

## Yapay Fotosentez ve Sürdürülebilir Enerji Potansiyeli

Ragıp Adıgüzel<sup>1</sup>

### Özet

Bu çalışmada 21. Yüzyılın başlıca sorunu olan küresel ısınma ve iklim değişikliği ile mücadelede yapay fotosentez ve uygulamaları ele alınmıştır. Yapay fotosentez gezegenimiz için temiz ve sürdürülebilir enerji konusunda ümit vaat eden önemli bir mihenk taşıdır. Doğal fotosentezden ilham alınarak geliştirilen bu biyokimyasal proseste güneş ışığı veya yapay ışık yardımıyla karbondioksit ve su yakıtlar ve oksijen gibi faydalı kimyasallara dönüştürülebilmektedir. Bu suretle yakıt ve oksijen üretme sürecinde sera gazına neden olan büyük miktarda zararlı karbondioksit atmosferimizden giderilebilecektir. Doğada yeterince su ve karbondioksit bulunması yapay fotosentez üzerinde çalışmayı değerli kılmaktadır. Nitekim birçok araştırmacı bu alana yoğun ilgi göstermekte olup son yıllarda yapılan çalışmalar hızla artış göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek performansa sahip etkin fotokatalizörlerin geliştirilmesinin yanı sıra yapay fotosentez sistemlerinin ekonomik ve verimlilik bakımından sürdürülebilir hale gelmesi ve küreselleşmesi için bir dizi çalışmalar ve zaman gerekmektedir.

### Giriş

Gezegeneimizin güneş ışınlarının atmosferde su buharı, karbondioksit ve metan gibi sera gazları tarafından tutulması sonucunda ısınması sera etkisi olarak tanımlanmaktadır. Sera etkisi, normal koşullar altında doğal düzenin bir parçası olup dünya sıcaklığının belirli bir seviyede olması ve doğal hayatın sürdürülebilmesi için sera gazlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, artan dünya nüfusu, fosil yakıt kullanımı, ormanların yok olması, kaynakların aşırı ve düzensiz bir şekilde tüketilmesi ve insan faaliyetleri sonucunda atmosferdeki sera etkisi yapan gazlarda doğal olmayan bir artış göstermekte

1 Munzur Üniversitesi, Tunceli Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Tunceli, Türkiye, radiguzel@munzur.edu.tr, orcid id: 0000-0002-7050-0575

ve bunun sonucunda da küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Küresel ısınma sonucu meydana gelen iklim değişikliği doğal afetlere, su kıtlığı ve buna bağlı olarak tarımda olumsuz etkilere ve biyolojik çeşitliliğin yok olmasına sebep olmaktadır. İklim değişikliği sebep olduğu çevresel felaketlerle birlikte insan sağlığını da olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple, geleceğimizi tehdit eden küresel ısınma ve iklim değişikliği dünyanın karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan biridir. Aynı zamanda dünyanın çözüm üretilmesi bakımından öncelikli ve acil bir sorundur. Küresel ısınma, hava kirliliği ve enerji güvenliği konusundaki artan endişelere temel bir çözüm, yenilenebilir ve çevre dostu karbon salmayan veya karbon nötr enerji kaynaklarının kullanılmasıdır (Pirinç ve Beşer, 2024).

İklim değişikliği ile küresel anlamda ortak mücadele edilmesi konusunda 2015 yılında Paris Anlaşması kabul edilmiştir. Paris Anlaşması'na göre, belirlenen küresel sıcaklık artışının 1,5 °C ile sınırlandırılması hedefine ulaşılabilmesi için 2030 yılına kadar emisyon seviyesinin %45 azaltılmasının sağlanması ve yüzyıl ortasına kadar net sıfır emisyonu ulaşılması gerektiği ifade edilmektedir. Türkiye, 11 Kasım 2021 tarihinde Paris Anlaşmasına taraf olmuş ve iklim değişikliği ile mücadelede hem net sıfır emisyon hedefi vererek hem de Paris Anlaşması'na taraf olarak kararlılığını göstermiştir. 12. Kalkınma Planında da (2024-2028) sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliğine uyum eylemlerinin güçlendirilmesine ilişkin uzun dönemli bir yol haritası belirlenmiştir (ÇŞİDB-İDB, 2024).

