

ÇEVRE, KARBON VE SU EKOSİSTEMLERİ



Editör: Doç. Dr. Miraç UÇKUN

yaz
yayınları

ÇEVRE, KARBON VE SU EKOSİSTEMLERİ

Editör

Doç. Dr. Miraç UÇKUN

yaz
yayınları

2026

Çevre, Karbon ve Su Ekosistemleri

Editör: Doç. Dr. Miraç UÇKUN

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8996-37-1

Mayıs 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Yüzer Güneş Enerji Sistemleri ve Sucul Ekosistem Üzerine Etkileri.....	1
<i>Aysel ALKAN UÇKUN, Şeyma AKKURT</i>	
Küresel Karbon Döngüsünde Yutak Alanların Rolü ve Koruma Stratejileri	26
<i>Aysel ALKAN UÇKUN</i>	

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

YÜZER GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİ VE SUCUL EKOSİSTEM ÜZERİNE ETKİLERİ

Aysel ALKAN UÇKUN¹

Şeyma AKKURT²

1. GİRİŞ

Enerji üretiminde fosil yakıtların kullanımı çevreye zararlı emisyonlara neden olmaktadır (Elminshawy vd., 2022). Küresel iklim kriziyle mücadele sürecinde, enerji üretiminde karbon emisyonlarının azaltılması oldukça önemlidir (Garrett vd., 2024). Artan enerji tüketimi ve karbon emisyonlarını düşürme ihtiyacı dünyada güneş enerjisinin kullanımının yaygınlaşmasını hızlandırmıştır (IEA, 2019). Güneş enerjisi, tüm dünyada yaygın ve serbest olarak bulunabilen sürdürülebilir ve çevre dostu enerji alternatiflerinden biridir (Kumar vd., 2013). Güneş enerjisinden elektrik üretmenin en popüler yöntemi fotovoltaik (FV) sistemlerdir (Sudhakar ve Srivastava, 2013; Shukla vd., 2015). Bu sistemlerde güneş ışınları elektrik enerjisine ve ısı enerjisine dönüştürülür (Sahu vd., 2016). Son yıllarda yüzer güneş enerji sistemleri (YGES)'ler FV'lerin enerji üretiminde kullanımını yaygınlaştırmanın alternatif bir yoludur (Bank, 2018). FV sistemleri kurulum türlerine göre, yere monte/geleneksel kara tabanlı, çatı üstü, anal üst, açık deniz ve göl/rezervuar tabanlı YGES'ler olmak üzere 5 farklı gruptan oluşmaktadır (Sahu vd., 2016). 2050 yılına kadar dünya çapında fosil yakıtlardan üretilen

¹ Doçent Doktor, Karabük Üniversitesi, Orman Fakültesi, Doğa Koruma ve Biyoçeşitlilik Yönetimi Bölümü, ORCID: 0000-0002-8957-7476.

² Doktor Öğretim Üyesi, Karabük Üniversitesi, Orman Fakültesi, Doğa Koruma ve Biyoçeşitlilik Yönetimi Bölümü, ORCID: 0000-0002-0135-1975.

enerji oranının %12'ye düşmesi ve güneş FV üretiminin iki katına çıkarak küresel enerji arzının %38'ini oluşturması beklenmektedir (DNV, 2022). Ancak, GES'lerin kurulumu için yerleşim yerlerinin yakınında geniş alanlara ihtiyaç duyulması önemli bir sorundur (Oliveira-Pinto ve Stokkermans, 2020). Şehirlerin birçok yerinde arazi ihtiyacını ve elektrik üretimi için gerekli olan maliyeti azaltmak amacıyla büyük su kütlelerinin üzerine YGES kurulmaktadır. Bu uygulama oldukça yenidir ve kullanımı dünya çapında artmaktadır (Horton, 2022). YGES'lerin tasarımındaki değişikliklerle birlikte hızla yaygınlaştırılmasının, Birleşmiş Milletler (BM) Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri vardır (Bank, 2018).

İlk YGES (20 kW) 2007 yılında Japonya'da kurulmuştur. Dünya çapındaki YGES kapasitesi 2019 yılında 2.4 GW'a ulaşmıştır ve bu artış üstel bir oranda devam etmektedir (Vo vd., 2021; Trapani ve Redón Santafé, 2015). Japonya, Singapur, Kore ve Filipinler gibi dünyanın birçok ada ülkesinde fotovoltaik sistemlerin kurulumu için uygun arazi bulunmamaktadır. Bu bağlamda, birçok ülkede (Japonya, ABD, Kore, Avustralya vb.) ve dünyada YGES'e olan talep giderek artmaktadır. YGES farklı sucul bölgelere (okyanuslar, göller, balık çiftlikleri, barajlar vb.) ve atık su kütlelerine kurulabilir (Dubey vd., 2013). Her ne kadar YGES'lerin ekonomik ve teknik uygulanabilirlikleri iyi belirlenmiş olsa ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine (SKH) katkılar sağlasa da su kütleleri üzerindeki faydaları ve zararları hakkındaki bilimsel anlayış oldukça sınırlıdır. YGES'lerin ekosistem etkilerine ilişkin bir anlayış geliştirmek, eş zamanlı zararlı etkilerden kaçınan ve ortak faydaları en üst düzeye çıkaran sürdürülebilir dağıtımları sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

karşı dayanıklı özel olarak üretilmiş modüller gerekecektir. Kablolar ve konektörler sayesinde elektrik, PV'lerden çekilir ve karaya taşınır. Bu şekilde, güç şebekeye verilir veya pillerde depolanabilir. Su geçirmez ve yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı kablolar kullanılmalıdır (Sahu vd., 2016).

1.2. Yüzer Güneş Enerji Sistemlerinin Avantajları ve Olası Dezavantajları

YGES'ler tsunami, deprem, şiddetli kasırgalar ve su seviyesindeki değişiklikler gibi birçok çevresel olaylardan etkilenir. Bu çevresel olaylar YGES'lerin uzun süreli kullanımlarını ve performanslarını etkiler. Ancak mevcut YGES'lerin güvenilirliği ve yüksek performansları, birçok ülkeyi bu sistemleri kullanmaya ikna etmiştir (Pouran, 2018). YGES'ler rezervuarlardaki suyun soğutma etkisi sayesinde yere ve çatıya monte edilen fotovoltaiik sistemlerden daha fazla enerji üretir. Su kaynaklarının az olduğu bölgelerde su güvenliği, su kütlelerinin buharlaşmasının azaltılması ile sağlanır (Pouran vd., 2022). YGES'ler, sulama kanallarında (%70), doğal göllerde (%33) ve yapay göllerde (%50) buharlaşmayı önemli oranlarda azaltır (Sharma vd., 2015; Choi, 2014). Brezilya'nın yarı kurak bölgesinde yapılan bir çalışmada, su buharlaşmasının artan sayıda yüzer fotovoltaiik sistemler sayesinde %15.3'ten %55'e kadar azaldığı bildirilmiştir (Lopes vd., 2022). Yüzer sistemler, su yüzeyinde gölge oluşturarak güneş ışığı difüzyonunu azaltır ve alg oluşumunu engeller, böylece olası bir ötrofikasyonun zararlı etkilerinden kaçınılmış olur. Enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin kullanımı sayesinde karbon salınımının azalmasını sağlar (Kumar vd., 2015). YGES'lerin avantajları olduğu kadar olası çevresel dezavantajları da vardır. Aşağıda bu olası olumsuz çevresel ve sucul etkiler sıralanmıştır (Sahu vd., 2016; Koondhar vd., 2024).

- Bu sistemler, ekolojik olarak korunan ve hassas alanlarda etki yaratabilir.
- Üzerine kurulum yapılacak silikon modüller ve HDPE termoplastik şamandıralar, suyun kalitesini etkileyebilir.
- Su altı kabloları nedeniyle elektrik kazaları olasılığı ve mevcut ekosistemler üzerine etkisi olabilir.
- Su kütlelerindeki balıkçılık ve diğer ulaşım faaliyetleri etkilenebilir.
- Su sisteminin biyolojik çeşitliliğinin etkilenmesi muhtemeldir.
- Rüzgâr ve dalgalar gibi dış etkenler, yüzer güneş enerji santrallerine zarar verebilir.

