaynaklı olduğu için su, mavi ekonomi sektörü dışında gıda sektöründe de kritik öneme sahiptir. Sürdürülebilir olmayan tarım uygulamaları tarımsal arazinin bozulması, erozyon, azot, fosfor ve potasyum kirliliği risklerini ortaya çıkarmaktadır. Döngüsel ekonomiye geçişin genel mali boyutuna bakıldığında 2030 yılı iklim ve enerji hedeflerine ulaşılması için gereken ek yatırımın 260 Milyar avro olacağı öngörülmektedir. Söz konusu yatırım alanlarının başında daha sürdürülebilir teknolojilerin kullanılması, sürdürülebilir büyümenin finanse edilmesi, karbon emisyonunun azaltılması ve döngüsel ekonomiye geçişin sağlanması gelmektedir (European Commission, 2021).

Yeşil Mutabakat kapsamında Avrupa Komisyonu “Çiftlikten Sofraya” stratejisini de benimsemiştir. Bu strateji ile gıda kaybı ve atığının önlenmesi, sürdürülebilir gıda üretimi, işlenmesi, tüketimi ve dağıtımının sağlanması amaçlanmaktadır (European Commission, 2022). Bu doğrultuda 2023 yılında sürdürülebilir gıda sistemleri için yasal çerçeve önerisinin oluşturulması, veri boşluklarının giderilmesi için pestisit istatistiklerine dair düzenlemelerin revize edilmesinin önerilmesi, gıda israfının azaltılması için AB genelinde hedeflerin belirlenmesi planlanmaktadır. Ayrıca 2030 yılına kadar kimyasal pestisitlerin ve daha tehlikeli pestisitlerin genel kullanımının ve riskinin %50 azaltılması için ek önlemler alınacaktır (European Commission, 2020).

2030 yılı için AB genelinde en az %25 oranında organik tarıma geçilmesi hedeflenmektedir. 2019 yılı verilerine göre AB’de toplam tarımsal alanların %8,5’inde organik tarım yapılmaktadır. 2009 yılında 8.3 milyon hektar olan organik tarım alanı 2019 yılında %66 oranında artarak 13.8 milyon hektara yükselmiştir. Organik tarım alanları geleneksel tarım alanlarına göre %30 daha fazla biyolojik çeşitlilik içermektedir. Organik tarım alanlarında sentetik gübre kullanımına izin verilmemekle birlikte kimyasal pestisit

kullanımı için sınırlama getirilmektedir. Bu sebeple sürdürülebilir tarım uygulamaları için organik tarıma geçiş önem arz etmektedir (European Commission, 2021).

AB'de Yeşil Mutabakat çerçevesinde sürdürülebilir bir çevre oluşturulması için üretim sektöründe sürdürülebilir kimyasal kullanımı da önemsenmektedir. Avrupa Komisyonu kimyasalların tüm yaşam döngüsünün doğru yönetilmesi ve toksik maddelerin olmadığı bir çevrenin oluşturulması için aksiyon alınması yönünde adımlar atmaktadır. Bu kapsamda 2023 yılında AB'de kullanımı yasaklanan tehlikeli kimyasalların ihracat amacıyla de üretilmemesi için önlemler alınması planlanmaktadır. Yine 2023 yılında kimyasal güvenlik verileri ve araçlarına dair bilgilere erişimin sağlanması için açık bir platform oluşturulması çalışmaları yapılmaktadır (European Commission, 2020).

Avrupa Komisyonu tarafından yayınlanan "Hava, Su ve Toprakta Sıfır Kirliliğe Doğru" aksiyon planında 2030 yılına ait sıfır kirlilik hedefleri belirlenmiştir. Bu hedefler;

- Hava kirliliğinin sağlığa etkilerinin %55'ten daha fazla,
- Ulaşım gürültüsü kaynaklı rahatsızlığın %30,
- Biyolojik çeşitliliği tehdit eden hava kirliliğinin %25,
- Kimyasal pestisit kullanımının %50,
- Denizlerdeki plastik kirliliğinin %50, çevreye yayılan mikroplastiklerin %30,
- Kentsel katı atıkların %50 oranında azaltılmasıdır (European Commission, 2021).

2050 yılında ise hava, su ve toprak kirliliğinin sağlığa ve doğal ekosistemlere zarar vermeyecek ölçüde azaltılması, toksik içermeyen çevrenin oluşturulması ve gezegenin üstesinden gelebileceği sınırlara saygı gösterilmesi hedeflenmektedir (European Commission, 2021).

2.2 Türkiye'de dögüsel ekonomi ve sıfır atık

Dögüsel ekonomiye ve sıfır atık yönetim sistemine geçiş konusunda küresel ölçekte yaşanan gelişmeler ülkemizde yakından izlenmektedir. Çevre mevzuatında da bu doğrultuda gerekli güncellemeler yapılmaktadır. Ayrıca günümüze kadar kaynakların korunması, çevre kirliliğinin önlenmesi, geri dönüşüm oranlarının artması, atık üretiminin azaltılmasına yönelik sürdürülebilir çözümler bulunması adına çeşitli projeler hayata geçirilmiştir.

Atığın önlenmesi, önlenemeyen kısmının ise yeniden kullanım, geri dönüşüm ve enerji geri kazanımı yoluyla değerlendirilmesiyle bertarafa mümkün olan en az miktarda atık gönderilmesinin hedef alındığı Sıfır Atık Projesi 2017 yılı Eylül ayında başlatılmıştır. Sıfır Atık Yönetimi ve Depozito İade Sistemi'ne yönelik mevzuat hükümleri ise 2018 yılı Aralık ayında 2872 sayılı Çevre Kanunu'nda yer almıştır. Kurumlar sıfır atık yönetimine hızla geçmeye başlamış ve 2019 yılında 25 bin kurum sisteme geçmiştir (sifiratik.gov.tr, 2022). Ancak kurulan sistemlerin sürdürülebilirliği oldukça önemlidir. Bu amaçla sistem veriminin kontrolünün sağlanması, bilinçlendirme çalışmalarının periyodik olarak tekrar edilmesi, ayrıca denetleme ve cezai işlemlerin uygulanması gerekmektedir. Sıfır atık projesinin uygulanmaya başlandığı tarihten 2021 yılı Eylül ayına kadar 1.5 milyon ailenin bir aylık kullanımına eş değer enerji tasarrufu sağlanmıştır. Yaklaşık 24.2 milyon ton atık ekonomiye kazandırılmıştır. Böylece 356 milyon kWh enerji ve 437 milyon metreküp su tasarrufu sağlanmıştır. 3 milyon ton sera gazı salımı önlenmiş ve 265 milyon ağaç kurtarılmıştır (trthaber.com, 2021). Sıfır atık yönetimine daha

etkin katılımın sağlanması amacıyla 2022 yılından itibaren yerel yönetimlere sıfır atık müdürlüklerinin kurulması zorunluluğu getirilmiştir (csb.gov.tr, 2022).

Plastik kullanımının azaltılması amacıyla 2019 yılı Ocak ayında alışveriş poşetleri ücretlendirilmiştir. Bu sayede 2020 yılında plastik poşet kullanımında %75 azalma sağlanmıştır. 8.300 ton daha az sera gazı salınmış, 3 milyon MWh enerji tasarrufu sağlanmış, 1.8 milyon varil petrol kullanım tasarrufu sağlanmıştır. (Milliyet, 2021). Deniz ve kıyıların korunması, gelecek nesillere yaşanılabilir bir çevre bırakılması amacıyla 2019 yılı Haziran ayında Sıfır Atık Mavi Projesi başlatılmıştır. (Sıfır Atık Mavi, 2022).

2019 yılı Temmuz ayında Sıfır Atık Yönetmeliği yayımlanmıştır. Yönetmeliğin amacı hammadde ve doğal kaynakların etkin yönetimi ile sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda atık yönetimi süreçlerinde çevre ve insan sağlığının ve tüm kaynakların korunmasını hedefleyen sıfır atık yönetim sisteminin kurulmasıdır. Yönetmelikte, sıfır atık yönetim sistemine geçilmesi gereken son tarih mahalli idareler, bina ve yerleşkeler için ayrı ayrı belirtilmiştir. Sisteme geçiş tarihi kurum ve kuruluşa bağlı olarak değişmekle birlikte geçişin 31 Aralık 2022'ye kadar tamamlanması öngörülmüştür. Sıfır Atık Yönetmeliği 2021 yılı Ekim ayında revize edilmiştir. Yönetmeliğin son versiyonunda, kaynağında ayrı toplanan atıkların geri kazanıma veya bertarafa gönderilmek üzere bırakıldığı atık getirme merkezlerinin oluşturulması gerektiği hususu vurgulanmıştır. Ayrıca zincir marketler ile 400 m² üzerinde kapalı satış alanına sahip satış noktaları için de tehlikesiz nitelikteki kâğıt, cam, metal, plastik atıklar ile satışı yapılması durumunda pil, elektrikli küçük ev aletleri veya tekstil atıklarının ayrı olarak biriktirilmesi için toplama noktaları oluşturma yükümlülüğü getirilmiştir. Atık getirme merkezlerinin asgari alanı belediyelerin hizmet verdiği nüfusa istinaden belirlenmiştir. Alışveriş merkezlerinde mobil atık getirme merkezi kurulmasına dair ibareye yer verilmiştir (Sıfır Atık Yönetmeliği, 2019). Sıfır Atık Yönetimine geçiş için rehber olması amacıyla Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından kurum ve kuruluşlar özelinde Sıfır Atık Yönetim Sistemi Uygulama Kılavuzları yayımlanmıştır. Kurum ve kuruluşlar için ortak uygulama adımları şu şekildedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2020):

Çalışma Ekibinin Belirlenmesi

Sıfır atık yönetim sisteminin kurulması, uygulanması ve izlenmesinde sorumlu kişilerin belirlenmesi.

Planlama

- Atık türlerinin, kaynaklarının, mevcut ekipmanların belirlenmesi,
- Sorumlu personel durumunun değerlendirilmesi,
- Atık türü ve miktarına etki edebilecek faktörlerin tespit edilmesi.

Eğitim ve Bilinçlendirme Faaliyetleri

Sistemin yaygınlaştırılması için gerekli eğitim ve bilinçlendirme çalışmalarının yapılarak sisteme katılımın teşvik edilmesi.

İzleme, Kayıt Tutulması ve İyileştirme

Uygulamaya dair eksikliklerin ve sistemin geliştirilebilecek yönlerinin tespiti için periyodik olarak izleme yapılması ve kayıt altında tutulması (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2020).

Kılavuzlarda ayrıca sisteme geçecek kurum ve kuruluşlar için atık önleme ve azaltıma dair uygulama örnekleri bulunmakta olup örnek uygulamalar Tablo 1 ile verilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2020).

2019 yılının Temmuz ayında Türkiye Depozito İade Sistemi (TÜDİS) Projesi başlatılmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı himayesinde hazırlanan projede, Türkiye’de uygulanması planlanan depozito iade sisteminin teknik, idari ve mali yönden gereklilikleri üzerine çalışılmıştır. Depozito iade sistemi kapalı döngü geri dönüşüme imkân veren, kaynakların korunması, etkin geri dönüşümün ve yeniden kullanımın sağlanması için en verimli yöntemlerden biridir. Bu sebeple ülkemizde sisteme geçiş çalışmalarının başlatılması döngüsel ekonomiye uyum için de önemli bir adımdır. 2019 yılı Aralık ayında Geri Kazanım Katılım Payına İlişkin Yönetmelik yayımlanmıştır. Yönetmelik, poşetler için satış noktalarından, diğer ürünler için de piyasaya sürenlerden/ithalatçılardan geri kazanım katılım payı tahsil edilmesine dair usul ve esasları kapsamaktadır. Yine 2019 yılı Aralık ayında Atıkların Düzenli Depolanması’na Dair Yönetmelik’te Geçici Madde 1’e “Belediye atıklarının sıfır atık yönetim sistemine uygun olarak geri kazanımının sağlanması amacıyla çevre ile uyumlu fiziksel, kimyasal, biyolojik veya termal teknolojilerin kullanılması esastır. Bu teknolojilerin kullanıldığı ön işlem tesisleri ve kapasiteleri, 2035 yılında toplanan belediye atığı miktarının ağırlıkça en az %60’ı geri kazanılabilecek şekilde teşkil edilir.” ifadesi yer almaktadır.

2020 yılı Aralık ayında Türkiye Çevre Ajansı kurulmuştur. Ajansın başlıca görevleri;

- Depozito yönetim sistemini kurmak, kurdukmak, işletmek veya işletmirmek,
- Çevrenin iyileştirilmesine dair faaliyetlerde bulunmak,
- Geri kazanılabilir ürünlerin kullanımları sonrası ülke ekonomisine kazandırılmasına, sıfır atık yönetim sisteminin kurulmasına ve uygulanmasına katkı sağlamak,
- Kamuoyunda çevreye dair duyarlılık ve farkındalık oluşturmaktır.

2021 yılı Haziran ayında yeni Ambalaj Atıkları Kontrolü Yönetmeliği yayımlanmıştır. 2021 yılından itibaren ülke genelinde toplam geri dönüşüm ve geri kazanım hedefleri

Tablo 2, malzeme türüne göre geri dönüşüm oranları ise Tablo 3 ile verilmiştir.

Tablo 2’de görüldüğü üzere 2031 ve sonrası için verilen %70 hedefi oldukça yüksektir. Geri dönüşüm hedeflerine ulaşmadaki en önemli zorluklardan biri ambalajların diğer atıklarla karışık olarak toplanıp sonradan ayırmaya çalışılmasıdır. Ambalajlar bu şekilde toplandığı takdirde kontamine olmakta ve ekonomik değerini kaybetmektedir. Bu sebeple özellikle 2031 ve sonrası için belirlenen hedefe ulaşılması amacıyla kaynağında ayırma faaliyetlerinin yaygınlaştırılması, atık getirme merkezi sayılarının artırılması gerekmektedir. Bunun yanı sıra ülkemizde içecek ambalajları için depozito iade sisteminin uygulanmaya başlamasıyla bu ambalajların temiz olarak toplanması sayesinde belirlenen hedeflere ulaşılmasının daha kolay olacağı öngörülmektedir. Tablo 3 ile verilen hedefler malzeme bazında belirlenmiştir. Bu hedeflere ulaşılması için kaynağında ayırmayla birlikte yeni ürün üretiminde geri dönüştürülmüş malzeme kullanımına yönelik minimum oranların belirlenmesi de önem arz etmektedir. Ambalajın üretim sürecinde geri dönüştürülmüş malzeme olarak

kullanılmasında kalite süreçlerinin etkilenmemesi için diğer atıklarla karışmadan temiz olarak toplanmış olması gerekmektedir. Bunlara benzer çalışmalarla geri dönüşüm hedeflerine yönelik eylemler uygulandığında sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmanın önü de açılacaktır.

2021 yılı Temmuz ayında Yeşil Mutabakat Eylem Planı yayımlanmıştır. Eylem planında iklim değişikliği ile mücadele, yeşil finansman, AB sınırda karbon düzenlemesi, yeşil ve döngüsel bir ekonomi, temiz, ekonomik ve güvenli enerji arzı, sürdürülebilir tarım, sürdürülebilir akıllı ulaşım ve diplomasi başlıklarında olmak üzere çok geniş bir alanda atılacak adımlar yer almaktadır. Planda, 2021 yılında çevre etiketi ve atık yönetimi konularında başta Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler (KOBİ) olmak üzere firmaların bilgilendirilmesi, yemek artığı ve atıklarının geri dönüşümünün sağlanmasına yönelik farkındalık yaratma ve tüketicinin bilinçlendirilmesi çalışmalarının yapılması hedeflenmiştir.

2022 yılında Ulusal Döngüsel Ekonomi Eylem Planı hazırlanması öngörülmektedir. Bu kapsamda geri kazanılmış ikincil ürün ve malzeme kullanımı için teknik kriterlerin belirlenmesi hedeflenmektedir. Yeşil OSB ve Yeşil Endüstri Bölgesi Sertifikasyon sisteminin uygulamaya alınmasına yönelik olarak teknik ve idari çalışmaların tamamlanmasının da aynı zaman diliminde gerçekleştirilmesi öngörülmektedir. Çevre etiketi sisteminin 2023 yılında yaygınlaştırılması, tarımsal üretimde atık ve artıkların tekrar değerlendirilmesi konusunda AR-GE çalışmalarının 2024 yılında tamamlanması planlanmaktadır. 2022-2027 yılları arasında ise IPA fonları ve uluslararası finansman kaynakları kullanılarak sanayinin yeşil ve döngüsel ekonomiye geçişine ve emisyon azaltımına katkı sağlanması ele alınacaktır (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2021). İklim değişikliğinin azaltılması için 2016 yılında yürürlüğe giren Paris Anlaşması, 2021 yılı Ekim ayında ülkemizde de onaylanmıştır. İnsan kaynaklı sera gazı salımlarının sonucu olan küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme kıyasla 2 °C’nin altında tutulması anlaşmanın başlıca hedefi olmakla birlikte, sıcaklık artışının 1,5 °C’nin altında tutulmasına odaklanılması hususu da vurgulanmaktadır. Paris Anlaşması’nda ayrıca iklim değişikliğine karşı uyum sağlama yeteneğinin artırılması, gıda üretimini olumsuz etkilemeyecek şekilde düşük sera gazı emisyonlarının teşvik edilmesi, düşük sera gazı emisyonu ve iklim değişikliğine dayanıklı kalkınma doğrultusunda finans akışlarının oluşturulması hedeflenmektedir (United Nations, 2015).

Sıfır atık yönetimine geçiş ve döngüsel ekonomi konseptine uyum açısından destekleyici mevzuatın yanı sıra ilgili sektörlerin de çalışmaları mevcuttur. Türk Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği (TÜSİAD) tarafından yayınlanan raporda Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Döngüsel Ekonomi Eylem Planı’nın Türk iş dünyasına getirilerine yer verilmiştir. Rapora göre Türkiye’nin ara mallarda dışa bağımlılığı hızlı bir artış göstermektedir. Enerji bağımlılığı da hesaba katıldığında %23 seviyelerinde olan bu oran enerji dâhil edilmediğinde %16 civarındadır. İhracatta ise ara malın ithalat payı 2016 itibarıyla %42,2’dir. Döngüsel ekonomiye geçişle birlikte kaynak kullanımındaki verimlilik dışa bağımlılığı azaltacaktır. Döngüsellik kavramı yalnızca bir uygulama değişikliğinden ibaret olmamakla birlikte farklı bir ekonomik modele geçişi de başlatacaktır. Bu sebeple veriye dayalı süreçlerin geliştirilmesinin, mevzuat hazırlığı sürecinde iş dünyasının ve sektörün etkin katılımı için yeterli sürenin verilmesinin başarılı bir sistem kurgulanması için önem arz ettiği belirtilmiştir (Avrupa Yeşil Mutabakatı Döngüsel Ekonomi Eylem Planı Türk İş Dünyasına Neler

Tablo 1 Atık önleme/azaltım uygulamalarına örnekler (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2020).