Ayrıca, Dünya Bankası Türkiye Yeşil Sanayi Projesi kapsamında Avrupa yeşil mutabakatı ve iklim değişikliğine uyuma yönelik Ar-Ge ve yenilik konuları ve yeşil büyümeye hizmet eden Ar-Ge ve yenilik konuları öncelikli konular arasında yer almaktadır (ÇŞİDB-İDB, 2023; TÜBİTAK, 2024).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) verilerine göre, 2023 yılında dünya genelinde enerji tüketiminin %27'si yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanırken 2024 yılı itibarıyla bu oran %30'a yükselmiştir. Türkiye'nin toplam enerji üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanma oranı ise, 2024 yılında da artış göstererek %40'a yükselmiştir (Energy Exporter, 2024).

Bu konuda güneş enerjisi, tüm yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynakları arasında daima en başta yer almakta ve günümüzde de önemini korumaktadır. Literatürde tüm rezervlerden elde edilebilen toplam enerji miktarının, güneşin dünya yüzeyine sağladığı güneş enerjisinin yaklaşık %1'ine karşılık geldiği belirtilmektedir. Daha anlaşılır bir şekilde ifade etmek gerekirse, güneş enerjisi, güneş sisteminin ömrü boyunca tüm enerji ihtiyaçlarını karşılayacak kadar fazladır. Buna karşın, bu enerjinin

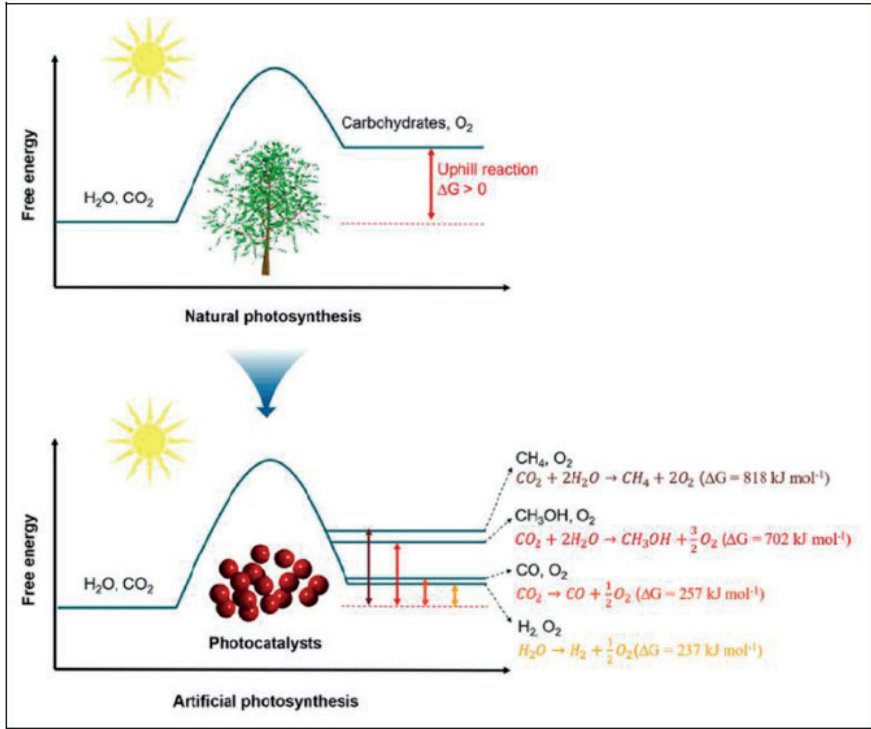
toplanması, depolanması ve kullanılması için ekonomik açıdan uygulanabilir teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir (Kim ve ark., 2019).

Enerji, ekonomik kalkınma ve sosyal büyüme için önemli bir itici güçtür. Dünya nüfusunun artması ve gelişen teknoloji ile paralel olarak enerji talebi de hızla artmaktadır. Bu bağlamda, enerji talebini karşılarken sera gazı emisyonlarını ve karbon ayak izini azaltma üzerine yoğunlaşan araştırmacılar için yenilenebilir enerji kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılması başlıca itici güç olmuştur (Azarpour ve ark., 2022).