1.3. Sucul organizmalar üzerindeki etkiler

Son çalışmalar, YGES'lerin öncelikli olarak abiyotik parametrelere odaklandığını, ekolojik süreçler üzerindeki etkilerinin henüz yeterince bilinmediğini teyit etmektedir. Su organizmaları üzerindeki etkileri değerlendiren çalışmaların çoğunluğu balık ve kabuklulara odaklanmıştır ve esas olarak su ürünleri yetiştiriciliğiyle ilgilidir, dolayısıyla YGES panelleri altında yetiştirilen hayvanların büyüme oranları değerlendirilmiştir (Pang vd., 2022; Chang vd., 2023). Su ürünleri yetiştiriciliğine odaklanması nedeniyle, vücut ağırlığı ve uzunluğu, üretim ve büyüme hızı gibi değişkenler hem balık hem de kabuklular için ölçülmüştür. Ancak, incelenen çalışmalar çelişkili sonuçlar bildirmektedir. Bazı çalışmalarda (Chang vd., 2023; Wang vd., 2022). YGES kurulmuş olan bölgelerde, balık vücut ağırlığında ve uzunluğunda bir artış olduğu bildirilirken, bazılarında (Chateau vd., 2019) büyüme oranında azalma olduğu gözlenmiştir. Kabuklularla yapılan çalışmalarda, YGES panellerinin olduğu bölgede, yengeç ve karides vücut boyutlarında bir artış olduğu gözlenmiştir (Pang vd., 2022; Chang vd., 2023) ancak başka bir çalışmada önemli bir fark gözlenmemiştir (Wang vd., 2022). Literatürde konuyla ilgili bir

örüntü belirlemek için yeterli çalışma yoktur. O yüzden YGES varlığının su ürünlerinin büyümesini ve üretimini nasıl etkileyebileceği sonucuna varmak hala mümkün değildir. YGES yapıları, enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak için su yüzeyinin büyük bir alanını (%74'e kadar) kaplayabilir (Exley vd., 2021). YGES'in varlığı, ışığın ve fotosentetik olarak aktif radyasyonun gelişini önemli ölçüde sınırlama potansiyeline sahiptir (Sharma vd., 2015). Işığın mevcudiyeti, ekosistemler içindeki enerji akışını yönlendiren birincil üretim için ana parametreler arasındadır (Karlsson vd., 2009). Azalmış ışık, fitoplanktonik, makrofitik ve bentik birincil üretimi doğrudan etkileyerek ototrofik topluluklardaki biyokütle dağılımını ve organik madde dinamiklerini değiştirme ve buna bağlı olarak tüketici çeşitliliğini ve besin döngüsünü etkileme potansiyeline sahiptir (Vadeboncoeur vd., 2002; Larson vd., 2007). YGES'lerin fitoplankton tepkisi üzerindeki etkileri, daha yüksek trofik seviyelerin besin kaynağı olmaları ve bazılarının su kalitesi üzerinde önemli bir etki göstermeleri nedeniyle çok önemlidir (Rolland vd., 2013). Her türlü yüzey örtüsü, fotosentezi kısıtlar, su-sediment arayüzünde fosfor salınımını sınırlar, dolayısıyla fitoplankton yoğunluğunu, biyokütleyi ve klorofil-a konsantrasyonlarını düşürür (Kleeberg vd., 2013). Etkilerin büyüklüğü su kütlesi tipine, yüzey örtüsüne ve kapsama alanına göre değişir ancak genel olarak önemlidir. Örneğin, Polonya'da küçük bir göldeki buz örtüsü, fitoplankton biyokütlesini %51 oranında azaltmıştır (Lenard ve Wojciechowska, 2013). Arjantin'deki bir mezokozmos deneyinde, su yüzeyini kaplayan bitki örtüsünün, fitoplankton biyokütlesini %88 oranında azalttığı gözlemlenmiştir (de Tezanos Pinto vd., 2007). Dahası, fotik bölgedeki yüzeysel ışık yoğunluğunu %1'e düşüren bir boya kullanan deneyde, fitoplankton biyokütlesinin %60 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Batt vd., 2015). Genel biyokütleyi etkilemenin yanı sıra, YGES panellerinin neden olduğu ışık baskılanması, fitoplankton üremesinin zamanlaması ve

oluşumunda kaymalara da neden olabilir. Daha düşük fitoplankton büyümesi ve dolayısıyla besin alımı, su sütunundaki besinlerin kalıcılığını sağlayacak, bu da büyüme mevsiminin ilerleyen dönemlerinde, fitoplankton çoğalması olasılığını artıracaktır (Salmi ve Salonen, 2016). Simülasyonlar, YGES ile kaplanmış alanların, klorofil-a (chl-a) konsantrasyonu ve alg büyümesini düşürebileceğini öngörmüştür (Chateau vd, 2019; Haas vd., 2020). Chateau vd. (2019), bir balık havuzunda %40 FV panel örtüsünün, kış aylarında ortalama chl-a konsantrasyonunu 1.61'den 1.06 mg/L'ye ve yaz aylarında 1.06'dan 0.86 mg/L'ye düşüreceğini tahmin etmiştir. Simülasyonlar, YGES panel örtüsü %40'ın üzerinde olduğunda, alg biyokütlesinde önemli azalmalar olabileceğini öne sürmüştür (Haas vd., 2020). Ayrıca, YGES kapsamının %60 veya %70'i aşmasının son derece düşük chl-a konsantrasyonlarına ($<1\mu\text{g/L}$) yol açabileceği öngörülmüştür (Exley vd., 2022). Aslında, alg büyümesindeki azalmalar YGES'in olumlu bir sonucu olarak algılanır çünkü ötrofik göllerde su kalitesini iyileştirir (Gadzanku vd., 2021). Ancak, YGES panelleri altında, fitoplanktonların hareketlilik, beslenme modu, dinlenme aşamaları oluşturma yeteneği, organizasyon, hücre şekli ve boyut sınıfı gibi işlevsel nitelikleri değişebilir (Özkundakci vd., 2016). Genel olarak yüzey örtüleri altındaki ışık mevcudiyetinin azalması, büyük ve sürüklenen fitoplankton türlerini ortadan kaldırarak, mekanik hareket edebilen daha küçük hareketli formların baskın olmasına yol açabilir, bu da popülasyon dinamiğini etkiler (Campbell ve Haase, 1981). Pelajik ve bentik üreticiler arasındaki rekabetçi etkileşimler ışık ve besin etkenleri tarafından yönlendirilir. Bu nedenle, ışık mevcudiyetinde köklü değişiklikler yapılırsa, ekosistem işleyişinde kaymalar beklenebilir (Yamamichi vd., 2018; Sand-Jensen ve Borum, 1991). Işık, göllerdeki avcı-av karşılaşmalarının sonucunu yönlendirebilir (Becker vd., 2009). Birçok balık görsel avcıdır ve ışığın azaltılması, avın algılanmasını ve beslenme başarısını etkileyebilir (Chidami ve

Amyot, 2008). YGES'in neden olduğu gölgelenme ayrıca bentik birincil üretim, bentik omurgasızlar ve balıklar gibi daha yüksek trofik seviyelerde azaltılmış bir üretim ve biyokütleye neden olabilir (Yamamichi vd., 2018). Sonuç olarak, YGES panellerinin trofik transfer verimliliği üzerindeki etkileri, ışık seviyeleri ve besin bulunabilirliği gibi birden fazla faktör arasındaki etkileşime bağlıdır.

Güneş radyasyonu ve besin konsantrasyonları fitoplankton tepkisinin birincil etki güçleri olsa da oksijen ve sıcaklık seviyeleri, daha yüksek trofik seviyelerdeki etkileri anlamak için kritik öneme sahiptir. Buzla kaplı göllerde, oksijen tükenmesi balık ölümlerinin başlangıcını belirleyen en önemli faktördür (Urabe vd., 2002), ancak aşırı yaz koşullarında da balık ölümleri görülebilir ve bu da sıcaklık-oksijen sıkışmasından kaynaklanır (Till vd., 2019). Metabolik hızın bir düzenleyicisi olan sıcaklığın, daha yüksek trofik seviyelerde önemli etkileri vardır. Örneğin, bir çalışmada, sonbaharda su sıcaklığında 1 °C'lik bir düşüşle zooplankton bolluğunda %9'luk bir azalma olduğu, ilkbaharda ise su sıcaklığında 1 °C'lik bir artışla zooplankton bolluğunda %27'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir (Haberman ve Haldna, 2017). Chateau vd. (2019), %40 YGES kaplamasının, ortalama olarak, su sıcaklığını kışın 20.99 °C'den 20.22 °C'ye ve yazın 31.03 °C'den 29.63 °C'ye düşürebileceğini belirtmiştir. Sıcaklık, ekolojik süreçlere etkileri olan çeşitli fiziksel ve kimyasal su özelliklerini düzenler. Örneğin, çözünmüş oksijen (ÇO) oranı daha yüksek sıcaklıklarda azalır (Foley vd., 2012). Su sıcaklığı ayrıca fitoplanktonların batma oranlarını belirleyen su viskozitesini ve yoğunluğunu da etkiler ve fitoplanktonların süspansiyonunu ve hayatta kalmasını düzenler (Naselli-Flores vd., 2021). Su sıcaklığı, tatlı su ekosistemlerindeki kimyasal ve biyolojik yönleri etkileyebilen tabakalaşma modellerini düzenler. Bitkilerden hayvanlara kadar, artan fizyolojik ve metabolik hızlar (fotosentez, solunum,

büyüme, besin alımı) genellikle artan sıcaklıkla birlikte gözlenir. Bu artış, sıcaklığın optimum seviyeye gelmesine kadar hızlı seyreder ancak enzimatik sistemin bozulması nedeniyle azalmaya başlar (Zohary vd., 2021). Aslında, tüm organizmalar bir termal nişle karakterize edilir ve türlerine özgü termal toleransları bu nedenle organizmaların dağılımını ve topluluk kompozisyonunu tanımlar. Uzun vadede, su sıcaklığı vücut boyutu, yaşam süresi, beslenme şekli ve davranış gibi yaşam özelliklerinde önemli bir rol oynar (Jeppesen vd., 2010). Su sıcaklığı, balık üremesi ve böcek çıkışı gibi organizma fenolojisini düzenleyen temel bir abiyotik parametredir. Daha yüksek sıcaklıklar, bakterilerden balıklara kadar, türler arasında ve türler içinde küçük boyutlu organizmaların oranının artmasını teşvik eder (Daufresne vd., 2009). Sıcaklık değişiklikleri ayrıca, fenolojik değişikliğe yol açan av ve avcılar arasında trofik uyumsuzluğa neden olarak suda yaşayan besin ağlarındaki enerji akışını etkileyebilir (Wonglersak vd., 2021). YGES su sıcaklığını düşürürse, karbon mineralizasyonu azalır bu da sedimentte daha yüksek organik karbon birikmesine, dolayısıyla karbon döngüsünün değişmesine yol açar (Gudasz vd., 2010). YGES panelleri tarafından indüklenen su sıcaklığındaki değişimler, bireysel metabolizmayla ilgili çeşitli fizyolojik ve biyolojik süreçleri etkileme potansiyeline sahiptir ve küçük sıcaklık değişimleri bile bireysel düzeyden tüm besin ağına kadar bir dizi etki yaratabilir (Gilbert vd., 2014). FV panelleri altındaki yengeçlerin doku rengi, kasları ve organları üzerinde çeşitli etkiler oluşturduğu ileri sürülmüştür (Pang vd., 2022). Ayrıca, Ji ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada (2022), su sıcaklığındaki değişikliklerin bir rezervuardaki balıkların yumurtlama süresini kısaltabileceği bildirilmiştir. Tüm bunlar, FV kapsamının su sıcaklığındaki değişiklikler yoluyla su hayvanlarının morfolojisi ve fizyolojisi üzerinde dolaylı etkileri olabileceğini ve bu tür etkilerin türlere ve ele alınan ekosisteme bağlı olabileceğini göstermektedir.