Atık Türü	Öneri
Genel öneri	<ul style="list-style-type: none"> Tüketimi teşvik eden faaliyetlerin azaltılması, alışverişlerde ürünün fiyatı ve alım gücünden önce ihtiyaç olup olmadığının değerlendirilmesi
Kâğıt	<ul style="list-style-type: none"> Bütün yazışmaların elektronik olarak yapılması Basılacak broşür, katalog vb. sayısının asgariye indirilmesi, mümkünse web sayfasından erişimin sağlanması Rapor ve çıktıların basılı olarak talep edilmemesi, elektronik ortamda alınması El ilanları ve afişler yerine dijital ekranların, duyuru/ilan panolarının kullanılması Kitap takas günleri düzenlenerek kullanılmayan kitapların değerlendirilmesi Kâğıt atıklarının önlenmesine ve azaltımına yönelik eğitim kurumları, kamu kurumları, ticari işletmeler ve sitelere yönelik eğitim/bilinçlendirme çalışmaları yapılması
Plastik	<ul style="list-style-type: none"> Ambalajlı ürün tüketiminin azaltılmasına yönelik olarak farkındalık kampanyaları düzenlenmesi Tek kullanımlık plastik tabak, bardak yerine yeniden kullanılabilir ürünlerin tercih edilmesi Plastik şişelerdeki sular yerine katlardaki su otomatlarının tercih edilmesi, personelin kendi bardaklarını veya mutfakta bulunan bardakları kullanması
Toner kartuş	<ul style="list-style-type: none"> Tekrar doldurulabilen kartuş alınması Yazışmaların elektronik ortamda yapılması ile fotokopi makinalarına olan ihtiyacın azalması
Atık piller	<ul style="list-style-type: none"> Atık pil azaltımı için şarj edilebilir pillerin tercih edilmesi
Gıda atığı	<ul style="list-style-type: none"> Yemek hazırlama sırasında tüketim tarihi/son tüketim tarihi yaklaşmış malzemelerin öncelikli olarak değerlendirilmesi Tabakta kalan yemeğin paketlenabilir olması durumunda müşteriye yalnızca gıda hijyenini koruyacak düzeyde ambalaj kullanılarak paket servis sunulması Gıda bağıışı yapılması, ihtiyaç fazlası gıdaların ihtiyacı olanlara verilmesi Tabakta kalan yemeklerin hayvan yemi üretiminde kullanılmasının sağlanması
İnşaat ve yıkıntı atıkları	<ul style="list-style-type: none"> Ömrünü tamamlamamış malzemelerin /yapıların kullanımına devam edilmesi Yıkım öncesi malzemelerin (ahşap, cam, çerçeve vb.) ayrılması,
Hacimli atıklar (masa, sandalye, dolap, vb. atıklar)	<ul style="list-style-type: none"> Kullanılmış eşya tadilat atölyeleri ve değış-tokuş alanlarında bu malzemelerin değerlendirilmesi İhtiyaç fazlası veya kullanılmayan ürün/malzemelerin ihtiyaç sahipleriyle paylaşılması, tekrar kullanımı veya yeniden dizayn edilerek başka bir ürün olarak kullanılması Tamir ederek ürünlerin kullanım ömrünün uzatılması,
Tekstil atıkları	<p>İhtiyaç fazlası veya kullanılmayan ürün/malzemeleri kullanabilecek olan kişilerle paylaşılması, tekrar kullanımı veya yeniden dizayn edilerek başka bir ürün olarak kullanılması,</p>
Sanayi tesisleri proses atıkları	<ul style="list-style-type: none"> Mevcut En İyi Tekniklerin kullanılması Atık önleme ve azaltımına yönelik proses ve hammadde tercih edilmesi Oluşan atıkların tesis içi geri kazanımının sağlanması (Plastik üretimi yapılan bir işletmede elektrik kesintisi, makine arızası vb. sebeplerle oluşan firelerin üretime dâhil edilmesi vb.) Endüstriyel simbiyoz uygulamaları ile atıkların yan ürün, alternatif hammadde ve ek yakıt olarak kullanım olanaklarının değerlendirilmesi

Tablo 2 Toplam geri dönüşüm ve geri kazanım hedefleri (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Yıllar	Toplam geri kazanım oranı (%)	Toplam geri dönüşüm oranı (%)
2021 -2025 yılları arasında her bir yıl için (2025 dâhil)	60	55
2026 -2030 yılları arasında her bir yıl için (2030 dâhil)	-	65
2031 ve sonrası	-	70

Tablo 3 Malzeme bazlı geri dönüşüm hedefleri (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Yıllar	Malzeme cinsi bazlı yıllık geri dönüşüm oranı (%) (yeniden kullanıma hazırlama dâhil)				
	Cam	Plastik	Metal	Kâğıt/Karton	Ahşap
2026' ya kadar	70	55	60	75	25
2031' e kadar	75	55	70	85	30
2031 ve sonrası	75	55	70	85	30

İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği (SKD) ile Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD) 2016 yılında Döngüsel Ekonomi Platformu'nu kurmuştur. Platformun amacı döngüsel ekonomi alanındaki bilgi/kaynak ihtiyacının giderilmesi, ölçüm mekanizmalarının sunulması, teknik hibe destekleri sağlanması ve işbirliği olanaklarının yaratılmasıdır (Döngüsel Ekonomi Platformu, 2022). 11. Kalkınma Planı'nda da Bölgesel Kalkınma Ajansları tarafından temiz üretim uygulamalarının desteklenmeye devam edeceği belirtilmektedir. Sanayi ve Teknoloji Stratejisi 2023'te, özellikle yeşil üretim, Yeşil Organize Sanayi Bölgesi (OSB) ve OSB'lerdeki temiz üretim yatırımlarının desteklenmesine önem verilmektedir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı önderliğinde, AB uyum çalışmaları kapsamında atık sayılmaktan çıkma (End-of-Waste) kriterlerinin belirlenerek ikincil hammadde kavramının yaygınlaştırılmasına yönelik proje çalışmaları EBRD desteğiyle yürütülmüştür. Buna yönelik yol haritası belirlenmiş ve çalışmaların AB destekli yeni bir proje ile devam etmesi planlanmıştır. Üretimde eko-tasarım ve eko-etiket uygulamalarına yönelik çalışmalar da yapılmaktadır. Enerji İle İlgili Ürünlerin Çevreye Duyarlı Tasarımına İlişkin Yönetmelik'te ürünlerin piyasaya arz edilebilmesi için tasarımlarına dair kriterler belirlenmekte ve enerji tüketimi ile çevresel etkilerin minimum düzeye indirilmesi amaçlanmaktadır (Döngüsel Ekonomi Platformu, 2022). İş dünyasında plastik kirliliğin azaltılmasına yönelik de önemli gelişmeler yaşanmış ve 34 şirket plastik kirliliği ile mücadele için taahhütlerini açıklamıştır (SKD Türkiye, 2021).

3. Sonuç

Avrupa ve Dünya'da benimsenen yeni atık yönetimi konseptleri ve döngüsel ekonomi yaklaşımına dair ülkemizin de önemli adımlar attığı ve uyum sürecinde gereken yolu izlediği görülmektedir. Mevzuat altyapısı yeni ihtiyaçlara göre şekillenmektedir. Bu noktada mevzuat hedeflerinin uygulanabilir ölçekte belirlenmesi önem arz etmektedir.

Kaynakların korunması için ambalaj atıklarının kaynağında ayrı toplanmasına özen gösterilmesi gerekmektedir. Bu sayede temiz toplanan ambalajlar üretim süreçlerine dâhil edilebilecek, birincil hammaddeye duyulan ihtiyaç azalacak ve döngüsel ekonomi konseptine uyum kolaylaşacaktır. Ambalaj atıklarının ayrı toplanmasında halkın yüksek oranda katılımının sağlanması için ambalaj atığı konteynerlerinin sayısının artırılması da önemlidir.

Kentsel katı atığın ağırlıkça büyük kısmını oluşturan biyobozunur atıklar kaynağında ayrı toplandığı süreçte

kompostlaştırma, biyometanizasyon, yem üretimi vb. birçok alternatif alanda yeniden değerlendirilebilmektedir. Özellikle pazar ve hâl atıklarının diğer atıklara karışmadan kaynağında ayrı toplama sistemi kolaylıkla uygulanabileceğinden bu atıkların hiçbir şekilde karışık atık konteynerlerine atılmaması ve doğrudan değerlendirilmesi için gerekli organizasyonun sağlanması önerilmektedir.

Atık yönetimi için belirlenen stratejiler doğrultusunda doğru uygulamalar yapıldığı takdirde atığın yalnızca az bir kısmı düzenli depolama sahalarına gönderileceğinden, ilgili sahaların vaktinden önce dolması önlenirken çevresel ve ekonomik olarak da birçok fayda sağlanabilecektir.

Depozito iade sistemi, şişeden şişeye geri dönüşümün sağlanması, özellikle PET ambalajların kimyasal işlemlere tâbi tutulmadan fiziksel geri dönüşümünün sağlanarak tekrar aynı amaçla kullanılması için en uygulanabilir sistemlerdendir. Depozito iade sisteminde tüketici içecek ambalajı için bedel ödediğinden ambalajları iade sürecine daha etkin katılımı sağlanabilmektedir.

Sonuç olarak sıfır atık yönetimi ve döngüsel ekonomiye geçiş sürecinde küresel ölçekte adımlar atılmaktadır. Kaynakların ve çevrenin korunması için özel sektör, kamu ve halkın katılımının sağlanacağı sürdürülebilir bir sıfır atık yönetim modeli oluşturulması önem arz etmektedir. Döngüsel ekonomi ilkelerinin de benimsenerek gerekli adımların bütüncül bir bakış açısı ile atılmasıyla politika ve stratejilerin daha sürdürülebilir olarak belirlenmesi ve uygulamaya geçmesi mümkün olacaktır.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

4. Kaynaklar

(2021). Avrupa Yeşil Mutabakatı Döngüsel Ekonomi Eylem Planı Türk İş Dünyasına Neler Getirecek? TÜSİAD.

csb.gov.tr. (2022, Mart). <https://csb.gov.tr/bakan-murat-kurum-turkiyenin-ilk-iklim-surasinda-konustu-bakanlik-faaliyetleri-32051> adresinden alındı

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2019, 07 12). Sıfır Atık Yönetmeliği.

- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2020). SIFIR ATIK YÖNETİM SİSTEMİ UYGULAMA KILAVUZU.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021, 06 26). Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği.
- Döngüsel Ekonomi Platformu. (2022). 07 16, 2021 tarihinde <https://donguseleekonomiplatformu.com/hakkimizda.html> adresinden alındı
- Döngüsel Ekonomi Platformu. (2022). 07 16, 2021 tarihinde https://donguseleekonomiplatformu.com/knowledge-hub/article_5-hukümetler-ne-yapiyor_15.html?page=3#articlePageTitle adresinden alındı
- ellenmacarthurfoundation.org. (2022, Mart). <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram> adresinden alındı
- ellenmacarthurfoundation.org. (2022, Mart). <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> adresinden alındı
- European Commission. (2018, 07 04). COUNCIL DIRECTIVE 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- European Commission. (2018, 07 05). DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.
- European Commission. (2018, 07 04). EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL DIRECTIVE 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste.
- European Commission. (2019). https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/protecting-environment-and-oceans-green-deal_en adresinden alındı
- European Commission. (2019, 06 12). DIRECTIVE (EU) 2019/904 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment.
- European Commission. (2019). Europa. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en adresinden alındı
- European Commission. (2020, 10 14). Chemicals Strategy for Sustainability Towards a Toxic-Free Environment.
- European Commission. (2020). Farm to Fork Strategy.
- European Commission. (2020, Mart 11). New Circular Economy Action Plan.
- European Commission. (2021, 04 19). ACTION PLAN FOR THE DEVELOPMENT OF ORGANIC PRODUCTION. https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/farming/organic-farming/organic-action-plan_en adresinden alındı
- European Commission. (2021, 05 12). Action Plan: 'Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil'.
- European Commission. (2021). The EU Blue Economy Report 2021.
- European Commission. (2022). Europa. https://ec.europa.eu/food/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en adresinden alındı
- Milliyet. (2021, 01 01). 07 16, 2021 tarihinde <https://www.milliyet.com.tr/ekonomi/son-dakika-plastik-posette-buyuk-tasarruf-yuzde-75-azaldi-6394741> adresinden alındı
- Sıfır Atık Mavi. (2022). 07 16, 2021 tarihinde <https://mavi.sifiratik.gov.tr/> adresinden alındı
- Sıfır Atık Yönetmeliği. (2019). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- sifiratik.gov.tr. (2022, Mart). <https://sifiratik.gov.tr/kutuphane/haberler/emine-erdogan-25-bin-kamu-kurumu-binasinda-sifir-atiga-gectik> adresinden alındı
- SKD Türkiye. (2021, 06 08). 07 16, 2021 tarihinde <http://www.skdturkiye.org/haber/sirketler-plastik-kirliligine-karsi-harekete-geciyor> adresinden alındı
- (2019). The European Green Deal. European Commission.
- trthaber.com. (2021, Eylül). <https://www.trthaber.com/haber/ekonomi/4-yilda-sifir-atik-sayesinde-kazanilanlar-611629.html> adresinden alındı
- Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı. (2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2021). Dış Ticaret İstatistikleri. https://www.kmo.org.tr/resimler/ekler/d5e10e038d7b224_ek.pdf adresinden alındı
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2021, Şubat 26). TÜİK. <https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=madde%20ak%C4%B1%C5%9F&dil=1> adresinden alındı
- United Nations. (2015). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamındaki Paris İklim Anlaşması.
- Zero Waste. (2022). <https://zerowaste.co.nz/why-zero-waste/> adresinden alındı

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Arıtma Çamurlarının Yönetimi ve Maliyeti: Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetimi Projesi

Ayşe FİLİBELİ¹, Azize AYOL², Nurdan BÜYÜKKAMACI³

Yazışma yazarı:

Ayşe FİLİBELİ,

ayse.filibeli@deu.edu.tr

Referans:

Filibeli, A., Ayol, A., Büyükkamacı, N., (2022), Arıtma Çamurlarının Yönetimi ve Maliyeti: Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetimi Projesi, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23(1) 79–90.

Makale Gönderimi : 27 ŞUBAT 2022

Online Kabul : 1 OCAK 2022

Online Basım :30 MAYIS 2022

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, Türkiye. ORCID:0000-0003-2475-7246

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, Türkiye. ORCID:0000-0002-2095-1132

³Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, Türkiye. ORCID: 0000-0003-4801-9846

Özet Atıksu arıtımında giriş atıksuyunun özellikleri ve arıtma için uygulanan işlemlerin verimine bağlı olarak farklı özelliklerde ve miktarda arıtma çamuru oluşmaktadır. Arıtma çamurlarının yararlı amaçlarla kullanılması ve/veya nihai olarak uzaklaştırılmasındaki uygulamalar, çevresel, teknik ve ekonomik uygulanabilirliği olan sürdürülebilir çözüm seçeneklerini içeren bir yönetim sistemi içinde düşünülmelidir. Çevresel kriterlerin sağlanmasına yönelik olarak uygulamadaki mevzuat ve politikalar doğrultusunda değerlendirmelerin yapılması, bölgesel özellikler ve mevcut olanaklar dikkate alınarak en uygun yönetim sistemine karar verilmesi gerekmektedir. Bu makalede, evsel/kentsel ve endüstriyel arıtma çamurlarının yönetimini belirlemek üzere dikkate alınması gereken esaslar verilerek değerlendirilmektedir. Anılan çalışmada, Gediz Havzası örneğinde mevcut/İNŞAAT halinde/planlanan atıksu arıtma tesislerinde oluşan ve gelecekte oluşması muhtemel arıtma çamuru miktar ve özelliklerinin belirlenmesi, atıksu arıtma tesislerinde arıtma çamuru miktarının azaltılmasını sağlayan prosesleri de dikkate alarak, oluşan/oluşacak arıtma çamurlarının işlenmesi, yararlı kullanımı/geri kazanımı ve nihai olarak bertaraf edilmesine yönelik çözüm önerileri getirilmektedir. Mevcut mevzuat doğrultusunda, çevre politikaları ile uyumlu, yenilikçi teknolojilerin kullanımına olanak sağlayabilen, mevcut ve planlanan yatırımları da dikkate alarak; kısa, orta ve uzun vadede çevresel ve ekonomik olarak uygulanabilir bir çamur yönetim sisteminin oluşturulması ve yaklaşık birim maliyetlerin çıkarılmasına yönelik olarak yapılan çalışmaların sonuçları değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arıtma çamuru, çamur yönetimi, atıksu arıtımı, havza planlama

Sludge Management and Cost of Sludge Treatment: Sludge Management Project of Gediz River Basin

Abstract Depending on the influent wastewater characteristics and the efficiencies of the applied treatment processes, sludge have been produced in different amounts and characteristics. The applications to be used for the beneficial use and/or final disposal of sludge should be handled within a management systematic that includes alternative solution options that are environmentally compatible, economically and ecologically viable, and sustainable. It is necessary to make evaluations in line with the legislation and policies in order to meet the environmental criteria, and to decide the most appropriate management system, taking into account regional properties and existing opportunities. In this study, the basic principles that should be taken into account in the preparation of a road map for the management of domestic/urban and industrial sludge are evaluated. In the example of Gediz River Basin; the studies on identification of the existing domestic/urban and industrial wastewater treatment plants; estimation of the amount of sludge produced in the wastewater treatment plants; applications for the sludge reduction; evaluation of the sludge properties with respect to environmental legislation; establishment of alternative management scenarios and cost analysis are discussed in detail.

Keywords: Sludge, sludge management, wastewater treatment, water basin planning

1. Giriş

Atıksuların sürdürülebilir ve güvenli yönetimi toplum sağlığı ve sürdürülebilir sosyo-ekonomik kalkınmanın esasını oluşturmaktadır. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi 2030, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 6.2, her birey için yeterli ve adil sanitasyon ve hijyene erişimin sağlanması; 2030 yılına kadar ülkelerin arıtılmamış atıksu oranlarını yarıya indirmeleri gerektiği ve geri dönüşüm-yeniden kullanım proseslerinin önemli boyutta artırılması gerektiğini vurgulamaktadır (Spinosa ve Doshi, 2021). Atıksu arıtma tesislerinde, atıksu ve arıtma çamurlarına uygulanan işlemler, elde edilen son ürünün miktar ve kalitesini etkiler; son ürünün yararlı amaçlara yönelik kullanımı ve/veya nihai olarak uzaklaştırılmasında önem taşır. Son yıllarda, arıtma çamuru, nihai olarak uzaklaştırılması gereken bir atık olarak değil, enerji ve materyal kazanımının sağlandığı; toprak şartlandırma, yapı malzemesi olarak kullanım gibi yararlı kullanım alternatifine sahip bir kaynak olarak ele alınmaktadır (Canziani ve Spinosa, 2019; Filibeli, 2019, Grobelak vd., 2019, Papa vd., 2017).

2. Arıtma Çamuru Tanımı, Miktar ve Özellikleri

Arıtma çamuru, herhangi bir su/atıksu arıtma işleminin kaçınılmaz atık/yan ürünüdür ve arıtılmış atıksuyun yalnızca %1-2'sini oluşturmasına rağmen, orijinal kirliliğin önemli bir kısmını içerir. Ulusal ve uluslararası mevzuatta arıtma çamuru ile ilgili çeşitli tanımlamalar mevcuttur. Bu tanımlar, arıtma çamuru yönetimi yöntemlerini sınırladıkları için önemlidir. 91/271/EEC AB Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi'nde "arıtılmış veya arıtılmamış, kentsel atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuru" tanımının yer aldığı, sadece kentsel atıksu ile ilgili olduğu ve endüstriyel atıksuları kapsamadığı görülmektedir (Council Directive 91/271/EEC, 1991). 86/278/EEC nolu AB Çamur Direktifi'nde, evsel/kentsel veya benzer özellikteki tüm arıtma çamurlarını içeren geniş bir tanım mevcut olup, ham ve stabilize arıtma çamurları ile septik tank çamurlarını içeren geniş bir tanımlama yapılmıştır (Council Directive 86/278/EEC, 1986). USA EPA Part 503 (40 CFR Part 503) Arıtma Çamurlarının Kullanımı veya Nihai Uzaklaştırılması için Standartlar kapsamında sadece evsel atıksu arıtımı sırasında üretilen çamur ve septik tank çamuru ile ilgili tanım verilmektedir. Tehlikeli Atıkların Yönetimini esas alan EPA 40 CFR 260 (40 CFR Part 260, n.d.)'de arıtılmış atıksu hariç, bir kentsel, ticari veya endüstriyel atıksu arıtma tesisinden; su arıtma tesisinden veya hava kirliliği kontrol tesisinden üretilen katı, yarı katı veya sıvı atık şeklinde geniş bir tanım verilmiş olup, elektrokaplama çamuru dâhil hem endüstriyel hem de kentsel arıtma çamurunu içermektedir. Ulusal mevzuatta Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik'te, ham ve stabilize çamur tanımlaması yapılmış olup, evsel ve kentsel atıksu arıtımı sırasında oluşan, evsel/kentsel atıksulara benzer bileşimdeki atıksuların arıtımından kaynaklanan ham ve stabilize arıtma çamurlarının kullanım kısıtları ve yasaklarını kapsamaktadır (Resmî Gazete, Sayı: 27661). Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği ise kentsel atıksuların toplanması, arıtılması ve deşarjı ile belirli endüstriyel sektörlerden kaynaklanan atıksu deşarjları ile ilgili esasları içermektedir; arıtma çamurlarının toprakta kullanımı için ilgili yönetmeliğe atıf yapılmaktadır (Resmî Gazete, Sayı: 26047). Genel anlamda bakıldığında, bu tanımların hem kentsel hem de endüstriyel çamuru kapsadığı; ancak kentsel arıtma çamuru ile ilgili düzenlemelerin daha yaygın olduğu görülmektedir.

Atıksu arıtma tesislerinde (AAT), tipik olarak, yoğunlaştırma ve susuzlaştırma öncesinde, atıksu giriş debisinin yaklaşık %1-2'sini oluşturan arıtma çamuru organik madde, çeşitli besi elementleri, ağır metaller, organik ve inorganik mikro kirleticiler ile bakteri, virüs, helmint veya protozoa gibi patojenler içerir.