İşte tam bu noktada küresel ısınma ile mücadele konusunda yapay fotosentez (YF) imdadımıza yetişmektedir. YF sistemleri, doğal fotosentezden ilham almak suretiyle güneş ışığı veya yapay ışık kaynakları yardımıyla karbondioksit ve suyu özellikle yakıtlar ve oksijen gibi yararlı kimyasallara dönüştüren biyokimyasal proseslerdir. Bu süreçte gerçekleşen tepkimeler aşağıda verilmektedir (Saravanana ve ark., 2021).



Tepkime 1’de oksijen ve karbonhidratlar meydana gelirken tepkime 2’de yine ışığı soğuran fotosensitizörler (PTS) vasıtasıyla karbonhidrat ile sudan karbondioksit ve hidrojen molekülü açığa çıkmaktadır. Diğer bir tabirle, fotokatalitik su ayrıştırmasında, karbonhidrat hidrojen moleküllerine dönüştürülür (Saravanana ve ark., 2021). Doğal fotosentezde güneş ışınları klorofiller yardımıyla soğurulurken YF tekniğinde ışık spektrumu fotosensitizörler (PTS) tarafından soğurulmaktadır. Kullanılan fotosensitizörler genellikle rutenyum polipiridin kompleksleri ve türevleridir, zira bu maddeler ışık enerjisini soğurma konusunda verimli ve uzun ömürlüdürler (Deponti ve Natali, 2016). Reaksiyon hızını artırmak için ise, hidrojenazlar gibi enzimler kullanılır (Saravanana ve ark., 2021). **Şekil 1**’de doğal fotosentez ile YF süreçlerinin karşılaştırmasına ait şema görülmektedir. Her iki süreçte de reaksiyon endergonik olup gerekli olan enerji güneş ışığından karşılanmaktadır (Mandad ve ark., 2025). Karbondioksit emisyonu ve sürdürülebilir enerji açısından bakıldığında doğanın karbon döngüsünden esinlenerek yola çıkılan bu süreç, son derece önem arz eden sürdürülebilir enerji üretme potansiyeline sahiptir.



Şekil 1. Doğal fotosentez ve YF süreçlerinin karşılaştırmasına ait reaksiyon şeması (Mandad ve ark., 2025)

YF süreci, fabrikalar ve enerji santrallerinden salınan  $CO_2$ 'nin kimyasal ürünlere dönüştürülmesi esnasında hammadde olarak kullanılması ve sudan güneş enerjisiyle üretilen temiz hidrojenle gerçekleşen ve aynı zamanda sera gazlarını azaltmaya yönelik umut verici bir yaklaşımdır. Buraya kadar gezegenimizi ve geleceğimizi tehdit eden karbondioksit salınımı ile meydana gelen sera gazlarının etkisiyle ortaya çıkan küresel ısınma ve iklim değişikliği ile mücadelede, YF tekniğinin öneminin altı çizilmeye çalışıldı.

### Yapay fotosentez (YF) prosesi

Doğal fotosentez sürecinin bir taklidi olarak geliştirilen YF süreci, doğal güneş ışığını toplayarak karşılığında karbondioksiti hidrojen ve karbon bazlı yakıtlara dönüştürür. Bu proses ile iki taraflı kazanç söz konusudur. Bir taraftan  $CO_2$  emisyonu düşürülürken diğer taraftan fotokatalitik yolla  $H_2O$ 'nun ayrışması ile hidrojen üretilmektedir.

YF ile hidrojen üretimi, mikroorganizmalarla yapılan karanlık ve fotofermantasyon ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir  $H_2$  verimi veya

daha yüksek ışık dönüşüm verimliliği elde etme potansiyeline sahip olabilir. Ancak, bu süreç geliştirilme aşamasında olup, daha verimli teknolojilere ve daha düşük  $H_2$  üretim maliyetine duyulan ihtiyaç nedeniyle ticarileşme aşamasına ulaşmak için uzun bir yol kat edilmesi gerekmektedir (Singh ve ark., 2021).