Su kütlelerinde çözülmüş oksijen (ÇO), YGES panelleri tarafından azaltılmış hava-su teması, atmosferle gaz alışverişi ve azaltılmış ışık insidansı yollarıyla etkilenebilir. ÇO ve birincil üretim, özellikle dip sularında, ışığın sınırlanmasına bağlı olarak fototrofik aktivitedeki (ÇO üretimi) azalmalarla güçlü bir şekilde bağlantılıdır (Bierman vd., 1994). Yüzer güneş panelleri altındaki ÇO azalmaları modelleme çalışmaları ve yerinde ölçümlerle öngörülmüştür (Chateau vd., 2019). de Lima vd. (2021), bir YGES yapısı ve açık su referans noktası altındaki ÇO konsantrasyonlarını karşılaştırmış ve YGES altında ÇO konsantrasyonlarının daha düşük olduğunu (referans noktasındaki 6.0 mg/L ile karşılaştırıldığında 4.6 mg/L) bulmuştur.

YGES'lerin türler üzerindeki doğrudan etkilerine ek olarak, değişen avcı-av ilişkileri yoluyla dolaylı olarak yaptığı etkiler, su kütlesi biyolojisi üzerindeki genel etkileri belirlemek için kritik öneme sahiptir. Örneğin, kladoseranların (su pireleri) genel yoğunluğunun, bitkilerin varlığında açık suya göre ortalama 60 kat daha fazla olduğu gözlenmiştir (Cazzanelli vd., 2008). Ayrıca, yüzey örtüleri altında zooplanktonların yatay ve dikey göçlerini artırdıkları gözlemlenmiştir çünkü bitkilerden kaynaklanan gölgeleme, balıklar tarafından avlanmayı önlemek için bir mekanizma sunmaktadır (Horppila ve Nurminen, 2008). Ancak, bu tür etkiler her zaman meydana gelmez; farklı bir çalışmada, ılıman göllerin makrofitlerle kaplı kıyı şeridinden açık pelajik bölgesine yatay bir eğim boyunca zooplankton bolluğunda veya çeşitliliğinde önemli bir fark olmadığı bulunmuştur (Spoljar vd., 2018). YGES'lerin varlığında, balıkların avcılara karşı uyanıklıklarını azaltmak suretiyle davranışlarını değiştirdikleri de gözlenmiştir. Örneğin, alabalıklar buz örtüsü altında yüzme aktivitelerini, örtünün olmadığı zamanlara göre %17 oranında artırmışlardır (Watz vd., 2015). Alt trofik seviyeler üzerindeki dolaylı bir diğer etki ise oksijen yetersizliği (anoksi) nedeniyle

balık ölümlerinin olmasıdır. Örneğin, kış buz örtüsüne sahip 13 Avrupa gölünde yapılan bir çalışmada, yazın aynı bölgede küçük gövdeli plankton türleri bulunurken kışın buz örtüsü altında planktivor balıkların küçük gövdeli planktonlar üzerindeki avlanma baskısının azalmasından dolayı daha büyük gövdeli plankton türleri baskın hale gelmiştir. Bunun sonucunda fitoplankton seviyesinde düşme gözlenmiş, bu da su kalitesi üzerinde olumlu bir kademeli etki yaratmıştır (Gyllström vd., 2005). Ancak, trofik seviyeler arasında, tür kompozisyonundaki bu tür değişiklikler, kısa vadede olumlu etki yaratmış gibi görünse de uzun vadede genel ekosistem dayanıklılığını etkileyebilir ve bazı su kütlelerinden insan tüketimi için yiyecek sağlanması üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir.

Su buharlaşması, göllerin temel fiziksel kontrolüdür ve yüzey suyu sıcaklığını, tabakalaşmayı, hava-su arayüzündeki gaz akışlarını ve su seviyelerini düzenler. Su seviyesindeki değişiklikler, aynı zamanda göl ekosistemlerinde rejim değişikliklerine neden olarak su kalitesini de tehlikeye atabilir (Gianniou ve Antonopoulos, 2007). YGES'nin, azalan rüzgâr hızı ve su sıcaklığının birleşik etkisi nedeniyle buharlaşma kayıplarını azaltacağı öngörülmektedir. Bir çalışmada, büyük YGES örtü alanında, su buharlaşmasının %96,8'e kadar düşebileceği ileri sürülmüştür (Shalaby vd., 2021). YGES ile ilgili özel deneysel çalışmalar sınırlı olsa da modelleme çalışmaları, YGES'in %50-%90 arasında değişen bir buharlaşma azaltma potansiyelinin olduğunu öngörmüştür (Bontempo Scavo vd., 2021; Prinsloo vd., 2021). İklim krizinin su kayıplarına neden olacağı göz önünde bulundurulduğunda, YGES'in buharlaşmayı azaltmak yoluyla su tasarrufu yaptığı söylenebilir. Ancak iddia edilen bu fayda, YGES'in kapladığı alanın büyüklüğüne, bağıl nem, rüzgâr hızı ve sıcaklık gibi yerel meteorolojik koşullara bağlıdır. Bu koşulların her biri de su ortamındaki ekosistemlerin besin ağı yapısını ve

enerjisini etkiler ve bu da rejim değişiklikleri gibi ciddi sonuçlara yol açabilir (Scheffer vd., 2001).

Literatürde, su ekosistemi dinamiklerinin yerel iklim ve coğrafi konumdan etkilenebileceği bilinmektedir (Exley vd., 2021), ancak sucul hayvanları inceleyen tüm çalışmalar Asya’da yapıldığından, farklı yerlerde daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Song vd. (2024) yaptığı bir çalışmada, YGES panellerinin, Çin sulak alanlarında, su kuşlarının çeşitliliğinde bir azalmaya ve bolluğunda bir artışa neden olduğu bildirilmiş olup kuş topluluklarında homojenleştirici bir etki yarattığı, panelleri barınak olarak kullanabilen bitki toplayıcılarını desteklediği ve dalgıç kuşların suya erişimlerini kısmen engellendiği ileri sürülmüştür. Deniz kuşları sürülerinin ise saatlerce YGES çiftliklerinde yiyecek aradıkları, potansiyel olarak yüzer yapıların etrafında toplanan veya onlara bağlı hayvanları avladıkları bildirilmiştir. Panel ve yüzdürücü malzeme yapısının da sucul organizmalar üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Farklı güneş paneli malzemelerinin sızıntılarını karşılaştıran bir çalışmada (Vlaswinkel vd., 2023), kristalin silikon panel sızıntılarının *Danio rerio* ve *Daphnia magna* üzerinde toksik etkiler yarattığı, deformasyonlara neden olduğu ve hayatta kalma oranını düşürdüğü tespit edilmiştir. Kristalin silikon, FV panelleri için baskın teknolojidir, bu da sucul organizmaların, bir doğal afet olması durumunda, YGES güç santralinin büyük hasar alması sonucu, ağır metal sızıntısının etkilerine karşı savunmasız olabileceği anlamına gelir. Mathijssen vd. (2020), tarafından yapılan bir çalışmada, polietilenden yapılmış tüplerden ve kapaklardan 2 hafta sonra alüminyum ve çinkonun salındığı tespit edilmiş ancak canlılar üzerinde hiçbir test yapılmamıştır. Flotasyon yapılarının olması durumunda, farklı kirlenme önleyici malzemelerden yapılmış şamandıralara bağlı çeşitli kirlenme faunası taksonları (*Annelida*, *Arthropoda*, *Bryozoa*, *Chlorophyta*, *Chordata*, *Cnidaria*, *Entoprocta*, *Nemertea*, *Ochrophyta*,

Platyhelminthes ve *Rhodophyta*) görülmüştür (Vlaswinkel vd., 2023). YGES kurulumlarının, istilacı türlerin dağılımını nasıl etkileyebileceğini bulmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