Genel olarak, stabilize arıtma çamuru %30-55 organik madde, yaklaşık %3 toplam azot, %0.7-%1.5 toplam fosfor, %0.7 toplam potasyum, %10-20 C/N oranı ve farklı konsantrasyonlarda ağır metal içermektedir. Arıtma çamurunun pH'ı normalde 6.5-7.5 aralığındadır. Kurutulmuş çamurun ısı değeri yaklaşık 12.000–15.000 kJ/kg KM'dir. Septik tanklardan gelen fekal arıtma çamuru, karşılaştırılabilir seviyelerde besin bileşikleri içermekle birlikte, genellikle atıksu arıtma tesislerinde üretilen çamurdan daha yüksek askıda katı madde içeriğine (%1'e karşı yaklaşık %3) ve daha yüksek KOİ değerlerine (> 10.000 mg/L) sahiptir. Yüksek düzeyde fekal koliform (1×10^5 cfu/100 mL) ve helmint yumurtaları (16.000 sayı/L'ye kadar) içerebilir. Bu tür çamurlar benzer şekilde arıtılabilir. Endüstriyel arıtma çamurları sektör ve alt sektör bazında kaynağına göre çok çeşitli fizikokimyasal özelliklere sahiptir, örneğin çok yüksek konsantrasyonlarda toksik bileşimler ve elementler içerebilir (Wiśniowska vd., 2019). Kentsel atıksu arıtma tesislerinde kaynağına göre tipik çamur miktarları, katı madde içeriği (KM) ve besi maddesi içerikleri Tablo 1'de özetlenmektedir (Spinosa ve Doshi, 2021).

Toplam nüfusun yaklaşık 500 milyon olduğu Avrupa Birliği ülkelerinde, çamur üretimi 13 Mt/yıl'ın üzerindedir ve kişi başına yılda kuru madde (KM) olarak 10 ila 15 kg (27-41 g KM/kişi/gün) arıtma çamuru üretilmektedir (Grobelak vd., 2019). Türkiye'de TÜİK Atık İstatistiklerine göre bertaraf ve geri kazanım yöntemlerine göre kentsel atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuru miktarı 2020 yılı için toplam 314325,4 ton KM olarak verilmektedir (TÜİK, Atık İstatistikleri, 2020). Ülkemizde kişi başına çamur üretimi yılda kuru madde (KM) olarak 36 g KM/kişi/gün olarak belirlenmiştir (TÜBİTAK KAMAG 108G189, 2013).

Atıksu arıtma tesisine gelen atıksuyun özelliklerine ve kullanılan arıtma işlemine bağlı olarak değişen miktar ve özellikte arıtma çamuru oluşmaktadır. Biyolojik arıtma yöntemi olarak klasik aktif çamur sistemleri ve çeşitli modifikasyonları yaygın kullanılmaktadır. Özellikle nüfus yoğunluğunun fazla olduğu yerleşimlerde biyolojik olarak azot ve fosfor gideriminin sağlandığı anaerobik/aerobik (A/O), anaerobik/anoksik/aerobik (A2/O), ardışık kesikli reaktör (AKR), Bardenpho ve University of Cape Town (UCT) gibi arıtma işlemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Küçük yerleşim birimlerinde ise sıklıkla aktif çamur sistemleri tercih edilmektedir. Endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde ise kullanılan atıksu arıtma prosesi gelen atıksu özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma uygulamaları gerçekleştirilmekte olup, biyolojik arıtma yöntemi olarak aktif çamur ve modifikasyonları kullanılmaktadır. Arıtma çamurlarının işlenmesinde uygulanan belli başlı prosesler: ön işlemler, yoğunlaştırma (graviteli, flotasyon, santrifüj, bantlı yoğunlaştırıcılar ile), stabilizasyon (anaerobik çürütme, aerobik çürütme, alkali işlemler vb.), susuzlaştırma (doğal veya mekanik yöntemler) ve son işlemlerdir (Metcalf ve Eddy, 2003). Bu prosesler, oluşan çamur hacminin azaltılmasının yanı sıra, koku, patojen giderimi ve vektör üremesinin engellenmesi amacıyla belli bir kombinasyonda uygulanmaktadır. Çamur işleme süreçleri sonucunda kalan çamur kuru madde olarak hala önemli miktardadır ve dolayısıyla atıksu arıtma sürecinde toplam işletme maliyetinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Arıtma çamurlarının işlenmesi sırasında uygulanan prosesler, bir sonraki ünitenin performansını ve nihai ürünün kalitesini de etkiler. Bu prosesler, son ürünün farklı amaçlara yönelik olarak yararlı kullanımı ve/veya nihai uzaklaştırılmasında en önemli aşamaları oluşturmaktadır. Uygulanacak son işlem olarak: zirai alanda ve/veya toprakta kullanım, düzenli depolama, kurutma ve yakma seçenekleri tercih edilmektedir. Bu yöntemlerin seçiminde arıtma çamurlarının özellikleri, bölgenin jeolojik, hidrojeolojik ve iklim özellikleri, mevcut ekonomik ve teknik imkânlar göz önünde bulundurulmaktadır. Atıksu arıtma işlemleri sırasında bir yan ürün/atık olarak oluşan ve nihai olarak uzaklaştırılması gereken

arıtma çamuru, kalitesine bağlı olarak enerji ve materyal kazanımının sağlandığı bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Filibeli ve Ayol, 2010, Gediz Havzası Projesi, 2017, Kusch-Brandt vd., 2021).

Ülkemizde evsel/kentsel arıtma çamurlarının yararlı kullanımı amacıyla yaygın kullanılan yöntem zirai alanda ve/veya toprakta uygulamadır. Atıksu arıtma tesislerinin nitrifikasyon ve fosfor giderimi aşamalarından kaynaklanan azot ve fosfor, arıtma çamuru içeriğinde biriken ve gübre değeri olan değerli besi elementleridir. Bu nedenle gübre veya toprak iyileştirici materyal olarak düşünülerek ticari gübre kullanımı yerine tercih edilebilmektedir. Bu değerli besi maddelerinin yanı sıra, beslenme zincirine girdiğinde zararlı etkileri olabilen ağır metaller, dezenfektanlar, patojenler ve organik kirleticiler gibi diğer bazı elementleri de içerebilir. Dolayısıyla bu kirleticilerin insan, flora, fauna ve çevre sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri nedeniyle toprakta kullanım seçeneği çok dikkatle ele alınmalıdır. Sürdürülebilir çamur yönetimi sadece hacim ve kütle azaltılmasını değil, aynı zamanda zararlı bileşenlerin canlı yaşam ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin önlenmesi ve yararlı materyalin geri kazanılmasını da kapsar (Gediz Havzası Projesi, 2017, Filibeli vd., 2018).

Nihai uzaklaştırma amacıyla günümüze kadar en yaygın uygulanan yöntem, kentsel katı atık depolama sahalarında düzenli depolamadır. Bu yöntem, yüksek nakliye gideri, geniş

alan ihtiyacı olması, arazi kontrolündeki sıkıntılar yaşanması, çamur nakliyesindeki zorluklar ve işlem görmeyen çamurların depolanmasında ilave kireç ekleme ve gaz çıkışı kontrolü gerektirmesi gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Arazi kullanım ve depolama imkânı yok ise uygun çözüm kurutmadır. Kurutma ile etkili bir dezenfeksiyon sağlanması sonucu arıtma çamuru bünyesindeki patojenik organizmalar da giderilmektedir. Ayrıca yüksek ısıya sahip olması nedeniyle ek yakıt olarak değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir. Kentsel katı atıklarla birlikte veya ayrı yakılması durumunda hacimsel olarak %95 oranında azalma sağlanırken, içeriğindeki patojenler ve toksik organik bileşikler de büyük oranda giderilerek, kokusuz son ürün elde edilmektedir. Enerji geri dönüşümünün sağlanması ve çıkan ürünün çimento üretiminde ara malzeme olarak kullanma imkânı olabilmektedir. Ancak yakma yöntemi, yüksek ilk yatırım ve işletme maliyeti, destek yakıt gereksinimi, karmaşık mekanik ve kontrol sistemi ve baca gazı emisyonlarının kontrolü gibi dezavantajlara sahiptir, karbon ayak izi yüksek olan bir prosestir (27721 sayılı Resmî Gazete, 2010). Bu alternatiflere ek olarak enerji elde edilmesine yönelik prosesler olan piroliz ve gazifikasyon işlemleri de uygulanmaktadır. Ancak bu proseslerin arıtma çamurlarına uygulanmasında tam ölçekli çalışmalardan elde edilen veriler oldukça sınırlıdır.

Tablo 1. Tipik çamur miktar ve özellikleri.

Çamur kaynağı	Miktar (L/kişi/gün)	Katı Madde (%)	Azot (%KM)	Fosfor (%KM)	Potasyum(%KM)
Ham ön çökeltim	0.9–2.2	2.0–8.0	1.5–5.0	0.3–2.8	<1.0
Ham aktif çamur	1.4–7.3	0.2–1.5	3.0–10.0	1.0–7.0	0.1–0.9
Ham ön çökeltim+aktif çamur	1.8–2.8	3.0–6.0	4.0–6.0	1.0–1.2	-
Çürük ön çökeltim+aktif çamur	0.6–1.0	2.0–12.0	1.0–6.8	0.2–5.7	<4.0
İleri arıtma	0.2–8.0	3.0–10.0	-	-	-

3. Arıtma Çamuru Miktarının Azaltılması

Sürdürülebilir atık yönetimi, çevrenin korunması ve kalitesinin iyileştirilmesi, insan sağlığının korunması, doğal kaynakların verimli ve rasyonel kullanımı, döngüsel ekonomi ilkelerini teşvik etmek, yenilenebilir enerji kullanımının ve enerji verimliliğinin artırılması için gerekli kriterlerin yerine getirilmesi olarak tanımlanabilir. Ekonomiyi döngüsel hale getirmek için, kaynakların korunması ve döngüyü kapatacak şekilde ürünlerin tüm yaşam döngüsüne odaklanarak sürdürülebilir üretim ve tüketime yönelik ek önlemler almak gereklidir. Kaynakların daha verimli kullanılması ve atığın bir kaynak olarak değerlendirilmesi ile önemli ölçüde tasarruf sağlanırken, toplam yıllık sera gazı emisyonları da azalacaktır. Kaynak kullanımının verimliliğini artırmak, ülkenin hammadde ithalatına olan bağımlılığını azaltmaya katkıda bulunabilir ve daha sürdürülebilir malzeme yönetimine ve döngüsel bir ekonomi modeline geçişi kolaylaştırabilir.

Avrupa Birliği ülkelerinde arıtma çamuru yönetimi, Atık Çerçeve Direktifi ile düzenlenmektedir (EC/2008/98). Atık Çerçeve Direktifine göre, atık önleme ve yönetimi mevzuatı ve politikasında atık hiyerarşisi: 1.Önleme, 2. Yeniden kullanım için ön hazırlık, 3. Geri dönüşüm, 4. Diğer geri kazanım işlemleri, 5. Nihai bertaraf öncelik sıralamasına göre uygulanmaktadır. Sürdürülebilir çamur yönetimi açısından, bu yaklaşımla tüm AB ülkelerinde en uygun teknolojiler kullanılarak mümkün olduğunca az çamur üretiminin sağlanacağı düşünülmektedir. Ülkemizde, arıtma çamurlarının yönetimi konusunda son yıllarda gerekli düzenlemeler Avrupa Birliği uyum süreci kapsamında yeniden gözden geçirilerek ilgili yönetmeliklerin içinde yer almaktadır. Atık önleme, kaynak verimliliğini artırmanın ve atıkların çevresel etkisini azaltmanın en etkili yoludur. Bununla birlikte, kaçınılmaz

bir atık türünü temsil ettiğinden, arıtma çamuru oluşumunu önlemek imkânsızdır. Bu nedenle, atık hiyerarşisinde sonraki önceliklere, yani yeniden kullanım için ön hazırlık (organik geri dönüşüm ve enerji geri kazanımı dâhil) veya nihai bertaraf edilmesine daha fazla önem verilmektedir. Atıkların denize atılması yasaktır ve biyolojik olarak parçalanabilen atıkların (ve dolayısıyla evsel/kentsel arıtma çamurunun) depolanması atıkların düzenli depolanmasına ilişkin 99/31/EC direktif ile sınırlandırılmıştır. Çamur yönetiminde ana esaslar bu tür atıkların doğal ve termal yöntemlerle işlenmesidir. Bu hususlar dikkate alındığında bertaraf etme yöntemleri iki gruba ayrılabilir: 1. Organik madde geri dönüşümü ve 2. Enerji ve materyal geri dönüşümü (Wiśniowska vd., 2019).

Arıtma çamurlarının yönetimi konusunda son yıllarda yeni yaklaşımlara yer verilmektedir. Yasal mevzuatta getirilen kısıtlamalar, maliyet artışı ve çamurun nihai bertarafındaki çeşitli hassasiyetler (mikro kirleticiler, mikroplastikler, toksik bileşenler vb.) gibi sebepler, arıtma çamuru yönetiminde çamur miktarının azaltılmasına (çamur minimizasyonu) yönelik stratejilerin araştırılması ve geliştirilmesi yönünde yapılan çalışmalara hız kazandırmıştır. Çamur minimizasyonu ile çamur işleme ünitelerinin hacim ve maliyetlerinde azalma sağlanırken, bu işlemler sonucunda bertaraf edilmesi gereken çamur miktarında da önemli azalma hedeflenmektedir. Çamur minimizasyonu amacıyla uygulanan işlemler: a) atıksu arıtımı aşamasında oluşan çamur miktarının azaltılmasına yönelik uygulanan ön işlemler (dezentegrasyon), b) oluşan çamurun kütle ve hacmini belli oranda azaltmayı sağlayan teknikler (kaynakta azaltma yöntemleri) olarak iki grupta toplanabilir. Çamur stabilizasyonu aşamasında, aerobik/anaerobik çürütücülerin verimini arttırmak ve çamur minimizasyonu amacıyla mevcut klasik çürütme proseslerinin modifikasyonlarının uygulandığı gerçek ölçekli

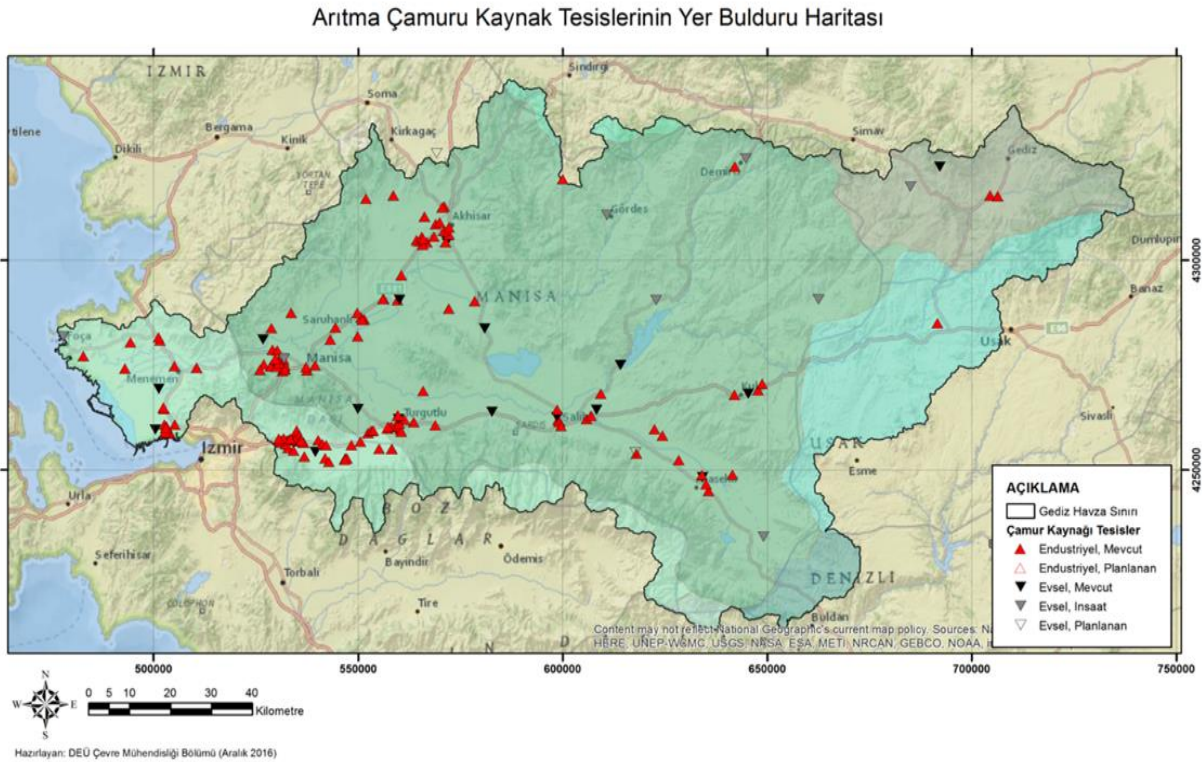
tesisler bulunmaktadır. Isıl işlem, ultrasonikasyon, klasik ve ileri oksidasyon işlemleri, enzim uygulaması gibi bilinen ön işlemler (dezentegrasyon), çamur miktarında azalma sağlarken çamurun su verme özelliklerini de geliştirir. Fakat en önemli dezavantajları ilave arıtma ünitelerinin getireceği yüksek yatırım ve işletme masraflarıdır (Gediz Havzası Projesi, 2017). Atıksu arıtımı aşamasında arıtma çamuru miktarının azaltılmasına yönelik uygulamaların bir kısmı laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalar olmakla birlikte gerçek ölçekte tesis uygulaması ile deneyimlenmiş olan prosesler de mevcuttur. Bu prosesler içsel ve dışsal aerobik, anoksik ve anaerobik çamur döngüleri yapmak ve farklı sistemlerin kombinasyonları olarak uygulanan sistemlerdir. Patentli isimler ile anılan bu proseslerde üretilen çamur miktarında %45-60 oranında azalma sağlanabilmektedir (Demir, O. vd., 2016; Galilee, U. vd., 2014; Erden, G. vd., 2010; Ayol, A., vd. 2008, Filibeli, A. vd., 2008).

4. Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetim Planı

Çamur arıtımı ve nihai olarak uzaklaştırılmasında, teknik, ekonomik ve sosyal bileşenleri tek başına sağlayabilen bir proses veya yöntem olmadıgından, bu bileşenlerin tamamını içeren bütünlük ve sürdürülebilir bir çamur yönetim sistemi içinde çözüm aramak gerekir (Filibeli, 2018). Bu çalışma kapsamında, Gediz Havzası örneğinde atıksu arıtma

tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının yönetimi için yol haritasını belirlemek üzere dikkate alınması gereken temel esaslar verilmektedir. Mevcut/İNŞAAT/planlanan atıksu arıtma tesislerinde üretilen ve gelecek projeksiyonuna göre oluşması muhtemel arıtma çamuru miktar ve özelliklerinin belirlenmesi, atıksu arıtma tesislerinde arıtma çamuru miktarının azaltılmasını sağlayan prosesleri de dikkate alarak, oluşan/oluşacak çamurların işlenmesi, yararlı kullanımı, enerji ve materyal geri kazanımı ve bertaraf edilmesine yönelik çözüm önerileri getirilmektedir. Mevcut mevzuat doğrultusunda, çevre politikaları ile uyumlu, yenilikçi teknolojilerin kullanımına olanak sağlayabilen, mevcut ve planlanan yatırımları da dikkate alarak çevresel ve ekonomik olarak uygulanabilir bir çamur yönetim sisteminin oluşturulmasındaki temel kriterler verilmektedir.

Ülkemizdeki 25 nehir havzasından biri olan Gediz Havzası, nüfusun, tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerin yoğun olduğu bir havzadır ve İzmir, Manisa, Kütahya ve Uşak havza sınırları içerisinde bulunan illerdir. Gediz Havzası'nda yoğunluklu olarak Manisa İli ve ilçeleri olmak üzere Manisa'nın 15, Kütahya'nın 3, İzmir ilinin 4 ilçesi ve Uşak il merkezi bulunmaktadır. Havzada mevcut, inşaat halinde ve planlanan tesislerin konumu Şekil 1'de gösterilmiştir (Gediz Havzası Projesi, 2017).



Şekil 1. Gediz Havzası'ndaki mevcut/İNŞAAT halinde/planlanan evsel ve endüstriyel tesislerin konumu.