YF ile güneş hücreleri kullanılarak güneş ışığı kullanılabilir elektriğe dönüştürülmektedir. Reaksiyonun sonunda sadece oksijen salmak yerine, süreç havadaki karbondioksiti ve suyu da sıvı hidrojene dönüştürür. Bu sıvı hidrojen, motorları çalıştırmak veya klima sistemlerini ve su ısıtıcılarını çalıştırmak için yakıt olarak kullanılabilir (Mu, 2021). Bu yüzden YF üzerinde derinlemesine çalışılmak kaydıyla geleceğimiz için ümit vaat etmektedir.

Bu çalışmada YF uygulamaları ele alınırken  $CO_2$ 'nin güneş yakıtlarına indirgenmesi ve bunların diğer endüstrideki uygulamaları ile birlikte fotokatalitik yolla sudan hidrojen üretilmesi üzerinde durulacaktır.

### YF yönteminin tarihsel gelişimi

YF kavramı ilk kez 1912 yılında fotokimya ve yeşil kimyanın öncüsü olan İtalyan Kimyager G. L. Ciamician tarafından ortaya atıldı. Bitkilerin enerji üretim yöntemlerini taklit etmeyi amaçlayan fotokimyasal süreçlerle güneş enerjisinden yararlanılması konusunda öneride bulundu (KIZUNA, 2021).

1967 yılında Dr. Akira Fujishima'nın, Dr. Kenichi Honda'nın rehberliğinde güçlü fotokatalitik özelliklere sahip bir materyal olan titanyum dioksitin ( $TiO_2$ ) fotokatalitik özelliklerini keşfettiğinde önemli bir ilerleme kaydedildi. Bu sayede  $TiO_2$ 'yi su altında ultraviyole ışığına maruz bırakmanın bitkilerdeki fotosenteze benzer bir redoks (veya oksidasyon-redüksiyon) reaksiyonuyla su moleküllerinin hidrojen ve oksijene ayırabileceğini buldular. Bunun üzerine Dr. Fujishima'nın Dr. Honda ile yazdığı makalenin 1972'de yayınlanmasının ardından fotokataliz reaksiyonu "Honda-Fujishima Etkisi" olarak literatüre geçti. Bu öncü çabaların, doğal fotosentez süreçlerini taklit ederek sürdürülebilir enerji çözümleri geliştirmeyi amaçlayan YF üzerinde devam eden araştırmaların temelini oluşturduğu söylenebilir. (KIZUNA, 2021).

Fosil yakıtlardan hidrojen gibi yenilenebilir enerjilere geçişle birlikte, karbondan arındırılmış bir topluma ulaşmak için bir diğer önemli önlem şüphesiz karbon geri dönüşümüdür. Diğer bir tabirle,  $CO_2$ 'yi kaynak olarak etkili bir şekilde kullanmaktır. Bu bakış açısından yola çıkarak Fujishima, yüksek verimli güneş hücrelerinden üretilen elektriği kullanarak suyun elektrolizi yoluyla üretilen hidrojeni enerji santrallerinden ve fabrikalardan yayılan  $CO_2$  ile birleştirerek enerji kaynağı olarak kullanılabilen metanole