2. SONUÇ

YGES, sucul ve bitişik karasal ekosistemlerde çok yönlü ekolojik etkilere yol açabilmekte olup, bu etkilerin toplam sonucu her ne kadar öngörülmesi güç olsa da tatlı su ekosistemlerinden sağlanan su temini ve iklim düzenleme gibi temel hizmetleri riske atabilecek değişimler söz konusu olabilmektedir. Buna karşın, YGES'ler küresel iklim kriziyle mücadelede önemli avantajlar sunarak buharlaşmayı azaltmakta, su kaynaklarının korunmasına katkı sağlamakta ve algal büyümeyi sınırlayarak su kalitesini iyileştirebilmektedir. Literatürde çoğunlukla su sıcaklığı, klorofil-a, çözünmüş oksijen ve buharlaşma gibi parametrelerdeki değişimler incelenmiş; ancak sistemlerin görece yeni olması nedeniyle uzun vadeli etkilerine ilişkin çalışmaların yetersiz olduğu ve kısa vadeli etkilerin de sınırlı düzeyde araştırıldığı belirtilmiştir. Mevcut bulgular, panel alanının artmasıyla fitoplankton üretiminin azalabileceğini, buna karşılık abiyotik faktörlerin diğer trofik düzeylerde daha karmaşık etkileşimlere yol açtığını göstermektedir. Ayrıca YGES'lerin, sucul organizmaların fizyolojisi, topluluk yapısı ve ekolojik ilişkileri üzerinde seçici etkiler yaratarak ekosistem ağlarında öngörülemeyen sonuçlar doğurabileceği ifade edilmektedir. Bu nedenle, YGES'lerin etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için uzun vadeli izleme çalışmaları ile trofik etkileşimlere odaklanan disiplinler arası araştırmaların artırılması gerekmektedir. Bununla birlikte, yerel çevresel koşullara uygun tasarım ve planlama yaklaşımlarının benimsenmesi, hem olası olumsuz etkilerin

azaltılmasına hem de bu sistemlerden sürdürülebilir şekilde yararlanılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Bank, W. (2018). Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. *World Bank Group; Energy Sector Management Assistance Program, Solar Energy*.
- Batt, R. D., Carpenter, S. R., Cole, J. J., Pace, M. L., Johnson, R. A., Kurtzweil, J. T., & Wilkinson, G. M. (2015). Altered energy flow in the food web of an experimentally darkened lake. *Ecosphere*, 6(3), 1-23.
- Becker, V., de Souza Cardoso, L., & Huszar, V. L. M. (2009). Diel variation of phytoplankton functional groups in a subtropical reservoir in southern Brazil during an autumnal stratification period. *Aquatic Ecology*, 43(2), 285-293.
- Bierman, V. J., Hinz, S. C., Zhu, D. W., Wiseman, W. J., Rabalais, N. N., & Turner, R. E. (1994). A preliminary mass balance model of primary productivity and dissolved oxygen in the Mississippi River plume/inner Gulf Shelf region. *Estuaries*, 17(4), 886-899.
- Bontempo Scavo, F., Tina, G. M., Gagliano, A., & Nižetić, S. (2021). An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants. *International Journal of Energy Research*, 45(1), 167-188.
- Campbell, J. M., & Haase, B. L. (1981). Availability of suitable phytoplanktonic food for zooplankton in an ice-covered lake. *Hydrobiologia*, 79(2), 113-119.
- Cazzanelli, M., Warming, T. P., & Christoffersen, K. S. (2008). Emergent and floating-leaved macrophytes as refuge for zooplankton in a eutrophic temperate lake without submerged vegetation. *Hydrobiologia*, 605(1), 113-122.
- Chang, P. H., Shih, C. H., & Kao, W. C. (2023). Optimizing the fishery and solar power symbiosis model for sustainable

marine resource management: Evaluating the effects of solar shading on the growth and water quality of *Litopenaeus vannamei* and *Chanos chanos*. *Water*, 15(18), 3260.

- Château, P. A., Wunderlich, R. F., Wang, T. W., Lai, H. T., Chen, C. C., & Chang, F. J. (2019). Mathematical modeling suggests high potential for the deployment of floating photovoltaic on fish ponds. *Science of the total environment*, 687, 654-666.
- Chidami, S., & Amyot, M. (2008). Fish decomposition in boreal lakes and biogeochemical implications. *Limnology and Oceanography*, 53(5), 1988-1996.
- Choi, Y. K. (2014). A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact. *International journal of software engineering and its applications*, 8(1), 75-84.
- Daufresne, M., Lengfellner, K., & Sommer, U. (2009). Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(31), 12788-12793.
- de Lima, R. L. P., Paxinou, K., C. Boogaard, F., Akkerman, O., & Lin, F. Y. (2021). In-situ water quality observations under a large-scale floating solar farm using sensors and underwater drones. *Sustainability*, 13(11), 6421.
- de Tezanos Pinto, P., Allende, L., & O'Farrell, I. (2007). Influence of free-floating plants on the structure of a natural phytoplankton assemblage: an experimental approach. *Journal of Plankton Research*, 29(1), 47-56.
- DNV 2022 Energy Transition Outlook (DNV AS)
https://brandcentral.dnv.com/mars/public_sharing.lb?p_c

olshar_id=127470&p_hash=7B8531F9, Accessed 10 March 2025.

- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy procedia*, 33, 311-321.
- Dzamesi, S. K. A., Ahiataku-Togobo, W., Yakubu, S., Acheampong, P., Kwarteng, M., Samikannu, R., & Azeave, E. (2024). Comparative performance evaluation of ground-mounted and floating solar PV systems. *Energy for Sustainable Development*, 80, 101421.
- Elminshawy, N. A., Osama, A., Naeim, N., Elbaksawi, O., & Tina, G. M. (2022). Thermal regulation of partially floating photovoltaics for enhanced electricity production: A modeling and experimental analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102582.
- Exley, G., Hernandez, R. R., Page, T., Chipps, M., Gambro, S., Hersey, M., ... & Armstrong, A. (2021). Scientific and stakeholder evidence-based assessment: Ecosystem response to floating solar photovoltaics and implications for sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111639.
- Exley, G., Page, T., Thackeray, S. J., Folkard, A. M., Couture, R. M., Hernandez, R. R., ... & Armstrong, A. (2022). Floating solar panels on reservoirs impact phytoplankton populations: A modelling experiment. *Journal of Environmental Management*, 324, 116410.
- Foley, B., Jones, I. D., Maberly, S. C., & Rippey, B. (2012). Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: Effects of climate change and eutrophication. *Freshwater Biology*, 57(2), 278-289.

- Gadzanku, S., Mirletz, H., Lee, N., Daw, J., & Warren, A. (2021). Benefits and critical knowledge gaps in determining the role of floating photovoltaics in the energy-water-food nexus. *Sustainability*, 13(8), 4317.
- Garrett, K. P., McManamay, R. A., & DeRolph, C. R. (2024). When energy doesn't add up: use of an energyshed framework in assessing progress towards renewable energy transitions. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(1), 015004
- Gianniou, S. K., & Antonopoulos, V. Z. (2007). Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. *Journal of Hydrology*, 345(3-4), 212-223.
- Gilbert, B., Tunney, T. D., McCann, K. S., DeLong, J. P., Vasseur, D. A., Savage, V., ... & O'Connor, M. I. (2014). A bioenergetic framework for the temperature dependence of trophic interactions. *Ecology letters*, 17(8), 902-914.
- Gudasz, C., Bastviken, D., Steger, K., Premke, K., Sobek, S., & Tranvik, L. J. (2010). Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, 466(7305), 478-481.
- Gyllström, M., Hansson, L. A., Jeppesen, E., Criado, F. G., Gross, E., Irvine, K., ... & Moss, B. (2005). The role of climate in shaping zooplankton communities of shallow lakes. *Limnology and Oceanography*, 50(6), 2008-2021.
- Haas, J., Khalighi, J., De La Fuente, A., Gerbersdorf, S. U., Nowak, W., & Chen, P. J. (2020). Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. *Energy Conversion and Management*, 206, 112414.

- Haberman, J., & Haldna, M. (2017). How are spring zooplankton and autumn zooplankton influenced by water temperature in a polymictic lake?. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 66(3), 264-278.
- Horppila, J., & Nurminen, L. (2008). Diurnal variation in light intensity underneath floating macrophyte leaves and implications for the behaviour of plant-attached zooplankton. *Biological Rhythm Research*, 39(4), 349-357.
- Horton, B. A. (2022) Floating solar farm puts Thailand on track towards carbon neutrality euronews www.euronews.com/green/2022/03/11/huge-floating-solar-farm-sets-thailand-on-track-towards-carbon-neutrality, Accessed 05 April 2026.
- International Energy Agency (IEA). Snapshot of global PV markets. Strategic PV analysis and Outreach 2019. 2019. file:///C:/Users/Asus/Dropbox/My%20PC%20(DESKTOP-FA2PA9R)/Downloads/IEA-PVPS_T1_35_Snapshot2019-Report.pdf, Accessed 13 February 2025.
- Jeong, H. S., Choi, J., Lee, H. H., & Jo, H. S. (2020). A study on the power generation prediction model considering environmental characteristics of floating photovoltaic system. *Applied Sciences*, 10(13), 4526.
- Jeppesen, E., Meerhoff, M., Holmgren, K., González-Bergonzoni, I., Teixeira-de Mello, F., Declerck, S. A., ... & Lazzaro, X. (2010). Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia*, 646(1), 73-90.

- Karlsson, J., Byström, P., Ask, J., Ask, P., Persson, L., & Jansson, M. (2009). Light limitation of nutrient-poor lake ecosystems. *Nature*, 460(7254), 506-509.
- Kleeberg, A., Freidank, A., & Jöhnk, K. (2013). Effects of ice cover on sediment resuspension and phosphorus entrainment in shallow lakes: Combining in situ experiments and wind-wave modeling. *Limnology and Oceanography*, 58(5), 1819-1833.
- Koondhar, M. A., Albasha, L., Mahariq, I., Graba, B. B., & Touti, E. (2024). Reviewing floating photovoltaic (FPV) technology for solar energy generation. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101449.
- Kumar, V. A., Rashmitha, M., Naresh, B., Bangararaju, J., & Rajagopal, V. (2013, September). Performance analysis of different photovoltaic technologies. In 2013 International Conference on Advanced Electronic Systems (ICAES) (pp. 301-303). IEEE.
- Kumar, V., Shrivastava, R. L., & Untawale, S. P. (2015). Solar energy: review of potential green & clean energy for coastal and offshore applications. *Aquatic procedia*, 4, 473-480.
- Larson, J. H., Frost, P. C., Lodge, D. M., & Lamberti, G. A. (2007). Photodegradation of dissolved organic matter in forested streams of the northern Great Lakes region. *Journal of the North American Benthological Society*, 26(3), 416-425.
- Lee, N., Grunwald, U., Rosenlieb, E., Mirletz, H., Aznar, A., Spencer, R., & Cox, S. (2020). Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renewable Energy*, 162, 1415-1427.