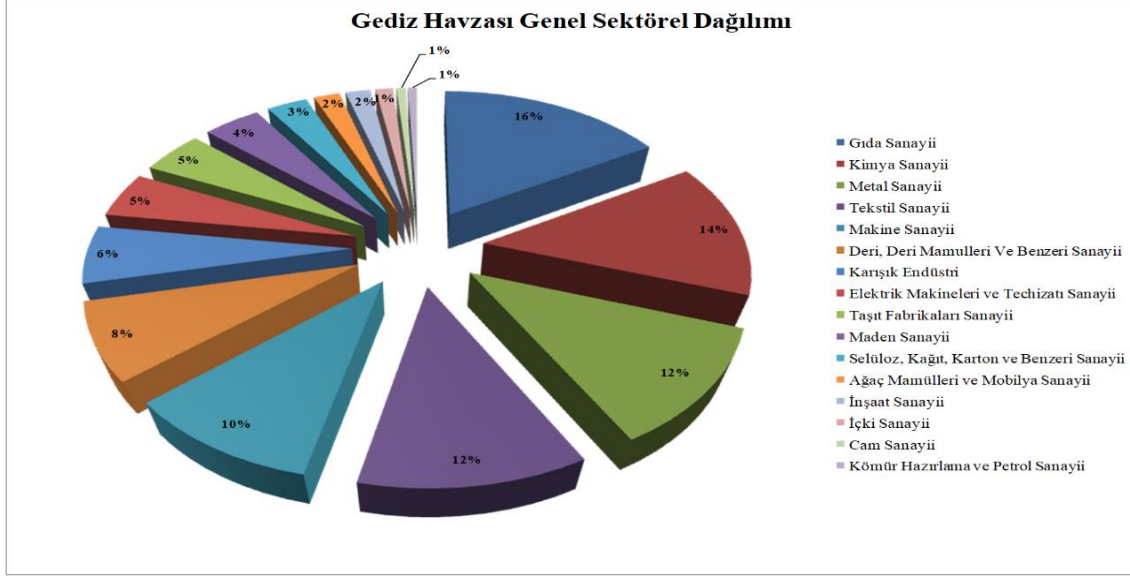
4.1 Mevcut atıksu arıtma tesislerinin belirlenmesi

Mevcut evsel/kentsel/endüstriyel atıksu arıtma tesislerinin durumu, arıtılan atıksu miktarları, proses bilgileri, arıtma çamuru işleme ve bertaraf edilmesine yönelik olarak yapılacak çalışmalar, yönetim sisteminin oluşturulmasında ilk aşama olarak ele alınmaktadır. Havza bazında veya il bazında yürütülecek olan envanter çalışmaları ile daha somut ve basit çözüm alternatiflerine ulaşılması amacıyla ilk aşamada bölgedeki mevcut bilgilerin güncellenmesi önemlidir. Gediz Havzasında, ilgili kurum, kuruluş ve yetkililer ile iletişime

geçilerek havzadaki evsel/kentsel ve endüstriyel tesisler için bilgi formları ile toplanan bilgiler veri tabanına işlenmiştir. Proje çalışmalarının yapıldığı tarih itibarı ile havza sınırları içinde İzmir'de 10 AAT (Çiğli, Foça, Menemen, Kemalpaşa), Manisa'da 17 AAT (Merkez, Turgutlu, Akhisar, Salihli, Alaşehir, Kula, Ahmetli, Saruhanlı, Selendi, Sarıgöl, Gördes, Gölmarmara, Köprübaşı, Salihli-Durasılı, Şehzadeler, Yunusemre, Demirci) ve Kütahya'da 3 AAT (Gediz, Şaphane ve Pazarlar) olmak üzere toplam 30 evsel/kentsel AAT bulunmaktadır. Endüstriyel kuruluşların genel dağılımına ilişkin olarak yapılan değerlendirmelerde ise bu tesislerin münferit ve/veya Organize Sanayi Bölgeleri içinde bulunma durumuna göre

gruplandırılmalar yapılarak, faaliyet alanları ve sektörel dağılımları belirlenmiştir. Her bir tesise ait bilgi ve belgeler bir araya getirilerek tesis kapasitesi, geleceğe yönelik kapasite artırımı planlamaları, atıksu arıtımı için mevcut uygulamalar değerlendirilmiştir. Gediz Havzası genelinde 974 münferit endüstriyel tesisin faaliyette olduğu ve sektör dağılımının ise ağırlıklı olarak, Gıda sektöründe olduğu görülmektedir. Bunu Metal, Kimya ve Makine sanayi takip etmektedir. Havzada yer alan 15 OSB'de toplam 1669 tesis bulunmakta ve sektörel

dağılım olarak sırasıyla Kimya, Tekstil, Metal, Makine, Gıda, Deri, Deri Mamulleri ve Benzeri Sanayi faaliyettedir. Karışık sektörel dağılımı olan endüstrilerin havzada önemli bir yer tuttuğunu söylemek mümkündür. İhtisas OSB olarak da deri plastik, halı-kilim sektörlerine yönelik organize sanayi bölgeleri bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Gediz Havzası'ndaki Endüstriyel Tesislerin Genel Sektörel Dağılımı.

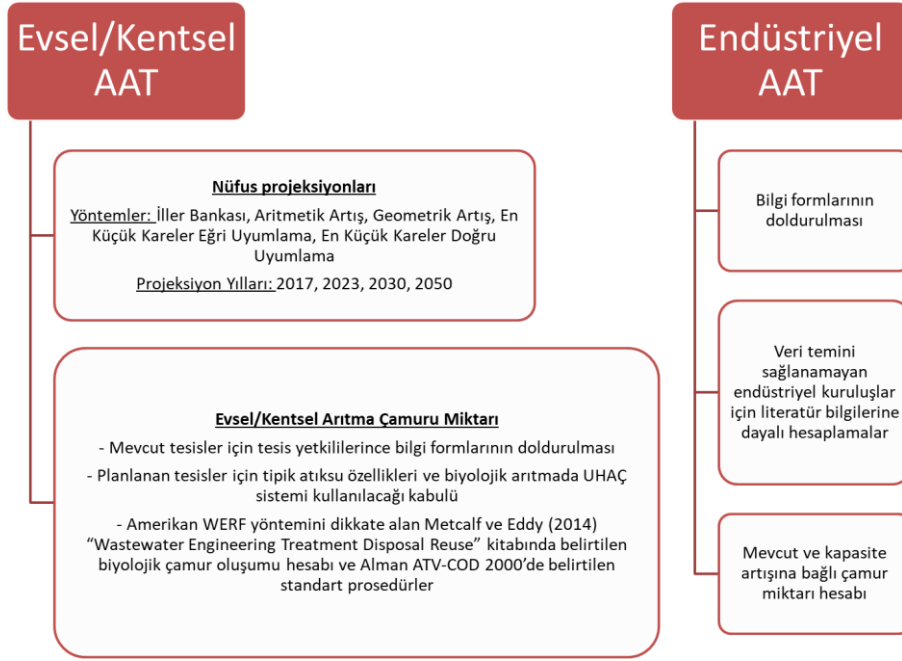
4.2 Evsel/kentsel ve endüstriyel tesislerde oluşan arıtma çamuru miktarının belirlenmesi

Evsel/kentsel nitelikli atıksu arıtma tesislerinde mevcut prosesin özelliğine göre oluşan çamur miktarları hesaplanabilir. Gelecek yıllarda oluşması beklenen arıtma çamuru miktarının hesaplanmasında ise, mevcut nüfus yılı baz alınarak farklı nüfus projeksiyon yöntemleri uygulanmak suretiyle belirlenen nüfus değerleri dikkate alınarak hesaplama yapılır. AAT'lerinin hizmet ettiği eşdeğer nüfus değerlerine göre küçük, orta ve büyük ölçekli sınıflandırma yapılabilir. Literatürde <10.000 EN "küçük ölçekli", 10.000 < EN < 100.000 arası "orta ölçekli" ve >100.000 EN olan tesisler "büyük ölçekli" olarak sınıflandırılmaktadır (PURE, 2012, TÜBİTAK KAMAG 108G189, 2013, Gediz Havzası Projesi, 2017). Arıtma çamuru işleme ve nihai bertaraf seçeneklerine karar verilirken, uygulama kolaylığı ve maliyet faktörleri göz önünde bulundurularak farklı teknolojilerin uygulanabilirliği değerlendirilmelidir. Gediz Havzası'nda mevcut durum ve gelecek projeksiyonuna bağlı olarak evsel/kentsel ve endüstriyel arıtma tesislerinde oluşan/oluşacak arıtma çamuru miktarı hesaplamalarında kullanılan yöntem Şekil 3'te verilmiştir.

Evsel/kentsel atıksu arıtma tesislerinde mevcut ve gelecek yıllarda oluşması beklenen arıtma çamuru miktarları 2017, 2023, 2030 ve 2050 yılları için belirlenen nüfus projeksiyonlarına göre hesaplanmıştır. Havza genelinde 2015 yılı için 725,29 ton/gün, 2017 yılında 816,92 ton/gün, 2023 yılında 992,36 ton/gün, 2030 yılında 1138,31 ton/gün ve 2050 yılında 1349,63 ton/gün olarak hesaplanmıştır.

Bu değerler dikkate alındığında arıtılan birim atıksu miktarı için üretilen birim çamur miktarı yaklaşık 0,59 kg/m³ atıksu olarak hesaplanmıştır.

Endüstriyel nitelikli atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuru miktarları ise endüstrilerden gelen atıksu özellikleri, proses bilgileri, çamur işleme üniteleri dikkate alınarak her bir tesis için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Gediz Havzası genelinde 577,5 ton/gün endüstriyel arıtma çamuru üretimi söz konusudur. Bunların sektörel olarak dağılımı ise Seramik (216,6 ton/gün), Gıda-Konserve-Salça (160 ton/gün), OSB'ler (87,5 ton/gün), Gıda-Et-Tavukçuluk'tur (52 ton/gün). Seramik ve Kağıt-Ambalaj endüstrisi gibi arıtma çamurlarının yeniden kullanıldığı sektörler hariç tutulduğunda günlük toplam çamur üretiminin 360 ton olduğu belirlenmiştir. Arıtılan atıksu miktarlarına bakıldığında ise AAT sayısı bakımından %4'lük paya sahip olmasına rağmen OSB'lerin %45 oranıyla en fazla miktarda atıksuyu arıttığı anlaşılmaktadır. Bunu %22 ile Gıda-Konserve-Salça, %13 ile Gıda-Et-Tavukçuluk, %8 ile Seramik, %4 ile Tarım Ürünleri, %2 ile Kağıt-Ambalaj ve diğer sektörler izlemektedir. Havza'daki endüstriyel tesislerin gelecekte oluşması muhtemel arıtma çamuru miktarları sadece OSB'ler için yapılabilmektedir. Havza'da inşaat ve planlama aşamasında olan Turgutlu OSB, Akhisar Zeytin İhtisas OSB, Menemen Plastik OSB ve Bağyurdu OSB'nin tam kapasitede faaliyet göstermesi halinde havzada mevcut OSB'lerde üretilen çamur miktarına %20 oranında artış sağlayacağı öngörülmüştür. Bu durumda yakın gelecekte OSB'lerde üretilen çamur miktarının 105 ton/gün olacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 3. Evsel/kentsel ve endüstriyel çamur miktarı hesap yöntemi.

4.3 Evsel/kentsel ve endüstriyel tesislerde kullanılan atıksu arıtma ve arıtma çamuru işleme yöntemleri

Mevcut AAT'lerinde uygulanan atıksu arıtma prosesleri (aktif çamur ve modifikasyonları, biyolojik nutrient giderimi vb.), arıtma çamuru işleme yöntemleri (yoğunlaştırma, susuzlaştırma ve stabilizasyon) ve varsa çamur minimizasyon teknikleri incelenmelidir. Gerek atıksu arıtımında gerekse arıtma çamurunun işlenmesi için uygulanan yöntem, oluşan çamurun özellik ve miktarını, dolayısıyla yararlı kullanım/nihai bertaraf yöntemini belirleyen en önemli unsurlardan biridir.

Evsel/kentsel arıtma çamurlarının toprakta kullanımı için çamur stabilizasyonu gereklidir. Aerobik ve/veya anaerobik stabilizasyon uygulamaları olan AAT'lerde oluşan arıtma çamuru özelliklerinin Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik kapsamında verilen sınır değerleri sağlaması halinde toprakta kullanım için uygundur (27661 sayılı Resmi Gazete, 2010). Nihai bertaraf yöntemlerinden düzenli depolama uygulaması için Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik kapsamında verilen sınır değerlerin sağlanması gereklidir (27533 sayılı Resmi Gazete, 2010). Enerji geri kazanımı amaçlı ek yakıt olarak kullanılması düşünülüyorsa %90 üzerinde kuru madde içeriğine kadar kurutulması ve belli parametreler açısından uygunluk gereklidir (29036 sayılı Resmi Gazete, 2014).

Endüstriyel arıtma çamurlarının özellikleri nihai bertaraf yöntemine karar verilmesinde belirleyici olmaktadır. Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY) (29314 sayılı Resmi Gazete, 2015) kapsamında yapılacak karakterizasyon çalışmalarına göre atık kodları ve sınıfının belirlenmesi ve tehlikeli veya tehlikesiz olması durumuna göre nihai bertaraf seçeneğine karar verilmesi gerekmektedir. Kalorifik değeri yüksek olan arıtma çamurlarının lisanslı atık yakma tesislerinde yakılarak veya çimento fabrikalarında ek yakıt olarak enerji kazanımı amaçlı kullanılması öngörülebilir. Son yıllarda yeni teknolojilerden gazlaştırma ve piroliz yöntemleri de uygulanmaktadır. Enerji geri kazanımı uygulanabilir olmayan arıtma çamurları ise mevzuattaki esaslara göre düzenli depolama tesislerine gönderilir. Evsel/kentsel ve endüstriyel arıtma çamurlarının yararlı kullanım/nihai bertaraf alternatifleri Şekil 4'te özetlenmektedir (Filibeli, A., 2018).

Gediz Havzasındaki evsel/kentsel AAT'lerde atıksu arıtma prosesi olarak genellikle uzun havalandırmalı aktif çamur (UHAÇ) prosesi, biyolojik nutrient giderimi (BNR) ve klasik aktif çamur prosesleri (KAÇ) uygulanmaktadır. Arıtma çamurlarının yoğunlaştırılması ve mekanik su alma proseslerinin yaygın olarak kullanıldığı; fakat çamur stabilizasyonu uygulamalarının az sayıda olduğu belirlenmiştir. Çiğli AAT'de anaerobik stabilizasyon, Alaşehir ve Akhisar AAT'lerde aerobik stabilizasyon ve Salihi AAT'de kireç stabilizasyonu uygulamaları mevcuttur. Çamur susuzlaştırmada genellikle dekantör üniteleri ve birkaç tesiste bantlı pres filtre uygulamasının olduğu; bazı AAT'lerinde ise kurutma yatağı (solar veya klasik) uygulaması vardır. Bu tesislerde oluşan çamur keki için nihai bertaraf yöntemi olarak genellikle arıtma tesisinde geçici depolama, katı atık depolama tesisi veya kurutma işlemleri sonrasında ek yakıt olarak kullanmak üzere çimento fabrikalarına gönderilmesi uygulamalarının olduğu belirlenmiştir. İzmir'de havza sınırlarında kalan AAT'lerde susuzlaştırılan çamur, Çiğli AAT'ne taşınarak, bu tesisdeki termal kurutma tesisinde kurutma sonrasında ek yakıt olarak kullanılmak üzere çimento fabrikasına gönderilmektedir. Manisa ilindeki tesislerin büyük çoğunluğunda su alma işlemi sonrasında tesis sahasında bekletme işlemi uygulanmaktadır. Akhisar evsel AAT'de solar kurutma işlemi sonrasında tesis sahasında bekletme yapılmaktadır. Bu solar kurutma tesisine yakın bölgede yer alan ve yine MASKİ tarafından işletilen Saruhanlı AAT ve Salihi AAT'lerinden susuzlaştırılmış çamur kekinin de taşınması için planlama yapılmıştır. Kütahya Gediz AAT'nde ise susuzlaştırma işlemi sonrasında çamur keki, belediyeye ait eski arıtma tesisinin kullanım dışı lagünlerinde bekletilmektedir.

Havzadaki endüstriyel AAT'lerde genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma (aktif çamur ve modifikasyonları) uygulamaları mevcut olup, gıda sektöründe ağırlıklı olarak sadece fiziksel ve biyolojik arıtma; metal ve kimya endüstrilerinde fiziksel ve kimyasal arıtma uygulanmaktadır. Çamur işlemede mekanik susuzlaştırma uygulamaları yaygındır; çamur stabilizasyonu uygulamaları çok kısıtlı olup, sadece Manisa OSB ve İzmir Çiğli AOSB AAT'lerinde aerobik stabilizasyon uygulaması vardır. Çamur susuzlaştırmada pres filtre, bantlı pres filtre ve dekantör üniteleri kullanılmaktadır, birkaç tesiste kurutma yatağı uygulamasının olduğu görülmüştür. Havzadaki münferit endüstriyel tesislerin büyük çoğunluğunda ve Organize Sanayi



Şekil 4. Evsel/kentsel ve endüstriyel arıtma çamurlarının nihai bertaraf/yararlı kullanım alternatifleri.

4.4 Evsel/kentsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuru numunelerinin alınması, karakterizasyonu ve toprak analizleri

Atıksu arıtma işlemleri sonrasında oluşan arıtma çamurlarının özelliklerinin belirlenebilmesi için AAT'lerinin çamur işleme ünitelerinden uygun noktalardan numunelerin alınması, saklanması ve analiz edilmek üzere ilgili laboratuvara ulaştırılması ilgili prosedürler çerçevesinde yürütülür. Karakterizasyon çalışmalarında ilgili mevzuat kapsamında belirtilen analizlerin yapılması gereklidir. Analiz sonuçlarına göre yapılacak değerlendirmeler çamurun işlenmesi, yararlı kullanımı ve/veya nihai bertaraf yöntemine karar verilmesinde belirleyici unsurdur. Ülkemizde uygulamada olan mevzuat esaslarına göre ilgili analizlerin yapılması zorunludur (Tablo 2) (Filibeli, 2018).

Gediz Havzası'ndaki AAT'lerde oluşan arıtma çamurlarının özelliklerinin tespit edilmesi için belirlenen örnekleme noktalarından numune alma ve karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Numune alma programı çerçevesinde, seçilen 8 adet evsel/kentsel ve 35 adet endüstriyel olmak üzere toplam 43 tesisten alınan çamur keki numunelerinde yürütülen karakterizasyon çalışmaları Tablo 2'de verilen mevzuat kapsamındaki analizler ile gerçekleştirilmiştir.

Arıtma çamurlarının toprakta kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için Gediz Havzası içinde yer alan dört ili temsilen seçilen toplam 8 örnekleme noktasından toprak örnekleri alınmıştır. Toprak numunelerinde yapılan EK-1A analiz sonuçlarına göre; İzmir ve Manisa illeri topraklarının "Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik"te belirtilen sınır değerleri sağladığı; Uşak ve

Kütahya illeri topraklarında Ni ve Cr gibi bazı ağır metal konsantrasyonlarının sınır değerlerin üzerinde olması nedeniyle kullanıma uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2 kapsamında verilen Atık Kabul Kriterlerine göre, numune alınan AAT'lerde EK-2A ve EK 2B'de verilen sınır değerler, bir veya daha çok parametre için aşıldığından, bu çamurların III. Sınıf ve II. Sınıf Düzenli Depolama Tesislerine gönderilmeleri uygun değildir. Çözülmüş organik karbon (ÇOK), toplam organik karbon (TOK), fenol indeksi ve mineral yağ parametreleri sınır değerlerin üzerinde olan parametrelerdir. Bunun çözümüne yönelik olarak fiziksel, kimyasal, biyolojik veya ısı ön işlemlerden bir veya birkaçının uygulanarak, EK 2'de verilen parametrelerin sınır değerleri sağlanması halinde düzenli depolama tesislerinde depolanabileceği değerlendirilmiştir.

35 adet endüstriyel tesisten alınan arıtma çamuru örneklerinde Atık Yönetimi Yönetmeliği ekleri kapsamında atık kodları ve sınıfları belirlenerek, analiz sonuçlarına göre tehlikeli/tehlikesiz olma durumları tespit edilmiştir. Bu Yönetmelik gereğince yapılan değerlendirmede, 35 tesisin 15 tanesi (OSB, Kimya, Metal, Halıcılık, Deri, Boya-Mürekkep sektörleri) haricinde tüm tesislerde oluşan endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının "tehlikesiz" atık sınıfında olduğu belirlenmiştir. Gıda Sektöründe (Et-tavukçuluk, Konserve-salça, Yağ, Süt işleme, Üzüm işleme alt sektörleri) bulunan işletmelerde oluşan arıtma çamurlarının çoğunluğunun tehlikesiz atık sınıfında olduğu; Cam, Galvaniz, Seramik, Kâğıt ve Yapı Malzemesi üretimi gibi sektörlerde oluşan arıtma çamurlarının da bu sınıfa dâhil olduğu belirlenmiştir.

Tehlikeli atık sınıfında bulunan arıtma çamurlarının nihai bertaraf edilmesinde tehlikeli ve zararlı atıklar için geçerli esaslar uygulanmalıdır (29314 sayılı Resmi Gazete, 2015). Ekotoksik özellikleri nedeniyle toksik ve çok toksik olarak sınıflandırılan

arıtma çamurlarının geçici olarak depolanmaması, atık bertaraf tesislerine gönderilmesi gerekmektedir. Yapılan analiz sonuçlarına göre kalorifik değeri yüksek olan bu tür arıtma çamurlarının AYY EK-2B'de yer alan (R1-Enerji üretimi amacıyla başlıca yakıt olarak veya başka şekillerde kullanma) işlemi gereği lisanslı atık yakma tesislerinde yakılarak enerji kazanımı amaçlı kullanılması öngörülebilir. Enerji geri kazanımı uygulanabilir olmayan arıtma çamurları Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2 Atık Kabul Kriterleri kapsamında değerlendirilmelidir. Bu çamurların düzenli depolama tesislerinde depolanması halinde tehlikeli olma özelliklerini azaltmak amacıyla ön işlemlerin uygulanması ve I. Sınıf veya II. Sınıf Düzenli Depolama Tesislerinde depolanması gerekmektedir.