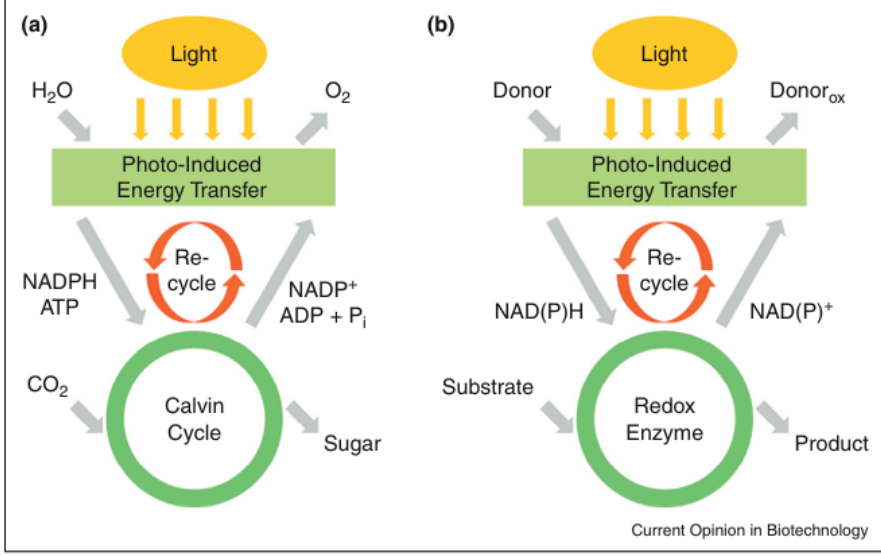
dönüştürmesini önermiştir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi halinde, CO<sub>2</sub> gibi karbon içeren gazlar artık sera etkisine katkıda bulunamayacaktır. Tam tersine, bu gazlar petrol ve doğal gazın yerini alacak “kaynaklar” haline gelecektir (KIZUNA, 2021). Bu bağlamda 21. Yüzyılın başlarından itibaren özellikle son on yılda yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılabilmesi ve sürdürülebilirlik adına epey çalışma yapılmış olup bunların her birinde bir sonraki çalışmalara ışık tutacak önemli adımlar atılmıştır. En önemli adımlardan biri de güneş ışığını yakalama ve yönlendirme ile birlikte CO<sub>2</sub> indirgeme performansını iyileştirmeye yönelik etkili olan yeni fotokatalizörlerin geliştirilmesine odaklanılmasıdır (Li ve ark., 2016).

### **Karbondiyoksitin güneş yakıtlarına indirgenmesi ve endüstrideki uygulamaları**

Doğal fotosentezde ışık enerjisinden kimyasal enerji üretirken meydana gelen ışık reaksiyonu, Calvin döngüsüne göre CO<sub>2</sub>'yi karbondihidratlara indirgemek için ATP ve NADPH tüketen çeşitli redoks enzimatik reaksiyonlar yoluyla gerçekleşmektedir. Doğal fotosentez sürecinden esinlenen biyokatalitik YF'de ise kuantum noktaları, silikon nanoteller ve organik boyalar gibi yardımcı faktörlerin sisteme yüklenmesi gerekmektedir. Redoks enzimatik reaksiyonların foto-indüklenen enerji toplama ve elektron transferi ile birleşimi süreci, yakıtları ve diğer kimyasalları görünür ışık altında sentezlemek için kullanılabilir (Azarpour ve ark., 2022). Böylece güneş ışığı enerjisinin yüksek enerjili kimyasal bağlarda depolanmasını sağlayan YF süreci, dünyadaki canlı organizmalara da fayda getirecektir. Doğal fotosentez ve biyokatalitik YF'nin basit döngülerinin şematize edilmiş hali **Şekil 2**'de görülmektedir.

Azarpour ve ark. (2022) tarafından bu süreçte makul dönüşüm verimliliklerinde su moleküllerinin oksijene ve hidrojene ayrışması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu ayrışmanın, çevre dostu elektrik enerjisi üretimi için kullanılabilen karbon içermeyen bir enerji taşıyıcısı olan hidrojen üretme bakımından avantaj sağladığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte soğurulan en enerji miktarının, su moleküllerini elektrokimyasal oksidasyonla oksijene ayırmak ve proton ve CO<sub>2</sub>'nin indirgenmesiyle kimyasal yakıtların sentezi için yeterli olması gerekir. Bu değer bir su molekülünün hidrojen ve oksijene ayrışması için 1,23 V, metan oluşumunda CO<sub>2</sub>'nin indirgenmesi için ise 1,4-1,6 V aralığında olduğu belirtilmiştir. Buna ilave olarak, daha geniş bir güneş spektrumundan verimli bir şekilde enerji soğurulması için daha küçük bant aralığına sahip yarı iletken malzemelerin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Bunların yanı sıra, YF tekniğinde suyun oksidasyonu ve yakıt üretimi için kullanılan katalitik işlem üzerinde daha çok çalışmaların

yapılması gerektiği,  $H_2$ 'nin güvenli bir şekilde depolanması ve taşınması ile ilgili güçlüklerin olduğu,  $H_2$  katalizörlerinin  $O_2$ 'ye duyarlı olduğu ve kullanılan malzemelerin sulu ortamda korozyona uğradığı ifade edilmiştir (Azarpour ve ark., 2022).