- Lenard, T., & Wojciechowska, W. (2013). Phytoplankton diversity and biomass during winter with and without ice cover in the context of climate change. *Polish Journal of Ecology*, 61(4), 739-748.
- Lopes, M. P. C., Nogueira, T., Santos, A. J. L., Branco, D. C., & Poursan, H. (2022). Technical potential of floating photovoltaic systems on artificial water bodies in Brazil. *Renewable Energy*, 181, 1023-1033.
- Mathijssen, D., Hofs, B., Spierenburg-Sack, E., Van Asperen, R., Van Der Wal, B., Vreeburg, J., & Ketelaars, H. (2020). Potential impact of floating solar panels on water quality in reservoirs; pathogens and leaching. *Water Practice & Technology*, 15(3), 807-811.
- Naselli-Flores, L., Zohary, T., & Padisák, J. (2021). Life in suspension and its impact on phytoplankton morphology: an homage to Colin S. Reynolds. *Hydrobiologia*, 848(1), 7-30.
- Oliveira-Pinto, S., & Stokkermans, J. (2020, December). Marine floating solar plants: An overview of potential, challenges and feasibility. In *Proceedings of the institution of civil engineers-maritime engineering* (Vol. 173, No. 4, pp. 120-135). Thomas Telford Ltd.
- Özkundakci, D., Gsell, A. S., Hintze, T., Täuscher, H., & Adrian, R. (2016). Winter severity determines functional trait composition of phytoplankton in seasonally ice-covered lakes. *Global change biology*, 22(1), 284-298.
- Pang, Y., Niu, C., Wu, L., Song, Y., Song, X., Shi, A. Y., ... & Cheng, Y. (2022). Comprehensive utilization of land resources for photovoltaic power generation to culture Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*): growth

- performance, nutritional composition and tissue color. *Fishes*, 7(4), 207.
- Pouran, H. M. (2018). From collapsed coal mines to floating solar farms, why China's new power stations matter. *Energy policy*, 123, 414-420.
- Pouran, H. M., Lopes, M. P. C., Nogueira, T., Branco, D. A. C., & Sheng, Y. (2022). Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging clean energy technology. *IScience*, 25(11).
- Prinsloo, F. C., Schmitz, P., & Lombard, A. (2021). Sustainability assessment framework and methodology with trans-disciplinary numerical simulation model for analytical floatovoltaic energy system planning assessments. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101515.
- Ranjbaran, P., Yousefi, H., Gharehpetian, G. B., & Astaraei, F. R. (2019). A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 332-347.
- Rolland, D. C., Bourget, S., Warren, A., Laurion, I., & Vincent, W. F. (2013). Extreme variability of cyanobacterial blooms in an urban drinking water supply. *Journal of plankton research*, 35(4), 744-758.
- Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 66, 815-824.
- Salmi, P., & Salonen, K. (2016). Regular build-up of the spring phytoplankton maximum before ice-break in a boreal lake. *Limnology and Oceanography*, 61(1), 240-253.
- Sand-Jensen, K., & Borum, J. (1991). Interactions among phytoplankton, periphyton, and macrophytes in temperate

- freshwaters and estuaries. *Aquatic botany*, 41(1-3), 137-175.
- Scheffer, M., Straile, D., van Nes, E. H., & Hosper, H. (2001). Climatic warming causes regime shifts in lake food webs. *Limnology and Oceanography*, 46(7), 1780-1783.
- Shalaby, M. M., Nassar, I. N., & Abdallah, A. M. (2021). Evaporation suppression from open water surface using various floating covers with consideration of water ecology. *Journal of Hydrology*, 598, 126482.
- Sharma, P., Muni, B., & Sen, D. (2015, May). Design parameters of 10 KW floating solar power plant. In *Proceedings of the international advanced research journal in science, engineering and technology (IARJSET)*, National conference on renewable energy and environment (NCREE-2015), Ghaziabad, India (Vol. 2).
- Shukla, K. N., Rangnekar, S., & Sudhakar, K. (2015). A comparative study of exergetic performance of amorphous and polycrystalline solar PV modules. *International Journal of exergy*, 17(4), 433-455.
- Song, X., Liu, T., Wang, G., Zhang, Y., & Li, C. (2024). Floating photovoltaic systems homogenize the waterbird communities across subsidence wetlands in the North China Plain. *Journal of Environmental Management*, 349, 119417.
- Špoljar, M., Dražina, T., Lajtner, J., Sertić, M. D., Radanović, I., Wallace, R. L., ... & Tomljanović, T. (2018). Zooplankton assemblage in four temperate shallow waterbodies in association with habitat heterogeneity and alternative states. *Limnologica*, 71, 51-61.

- Sudhakar, K., & Srivastava, T. (2014). Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module. *International Journal of Ambient Energy*, 35(1), 51-57.
- Till, A., Rypel, A. L., Bray, A., & Fey, S. B. (2019). Fish die-offs are concurrent with thermal extremes in north temperate lakes. *Nature Climate Change*, 9(8), 637-641.
- Trapani, K., & Redón Santafé, M. (2015). A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(4), 524-532.
- Urabe, J., Kyle, M., Makino, W., Yoshida, T., Andersen, T., & Elser, J. J. (2002). Reduced light increases herbivore production due to stoichiometric effects of light/nutrient balance. *Ecology*, 83(3), 619-627.
- Vadeboncoeur, Y., Vander Zanden, M. J., & Lodge, D. M. (2002). Putting the Lake Back Together: Reintegrating Benthic Pathways into Lake Food Web Models: Lake ecologists tend to focus their research on pelagic energy pathways, but, from algae to fish, benthic organisms form an integral part of lake food webs. *Bioscience*, 52(1), 44-54.
- Vlaswinkel, B., Roos, P., & Nelissen, M. (2023). Environmental observations at the first offshore solar farm in the North Sea. *Sustainability*, 15(8), 6533.
- Vo, T. T. E., Ko, H., Huh, J., & Park, N. (2021). Overview of possibilities of solar floating photovoltaic systems in the offshore industry. *Energies*, 14(21), 6988.
- Wang, T. W., Chang, P. H., Huang, Y. S., Lin, T. S., Yang, S. D., Yeh, S. L., ... & Chen, C. C. (2022). Effects of floating photovoltaic systems on water quality of aquaculture ponds. *Aquaculture Research*, 53(4), 1304-1315.

- Watz, J., Bergman, E., Calles, O., Enefalk, Å., Gustafsson, S., Hagelin, A., ... & Jonsson, B. (2015). Ice cover alters the behavior and stress level of brown trout *Salmo trutta*. *Behavioral ecology*, 26(3), 820-827.
- Wonglersak, R., Fenberg, P. B., Langdon, P. G., Brooks, S. J., & Price, B. W. (2021). Insect body size changes under future warming projections: a case study of Chironomidae (Insecta: Diptera). *Hydrobiologia*, 848(11), 2785-2796.
- Yamamichi, M., Kazama, T., Tokita, K., Katano, I., Yoshida, T., Hairston, N. G., & Urabe, J. (2018). A shady phytoplankton paradox: when phytoplankton increases under low light. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1882).
- Zohary, T., Flaim, G., & Sommer, U. (2021). Temperature and the size of freshwater phytoplankton. *Hydrobiologia*, 848(1), 143-155.

KÜRESEL KARBON DÖNGÜSÜNDE YUTAK ALANLARIN ROLÜ VE KORUMA STRATEJİLERİ

Aysel ALKAN UÇKUN¹

1. GİRİŞ

Son yüzyılda gözlenen iklimsel değişimlerin arka planında, atmosferin bileşiminde meydana gelen insan kaynaklı değişimler belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle karbondioksit (CO₂), hem küresel karbon bütçesindeki payı hem de atmosferde uzun süre kalabilme özelliği nedeniyle iklim sistemi üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Enerji üretiminde fosil yakıtlara dayalı yapı, sanayi faaliyetlerinin genişlemesi ve ulaşım ağlarının yoğunlaşması gibi faktörler, doğal süreçlerin absorbe edebileceğinden daha fazla karbonun atmosfere verilmesine neden olmuştur. Bu durum, yalnızca küresel ortalama sıcaklıkların yükselmesine değil, aynı zamanda iklim sisteminin farklı bileşenleri arasında dengenin bozulmasına yol açmaktadır (Jain, 2022).