“Tehlikesiz” olarak sınıflandırılan bazı endüstriyel arıtma çamurlarının içeriğinde geri kazanılabilir nitelikteki materyalin bulunması (yüksek feldispat/kuvars, silis içeriği gibi) halinde, AYY EK-2B'de yer alan (R5-Diğer anorganik malzemelerin ıslahı/geri dönüşümü) işlemi gereği çimento, yapı sektörü vb. alanlarda eğer teknik şartları sağlıyorsa geri kazanım uygulaması yapılmalıdır. Geri kazanım sonrasında kalan kısmın Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2 Atık Kabul Kriterleri kapsamında değerlendirilerek III. Sınıf ve II. Sınıf Düzenli Depolama Tesislerine gönderilmeleri sağlanmalıdır (Gediz Havzası Projesi, 2017).

Tablo 2. Çalışma kapsamında evsel/kentsel ve endüstriyel çamurlar için değerlendirilen mevzuat.

İlgili Mevzuat	Açıklama
Atık Yönetimi Yönetmeliği	
EK-1	Atık Kodu Belirleme Hiyerarşisi ve Atık Kodu Açıklamaları
EK-2A	Bertaraf yöntemleri
EK-2B	Geri kazanım işlemleri
EK-3A	Tehlikeli kabul edilen atık özellikleri
EK-3/B	“Tehlikeli Atık Eşik Konsantrasyonları”na göre tehlikeli/tehlikesiz olarak sınıflandırma, yapılacak analizlere ilişkin açıklamalar
EK-4	Atık Listesine göre “Atık Kodu”nun belirlenmesi
Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik	
EK-1	Testler ve Numune Alma Metotları
EK-2	“Atık kabul kriterleri” kapsamında değerlendirme ile düzenli depolama tesisi sınıfının (Sınıf I, Sınıf II ve Sınıf III) belirlenmesi
EK-3	Düzenli Depolama Tesislerinde Kullanılan Sızdırmaz Malzemeler İle İlgili Standartlar
EK-4	Meteorolojik Veriler
Ek-5	Depo Gazı ve Sızıntı Suyunun Kontrolü ve İzlenmesi
Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği	
Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik	Tehlikeli/tehlikesiz olma durumuna göre yakma için gerekli koşulları sağlama
Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik	
EK-IA	Arıtma çamuru uygulanacak topraktaki ağır metal sınır değerleri
EK I-B	Stabilize arıtma çamurunda müsaade edilecek maksimum ağır metal içerikleri
EK I-C	Stabilize arıtma çamurunda organik bileşiklerin konsantrasyonları ve dioksinlerin (PCDD/F) sınır değerleri
EK-ID	Stabilize arıtma çamurunda yapılacak mikrobiyolojik analizler

4.5 Arıtma çamurlarının yönetimi için alternatif senaryoların değerlendirilmesi ve maliyet analizi

Bir bölge veya il bazında arıtma çamurlarının yönetimi için yapılacak planlamada, mevcut çevre politikaları ve planlama süreçleri, uygulamadaki mevzuat, mevcut atıksu arıtma tesislerinin durumu: kapasitesi, atıksu arıtma prosesi, çamur işleme ve bertaraf prosesi, bu tesislerde oluşan arıtma çamuru miktarları ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla mevcut analiz sonuçları, bölgede mevcut lisanslı atık işleme ve bertaraf tesisleri: bu tesislerin atık işleme kapasiteleri ve geleceğe yönelik kapasite artırma planlamaları, AAT'ine uzaklığı; mevcut çimento fabrikaları, termik santraller, kireç fabrikaları vb. tesisler; mevcut karayollarının durumu, mevcut tarım alanlarının ve su kaynaklarının durumu gibi unsurların göz önünde bulundurulması gereklidir.

Mevcut AAT'ler ve planlanan AATler için, nihai olarak bertaraf edilmesi/yararlı kullanımı mümkün olan arıtma çamuru miktarları ve özellikleri ile bölgedeki atık işleme ve nihai uzaklaştırma tesislerine ait bilgiler dikkate alınarak, projeksiyon dönemlerine

göre alternatif yararlı kullanım/nihai uzaklaştırma senaryoları hazırlanabilir. Bu senaryolarda ortak ön işlem, geri kazanım ve bertaraf tesislerinin (biyogaz, kurutma, gazlaştırma, yakma ve depolama) yerlerinin belirlenmesi, her bir senaryo için taşıma, ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin belirlenmesi çalışmaları yapılarak ekonomik ve ekolojik açıdan en uygun seçeneğe karar verilebilir. Öngörülecek merkezi tesislerin kurulmasına uygun olası alanların yer belirleme çalışmaları sırasında bu alanlarda arazinin özellikleri, konumu, yüzeysel ve yeraltı su kaynaklarının konumu, yakınındaki yerleşim alanlarına uzaklığı, ana ve tali yollara olan bağlantıları, sit alanı olup olmadığı vb. konularda yerinde tespitler yapılmalıdır.

Bu değerlendirmelerde gerek evsel/kentsel, gerekse endüstriyel AAT'de oluşacak çamur miktarının azaltılması ve çamur kalitesinin iyileştirilmesine yönelik uygulanabilecek ön işlemler alternatif senaryolara dâhil edilmelidir. Konum itibarıyla birbirine yakın olan evsel AAT'lerden gelecek arıtma çamurları ile gıda ve tarım sektöründen kaynaklanan organik içerikli tehlikesiz endüstriyel çamurlardan biyogaz elde edilmesi amacıyla merkezi biyogaz tesisleri öngörülebilir. Endüstriyel arıtma çamurlarının ek yakıt olarak kullanımı seçeneğinde ürün

kalitesine olabilecek olumsuz etkiler düşünülerek, arıtma çamurlarının ısı değeri, klorür, sülfat ve organik madde içerikleri dikkate alınmalıdır. Alternatif senaryolar içinde uygulamaya yönelik en uygun seçeneklere karar verme aşamasında yetkili kurum ve kuruluşlar ile yürütülecek çalışmalar sonucu nihai senaryolara karar verilir (Filibeli, 2018, Gediz Havzası Projesi, 2017).

Gediz Havzası'nda arıtma çamurlarının yönetimi için geliştirilen alternatif senaryolarda, atıksu arıtma tesislerinde oluşan toplam çamur miktarları dikkate alınarak ölçeklendirme yapılmıştır. Ölçeklendirmede evsel/kentsel AAT için eşdeğer nüfus değerleri esas alınmıştır: küçük ölçekli AAT'ler (EN < 10.000), orta ölçekli AAT'ler (EN = 10.000-100.000) ve büyük ölçekli AAT'ler (EN >100.000) (PURE, 2012; TÜBİTAK-KAMAG 168G167,2013).

Küçük ölçekli AAT'lerinde hesaplanan çamur miktarları 0.12-1.39 ton/gün, orta ölçekli AAT'lerinde 1.75-8 ton/gün ve büyük ölçekli AAT'lerinde 18-108 ton/gün arasında değişmektedir. Ortalama çamur miktarları küçük ve orta ölçekli AAT'leri için 1 ton/gün ve 5 ton/gün civarında belirlenmiştir. Büyük ölçekli AAT'lerinde oluşan çamur miktarları geniş bir aralıkta değişim gösterdiğinden 30 ton/gün ve 100 ton/gün olmak üzere iki farklı değer esas alınmıştır. Endüstriyel AAT'lerinde oluşan arıtma çamurlarının işlenmesi ve bertaraf edilmesi amacıyla oluşturulan

alternatif senaryolarda, münferit tesisler için 1 ton/gün'den az çamur üretimi olan tesisler küçük ölçekli, 1 – 10 ton/gün aralığında çamur üretimi olan tesisler orta ölçekli ve 10 ton/gün'den fazla olanlar ise büyük ölçekli olarak sınıflandırılmıştır.

Gediz Havzası sınırları içinde bulunan alıcı konumundaki mevcut tesislerin arıtma çamuru kullanım potansiyeli dikkate alınarak, gelecek planlamasına yönelik ilave kapasite sağlayacak merkezi tesislerin yapılmasına ihtiyaç olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda merkezi biyogaz tesisleri, merkezi kurutma tesisleri, merkezi gazlaştırma tesisi ve merkezi yakma tesisleri kurulması önerilmektedir. Bu tesislerin yer belirleme çalışmaları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Manisa İl Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü ve İzmir İl Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü yetkilileri ile birlikte gerçekleştirilmiştir.

Gediz Havzasında oluşan evsel/kentsel ve endüstriyel arıtma çamurlarının yönetimi için 7 adet olası senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolar Tablo 3'te özetlenmiştir (Gediz Havzası Projesi, 2017). Tabloda parantez içerisinde verilen rakamlar, senaryoda önerilen uygulamanın toplam oluşan arıtma çamurunun ne kadarlık kısmı için uygulanabileceğini göstermektedir.

Tablo 3. Gediz Havzası'nda arıtma çamuru yönetimi için oluşturulan alternatif senaryolar.

Senaryo	Açıklama
SENARYO 1	A. Solar Kurutma + Toprakta Kullanım (Toplam çamurun % 14,1), B. Kurutma (Mevcut Evsel Termal Kurutma Tesisleri + Yeni Yapılacak) + Ek Yakıt Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 46,4), C. Kurutma + Yakma (Toplam çamurun % 22,6), D. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 16,9)
SENARYO 2	A. Minimizasyon + Stabilizasyon + Toprakta Kullanım (Toplam çamurun % 22,6), B. Solar Kurutma + Toprakta Kullanım (Toplam çamurun % 0,5), C. Kurutma + Ek Yakıt Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 37,3), D. Kurutma + Yakma (Toplam çamurun % 22,7), E. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 16,9)
SENARYO 3	A. Kurutma + Ek Yakıt Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 74), B. Kurutma + Yakma (Toplam çamurun % 8), C. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 16,9), D. Yakma (Toplam çamurun % 1,1)
SENARYO 4	A. Biyometanizasyon + Toprakta Kullanım (Toplam çamurun % 18,1), B. Kurutma + Ek Yakıt Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 56,7), C. Kurutma + Yakma (Toplam çamurun % 8,3), D. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 16,9'u)
SENARYO 5	A. Kurutma + Yakma (Toplam çamurun % 83,1), B. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 16,9)
SENARYO 6	A. Kurutma + Gazlaştırma (Toplam çamurun % 81,8), B. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 16,9), C. Düzenli Depolama (Toplam çamurun % 1,3'ü)
SENARYO 7	A. Kurutma + Ek Yakıt (Toplam çamurun % 74), B. Düzenli Depolama (Toplam çamurun % 8), C. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 16,9), D. Yakma (Toplam çamurun % 1,1)

Önerilen arıtma çamuru işleme ve bertaraf etme alternatif senaryolarındaki maliyet analizi çalışmalarında, ilk aşamada çamur işleme ve bertaraf tesislerinin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin belirlenmesi amacıyla, yurtiçi ve yurtdışı gerçek ölçekli kurulu tesisler için araştırma yapılmış; yurtiçi ve yurtdışı uygulamaları olan firmalardan belirli kapasiteler için fiyat teklifi alınmıştır. Gerçek ölçekte kurulu çamur işleme ve bertaraf tesislerinin toplam maliyetlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan literatür taraması sonuçları dikkate alınarak, çamur işleme ve bertaraf ünitelerinin kapasiteleri, yatırım ve işletme maliyetlerine göre birim ton kuru madde için birim maliyet tahmini yapılmıştır (Tablo 4). Kullanılan birim işlemler bazında dikkate alınan birim yatırım ve işletme maliyetlerine göre, evsel/kentsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesisleri için oluşturulan alternatif senaryoların toplam maliyet hesabı yapılmıştır.

Oluşturulan senaryoların yatırım, işletme ve taşıma maliyetleri projenin yapıldığı tarihteki maliyetler dikkate alınarak

belirlenmiştir. En yüksek yatırım maliyeti 222 Milyon TL (55,5 Milyon €) gazlaştırma uygulamasının yer aldığı Senaryo 6 için elde edilirken, en düşük yatırım maliyeti 59,2 Milyon TL (14,8 €) yatırımla kurutma+ek yakıt ve depolama seçeneklerini bulunduran Senaryo 7'de oluşmuştur. Bunda da en büyük etken Manisa Uzunburun'da planlanan katı atık depolama tesisinin hâlihazırda finansman desteği sağlanmış ve inşaat aşamasında olmasıdır. İşletme maliyetlerine göre ise en yüksek maliyet yaklaşık 13 Milyon TL/yıl (3.25 Milyon €/yıl) ile 6 nolu senaryoda, en düşük maliyet ise yaklaşık 8.2 Milyon TL/yıl (2.05 Milyon €/yıl) ile 1 nolu senaryoda elde edilmiştir. Taşıma maliyeti açısından en yüksek maliyet yaklaşık 4 Milyon TL/yıl (1 Milyon €/yıl) ile 7 nolu senaryoda, en düşük maliyet ise yaklaşık 1.78 Milyon TL/yıl (0.45 Milyon €/yıl) ile 3 nolu senaryoda elde edilmiştir. Bununla birlikte biyometanizasyon ve gazlaştırma uygulamalarını içeren 4 nolu ve 6 nolu (senaryolarda işletim maliyeti değerlendirilmesinde bu uygulamalardan elde edilen biyogaz ve sentez gazının elektrik enerjisi dönüşümleri de

dikkate alındığında, bu senaryolar için belirtilen işletme maliyetlerinin en az %30-%35 oranında azaltılması söz konusudur (Gediz Havzası Projesi, 2017).

4.6 Arıtma çamurlarının yönetimi için nihai senaryoların belirlenmesi

Nihai senaryolar belirlenirken uygulamaya yönelik alternatif senaryolar göz önünde bulundurulur. Bu aşamada, inceleme bölgesinin özellikleri, bölgede daha önce gerçekleştirilen projelerden sağlanan bilgiler, mevcut ve gelecek ihtiyacını karşılamaya yönelik yapılması planlanan AAT'ler, bu AAT'lerde oluşan/oluşacak çamur miktarları ve özellikleri, bölgede mevcut ve planlanan nihai uzaklaştırma/yararlı kullanıma yönelik tesisler ve kapasiteleri dikkate alınmalıdır. Nihai senaryolarda, hâlihazırdaki durum göz önünde bulundurulurken, gelecek dönemde farklı zaman dilimlerinde uygulamaya alınabilecek bir planlama yapılmalıdır. Böyle bir planlamada mevcut durum, kısa vade, orta vade ve uzun vadede gerçekleştirilecek uygulamalar öngörülebilir.

Mevcut durumu temsil eden senaryoda, bölgede mevcut alıcı tesislerin kullanımına öncelik verilmeli, ilave bir yatırıma gidilmeksizin, nihai uzaklaştırma ve/veya yararlı kullanım sağlanmalıdır. Gelecek planlamasına yönelik olarak belirlenecek senaryolarda ise, her bir süreçte inşaatı devam eden, yapımı planlanan ve önerilen yeni alıcı tesislerinin projelerinin ve yapımının tamamlanması ve işletmeye alınmasına yönelik planlamalar olmalıdır. Farklı zaman periyotlarında işlerlik kazanması düşünülen senaryoların her birinde kullanımı öngörülen tesislerin konum ve kapasitesi,

çamur miktarları ve taşıma mesafeleri göz önünde bulundurularak, taşıma maliyetlerini en aza indirmek için Coğrafi Bilgi Sistemi (ArcGIS gibi) ile mevcut veri tabanı kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmalıdır. Bu senaryolar için ilk yatırım ve işletme maliyetleri hesaplanarak, bu maliyetlerin karşılanmasına yönelik olası finans kaynaklarının planlamasına gidilmelidir. Nihai senaryolarda gelecek planlamalarında uygulanması öngörülen seçenekler belirlenirken, materyal ve enerji geri kazanımının esas alındığı teknolojiler öncelikli olarak tercih edilmeli; gelecek projeksiyonları için toprakta kullanım ve depolama seçenekleri kademeli olarak azaltılmalıdır (Filibeli, 2018).

Gediz Havzasında bulunan evsel/kentsel/endüstriyel AAT'lerde arıtma çamuru yönetimi için uygulamaya yönelik oluşturulan alternatif senaryolar dikkate alınarak, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü yetkilileri ve proje ekibinin ortak çalışması ile nihai senaryolar belirlenmiştir. Nihai senaryolara karar verirken, mevcut duruma ilave olarak, gelecek planlamasına yönelik üç farklı dönem kapsayan bir planlama yapılması önerilmiştir: Nihai Senaryo 1: Mevcut Durum, Nihai Senaryo 2: Kısa Vade (2017 – 2023 dönemi), Nihai Senaryo 3: Orta Vade (2023 – 2030 dönemi) ve Nihai Senaryo 4: Uzun Vade (2030 – 2050 dönemi) (Gediz Havzası Projesi, 2017).

Nihai senaryo seçenekleri, uygulama yüzdelerini gösterecek şekilde Tablo 5'de verilmektedir. Mevcut durum, kısa, orta ve uzun vade dönemlerine ait nihai senaryo yatırım-işletim-taşıma maliyeti ise Tablo 6'da özetlenmektedir:

Tablo 4. Kullanılan prosesler bazında birim yatırım ve işletme maliyetleri (Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetim Planının Hazırlanması Projesi, 2017).

PROSES	Birim Yatırım Maliyeti (Euro/tonKM)	İşletme Maliyeti (Euro/tonKM)
KURUTMA		
Termal	350	50
Termal +Kojenerasyon	770	100
Solar	400	45
YAKMA		
Yakma	700	100
GAZLAŞTIRMA		
Gazlaştırma	350	50
Piroliz	200	
ANAEROBİK ÇÜRÜTME		
Anaerobik Çürütme	400	60
AEROBİK ÇÜRÜTME		
Aerobik Çürütme	250	60
SANTRİFÜJ DEKANTÖR		
Santrifüj Dekantör	100	20
DEPOLAMA		
Depolama	300	25
YAPI MALZEMESİ KULLANIM	50	
Solidifikasyon	50	
ULTRASONİKASYON MİNİMİZASYON		
Ultrasonikasyon Minimizasyon	70-150	10

Tablo 5. Gediz Havzası'nda arıtma çamuru yönetimi için oluşturulan nihai senaryolar.

Senaryo	Açıklama
Nihai Senaryo 1: Mevcut Durum	A. Stabilizasyon/ Solar Kurutma + Toprakta Kullanım (Toplam çamurun % 13,9'u) B. Kurutma + Ek Yakıt (Toplam çamurun % 41,6'sı) C. Düzenli Depolama (Toplam çamurun % 25,7'si) D. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 18,8'i)
Nihai Senaryo 2: Kısa Vade (2017 – 2023 dönemi)	A. Stabilizasyon/ Solar Kurutma + Toprakta Kullanım (Toplam çamurun % 8'i) B. Kurutma + Ek Yakıt (Toplam çamurun % 51,3'ü) C. Düzenli Depolama (Toplam çamurun % 23,5'i) D. Yapı malzemesi olarak kullanım (Toplam çamurun % 17,2'si)
Nihai Senaryo 3: Orta Vade (2023 – 2030 dönemi)	A. Stabilizasyon/ Solar Kurutma + Toprakta Kullanım (Toplam çamurun % 5'i) B. Kurutma + Ek Yakıt (Toplam çamurun % 41,8'i) C. Düzenli Depolama (Toplam çamurun % 2,2'si) D. Biyometanizasyon (Toplam Çamurun % 4'ü)* E. Kurutma + Yakma (Toplam Çamurun % 12,2'si) F. Kurutma + Gazlaştırma (Toplam Çamurun % 19'u) G. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 15,8'i)
Nihai Senaryo 4: Uzun Vade (2030 – 2050 dönemi)	A. Stabilizasyon/ Solar Kurutma + Toprakta Kullanım (Toplam çamurun % 3'ü) B. Kurutma + Ek Yakıt (Toplam çamurun % 45,1'i) C. Düzenli Depolama (Toplam çamurun % 1'i) D. Kurutma + Yakma (Toplam Çamurun % 14,5'i) E. Kurutma + Gazlaştırma (Toplam Çamurun % 22,3'ü) F. Yapı Malzemesi Olarak Kullanım (Toplam çamurun % 14,1'i)

*Uzun vadede biyometanizasyon seçeneği alternatif olarak korunacak olup, A-stabilizasyon seçeneğinin içinde değerlendirilmiştir.

Tablo 6. Gediz Havzası'nda arıtma çamuru yönetimi için mevcut durum, kısa, orta ve uzun vade dönemlerine ait nihai senaryo yatırım-ışletim-taşıma maliyetleri (maliyetler projenin yapıldığı tarihteki bedeller dikkate alınarak belirlenmiştir- 1 € = 4 TL).