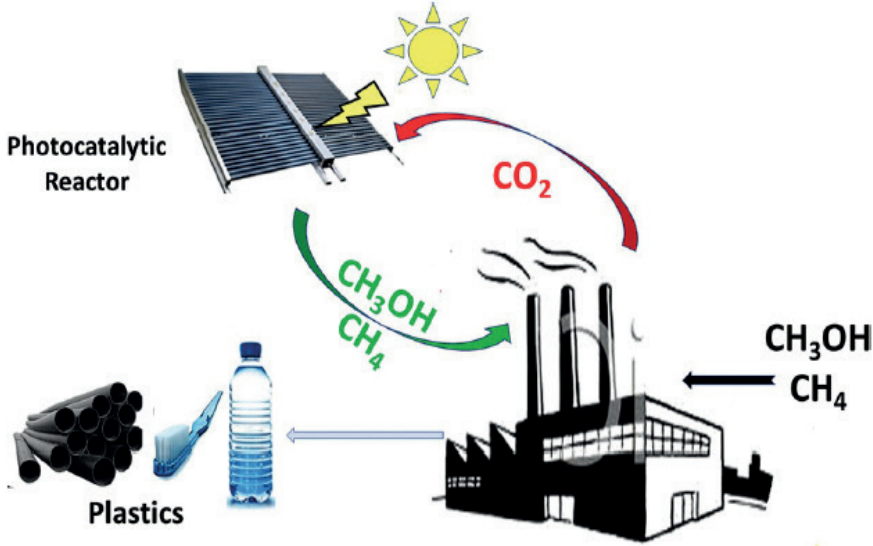
Şekil 2. Doğal fotosentez ve biyokatalitik YF'nin şematik gösterimi a) Doğal fotosentez, b) Biyokatalitik YF (Azarpour ve ark., 2022; Kim ve ark., 2014)

Güneş ışığı altında  $CO_2$ 'nin fotokatalitik dönüşümünü gerçekleştirmek için ışıqla harekete geçen bir malzeme olarak fotokatalizör yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde fotokatalizör kullanarak  $CO_2$  dönüşümünün, çeşitli yöntemlerle elde edildiği rapor edilmektedir. Bu yöntemlerin bazıları içerik olarak süspanse edilmiş  $TiO_2$  içeren  $CO_2$  ile doymuş sulu çözelti, izopropil alkolde süspanse edilmiş  $TiO_2$  tozları içeren yüksek basınçlı  $CO_2$  sistemi ve nemlendirilmiş gaz fazlı  $CO_2$  şeklindedir (Nawaz ve ark., 2019).

Bunlardan gaz fazı dönüşümü, sulu fazdan katalizörün sıfır geri kazanımı ve  $CO_2$ 'nin düşük çözünürlüğünün üstesinden gelinmesi avantajından dolayı ticari potansiyeli diğerlerini geride bırakmıştır. YF gibi, bu süreçte,  $H_2O$  varlığında foto uyarılmış elektronlar ( $e^-$ ) aracılığıyla  $CO_2$ 'yi indirger ve metan ( $CH_4$ ), metanol ( $CH_3OH$ ), formaldehit ( $HCHO$ ), formik asit ( $HCOOH$ ) gibi enerji taşıyan ürünler elde edilir (Nawaz ve ark., 2019).

Bu süreçte aynı zamanda “Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası” hazırlık çalışmaları kapsamında belirlenen 6 pilot sektörden (Demir-

Çelik, Alüminyum, Çimento, Kimyasallar, Plastik ve Gübre) kimyasallar ve plastik sektörlerine de yeşil üretim bakımından katkı sağlanmaktadır (TÜBİTAK, 2024). Elde edilen bu güneş yakıtlarının potansiyel endüstriyel uygulamalarına ilişkin genel bir bakış **Şekil 3**'te verilmektedir (Nawaz ve ark., 2019).