Sanayi devrimiyle birlikte hız kazanan arazi dönüşümleri, karbon döngüsüne yapılan en güçlü müdahalelerden biri olarak kabul edilmektedir. Ormanların tarım alanlarına veya yerleşim bölgelerine dönüştürülmesi, karbon açısından çift yönlü bir etki yaratmaktadır: bir yandan mevcut karbon stokları serbest bırakılırken, diğer yandan karbonu tutabilecek biyolojik sistemlerin kapasitesi daralmaktadır (Houghton vd., 2012). Bu süreç, atmosferdeki karbon birikimini hızlandırarak doğal

¹ Doçent Doktor, Karabük Üniversitesi, Orman Fakültesi, Doğa Koruma ve Biyoçeşitlilik Yönetimi Bölümü, ORCID: 0000-0002-8957-7476.

dengeyi daha da kırılgan hale getirmektedir. Bu noktada karbon yutakları, iklim sisteminin kendi kendini düzenleme kapasitesinin temel bileşenleri olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, atmosferdeki CO₂'yi alarak biyokütle, toprak ve su ortamlarında depolayan dinamik yapılardır. Fotosentez yoluyla başlayan karbon bağlanması süreci, bitkisel üretim ve toprak oluşumu aracılığıyla daha uzun süreli depolama mekanizmalarına aktarılmaktadır (Schimel vd., 2015). Bu yönüyle karbon yutakları, yalnızca depolama alanları değil, aynı zamanda karbon akışını yönlendiren aktif süreçlerdir. Bununla birlikte, karbon yutaklarının kapasitesi çevresel koşullara son derece duyarlıdır. İklim değişikliğinin tetiklediği sıcaklık artışları, su kıtlığı ve ekosistem bozulmaları, bu sistemlerin işleyişini doğrudan etkileyebilir. Örneğin, uzun süreli kuraklık koşulları bitkisel üretimi sınırlarken, yangınlar veya turbalıkların kuruması gibi olaylar depolanmış karbonun hızla atmosfere geri dönmesine neden olabilir (Anderegg vd., 2020). Bu nedenle karbon yutakları, durağan değil; değişen çevresel koşullara sürekli yanıt veren dinamik sistemler olarak değerlendirilmelidir.

2. KÜRESEL KARBON DÖNGÜSÜ VE YUTAK ALANLAR

Karbon döngüsü, gezegen ölçeğinde işleyen ve karbonun farklı rezervuarlar arasında sürekli yer değiştirdiği karmaşık bir süreçler bütünüdür. Atmosfer, hidrosfer, biyosfer ve litosfer arasında gerçekleşen bu akışlar, yeryüzündeki yaşamın sürekliliği ve iklim sisteminin dengesi açısından temel bir işlev görmektedir. Doğal koşullar altında bu döngü, uzun zaman dilimlerinde görece dengeli bir yapı sergilemiş; karbon alımı ve salımı arasında dinamik bir denge oluşmuştur (Ciais vd., 2014). Ancak insan faaliyetlerinin yoğunlaşması, bu dengeyi atmosfer lehine bozmuştur.

Karbon döngüsünün biyolojik ayağı, özellikle fotosentetik organizmaların faaliyetleriyle şekillenmektedir. Bitkiler ve fitoplanktonlar, atmosferdeki CO₂'yi kullanarak organik bileşikler üretir ve bu karbonu biyokütlelerinde depolar. Bu karbon, trofik seviyeler arasında aktarılırken ekosistem içerisinde dolaşımını sürdürür. Bitkisel materyalin ayrışmasıyla birlikte karbonun bir kısmı toprağa geçer ve burada daha uzun süreli depolanabilir (Schlesinger & Andrews, 2000). Buna karşılık, solunum ve ayrışma süreçleri karbonun atmosfere geri verilmesini sağlar. Toprak mikroorganizmalarının gerçekleştirdiği ayrışma faaliyetleri, karbon döngüsünde önemli bir çıkış yolu oluşturur. Bu süreçlerin hızının sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlere bağlı olması, karbon döngüsünü iklimle doğrudan ilişkili hale getirmektedir (Davidson & Janssens, 2006). Okyanuslar ise bu döngünün en büyük karbon rezervuarlarından biri olarak işlev görmektedir. Atmosfer ile okyanus yüzeyi arasında sürekli gerçekleşen gaz alışverişi, CO₂'nin deniz suyunda çözünmesini sağlar. Bunun yanı sıra, fitoplanktonların gerçekleştirdiği fotosentez, karbonun biyolojik olarak bağlanmasına katkıda bulunur. Bu karbonun bir kısmı, biyolojik pompa aracılığıyla derin okyanus katmanlarına taşınarak uzun süreli depolanır (Le Quéré vd., 2018).

Güncel küresel karbon bütçesi analizleri, kara ve okyanus sistemlerinin birlikte, insan faaliyetleri sonucu oluşan CO₂ emisyonlarının yaklaşık yarısını absorbe ettiğini ortaya koymaktadır (Friedlingstein vd., 2022). Bu durum, doğal sistemlerin iklim değişikliği üzerindeki etkileri tamponladığını göstermektedir. Ancak bu kapasitenin sınırsız olmadığı ve çevresel baskılar altında azalabileceği unutulmamalıdır. Karbon yutak alanları, bu döngü içerisinde düzenleyici rol oynayan kritik bileşenlerdir. Ormanlar, sulak alanlar ve okyanuslar gibi sistemler, farklı mekanizmalarla karbonu depolayarak atmosferdeki CO₂ birikimini sınırlar. Bununla birlikte, bu

sistemlerin işleyişi çevresel değişimlere karşı hassastır ve antropojenik baskılar altında zayıflayabilir. Bu nedenle karbon döngüsünün işleyişini anlamak, yalnızca teorik bir çerçeve sunmakla kalmaz; aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadele stratejilerinin bilimsel temelini oluşturur.

3. BAŞLICA KARBON YUTAK EKOSİSTEMLERİ

Karbon yutakları, farklı ekosistem tiplerinde farklı mekanizmalar aracılığıyla işlev gören ancak atmosferdeki karbonun tutulması ve depolanması ortak amacı etrafında birleşen sistemlerdir. Bu ekosistemlerin etkinliği, biyolojik üretkenlik, ayrışma süreçleri ve çevresel koşullar gibi faktörlerin etkileşimiyle belirlenir.

3.1. Orman Ekosistemleri

Ormanlar, küresel ölçekte en büyük karasal karbon rezervuarlarından biri olup hem canlı biyokütlede hem de toprakta önemli miktarda karbon depolamaktadır. Ağaçların uzun yaşam döngüleri ve yüksek biyokütle üretimi, bu sistemlerin karbonu uzun süreli olarak tutabilmesini sağlar (Pan vd., 2011). Farklı orman tipleri, karbon depolama açısından farklı özellikler gösterir. Tropikal ormanlar yüksek üretkenlikleri sayesinde hızlı karbon bağlama kapasitesine sahipken, boreal ormanlar düşük sıcaklıkların ayrışmayı sınırlaması nedeniyle karbonu daha uzun süre saklayabilir (Bonan, 2008). Orman ekosistemlerinde karbon depolama dört ana bileşende gerçekleşir: Yer üstü biyokütle; Yer altı biyokütle (kök sistemleri); Ölü organik madde; Toprak organik karbonu. Literatürde özellikle toprak karbonunun uzun vadeli depolama açısından kritik olduğu vurgulanmaktadır. Yaşlı (old-growth) ormanların toprak karbon depolama kapasitesinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Toprak karbonu, biyokütleyle kıyasla daha stabil bir karbon havuzu olarak kabul edilir (Ameray vd., 2021). Ormanların karbon yutak kapasitesi, yalnızca doğal

süreçlere değil, aynı zamanda orman yönetim stratejilerine de bağlıdır. Yoğun orman yönetiminde, hızlı büyüyen türlerle ağaçlandırma, gübreleme ve toprak işleme yapılarak karbon tutma hızı artırılabilir. Koruma odaklı yönetimde, daha yüksek toplam karbon stokları sağlanır, özellikle toprak karbonu açısından avantajlıdır. Orta düzey yönetimde ise karbon depolama ve üretim arasında denge sağlanır. Ağaç türü seçimi ve yaş yapısı da karbon stoklarını doğrudan etkiler (Ameray vd., 2021). Orman karbon stoklarının doğru hesaplanması bilimsel literatürde önemli bir araştırma alanıdır. Farklı yöntemler (biyokütle tahminleri, uzaktan algılama, modelleme) arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Ortalama biyokütle yöntemine göre yüksek karbon yoğunlukları rapor edilmiştir (örneğin ~57 Mg/ha) (Sun ve Liu, 2019). Son yıllarda yapay zekâ ve uzaktan algılama teknikleri karbon tahmininde kullanılmaktadır (ancak belirsizlikler devam etmektedir). Ormanlar hem karbon yutağı hem de potansiyel karbon kaynağı olabilir. İklim değişikliği, yangınlar, kuraklık ve zararlılar ormanların karbon yutak kapasitesini azaltabilir. Yanlış yönetim veya bozulma durumunda depolanan karbon tekrar atmosfere salınabilir. Bu nedenle literatürde, ormanların dinamik ve hassas sistemler olduğu vurgulanır. Ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma projeleri karbon depolamayı önemli ölçüde artırabilir. Tür çeşitliliği ve karışık orman yapıları daha yüksek karbon birikimi sağlayabilir. Orta yoğunlukta ve karışık tür kompozisyonlarının karbon tutmada daha etkili olduğu gösterilmiştir (Ofosu vd., 2025). Son çalışmalar, orman karbon yutaklarının yalnızca ekolojik değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik bir konu olduğunu göstermektedir. Karbon yutak hedefleri ile yerel paydaşların ekonomik çıkarları arasında denge kurulması gereklidir. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile uyumlu orman yönetimi kritik önemdedir (Yan vd., 2026).