Senaryo	Yatırım maliyeti (TL)	İşletme maliyeti (TL/yıl)		Taşıma maliyeti (TL/yıl)	
Nihai Senaryo 1: Mevcut Durum	-	12 741 400 (3 185 350 €/yıl)	14 056 900 (3 514 225 €/yıl)	3 026 020 (706 505 €/yıl)	5 656 240 (1 414 060 €/yıl)
Nihai Senaryo 2: Kısa Vade (2017 – 2023 dönemi)	44 850 000 (11 212 500 €/yıl)	2017 17 309 920 (4 327 480 €/yıl)	2023 19 108 750 (4 777 188 €/yıl)	2017 2 869 225 (717 306 €/yıl)	2023 5 212 535 (1 303 134 €/yıl)
Nihai Senaryo 3: Orta Vade (2023 – 2030 dönemi)	101 480 000 (25 370 000 €/yıl)	2023 32 911 870 (8 227 968 €/yıl)	2030 35 942 660 (8 985 665 €/yıl)	2023 4 802 260 (1 200 565 €/yıl)	2030 6 565 560 (1 641 400 €/yıl)
Nihai Senaryo 4: Uzun Vade (2030 – 2050 dönemi)	178 850 000 (44 712 500 €/yıl)	2030 49 214 520 (12 303 630 €/yıl)	2050 61 843 100 (15 460 775 €/yıl)	2030 4 950 895 (1 237 724 €/yıl)	2050 7 809 725 (1 952 430 €/yıl)

5. Sonuç

Arıtma çamurlarının işlenmesi ve nihai olarak uzaklaştırılmasında, teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel bileşenleri içeren bütünleşik ve sürdürülebilir bir çamur yönetim sistematığının oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında, Gediz Havzası örneğinde arıtma çamurlarının yönetiminde izlenmesi gereken yol haritasının oluşturulması için temel esaslar değerlendirilmiştir. Nihai senaryolarda, mevcut durum dikkate alınarak, gelecek planlamasına yönelik olarak 2017-2050 yıllarını kapsayan Kısa, Orta ve Uzun Vadede uygulamaya geçirilecek bir planlama yapılması öngörülmüştür. Ele alınan dört nihai senaryo için yatırım-ışletme-taşıma maliyetleri belirlenmiştir. Uzun vade senaryolarında daha çok enerji geri kazanımına yönelik uygulamalarda artış planlanırken, düzenli depolama ve toprakta kullanım seçeneklerinde önemli derecede azaltmaya gidilmiştir.

6. Teşekkür ve Bilgi

Bu makale, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) adına Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü tarafından yürütülen "Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetim Planının Hazırlanması Projesi" kapsamında hazırlanmıştır. Proje sürecinde proje ekibine destekleri ile katkı sağlayan tüm kurum, kuruluş ve işletmelere teşekkür ederiz.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

7. Kaynaklar

- Atık Yönetimi Yönetmeliği, 29314 sayılı Resmi Gazete, 2015.
- Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt Ve Alternatif Hammadde Tebliği, 29036 sayılı Resmi Gazete, 2014.
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 27533 sayılı Resmi Gazete, 2010.
- Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik, 27721 sayılı Resmi Gazete, 2010.
- Ayol A., Filibeli A., Sir D., Kuzuyaka E. (2008) Aerobic and anaerobic bioprocessing of activated sludge: Floc disintegration by enzymes, Journal of Environmental Science Health, 43, 528-35.
- Canziani, R., Spinosa, L., 2019. Sludge: sources and characterization. In: Prasad, M.N.V. (Ed.), Industrial and Municipal Sludge: Emerging Concerns and Scope for Resource Recovery. Elsevier Inc., Ch. 1, 3-31, ISBN 978-0-12-815907-1.
- COUNCIL DIRECTIVE of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86 / 278 /EEC).
- Demir, O. and Filibeli A., (2016).The investigation of the sludge reduction efficiency and mechanisms in oxic-settling-anaerobic (OSA) process. Water Science and Technology, V.73, No.10, pp.2311-2323, DOI:10.2166/wst.2016.076.
- EC/2008/98, Waste Framework Directive (Avrupa Birliği Atık Çerçeve Direktifi).
- EPA 40 CFR 260 (40 CFR Part 260, n.d.) PART 260 - Hazardous

- Waste Management System: General, 1980.
- Erden G., Demir O., Filibeli A. (2010) Disintegration of biological sludge: Effect of ozone oxidation and ultrasonic treatment on aerobic digestibility, *Bioresource Technology*, 101 (21), 8093-8098.
- Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik, 27661 sayılı Resmi Gazete, 2010.
- Filibeli A., ve Demir, O., (2008). Aşırı çamur üretiminin kaynağa azaltılmasına yönelik uygulamalar. Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları 08 Sempozyumu. 537-534.
- Filibeli A., Ayol A., (2008) Sludge/Biosolid Management in Turkey from Point View of Practical Applications by Local Authorities and Legal Aspects of Turkish Environmental Policy on Sludge/Biosolid Treatment and Handling. *Global Biosolid Atlas*, UNEP.
- Filibeli, A., "Arıtma Çamurlarının Sürdürülebilir Yönetiminde Yeni Yaklaşımlar: Enerji ve Materyal Geri Kazanımı", IEECC Uluslararası Çevre Mühendisliği Kongresi, 10-12 Ekim 2019, Kocaeli-Gebze.
- Filibeli, A., "Principles of Generating a Sludge Management System", Eurasia 2018 Waste Management Symposium, 2-4 May 2018, YTU Davutpaşa Congress Center, İstanbul/Türkiye.
- Filibeli, A., Ayol, A., Büyükkamacı, N., Saygılı, G., Şener, G., "Investigation of Beneficial Usage Alternatives of Domestic/Municipal/Industrial Treatment Plant Sludges: Case Study of Gediz Watershed Area in Turkey", 4th International Conference on Sustainable Development, 11-15 April, 2018, Athens, Greece.
- Galilee U. Semblante, Faisal I. Hai, Huu H. Ngo, Wenshan Guo, Sheng-Jie You, William E. Price, Long D. Nghiem, (2014) Sludge cycling between aerobic, anoxic and anaerobic regimes to reduce sludge production during wastewater treatment: Performance, mechanisms, and implications. *Bioresource Technology*, 155, 395-409.
- Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetim Planının Hazırlanması Projesi Nihai Raporu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı adına Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Mühendisliği tarafından hazırlanmıştır, Şubat 2016 – Ağustos 2017.
- Grobelak, A., Czerwińska, K., Murtaś, A., General considerations on sludge disposal, industrial and municipal sludge, *Industrial and Municipal Sludge Emerging Concerns and Scope for Resource Recovery*, Chapter 7, pp. 135-153, 2019.
- Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği, 26047 sayılı Resmi Gazete, 2006.
- Kusch-Brandt, S., Mohammad A. T. Alsheyab, "Wastewater Refinery: Producing Multiple Valuable Outputs from Wastewater", 2021.
- Metcalf ve Eddy, 2003. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*.
- Papa, M., Foladori, P., Guglielmi, L., & Bertanza, G. (2017). How far are we from closing the loop of sewage resource recovery? A real picture of municipal wastewater treatment plants in Italy. *Journal of Environmental Management*, 198, 9–15, doi:10.1016/j.jenvman.2017.04.061.
- PURE (2012) Good Practices in Sludge Management, Project on Urban Reduction of Eutrophication (PURE), Union of the Baltic Cities Environment Commission, Finland
- Spinosa, L. and Doshi, P. (2021) "Re-thinking sludge management within the Sustainable Development Goal 6.2", *Journal of Environmental Management*, 287 112338.
- TÜBİTAK-KAMAG 108G167 Nolu Proje, Evsel/Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi, İTÜ, DEÜ, ODTÜ, BÜ, 2010-2013.
- US EPA PART 503 (40 CFR Part 3)- Standards For The Use or Disposal Of Sewage Sludge, 1993.
- Wiśniowska, E., Grobelak, A., Kokot, P., Kacprzak, M., Sludge legislation-comparison between different countries, *Industrial and Municipal Sludge*, Chapter 10, pp. 201-224, 2019.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

İleri Kimyasal Oksidasyon Prosesleri ile Endüstriyel Kirletici Giderimine Genel bir Bakış

İdil ARSLAN ALATON

Yazışma yazarı:

İdil ARSLAN ALATON,
arslanid@itu.edu.trİstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0003-4241-5100

Referans:

Arslan Alaton, İ. (2022), İleri Kimyasal Oksidasyon Prosesleri ile Endüstriyel Kirletici Giderimine Genel bir Bakış, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23(1) 91-98

Makale Gönderimi : 13 MART 2022
Online Kabul : 19 NİSAN 2022

Özet Yoğun bir nüfus ve endüstriyel aktiviteler sonucunda gün geçtikçe artan su tüketimi; bilinçsiz tüketimin doğurduğu yerel su sıkıntıları ve küresel iklim değişikliği, doğal kaynaklarımızı korumamızın ve dikkatli kullanmamızın önemini vurgulamaktadır. Su kaynaklarımızın sürdürülebilir yönetimi için ileri arıtma, suyun yeniden kullanımı, kaynağında su kirliliği kontrolü gibi önlemlerin alınması gündeme gelmiştir. Öte yandan, su ve atıksulardaki konsantrasyonları giderek artan karmaşık, inert ve/veya toksik ve daha ziyade endüstriyel kaynaklı kirleticilerin varlığı, söz konusu önlemlerin alınmasını zorlaştırmaktadır. Günümüzde atıksuların kaynaklandığı endüstriyel prosesleri daha iyi tanımak, daha kapsamlı çevresel karakterizasyon çalışmaları yapmak, proseslerde bilinçli su tüketimini pekiştirmek ve proses kimyasallarını daha ekolojik olanları ile değiştirmek dışında etkili ve sürdürülebilir bir arıtma, su kirliliği ve kontrolünün en önemli ihtiyacı haline gelmiştir. Son yıllarda, konvansiyonel arıtma yöntemlerinin yerini daha spesifik bir kirletici grubunun giderimini hedefleyen, kirleticilerin faz transferinden ziyade tamamen veya kısmen parçalanıp daha zararsız ve/veya daha biyoayrışabilir bileşiklere dönüştürme yöntemleri almıştır. Bunların arasında, örneğin “İleri Oksidasyon Prosesleri-İOP” olarak tanınan birtakım özel arıtma prosesleri geliştirilmiştir. Oksidanların (peroksitler, ozon, vb.) fotokimyasal, kimyasal, termal veya (foto)katalitik yollarla aktifleştirildiği, reaktif oksitleyici bileşiklerin reaksiyon çözeltisinde üretilmesine dayanan İOP, toksik ve/veya biyolojik olarak zor ayrışan veya inert, karmaşık yapıli kirleticilerin gideriminde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. İOP bilinçli kullanıldığında endüstriyel kirleticilerin arıtımında çok etkili olmakla birlikte, yüksek elektrik enerjisi tüketimleri de azalmaktadır. Bundan dolayı uygulama şekline, yöntemine, zamanına ve yerine çok dikkatli karar vermek gerekmektedir. Bu makalede bir rehber yaklaşımı ile İOP'nin temel prensipleri, uygulama alanları ve potansiyelleri, İOP'nin avantaj ve dezavantajları (uygulama sırasında karşılaşılan başlıca sorunlar), prosesin “püf noktaları”, arıtma performansına etki eden başlıca çevresel faktörler ve dikkatle optimize edilmesi gereken en kritik proses parametrelerinin arıtma verimine etkileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İleri oksidasyon prosesleri (İOP), endüstriyel kirleticiler, proses kontrol parametreleri, elektrik enerjisi tüketimi, toksisite ve biyolojik ayrışabilirlik.

A General Overview of the Treatment of Industrial Pollutants with Advanced Chemical Oxidation Processes

Abstract As a consequence of an intensive population and industrial activities, the ever increasing water consumption, local water problems due to unconscious water consumption and global climate change, the necessity of preserving water sources and using them carefully has become an issue of priority. For the sustainable management of the limited water sources, some precautions such as advanced treatment, water reuse, water pollution control at its source have become critical tasks. On the other hand, the presence of complex, refractory and/or toxic pollutants of mainly industrial origin and ever-increasing concentrations, render the above-mentioned issues rather challenging and difficult. Nowadays, besides gathering more information about the industrial process profile, a more comprehensive environmental characterization, conscious water consumption and the replacement of the process chemicals with more ecological ones, effective and sustainable treatment has become an integral step water pollution and its control. In recent years, conventional treatment processes have been replaced by methods that specifically target the complete or partial destruction by employing destructive rather than phase-transfer-based techniques, converting these pollutants into less harmful and/or more biodegradable products. For instance, recently, the so-called “Advanced Oxidation Processes-AOP” have been developed and successfully applied for the above mentioned purposes. AOP which are based on the activation of oxidants (peroxides, ozone, etc.) by photochemical, chemical, thermal, and (photo)catalytic purposes to produce reactive oxidizing species in the reaction solution, are capable of converting recalcitrant and/or toxic pollutants into more bioamenable, less toxic compounds. If used consciously, AOP are very effective in the destruction of industrial pollutants and the intensive electric energy consumption can be reduced in this way as well. Hence, the mode, time and place of their application is a

very integral issue. In this paper, the basic principles, application areas and potentials as well as advantages and shortcomings (major challenges faced during their application), some “tips and tricks”, major factors affecting their treatment performance as well as basic process control parameters that need to be carefully optimized are presented.

Keywords: Advanced Oxidation Processes (AOP), industrial pollutants, process control parameters, electric energy consumption, toxicity and biodegradability.

1. Giriş

Endüstriyel atıksuların arıtımı evsel atıksularınkine göre her zaman daha zorlayıcı bir deneyim olmuştur; nitekim endüstriyel atıksu evsel atıksulara göre daha karmaşık yapılı, kimyasal içeriği ve akış debisi oldukça değişken bir atıksuyu teşkil etmektedir. Karmaşık içerikleri ve yüksek, inert kimyasal oksijen ihtiyaçlarından (KOİ değerlerinden) dolayı endüstriyel atıksular için sürdürülebilir yönetim stratejilerinin oluşturulması gereklidir (URL-2). Söz konusu stratejiler, endüstriyel sektörlerin proses ve kirlenme profillerinin ilişkilendirilmesi, alternatif, “yeşil” olarak tanımlanan kimyasalların araştırılması ve mevcut proses kimyasalları ile değiştirilmesi, ayırık akım arıtma yöntemlerinin tanımlanması ve sektör bazında ayrıntılı, daha spesifik çevresel karakterizasyon çalışmalarını gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Yapılan çalışmaların sonucuna son seçenek olarak ileri bir arıtmanın kaçınılmaz, hatta bazı durumlarda deşarj edilen, geri kazanılamayan atıksuların daha konsantre ve kalıcı (inert) yapıda olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle renk, akut/kronik toksisite, bazı yüzey aktif maddeler, stabilizatörler ve halojen içeren organik solventler gibi spesifik kirlenmelerin etkin arıtımı başlıca sorun olarak görülmüştür (Fatta-Kassinos ve diğ., 2015). Evsel atıksu özellikleri, endüstriyel atıksu özellikleri ile karşılaştırıldığında aşağıdaki genel sonuçlara varmak mümkündür;

- Endüstriyel atıksuların debileri çok değişkendir ve prosesin özelliğine göre gün içinde bile farklılık gösterebilmektedir. Halbuki evsel atıksular nispeten daha az değişkenlik gösteren bir debi ile arıtma tesislerine kabul edilmekte ve burada konvansiyonel bir arıtma zincirine tabi tutulmaktadır.

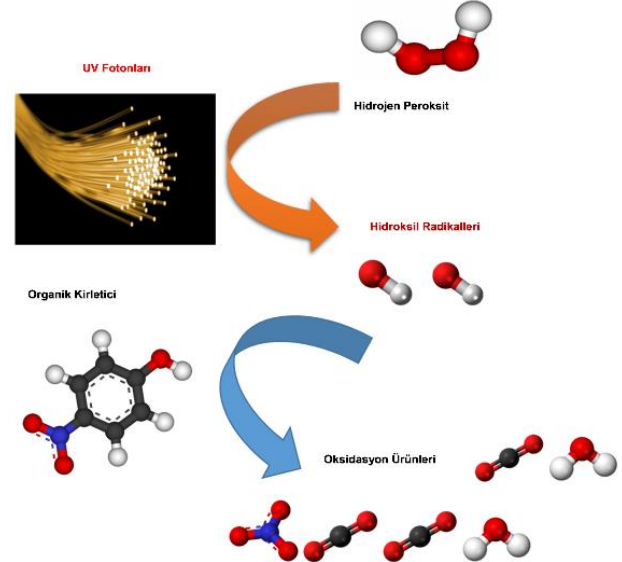
- Endüstriyel atıksuların sıcaklık, pH ve diğer fizikokimyasal/çevresel özellikleri değişkenlik göstermektedir; bundan dolayı endüstriyel atıksular için “tipik bir atıksu karakterizasyonu”ndan söz etmek mümkün değildir (örneğin, tekstil endüstrisi atıksuları için).

- Endüstriyel atıksuların arıtımı konvansiyonel evsel atıksu arıtımına göre daha zordur, çünkü endüstriyel atıksuların içeriğinde/yapılarında nispeten daha fazla zor ayrışan (biyolojik arıtmaya elverişli olmayan), toksik ve/veya karmaşık yapılı kirlenmeler (solventler, yüzey aktifler, fenoller, halojenli poliaromatik bileşikler, vb.) bulunur (Lucas ve diğ., 2007). Bu durumda konvansiyonel arıtma yöntemleri yetersiz kalmakta ve mevcut arıtma sistemlerinin etkin bir arıtma için ileri arıtma teknolojileri entegre edilmesi gerekmektedir. Ne tür ileri arıtma yöntemlerinin söz konusu endüstriyel atıksu için daha uygun olduğu ise atıksuyun yapısal özelliklerine, ayrıca proses profile ve kirlenme profiline bağlıdır (Riberio ve diğ., 2019).

Yukarıdaki hususlardan anlaşılacağı üzere endüstriyel atıksuların arıtılması için konvansiyonel, klasik arıtma yöntemleri çoğunlukla yetersiz kalmakta ve daha uygun ileri arıtma alternatiflerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve en sürdürülebilir arıtma yöntemine karar verilmesi gerekmektedir.

2. Endüstriyel Kirlenmelerin İleri Oksidasyonu: Temel Prensipler ve Uygulama Alanları

İOP; su ve atıksularda bulunan toksik ve/veya zor ayrışan kirlenmeleri genellikle oda sıcaklığında (ıslak su oksidasyonu hariç) ve atmosferik basınçta, reaksiyon çözültisinde üretilen serbest radikallerin etkisiyle meydana gelen zincir tepkimeler sonucunda ideal koşullarda zararsız son oksidasyon ürünlerine (CO_2+H_2O +inorganik tuzlar) dönüştüren ileri arıtma prosesleridir (Parsons, 2004). İOP'nin çalışma prensibi şematik/şekilsel olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İleri Oksidasyon Proseslerinin Mekanizması.

Yaklaşık olarak 30-40 yıl önce endüstriyel atıksuların kimyasal/fotokimyasal oksidasyonunun ekonomik ve uygulanabilir olmadığı kanısı çok yaygındı. Bunun başlıca nedenleri, kimyasal oksidanların yüksek maliyeti, oldukça sınırlı ve zorlayıcı saklama/uygulama koşulları, ayrıca söz konusu arıtma sistemlerinin yüksek elektrik enerjisi tüketimliydi. Ozon, klor dioksit, hidrojen peroksit ve persülfat oksidanları, dezenfeksiyonda yaygın olarak kullanılmaktadır ve endüstriyel atıksuların kimyasal oksidasyonunda da sınırlı sayıda uygulamalar mevcuttur (çöp sızıntı suları, deri, kâğıt ve tekstil endüstrisi atıksuları, vb.). Söz konusu oksidanlarla endüstriyel kirlenmelerin tam oksidasyonunu sağlamak genellikle mümkün değildi (Pariante ve diğ., 2013; Ike ve diğ., 2018). Günümüzde bile “kısmi ileri oksidasyon”, biyolojik arıtılabilirliğin iyileştirilmesini ve/veya detoksifikasyonunu hedefleyen, daha düşük oksidan konsantrasyonlarında ve/veya arıtma sürelerinde uygulanabildiği için teknik ve ekonomik olarak daha gerçekçi bir yaklaşımdır (Ledakowicz ve diğ., 2006). Özellikle büyük kapasiteli (yüksek debili), tam ölçekli arıtma tesislerinde kimyasal ve fotokimyasal ileri arıtma yöntemlerinin tek başına birer arıtma prosesi olarak kullanılması pratikte ekonomik ve teknik olarak sürdürülebilir değildir. Kimyasal ve fotokimyasal arıtma sistemlerinin endüstriyel kirlenmelerin ön ve/veya son arıtma basamağı olarak uygulanmaları daha gerçekçi ve ekonomik olarak daha uygun bir alternatiftir (Ollis, 2001; Oturan ve Aaron, 2014).