3.2. Sulak Alanlar ve Turbalıklar

Sulak alanlar, özellikle turbalıklar, karbon depolama açısından benzersiz özelliklere sahiptir. Suyu doymuş ve oksijensiz ortamlar, organik maddenin ayrışmasını yavaşlatarak karbonun uzun süre korunmasını sağlar (Gorham, 1991). Bu ekosistemler, binlerce yıl boyunca biriken organik materyal sayesinde önemli karbon rezervleri oluşturmuştur. Sulak alanların karbon yutak kapasitesinin temelinde hidrolojik ve biyokimyasal koşullar yer alır. Bu koşullardaki ana süreçler: Bitkilerin atmosferik CO₂'yi fotosentezle dönüştürdüğü organik maddenin suya doymuş ortamlarda birikmesi ve anaerobik koşullar (oksijen eksikliği) nedeniyle ayrışmanın yavaşlamasıdır. Bu durumun sonucunda, organik karbon, tamamen parçalanmadan sediment ve toprakta birikir. Oksijensiz ortamlar ayrışmayı sınırladığı için karbon uzun süre tutulur. Bitki kökleri ve mikroorganizmalar karbon döngüsünü yönlendirir (Li vd., 2024). Turbalıklar, sulak alanların özel bir alt tipidir ve karbon depolama açısından en kritik sistemlerdendir. Suyu doymuş, düşük oksijenli ve genellikle asidik ortamlardır. Bitki materyali tamamen ayrışmadan torf olarak birikir. Bu nedenle turbalıklar, binlerce yıl boyunca karbon depolayabilen sistemlerdir ve uzun vadeli karbon yutağı olarak işlev görür. Turbalıklar, dünya toprak karbonunun yaklaşık üçte birini depolar. Birim alan başına karbon depolama kapasitesi çok yüksektir. Bu nedenle, turbalıklar, alan başına, ormanlardan bile daha yoğun karbon depolayabilir (Kayranlı vd., 2010). Sulak alan ortamında karbon işlenmesi karmaşıktır ve çeşitli ayrışma reaksiyonları farklı katmanlarda gerçekleşir; örneğin solunum ve metan oksidasyonu aerobik bölgelerde, metanogenez ise anaerobik bölgelerde meydana gelir (Kadlec ve Wallace, 2008). Bununla birlikte, en yüksek ayrışma oranları, taze yaprak döküntüsü ve yakın zamanda sentezlenmiş kararsız organik maddenin yüksek miktarda bulunduğu sulak alan yüzeyine en yakın yerlerde bulunur (Schiff vd., 1998).

Bilim insanları sulak alanların biyokimyası ve hidrolojisi konusunda detaylı araştırmalar yürütmüştür. Bununla birlikte, sulak alanların gerçekten karbon kaynağı mı yoksa karbon yutağı mı olduğu konusunda genel kabul görmüş bir görüş birliği yoktur. Değişkenlerin, reaksiyonların ve çevresel koşulların karbon depolama ve salınımı üzerindeki etkisinin yorumlanmasında görüş ayrılıkları mevcuttur. Bu nedenle, karbon depolamayı artırmak için politikaların ve planlama süreçlerinin nasıl uyarlanacağına dair öneriler önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Karbon depolama ve akış verilerinin karşılaştırmaları, bölgeye ve iklime bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir (Kayranlı vd., 2010).

3.3. Okyanuslar

Okyanuslar, Dünya'daki en büyük aktif karbon yutağıdır ve atmosferik CO₂ seviyelerinin düzenlenmesinde kritik rol oynar. Küresel okyanuslar, antropojenik CO₂ emisyonlarının yaklaşık %25–30'unu absorbe etmektedir. Yıllık karbon alımı yaklaşık 2.6–3.0 Pg C/yıl düzeyindedir. Bu süreç, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunu düşürerek iklim sistemini doğrudan etkiler. Dolayısıyla okyanuslar, yalnızca karbon depolayan değil, aynı zamanda iklim düzenleyici sistemler olarak işlev görür (Lee vd., 2026).

Okyanus, küresel karbon döngüsü için esas olarak üç faktör nedeniyle önemlidir: (1) okyanus, nispeten kısa bir devir süresine sahip devasa bir karbon rezervuarıdır; (2) deniz suyundaki karbondioksit, etkili bir şekilde inorganik olarak diğer maddelere ayrışır; (3) deniz planktonu, yüzey okyanus karbondioksit konsantrasyonunu cansız bir okyanusa göre daha düşük bir seviyede tutar. Fitoplanktonlar tarafından gerçekleştirilen fotosentez ve biyolojik pompa mekanizması, karbonun derin okyanuslara taşınmasını sağlayarak uzun süreli depolamaya katkıda bulunur. Ancak artan CO₂ seviyeleri,

okyanus asitlenmesi gibi sorunlara yol açarak bu sistemlerin işleyişini tehdit etmektedir (Gruber vd., 2023).

3.4. Tarım Arazileri

Tarım arazileri, küresel karbon döngüsünde hem sera gazı kaynağı hem de uygun yönetim altında karbon yutağı olarak işlev gören dinamik sistemlerdir. Arazi kullanımı ve tarımsal faaliyetler önemli miktarda sera gazı emisyonuna neden olsa da bitkilerin fotosentez yoluyla atmosferik CO₂'yi organik maddeye dönüştürmesi ve bunun toprakta birikmesi sayesinde önemli bir karbon depolama potansiyeli oluşmaktadır. Bu süreçte özellikle toprak organik karbonu, karbonun uzun süreli tutulmasında merkezi rol oynamaktadır (Zhang vd., 2024)

Tarım topraklarında karbon sekestrasyonu büyük ölçüde uygulanan yönetim stratejilerine bağlıdır. Koruyucu toprak işleme, örtü bitkileri kullanımı, ürün rotasyonu, organik gübreleme ve tarım-orman gibi uygulamalar, toprağa giren organik madde miktarını artırarak karbon birikimini desteklemektedir. Özellikle örtü bitkilerinin kullanımıyla hektar başına yıllık anlamlı düzeyde karbon artışı sağlanabildiği meta-analiz çalışmalarında gösterilmiştir (Poeplau & Don, 2015). Bu tür uygulamalar, "iklim-akıllı tarım" yaklaşımlarının temelini oluşturarak tarım arazilerinin net karbon yutağına dönüşmesine katkı sağlamaktadır (Kumari vd., 2025). Bununla birlikte, tarım topraklarının karbon depolama kapasitesi sınırsız değildir ve çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Toprak karbonu zamanla doygunluğa ulaşmakta, ayrıca yanlış yönetim uygulamaları depolanan karbonun tekrar atmosfere salınmasına yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra bazı tarımsal uygulamalar nitroz oksit ve metan gibi güçlü sera gazlarının emisyonunu artırarak net iklim etkisini azaltabilmektedir. Bu nedenle tarım arazileri, tek başına bir çözüm olmaktan ziyade, sürdürülebilir yönetim stratejileriyle desteklenmesi gereken ve

diğer karbon yutak sistemleriyle birlikte değerlendirilmesi gereken önemli bir bileşen olarak kabul edilmektedir (Padarian vd., 2022).

4. KARBON YUTAKLARINI ZAYIFLATAN VE TERSİNE ÇEVİREBİLEN SÜREÇLER

Karbonu atmosferden uzaklaştırma kapasitesi yüksek olan ekosistemler, güncel çevresel baskılar altında yalnızca zayıflamakla kalmamakta, kimi durumlarda işlevlerini tersine çevirerek net karbon kaynağına dönüşebilmektedir. Bu dönüşüm, çoğunlukla birden fazla sürücünün eşzamanlı etkisiyle ortaya çıkar ve tekil bir nedene indirgenemez. Arazi kullanımındaki hızlı dönüşüm, bu sürecin en görünür belirleyicilerinden biridir. Ormanların tarım, altyapı veya madencilik faaliyetleri için dönüştürülmesi, iki aşamalı bir etki yaratır: (i) mevcut biyokütlede depolanmış karbonun kısa sürede atmosfere geri verilmesi ve (ii) gelecekte karbon tutabilecek alanların ortadan kalkması. Bu nedenle arazi kullanım değişikliği, fosil yakıt emisyonlarından sonra en önemli insan kaynaklı karbon akışı bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Friedlingstein vd., 2022). Sulak alanların hidrolik rejiminin bozulması da benzer biçimde kritik sonuçlar doğurur. Özellikle turbalıkların drenajı, uzun süre oksijensiz ortamda korunmuş organik maddenin hızla oksitlenmesine yol açar. Bu süreç, CO₂'nin yanı sıra metan (CH₄) gibi güçlü sera gazlarının da salınmasına neden olabilir (Gorham, 1991; Leifeld & Menichetti, 2018). Dolayısıyla sulak alan kaybı, yalnızca yerel bir ekosistem değişimi değil, küresel karbon bütçesi açısından da önemli bir kırılmadır.

İklim değişikliğinin kendisi, karbon yutaklarını doğrudan etkileyen ikinci büyük baskı grubunu oluşturur. Artan sıcaklıklar, bitkisel üretkenliği bazı bölgelerde artırsa bile, çoğu durumda su stresi ve besin sınırlamaları nedeniyle bu kazanım kalıcı değildir.

Buna karşılık, toprakta mikrobiyal aktivitenin hızlanması, ayrışmayı artırarak net karbon kaybına yol açabilir (Davidson & Janssens, 2006). Ayrıca sıcaklık ve kuraklık stresinin birleşimi, orman yangınlarının sıklığını ve şiddetini artırarak kısa sürede büyük karbon salımlarına neden olmaktadır (Bowman vd., 2009). Ekosistemlerin bu baskılar altında verdiği yanıtlar çoğu zaman doğrusal değildir. “Eşik davranışı” olarak tanımlanan durumlarda, belirli bir baskı seviyesinin aşılmasıyla birlikte sistem ani ve geri dönüşü zor bir değişim gösterebilir. Örneğin uzun süreli kuraklık yaşayan ormanların geniş alanlarda yaşamını yitirmesi, bu sistemlerin karbon yutağı olmaktan çıkıp karbon kaynağına dönüşmesine yol açabilir (Anderegg vd., 2020; Allen vd., 2010).