İOP'in günümüzde daha yaygın olarak endüstriyel kirleticilerin arıtımında kullanılmalarının başlıca nedenleri aşağıda sayılmıştır (Caprio ve diğ., 1999);

- Deşarj kriterlerinin ve standartlarının daha ciddi bir şekilde denetlenmesi ve bunların parametre bazında değerlerinin son yıllarda düşürülmüş olması
- Günümüz enstrümental analiz cihazları ile kirleticilerin konsantrasyonlarının mikrog/L, hatta nanog/L mertebelerinde ölçülebilmesi; söz konusu mikrokirleticilerin gelişmiş numune hazırlama yöntemleri kullanarak karmaşık su ve atıksu matrislerinde bile tespit edilebilmesi
- Su sıkıntısı / kıtlığı sorunlarının son derece ciddi boyutlara gelmiş olması nedeniyle yeniden kullanım ve ileri arıtma gerekliliğinin ve ihtiyacının önemli derecede artmış olması

Yukarıda sayılan faktörler dikkate alınarak endüstriyel kirleticilerin İOP ile etkili bir şekilde arıtılmaları, İOP'nin mevcut, konvansiyonel arıtma sistemlerine entegre edilmeleri son yıllarda daha fazla gündeme gelmiş ve önem kazanmıştır (Changotra ve diğ., 2019).

Bunların ötesinde, İOP'nin ileri biyolojik arıtma proseslerine göre bazı önemli ekonomik ve teknik üstünlükleri de mevcuttur (Ollis, 2001; Oller ve diğ., 2011). Bunlar;

- Çok hızlı olmaları nedeniyle nispeten düşük reaktör hacmine ve kısıtlı alana ihtiyaç duymaları (düşük hidrolik bekleme süreleri)
- Toksik ve/veya inert endüstriyel kirleticilerin ayrık akımlarda ön ve/veya son arıtma basamaklarında daha etkin bir şekilde arıtılabilmeleri
- Son 20-30 yılda endüstriyel atıksular için özel ileri arıtma proseslerinin geliştirilmiş ve sürdürülebilir atıksu arıtma yöntemlerinin önem kazanmış olması

Yukarıda sayılan nedenlerden dolayı İOP giderek daha yaygın ve konvansiyonel proseslerle entegre ve hatta konvansiyonel arıtma yöntemlerine alternatif olarak düşünülmektedir. Bununla birlikte, günümüzde artık sadece arıtma maliyetleri dikkate alınmamaktadır. Aynı zamanda, yeni deşarj limitlerinin sağlanması, insan sağlığını ve su kalitesini tehdit eden öncelikli kirleticilerin oksidatif parçalanma yoluyla yok edilmesi giderek daha fazla önem kazanmıştır. Baka bir deyişle artık arıtma prosesleri seçilirken daha fazla ve farklı kriterler önemsenmektedir. İOP yukarıda sayılan nedenlerden dolayı daha etkin, daha sürdürülebilir ve çevreyle dost arıtma prosesleri olarak daha fazla uygulanmaya başlanmıştır (Stasinakis, 2008).

3. İleri Oksidasyon Proseslerinin Sınıflandırılması

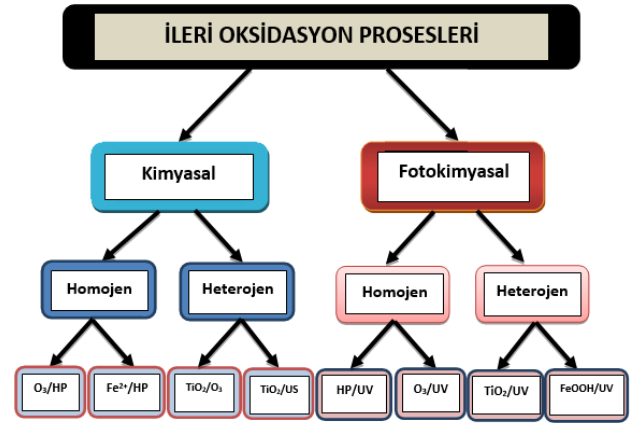
İOP çok genel olarak fotokimyasal (fotokatalizör+oksidan+UV-ultra viyole-ışınım) ve kimyasal (katalizör, sonoliz veya termal enerji+oksidan) olarak aktivasyon yöntemine göre ikiye ayrılmaktadır (**Şekil 2**); fakat daha farklı sınıflandırma ve kategorizasyonlar (homojen/heterojen sistemler) da mümkündür (Parsons, 2004). İOP'nin en eski ve bilinenleri O₃/UV-C, H₂O₂/UV-C, Fe²⁺/Fe³⁺/FeOOH/H₂O₂/UV-C (Foto-Fenton and Foto-Fenton-benzeri homojen ve heterojen ileri oksidasyon prosesleri), TiO₂/UV-A (titanyum dioksit veya başka yarıiletkenlerin yüzeyinde meydana gelen heterojen fotokataliz) ve TiO₂ yarıiletkeni ile ozon varlığında heterojen kataliz (TiO₂/O₃) (Arslan-Alaton ve diğ., 2009; Schneider ve diğ., 2014). Bunlar kısa (UV-C; 180-290 nm dalga boyları arasında ışınım yapan) veya yakın (UV-A; 300-390 nm dalga boyları arasında ışınım yapan) UV dalga boylarındaki ışınım ile aktive edilen homojen ve heterojen oksidasyon sistemleridir (**Şekil 2**). Ayrıca Fenton/Fenton-benzeri prosesler, O₃/H₂O₂ (perozon veya perokson olarak adlandırılan), sonoliz yoluyla veya metal/metal oksit katalizörleri ile aktive edilebilen, peroksit gibi

oksidanların kullanıldığı fotokimyasal olmayan İOP de mevcuttur (Glaze ve diğ., 1987; Miklos ve diğ., 2018). Yeni katalizör ve fotokatalizörlerin sentezi, karakterizasyonu ve kimyasal/fotokimyasal/fotokatalitik ileri oksidasyon sistemlerinde endüstriyel kirleticilerin giderimi için kullanılmaları son yılların önemli, ön plana çıkan araştırma konuları arasında yer almaktadır (Pelaez ve diğ., 2012; Schneider ve diğ., 2014).

Tüm üstünlüklerine rağmen İOP, kontrol edilmesi zor olan, enerji tüketimi yüksek, işletim maliyetleri ciddi rakamları bulabilen arıtma sistemleri olarak bilindiklerinden bir su/artıksu arıtma teknolojisi olarak kullanılmalarına karar vermeden önce bir "kontrol listesinin" hazırlanması önerilmektedir. Bu kontrol listesi konu ile ilgili uzmanlar tarafından hazırlanmış beş (5) kritik soruyu içermektedir (CCOT, 1996);

1. Parçalama teknolojisi bir faz transfer teknolojisine tercih ediliyor mu?
2. Hava veya alıcı su ortamına deşarj konusunda hassas kriterler/kıtlamalar mevcut mu?
3. Hedef endüstriyel kirleticinin havaya geçmesi zor mu/uçuculuğu az mı (örneğin fenol)?
4. Hedef endüstriyel kirleticinin adsorpsiyon kapasitesi düşük mü (örneğin endüstriyel boyar maddeler)?
5. Kirlitici ile yüklü aktif karbonun (veya farklı bir adsorbanın) bertarafı konusunda endişe verici bir durum söz konusu mu?

Eğer soruların cevabı en az üç kez "EVET" ise, İOP'nin mevcut arıtma sorununun çözümü için uygulanması düşünülebilir; başka bir deyişle İOP alternatif bir çözüm önerisi oluşturabilir.



Şekil 2. İleri Oksidasyon Proseslerinin Sınıflandırılması.

4. Sistem Boyutlandırma ve İşletim Maliyetleri

Yukarıda da söz edildiği üzere İOP, diğer ileri arıtma sistemlerine göre işletimi maliyeti daha yüksek olabileceği için, uygulanabilirliğine birtakım kriterler gözönünde bulundurarak karar verilmelidir. Organik karbon içeriği yüksek (KÖİ değeri >1000 mg/L), daha karmaşık/inert yapıları endüstriyel kirleticilerin özellikle fotokimyasal İOP ile arıtımı ekonomik ve teknik açıdan pek uygun değildir, nitekim bu tür uygulamalar ön arıtma uygulanmadığı ve İOP optimize edilmediği takdirde çok yüksek elektrik enerjisi ve kimyasal tüketimine neden olabilirler. Elektrik enerjisi tüketiminin başlıca nedeni UV lambalarının kullanılması ve lambaların belli aralıklarla yenilenmesidir (lambda ömrünün tükenmesi sonucunda yeni UV lambaları ile değiştirilmesi gerekmektedir. Piyasada satılan düşük basınçlı civa buharı lambaların ömrü yaklaşık olarak 20 bin saattir. Buraya not edilmelidir ki gerek UV ışık kaynakları gerekse ozon jeneratörleri için artık günümüzde bir enerji verimi (elektrik enerjisini fotonlara ve ozon moleküllerine dönüştürme) sınır değerine ulaşılmıştır ve bunun ötesinde bir elektrik enerjisi tasarrufu sağlamak, bu

cihazların verimini artırmak imkânlar ve teknoloji dahilinde mümkün değildir (Munter ve diğ., 1993). İOP uygulamalarında en fazla UV-C (kısa UV) emisyonu veren ışık kaynakları kullanılmakta, onun dışında en fazla çalışılan lamba türü UV-A floresan lambalarıdır (Stasinakis, 2008). UV lamba değiştirme maliyeti küçümsenmeyecek kadar yüksek ek bir işletme maliyeti olup elektrik enerjisi tüketimi maliyetinin yaklaşık olarak %30 kadar ilave bir işletim maliyetine neden olmaktadır. Oksidan/UV sistemi olarak düşünülebilecek fotokimyasal İOP'nin uygulanabilirliğine karar vermek için iki önemli proses tasarım değişkeninin dikkate alınması gerekir; bunların laboratuvar ve pilot ölçekli artırılabilirlik deneyleri ile çok dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerekir. Aksi takdirde, gerçek arıtma tesislerinde uygulanmaları teknik ve ekonomik açıdan büyük kayıplara neden olabilir. Bunlar (CCOT, 1996; Bolton, 2001);

-Arıtmaya tabi tutulan birim hacim atıksu başına uygulanan UV gücü veya dozu (kW/m³)

-Arıtmaya tabi tutulan birim hacim atıksu başına oksidan (genellikle bir peroksit) tüketimi (kg/m³)

Ozonun kullanıldığı karma ileri oksidasyon sistemleri için ozon üretim kapasitesi "kg ozon başına gerekli elektrik enerjisi" bazında yaklaşık olarak 10-15 kWh/kg O₃'dur ve işletim (elektrik tüketimi) maliyeti hesaplanırken dikkate alınması gerekmektedir (CCOT, 1996).

Uygulanan "UV dozu" ampirik bir parametredir ve atıksu debisi, hidrolik bekletme süresi ve UV ışık şiddetini tek bir ifade/de denklemde toplamaktadır. Bu ampirik ilişkinin iki tipi vardır; biri kesikli diğeri ise sürekli sistemler için kullanılmaktadır. Bunlar;

1) **Kesikli sistemler:** Bu tür fotokimyasal arıtma sistemlerinde UV ışık kaynağının gücü (kW) ve arıtma süresi (dak veya sa; h) çarpımı birim atıksu hacmi (reaktör kapasitesi; m³) başına enerji yükünü verir.

2) **Sürekli sistemler:** Bunlar atıksuların belirli bir debi ile arıtma sistemine giriş yaptığı sistemlerdir. Sürekli sistemlerde UV dozu atıksu debisi (m³/h) başına düşen UV gücüdür (kW).

Kesikli ve sürekli sistemlerde UV dozunu tanımlayan ampirik ilişkilere bakıldığında, her iki arıtma modunun da prensipte aynı olduğu anlaşılmaktadır (arıtma sisteminin boyutuna ve kapasitesine göre, Wh/L veya kWh/m³ birimleri kullanılır ve mevcut sistemlerle karşılaştırılır).

Burada belirtilmesi gereken nokta, hedeflenen arıtma (% giderim) verimine ve/veya son (çıkış) kirlenici konsantrasyonuna ulaşmak, gerekli UV dozunu tespit etmek için öncelikle bir deneysel tasarım yöntemi veya klasik optimizasyon çalışması ile en uygun arıtma koşullarının (tipik proses parametreleri: pH, oksidan konsantrasyonu, katalizör dozu, vb.) saptanması gerekmektedir. Hedef, herhangi bir kritik kirlenici parametresinin (AOX, KOİ, TOK, renk, siyanür, vb.) limit değeri bazında bir arıtma verimine ulaşmak için gerekli logaritmik giderim verimini (1-log, 2-log veya 3-log giderim, vb.) sağlamak olabilir. Eğer oksidasyon kinetiği 1. dereceye uymuyorsa -özellikle KOİ, TOK gibi kolektif parametreler bazında oksidasyon genellikle 0. dereceden kinetik gösterir-, bu durumda kütle (g, kg) KOİ, TOK giderimi ve hacim/debi başına sarfedilen elektrik enerjisi (kWh/m³ veya Wh/L olarak) hesaplanabilir. Enerji hesaplamalarında basit, 0.-1. dereceden hedef kirlenici giderim kinetikleri kullanılmakta, 0. dereceden kinetik gösteren kolektif çevre parametreleri için bağıl/mutlak giderim verimleri esas alınmaktadır. Başka bir deyişle, hedef kirlenici bazında UV dozu (temel işletim ve tasarım parametresi), işletim maliyetlerinin giderim kinetikleri ile birleştirilmesinden elde edilmektedir. EE/O (birim hacim ve log mertebeye (order) hedef kirlenici veya kolektif çevre kirliliği parametresinin giderimi için gerekli elektrik enerjisidir; birimi = kWh/m³/order (order=O=log), 1. dereceden kinetiğe uyan artırılabilirlik

çalışması için farklı fotokimyasal İOP'nin basit bir hesaplama yöntemi ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin, bir atıksudaki atrazini veya 1,4-dioksani fotokimyasal arıtma süresine karşı ölçerek söz konusu fotokimyasal İOP'nin (örneğin, HP/UV-C prosesinin) EE/O değeri bulunabilir ve önerilen arıtma sisteminin ekonomik açıdan fizibilitesine bu bilgi ışığında karar verilebilir. Bu hesaplama sonucunda atrazin örneğinde EE/O değeri 2-6 kWh/m³/log aralığında iken, 1,4-dioksan için bu değer 10-30 kWh/m³/log aralığında hesaplanmıştır (CCOT, 1996). Bunun açıklaması aşağıdaki gibidir; aynı giderim verimini elde edebilmek için atrazin için (bir herbisit) 1,4-dioksana (bir stabilizatör) göre beş (5) kat daha fazla elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır (aynı mertebeye giderim sağlayabilmek için, örneğin %90 (1-log), %99 (2-log) veya %99.9 (3-log).

UV-C ile sterilizasyon, oksitleyici/ağartıcı kimyasalların kullanıldığı dezenfeksiyon proseslerine (klorlama, ozonlama, vb.) göre daha ekonomik ve çevre dostu gibi görünse de, tüm konvansiyonel UV lambaları genellikle 20-200 mg aralığında civa içermektedir. Bu tür lambalar operasyon ve taşınmaları sırasında kırılabilir ve bu durum civa kontaminasyonuna neden olabilir. UV lambalarda civa ya sıvı formda (orta basınçlı civa buharı lambaları) veya amalgam içerisinde (düşük basınçlı floresan lambalarda) tutulurlar. Kazalar ve hatalı kullanım durumlarında söz konusu zararlı maddenin buhar formuna maruz kalma riski de artmaktadır. The United Nations Environmental Programme (UNEP), "Minamata Convention on Mercury" inisiyatifi ile insan sağlığını ve çevreyi korumak amacıyla civa buharı gibi insan kaynaklı zararlı emisyonların azaltılmasına yönelik fizibilite çalışmalarını başlatmış ve alınacak önlemler zincirini tanımlamıştır. UNEP, civa üretimini durdurma hedef yılı olarak 2020'yi belirleyerek bu konuda önemli bir adım atmıştır. 2020 yılında civa üretimini durdurma hedefini pek çok resmi kurum ve kuruluş toplam 127 ülkede imzalayarak civa gibi zararlı maddelerin üretimde kullanılmamasına öncü olmuşlardır. Sadece dezenfeksiyon amaçlı kullanılan sterilizasyon lambalarının akibeti konusunda ise süregelen bir belirsizlik söz konusudur. Bu önemli ve yaygın kullanım alanı (patojen giderimi) dışındaki tüm uygulamarda (görünür dalga boylarında emisyon veren lambalar ve su/atıksu arıtımı da dahil olmak üzere) civa buharı lambaları yerine LED (light emitting diode) lambaları önerilmektedir. Bunun için LED teknolojisinin de kısa zamanda geliştirilmesi gereklidir. LED lambalarının fotokimyasal arıtmada, hatta sterilizasyon amaçlı uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmaları çok önemlidir. LED kullanımının yaygınlaşması ile birlikte UV lamba ömrünün uzaması, servis maliyetlerinin azalması (lambanın değiştirilmesi, bakımı, tamiri, vb.) ayrıca LED bazlı arıtma sistemlerinin su/atıksu arıtımında daha etkin olması beklenmektedir. Nitekim yüksek güç tüketimleri, civadın dolayı zararlı atık kategorisinde yer almaları, düşük servis ömürleri ve fotonik verimleri (= mol giderilen kirlenici başına kullanılan mol foton) konvansiyonel ışık kaynaklarının kullanıldığı fotokimyasal İOP'nin uygulanabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Öte yandan, LED teknolojisinin son zamanlarda çok gelişmiş olması ve düşük dalga boylarında emisyon kabiliyeti olan LED lambalarının üretimine başlanması ile UV-LED/oksidan, UV-LED/katalizör ve UV-LED/oksidan/katalizör arıtma sistemleri siyanotoksinlerin, klorofenollerin, pestisitlerin ve boyar maddelerin arıtımında laboratuvar ve pilot ölçekte kullanılmaya başlanmıştır. LED teknolojisinin civa buharı lambalara göre bazı önemli avantajları ve üstünlükleri aşağıda listelenmiştir (Bolton, 2001). Bunlar;

- Kısa ısınma (start-up) süresi
- Civa bertaraf sorununun olmaması
- Uzun ömürlü olması nedeniyle daha az lamba değiştirme maliyeti
- Mekanik dayanıklılık
- Basit kullanım ve derli-toplu tasarım

- Düşük işletim voltajı nedeniyle daha düşük güç (elektrik) tüketimi
- Monokromatik (tek bir dalga boyunda) emisyon ile çalışma imkanıdır.

LED teknolojisi uzun yıllardır görünür ışık için rutin bir uygulama alanı olmasına rağmen kısa dalga boylarında (UV-C ışımı ile) henüz teknik olarak çok kısıtlı ve ekonomik olmayan seçenekler mevcuttur. Son yıllarda laboratuvar ölçekli çalışmalarda görülmüştür ki LED teknolojisi kısa UV dalga boylarında ışık kaynaklarının geliştirilmesi ile alternatif bir arıtma çözümü olarak karşımıza çıkacaktır. Şu anda LED teknolojisi ile çalıştırılan fotokimyasal ve fotokatalitik arıtma sistemleri henüz AR-GE aşamasındadır. Gerçek boyutta uygulamaya geçilmesi ve tam ölçekli bir arıtma teknolojisine geçilebilmesi için öncelikle daha büyük boyutlu LED ışık kaynaklarının üretilmesi gerekmektedir.

5. Tasarıma Ön Hazırlık Deneyleri

İşletim ve yatırım maliyetlerinin doğru tahmin edilebilmesi için su veya atıksu numuneleri ile "tasarıma ön hazırlık" deneylerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Bu ön arıtılabilirlik deneyleri, İOP'nin optimize edilmesini, daha verimli bir şekilde çalıştırılmasını mümkün kılmaktadır (Lodha ve Chaudhari, 2007). Örneğin, katalitik ozonlama, Fenton, Foto-Fenton, heterojen fotokataliz, (foto)katalitik sonoliz gibi İOP için proses değişkenleri birbirinden oldukça farklıdır ve optimizasyon deneylerinin İOP türüne/özelliklerine göre planlanması gerekmektedir (Beltran ve diğ., 2002; Pignatello ve diğ., 2006; Malato ve diğ., 2007).

Ön tasarım deneyleri için aşağıdaki hususların dikkate alınması gerekmektedir;

- Uygun/temsil edici bir numune hacmi
- Mevcut deşarj kriterleri ve belirlenen arıtma hedefleri
- Debi ve çevresel karakterizasyondaki varyasyonlar (değişimler)
- Arıtma tesisinin coğrafi konumu
- Yerel elektrik enerjisi birim fiyatları
- Elektrik enerjisi/işletim maliyetlerinin tahmini değerleri (EE/O değerler)
- Ön arıtma ihtiyacı (pH ayarı, süzme, ön çöktürme, vb.)

6. İOP'nin Performansını Etkileyen Başlıca Çevre Kirliliği Parametreleri

Bu bölümde, İOP'nin arıtma verimini etkileyen başlıca, en fazla bilinen endüstriyel ve kolektif parametrelere değinilmiştir.