Sonuç olarak, karbon yutaklarını tehdit eden faktörler birbirinden bağımsız değil; aksine birbirini güçlendiren bir ağ yapısı içinde işlemektedir. Bu nedenle bu sistemlerin korunması, yalnızca tekil baskıların azaltılmasıyla değil, çoklu stres faktörlerinin birlikte ele alındığı bütüncül yaklaşımlarla mümkündür.

5. KORUMA YAKLAŞIMLARI VE DOĞA TABANLI MÜDAHALELER

Karbon yutaklarının korunması ve güçlendirilmesi, son yıllarda “doğa tabanlı çözümler” başlığı altında ele alınan stratejilerle yeni bir boyut kazanmıştır. Bu yaklaşımlar, ekosistemlerin doğal işleyişinden yararlanarak hem karbon dengesine katkı sağlamayı hem de ekosistem hizmetlerini birlikte optimize etmeyi hedefler (Griscom vd., 2017; Seddon vd., 2020).

Orman ekosistemleri açısından bakıldığında, mevcut ormanların korunması çoğu zaman yeni ağaçlandırma faaliyetlerinden daha etkili bir karbon stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Bunun nedeni, olgun ormanların yüksek miktarda

karbonu hâlihazırda depoluyor olması ve bu stokların kaybının büyük emisyonlara yol açmasıdır. Bununla birlikte, bozunmuş alanlarda gerçekleştirilen ekolojik restorasyon ve doğal rejenerasyon süreçleri, uzun vadede önemli karbon kazanımları sağlayabilir (Pan vd., 2011; Bastin vd., 2019). Sulak alan restorasyonu, karbon yönetimi açısından en yüksek getirili müdahalelerden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle turbalıkların yeniden suya kavuşturulması, oksidatif ayrışmayı sınırlandırarak karbon kaybını önemli ölçüde azaltır ve yeni karbon birikimini teşvik eder (Leifeld & Menichetti, 2018). Tarım sistemlerinde uygulanabilecek iyileştirmeler de geniş bir potansiyel sunmaktadır. Toprak işleme yoğunluğunun azaltılması, bitki örtüsünün yıl boyunca korunması ve organik madde girdilerinin artırılması gibi uygulamalar, toprak karbon stoklarını yükseltebilir (Lal, 2004; Paustian vd., 2016). Bu uygulamalar aynı zamanda su tutma kapasitesini artırarak iklim değişikliğine uyumu da destekler.

Ekonomik araçlar, bu stratejilerin uygulanabilirliğini artıran tamamlayıcı mekanizmalar olarak öne çıkar. Karbon fiyatlandırması, emisyon ticaret sistemleri ve ekosistem hizmetleri için ödeme programları, karbon depolamayı teşvik eden faaliyetleri ekonomik olarak anlamlı hale getirebilir (Newell vd., 2014). Bununla birlikte, bu araçların başarısı, şeffaf izleme, doğrulama ve raporlama sistemlerinin varlığına bağlıdır. Dolayısıyla doğa tabanlı çözümler, yalnızca karbon sekestrasyonu açısından değil, aynı zamanda ekosistem dayanıklılığı ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından da çok katmanlı faydalar sunmaktadır.

6. SONUÇ

Karbon yutaklarının korunması meselesi, giderek daha fazla disiplinler arası bir yaklaşım gerektiren bir konu haline

gelmektedir. Bu sistemler yalnızca karbon depolamakla kalmaz; aynı zamanda biyolojik çeşitlilik, su düzenleme ve toprak sağlığı gibi temel ekosistem hizmetlerini de destekler. Bu nedenle karbon odaklı politikaların, diğer ekolojik boyutları göz ardı etmeden tasarlanması kritik öneme sahiptir. Mevcut politikaların önemli bir kısmı, sektörel sınırlar içinde kalmakta ve ekosistemler arası etkileşimleri yeterince dikkate almamaktadır. Oysa karbon döngüsü, ormanlar, okyanuslar ve toprak sistemleri arasında güçlü bağlantılar içeren bütüncül bir yapıdır (Falkowski vd., 2000). Bu nedenle etkili bir yönetim yaklaşımı, bu bağlantıları göz önünde bulundurmalıdır. Ayrıca doğa tabanlı çözümler her zaman otomatik olarak olumlu sonuçlar üretmez. Örneğin tek türle yapılan geniş ölçekli ağaçlandırma projeleri, kısa vadede karbon kazanımı sağlasa da uzun vadede biyolojik çeşitliliği azaltabilir ve ekosistem dayanıklılığını zayıflatabilir (Veldman vd., 2015). Bu nedenle karbon yönetimi stratejilerinin, ekolojik bütünlüğü koruyan çok amaçlı bir perspektifle ele alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak, gelecekte etkili bir iklim politikası geliştirmek için, bilimsel bilgiye dayalı, çok ölçekli ve entegre yönetim stratejilerinin benimsenmesi kaçınılmazdır. Bu doğrultuda, karbon yutaklarının korunması yalnızca çevresel bir gereklilik değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir gelecek için stratejik bir önceliktir.

KAYNAKÇA

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., ... & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management*, 259(4), 660-684.
- Ameray, A., Bergeron, Y., Valeria, O., Montoro Girona, M., & Cavard, X. (2021). Forest carbon management: A review of silvicultural practices and management strategies across boreal, temperate and tropical forests. *Current Forestry Reports*, 7(4), 245-266.
- Anderegg, W. R., Trugman, A. T., Badgley, G., Anderson, C. M., Bartuska, A., Ciais, P., ... & Randerson, J. T. (2020). Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, 368(6497), eaaz7005.
- Bastin, J. F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., ... & Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76-79.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449.
- Bowman, D. M., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., ... & Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth system. *Science*, 324(5926), 481-484.
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., ... & Thornton, P. (2013). Carbon and other biogeochemical cycles. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165-173.
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E. E. A., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., ... & Steffen, W. (2000). The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *science*, 290(5490), 291-296.
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., ... & Zheng, B. (2022). Global carbon budget 2022. *Earth system science data*, 14(11), 4811-4900.
- Gorham, E. (1991). Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological applications*, 1(2), 182-195.
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., ... & Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645-11650.
- Gruber, N., Bakker, D. C., DeVries, T., Gregor, L., Hauck, J., Landschützer, P., ... & Müller, J. D. (2023). Trends and variability in the ocean carbon sink. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 119-134.
- Houghton, R. A., House, J. I., Pongratz, J., Van Der Werf, G. R., Defries, R. S., Hansen, M. C., ... & Ramankutty, N. (2012). Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*, 9(12), 5125-5142.
- Jain, A. K. (2022). Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811-4900.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*. CRC press.

- Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A., & Hedmark, Å. (2010). Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review. *Wetlands*, 30(1), 111-124.
- Kumari, K., Sagwal, S., Tondon, V., Chauhan, S., & Panwar, K. (2025). Carbon Sequestration in Agricultural Soils: Strategies to Improve Soil Health. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(12), 297-314.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22.
- Lee, C. H., Subhas, A. V., Kim, J. H., & Lee, K. (2026). Ocean Carbon Dioxide Removal and Storage. *Chemical Reviews*.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., ... & Zheng, B. (2018). Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4), 2141-2194.
- Leifeld, J., & Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature communications*, 9(1), 1071.
- Li, L., Xu, H., Zhang, Q., Zhan, Z., Liang, X., & Xing, J. (2024). Estimation methods of wetland carbon sink and factors influencing wetland carbon cycle: A review. *Carbon Research*, 3(1), 50.
- Newell, R. G., Pizer, W. A., & Raimi, D. (2014). Carbon market lessons and global policy outlook. *Science*, 343(6177), 1316-1317.
- Oforu, E., Dsouza, K. B., Amaogu, D. C., Pigeon, J., Boudreault, R., Moreno-Cruz, J., ... & Leonenko, Y. (2025). Climate benefits of afforestation and reforestation with varying species mixtures and densities in the north-western boreal lands. *Environmental Research Letters*, 20(12), 124026.

- Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A., & Smith, P. (2022). Soil carbon sequestration potential in global croplands. *PeerJ*, 10, e13740.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), 49-57.
- Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41.
- Schiff, S., Aravena, R., Mewhinney, E., Elgood, R., Warner, B., Dillon, P., & Trumbore, S. (1998). Precambrian shield wetlands: hydrologic control of the sources and export of dissolved organic matter. *Climatic Change*, 40(2), 167-188.
- Schimel, D., Stephens, B. B., & Fisher, J. B. (2015). Effect of increasing CO₂ on the terrestrial carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(2), 436-441.
- Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48(1), 7-20.
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794).

- Sun, W., & Liu, X. (2019). Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China. *Forest Ecosystems*, 7(1), 4.
- Veldman, J. W., Overbeck, G. E., Negreiros, D., Mahy, G., Le Stradic, S., Fernandes, G. W., ... & Bond, W. J. (2015). Where tree planting and forest expansion are bad for biodiversity and ecosystem services. *BioScience*, 65(10), 1011-1018.
- Yan, Y., Zheng, Q., Miao, X., & Wei, Y. (2026). Does achieving the sustainable development goal of forest carbon sinks need to come at the expense of the stakeholders' benefits? Global perspective through systematic literature review. *Humanities and Social Sciences Communications*.
- Zhang, K., Liu, Z., McCarl, B. A., & Fei, C. J. (2024). Enhancing agricultural soil carbon sequestration: a review with some research needs. *Climate*, 12(10), 151.

ÇEVRE, KARBON VE
SU EKOSİSTEMLERİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com