6.1. Organik madde konsantrasyonu (KOİ, TOK)

Endüstriyel atıksuların İOP ile arıtımı için KOİ değerlerinin ≤ 1000 mg/L olması tavsiye edilmektedir. Optimum (en uygun) KOİ aralığı ise 100-500 mg/L'dir. Yüksek KOİ değerleri için (500-1000 mg/L), demir bazlı İOP tavsiye edilmektedir (Fenton ve Foto-Fenton prosesleri). KOİ değeri > 1000 mg/L ise, fotokimyasal ve fotokatalitik arıtma önerilmekte veya uygulamadan önce bir ön arıtma gerekmektedir (Safarzadeh-Amiri ve diğ., 1996). KOİ > 5000 mg/L ise İOP tavsiye edilmemektedir (Bolton, 2001; Pignatello ve diğ., 2006).

6.2. UV absorbans değeri

UV absorbans değerinin < 0.2 cm⁻¹ olması İOP için idealdir; fakat < 0.5 cm⁻¹ değerleri de tolere edilebilmektedir (CCOT, 1996). Yüksek UV absorbansları oksidanlarla UV-C ışığı için rekabete girmektedir; dolayısıyla ileri oksidasyonu inhibe etmekte, arıtma veriminde düşüşe neden olmaktadır.

Oksidanların kullanıldığı İOP'nde oksidanın UV-C absorptasyonu, serbest radikal üretimini doğrudan etkileyeceğinden dolayı yüksek absorbans değerleri fotokimyasal İOP için uygun bir reaksiyon ortamı değildir. UV absorbans değeri > 10 cm⁻¹ ise, tüm UV ışığı reaktörün kuartz kılıfının (çeperinin) ilk mm sinde absorplanmakta ve UV enerjisi (ışığı) oksidana ulaşmamaktadır. Absorbansın yüksek olduğu atıksu numunelerin fotokimyasal İOP ile arıtımı için etkin bir karıştırma veya doğrudan/yakın (arada kuartz cam kılıf/çeper olmaksızın) temas/mesafe tavsiye edilmektedir.

6.3. Askıda katı madde (AKM) ve Bulanıklık

AKM'nin UV/oksidasyon sistemi üzerinde iki farklı olumsuz etkisi vardır. Bunlar;

- i. Işığı yansıtma, dağıtma ve/veya absorplama
- ii. Organik maddeleri adsorplama

Sadece suda çözünmüş organik maddeler SO₄²⁻, HO[•] gibi serbest radikallerle doğrudan tepkimeye girebilirler (Peyton, 1993). Ortamda AKM (kolloidal maddelerden kaynaklanan türbidite) varsa, arıtma verimi önemli oranda düşer, çünkü katı formdaki kirlenmeler veya ortamdaki çözünmüş organik kirlenmeleri adsorplayan katılar yukarıda sayılan nedenlerden dolayı tepkimeleri yavaşlatır ve ayrıca söz konusu kirlenmelerin parçalanması (oksidasyonu) için faz transferi önemli bir engel oluşturur. Adsorplanan kirlenmeler, hidrofobik kirlenmeler (poliklorlu bifeniller, poliaromatik hidrokarbonlar, vb.) ve katı formdaki kirlenmelerin sulu fazda oksidasyonu birkaç aşamada gerçekleşeceği için gecikir. Bu etkiyi azaltmak/engellemek için bir ön arıtma işlemi (örneğin süzme, ekstraksiyon, filtrasyon) önemlidir. Atıksuda AKM ≥ 150 mg/L ise 10-30 nm tane boyutunda filtrelerle süzme işlemi şiddetle tavsiye edilmektedir. Kolloidal partiküllerin ve yağ damlacıklarının ortamdaki uzaklaştırılması ile hem organik madde yükü azalmakta hem de UV-C için rekabet edebilecek organik maddeler de ortadan kaldırılmaktadır (Bolton, 2001).

6.4. Yağ ve Gres

Tıpkı AKM örneğinde olduğu gibi atıksuda yağ ve gres parametresi değerlerinin yüksek olması UV ışığının absorplanmasına neden olmakta ve bunlar oksidanlarla UV ışığı için rekabet etmektedir. Aynı zamanda reaksiyon ortamında oluşan HO[•] de tüketmelerinden dolayı hedef kirlenmelerin oksidasyonunu da engellemektedir. Bir ön arıtma yöntemi ile ortamdaki uzaklaştırılmaları tavsiye edilmektedir (Ledakowicz ve diğ., 2006).

6.5. Karbonat, bikarbonat, klorür, sülfat ve fosfat

Inorganik anyonlar ve polianyonlar da tıpkı çözünmüş/kolloidal organik maddeler gibi ortamdaki HO[•] için hedef kirlenmelerle rekabete girmektedir. Bunlar genel olarak "radikal tutucu" olarak adlandırılmaktadır (Peyton, 1993). Anyonlar, türlerine göre daha alkali (bikarbonat and karbonat; pH $> 8, 10$) veya daha asidik (klorür; pH $< 2,3$) pH değerlerinde etkili olmaktadır (Rincon ve Pulgarin, 2004). HO[•] ve söz konusu anyon arasındaki bimoleküler tepkime hızı de anyonun türüne ve konsantrasyonuna göre değişiklik göstermektedir (Rincon ve Pulgarin, 2004).

7. Bazı Örnek Endüstriyel Kirlenmeler Bazında Arıtma Örnekleri

Bu kısımda, endüstriyel atıksularda daha fazla rastlanan kirlenmeler için arıtma örnekleri ve dikkat edilmesi gereken bazı noktalar sunulmuştur.

7.1. MTBE (metil tert butil eter)

MTBE bir endüstriyel solvent ve çok bilinen bir yeraltı suyu kirleticisidir. Yüksek su çözünürlüğünden dolayı, sudaki konsantrasyonu 5 mg/L'yi bulabilmektedir (Cater ve diğ., 2000). Bu mertebedeki konsantrasyonlarda aktif karbon adsorpsiyonu gibi ileri arıtma yöntemlerinin uygulanması ekonomik açıdan mümkün değildir. MTBE arıtımı için H₂O₂/UV-C prosesi önerilmektedir. 10 mg/L H₂O₂/UV-C arıtımı için tahmin edilen EE/O değeri yaklaşık olarak 10 kWh/m³/log'dur (CCOT, 1996).

7.2. Uçucu organik maddeler

Uçucu organik maddeler, MTBE gibi endüstriyel solventlerdir ve çeşitli temizlik, ekstraksiyon, kurutma, ayırma ve yıkama işlemlerinde kullanılmaktadır (Cater ve diğ., 2000). Bunların arasında DCE (dikloroetilen), TCE (trikloroetilen), VC (vinil klorür) en bilinen yeraltı suyu kirletici grubunu oluşturmaktadır ve temel (başlıca) su kaynağı olarak yeraltı suyunu kullanan ülkeler için yeraltı suyunun etkin arıtımı önem taşımaktadır. 10 mg/L mertebesindeki uçucu organik maddeler için UV/O₃, UV/H₂O₂, UV/Fenton ve özellikle fotokimyasal olmayan perokson ("perozon"; O₃/H₂O₂) prosesi önerilmektedir (Glaze ve diğ., 1987). Ozon kombinasyonları doğrudan yeraltına enjeksiyon yoluyla sürekli sistemlerde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (CCOT, 1996; Bolton, 2001).

7.3. Siyanür

Siyanür (CN⁻), maden işletmelerinden ve elektrokaplama prosesinden kaynaklanan, insan sağlığına ve çevreye çok olumsuz etkileri olan, zararlı/toksik bir endüstriyel kirleticidir. KCN, NaCN gibi serbest siyanürlerin oksidasyonu nispeten kolaydır ve konvansiyonel oksidantlarla (H₂O₂, HOCl, ClO₂, O₃) sağlanabilir, fakat daha karmaşık, kompleks formdaki siyanürler (genel formül: FeCN_x) için daha kuvvetli (ileri) oksidasyon sistemleri gerekmektedir. Siyanür arıtımı için önerilen İOP, H₂O₂/UV (tekil H₂O₂/UV prosesi ile arıtma için EE/O = 40-80 kWh/m³/log aralığında hesaplanmıştır), Foto-Fenton arıtımı ile bu değer takriben 10-20 kWh/m³/log aralığına düşmektedir, fakat demir bazlı İOP (Fenton prosesleri) için asidik değerlere (pH=2-5) bir pH ayarı gerekmektedir (Safarzadeh-Amiri ve diğ., 2019). Serbest siyanür (CN⁻) siyanat anyonuna (CNO⁻) yükseltgenmekte olup, nihai olarak CO₂, NO₂⁻ veya N₂(g)'a dönüşür. Kompleks formdaki siyanürler için İOP, CN⁻ için konvansiyonel kimyasal oksidasyon önerilmektedir (CCOT, 1996).

7.4. Fenoller ve polifenoller

Endüstriyel kirlilik parametrelerinin başında yer alan fenoller çeşitli formlarda (polifenol, halojenli fenol, vb.) atıksuda bulunmaktadır. Fenol ve fenol türevleri endüstriyel solvent ve koruyucu (stabilizatör) olarak kullanılırlar. Konsantrasyonları atıksularda (arıtma tesisi çıkışında) 100-800 mg/L mertebelerini bulabilir. Bu yüksek organik madde konsantrasyonlarında Foto-Fenton veya fotokimyasal olmayan İOP daha uygun seçeneklerdir (Pera-Titus ve diğ., 2004; Malato ve diğ., 2007; Lodha ve Chaudhari, 2007; Changotra ve diğ., 2019). İşletim maliyetleri (EE/O değerleri cinsinden) H₂O₂/UV arıtımı için >20-30 kWh/m³/log değerini bulduğu için önerilmemektedirler. Toplam fenol konsantrasyonu >100-200 mg/L ve atıksuyun KOİ değeri de yüksek ise (>1000 mg/L), işletim maliyetleri çok yüksek olarak hesaplandığından (EE/O ≈40-50 kWh/m³/log) karasu ve kağıt endüstrisi atıksuları gibi atıksular için İOP uygun bir seçenek değildir veya ön arıtma şarttır (Bolton, 2001; Pera-Titus ve diğ., 2004; Wang ve diğ. 2018).

7.5. TOX ve AOX (toplam ve adsorplanabilir organik bağlı halojenler)

AOX pestisit üretimi, deri, kâğıt ve tekstil endüstrisi atıksularında yüksek konsantrasyonlarda bulunmaktadır (Arslan ve diğ., 1999; Wang Paździor ve diğ., 2019). TOX ve AOX söz konusu endüstriler için özel (spesifik) bir kirlilik parametresidir ve 100-200 mikrog/L mertebelerinde bir limit değeri mevcuttur (ATV-Arbeitsgruppe, 1993; Schulze-Rettmer, 2001). Organik bağlı halojen içeriği (halojenli aromatik bileşikler) nedeni ile nispeten zor arıtılan bu parametre için O₃/UV ve demir bazlı kimyasal ve fotokimyasal İOP önerilmektedir (Bolton, 2001).

8. Sonuç ve Değerlendirme

Endüstriyel atıksular yapıları/debileri değişken, inert ve/veya zor ayrışan, karmaşık ve/veya toksik yapıları nedeniyle arıtılması oldukça güç, ileri arıtma teknolojilerinin uygulanmasını gerektiren "zor" atıksulardır. Laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalarda klasik biyolojik (aktif çamur) arıtma sistemleri, ileri kimyasal ve fotokimyasal oksidasyon prosesleri ile entegre edilmiştir, fakat gerçek uygulamalarda bu yaklaşım oldukça sınırlı kalmıştır (Ledakowicz ve diğ., 2006). Bu makalede İOP'nin hangi koşullarda ne tür kirletici gruplarına nasıl uygulanabileceği konusunda bazı temel bilgiler verilmiş, bu tür uygulamaların başarılı olması için proses-kirlenme profile ilişkisinin ve alternatif İOP'nin iyi bilinmesi ve söz konusu sistemlerinin bilinçli bir şekilde optimize edilmesi ve çalıştırılması gerektiği vurgulanmıştır. İOP'nin etkili ve ekonomik bir şekilde uygulanmaları için özellikle dikkat edilmesi gereken hususlara da değinilmiştir. Düşünenlerinin aksine İOP'ni kontrol etmek basit değildir, nitekim kirleticilerin hangi ileri oksidasyon ürünlerine dönüştüğü ve hedef kirleticilerin parçalanma mekanizması tam olarak bilinmemektedir. Bundan dolayı, önerilen İOP'nin organik madde gideriminde başarılı ve hızlı olması, işletim ve ilk yatırım maliyetinin de ekonomik olarak kabul edilebilir mertebelerde kalması yeterli değildir; aynı zamanda ekotoksikolojik olarak emniyetli olmaları gerekir; aksi takdirde İOP'nin konvansiyonel arıtma sistemleri ile entegrasyonu ve/veya konvansiyonel yöntemlerin yerine geçmesi sürdürülebilir değildir. Sonuç olarak, her atıksu/kirletici için özel bir çözüm yöntemi ve yaklaşımı vardır, endüstriyel kirleticilerin giderimi için İOP iyi bir alternatif olabilir, bu makale de gelecekteki deneysel çalışmalara ve uygulamalara bir yol gösterebilir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9. Kaynaklar

- Arslan, I., I. Akmehtmet Balcioğlu, and T. Tuhkanen (1999), Oxidative treatment of simulated dyehouse effluent by UV and near-UV light assisted Fenton's reagent, *Chemosphere*, 39(15), 2767-2783, [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00211-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00211-8).
- Arslan-Alaton, I., G. Tureli, and T. Olmez-Hanci (2009), Treatment of azo dye production wastewaters using Photo-Fenton-like advanced oxidation processes: Optimization by response surface methodology, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, 202(2-3), 142-153, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2008.11.019>.

ATV-Arbeitsgruppe (1993), Chapter 2.1.3.: AOX und Gewässerbeschaffenheit, In: *Korrespondenz Abwasser*

- 40, 1503-1510.
- Beltrán, F.J., F.J. Rivas, and R. Montero de Espinosa (2002), Catalytic ozonation of oxalic acid in an aqueous TiO₂ slurry reactor, *Appl. Catal. B Environ.*, 39(3), 221-231, [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(02\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(02)00102-9).
- Bolton, J. R. (2001), *Ultraviolet Applications Handbook*, 2nd Edn., Bolton Photosciences Inc., Edmonton.
- Calgon Carbon Oxidation Technologies (CCOT, 1996), *The AOP Handbook*. CCOT, Ontario.
- Caprio, V., A. Insola, and R. Marott (1999), Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery, *Catal. Today*, 53(1), 51-59, [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00102-9).
- Cater, S.R., M.I. Stefan, J.R. Bolton, and A. Safarzadeh-Amiri (2000), UV/H₂O₂ treatment of methyl tert-butyl ether in contaminated waters, *Environ. Sci. Technol.*, 34(4), 659-662, <https://doi.org/10.1021/es9905750>.
- Changotra, R., H. Rajput, and A. Dhir (2019), Treatment of real pharmaceutical wastewater using combined approach of Fenton applications and aerobic biological treatment, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, 376, 175-184, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.02.029>.
- Fatta-Kassinos, D., C. Manaia, T.U. Berendonk, E. Cytryn, J. Bayona, B. Chefetz, and L. Lundy (2015), COST Action ES1403: New and emerging challenges and opportunities in wastewater reuse (NEREUS), *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22(9), 7183-7186, <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4278-0>.
- Glaze, W.H., J.-W. Kang, D.H. Chapin (1987), The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation, *Oz. Sci. Eng.*, 9(4), 335-352, <https://doi.org/10.1080/01919518708552148>.
- Ike, I.A., K.G. Linden, J.D. Orbell, and M. Duke (2018), Critical Review of the science and sustainability of persulphate advanced oxidation processes, *Chem. Eng. J.*, 338, 651-669, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.034>.
- Ledakowicz, S., M. Michniewicz, A. Jagiella, J. Stufka-Olczyk, and M. Martynelis (2006), Elimination of resin acids by advanced oxidation processes and their impact on subsequent biodegradation, *Water Res.*, 40(18), 3439-3446, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.06.038>.
- Lodha, B. and S. Chaudhari (2007), Optimization of Fenton-biological treatment scheme for the treatment of aqueous dye solutions, *J. Hazard. Mater.*, 148(1-2), 459-466, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.061>.
- Lucas, M.S., A.A. Dias, A. Sampaio, C. Amaral, and J. Peres (2007), Degradation of a textile reactive azo dye by a combined chemical-biological process: Fenton's reagent-yeast, *Water Res.*, 41(5), 1103-1109, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.013>.
- Malato, S., J. Blanco, M.I. Maldonado, I. Oller, W. Gernjak, L. Pérez-Estrada (2007), Coupling solar photo-Fenton and biotreatment at industrial scale: Main results of a demonstration plant, *J. Hazard. Mater.*, 146(3), 440-446, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.084>.
- Miklos, D.B., C. Remy, M. Jekel, K.G. Linden, J.E. Drewes, and Uwe Hübner (2018), Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment-a critical review, *Water Res.*, 139, 118-131, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.042>.
- Munter, R., S. Preis, S. Kamenv (1993), Methodology of ozone Introduction into water and wastewater treatment, 1993, *Oz. Sci. Eng.*, 15(2), 149-165, <https://doi.org/10.1080/01919519308552265>.
- Oller, I., S. Malato, and J.A. Sánchez-Pérez (2011), Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination-a review, *Sci. Tot. Environ.*, 409(20), 4141-4166, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.061>.
- Ollis, D.F. (2001), On the need for engineering models of integrated chemical and biological oxidation of wastewaters, *Wat. Sci. Technol.*, 44(5), 117-123, <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0265>.
- Oturan, M.A. and J.-J. Aaron (2014), *Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review, Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577-2641, <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>.
- Pariante, M.I., J.A. Siles, R. Molina, J.A. Botas, J.A. Melero, and F. Martinez (2013), Treatment of an agrochemical wastewater by integration of heterogeneous catalytic wet hydrogen peroxide oxidation and rotating biological contactors, *Chem. Eng. J.*, 226, 409-415, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.081>.
- Parsons, S. (Ed.) (2004). *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*, IWA Publishing, London, 368 s.
- Paździor, K., L. Bilińska, and S. Ledakowicz (2019), A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chem. Eng. J.*, 376, 120597, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.057>.
- Pelaez, M., N.T. Nolan, S.C. Pillai, M. Seery, P. Falaras, A.G. Kontosi, P.S.M. Dunlop, J.W.J. Hamilton, J.A. Byrne, K. O'Shea, M.H. Entezari, and D.D. Dionysiou (2012), A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications, *Appl. Catal. B Environ.*, 125, 331-349, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.05.036>.
- Pera-Titus, M., V. García-Molina, M.A. Baños, J. Giménez, and S. Esplugas (2004), Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: A general review, *Appl. Catal. B Environ.*, 47(4), 219-256, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2003.09.010>.
- Peyton, G. R. (1993), The free-radical chemistry of persulfate-based total organic carbon analyzers, *Marine Chemistry*, 41(1-3), 91-103, [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(93\)90108-Z](https://doi.org/10.1016/0304-4203(93)90108-Z).
- Pignatello, J.J., E. Oliveros, and A. MacKay (2006), Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 36(1), 1-84, <https://doi.org/10.1080/10643380500326564>.

- Rincon, A.G. and C. Pulgarin (2004), Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on *E. coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO₂: Implications in solar water disinfection, *Appl. Catal. B Environ.*, 51(4), 283-302, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.03.007>.
- Ribeiro, A. R. L., N. F. Moreira, G. Li Puma, and A.M. Silva (2019), Impact of water matrix on the removal of micropollutants by advanced oxidation technologies, *Chem. Eng. J.*, 363(5), 155-173, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.080>.
- Safarzadeh-Amiri, A., J.R. Bolton, and S.R. Cater (1996), The use of iron in advanced oxidation processes, *J.AOT.*, 1(1), 105-111, <https://doi.org/10.1515/jaots-1996-0105>.
- Schneider, J., M. Matsuoka, M. Takeuchi, J. Zhang, Y. Horiuchi, M. Anpo, and D. W. Bahnemann (2014), Understanding TiO₂ photocatalysis: Mechanisms and materials, *Chem. Rev.*, 114(19), 9919-9986, <https://doi.org/10.1021/cr5001892>.
- Schulze-Rettmer, R. (2001), Ist der AOX noch sinnvoll? Auswertung des Buches "Halogen-Organische Verbindungen und Konsequenzen", In: KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48, 1602-1614.
- Stasinakis, A.S. (2008), Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment-a mini review, *Global NEST Journal*, 10(3), 376-385.
- Wang, Y., S. Shia, C. Wang, and S. Fanga (2018), Degradation of pulp mill wastewater by a heterogeneous Fenton-like catalyst Fe/Mn supported on zeolite, *Environ. Prot. Eng.*, 44(2), 131-145, <https://doi:10.5277/epe180209>.
- URL-1 (UNEP, 2022), <https://www.mercuryconvention.org/en/meetings/cop4>, erişim: 02.03. 2022.
- URL-2, <https://www.intechopen.com/chapters/70086>, erişim: 12.04.2022.