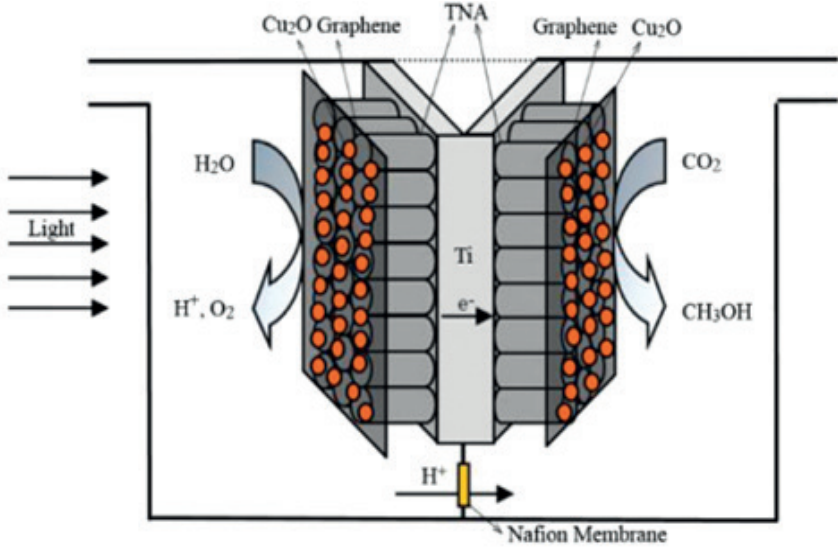


*Şekil 3. CO<sub>2</sub>'in fotokatalitik indirgenmesi ile güneş yakıtları ve yenilenebilir olefinlere giden karbon sıfır rotasının şematik gösterimi (Nawaz ve ark., 2019)*

Bununla birlikte bu sistemin gerçekleşmesindeki en önemli problem, verimli bir şekilde bol miktarda güneş enerjisi toplayabilen aktif ve kararlı çok fonksiyonlu katalizörlerin eksikliğidir. Bu sebeple birçok araştırmacı güneş ışığını verimli bir şekilde yakalayabilen ve yönlendirebilen yeni fotokatalizörlerin geliştirilmesine odaklanmışlardır. Bunun yanı sıra, bu süreci endüstriyel uygulama için gerçekleştirmeye yönelik birçok araştırma yapılmış ve hız kesmeden halen araştırılmaya devam edilmektedir.

Bu alanda yapılan daha ileri bir çalışmada, Li ve ark. (2016) tarafından CO<sub>2</sub>'nin verimli fotokatalitik dönüşümünde görünür ışık ( $\lambda > 400$  nm) altında metanol elde edilmesi, sırasıyla grafen ve Cu<sub>2</sub>O'nun elektrokimyasal depozisyonu ile hazırlanan monolitik iki taraflı Cu<sub>2</sub>O/grafen/TiO<sub>2</sub> nanotüp dizisi (TNA) heteroyapısı kullanılarak, ışıkla çalışan çift odacıklı bir reaktörde başarıyla gerçekleştirilmiştir. Proton değişim membranı içeren reaktör sisteminin şematik diyagramı **Şekil 4**'te verilmiştir. Bu süreç, sürdürülebilir

enerji üretimi ve çevresel faydalar sağlaması açısından önemli bir adımdır. Bu fotokatalitik  $\text{CO}_2$  dönüşümünde kullanılan heteroyapı katalizörünün ( $\text{Cu}_2\text{O}$ /grafen/TNA) bileşenlerinden  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ 'nin indirgenmesi için fotokatalizör olarak kullanılmıştır. Grafen, elektron iletkenliği yüksek olduğu için fotokatalitik süreçte yük taşıma ve transferini kolaylaştırarak fotokatalizörün etkinliğini artırmak amacıyla kullanılmıştır.  $\text{TiO}_2$  güçlü fotokatalitik özelliklere sahip bir materyaldir. Bu nedenle TNA ( $\text{TiO}_2$  Nanotüp Dizisi),  $\text{TiO}_2$ 'nin nanotüp yapısında olduğu için ışık emilimini artırması ve fotokatalitik aktiviteyi iyileştirmesi amacıyla kullanılmıştır (Li ve ark. 2016).

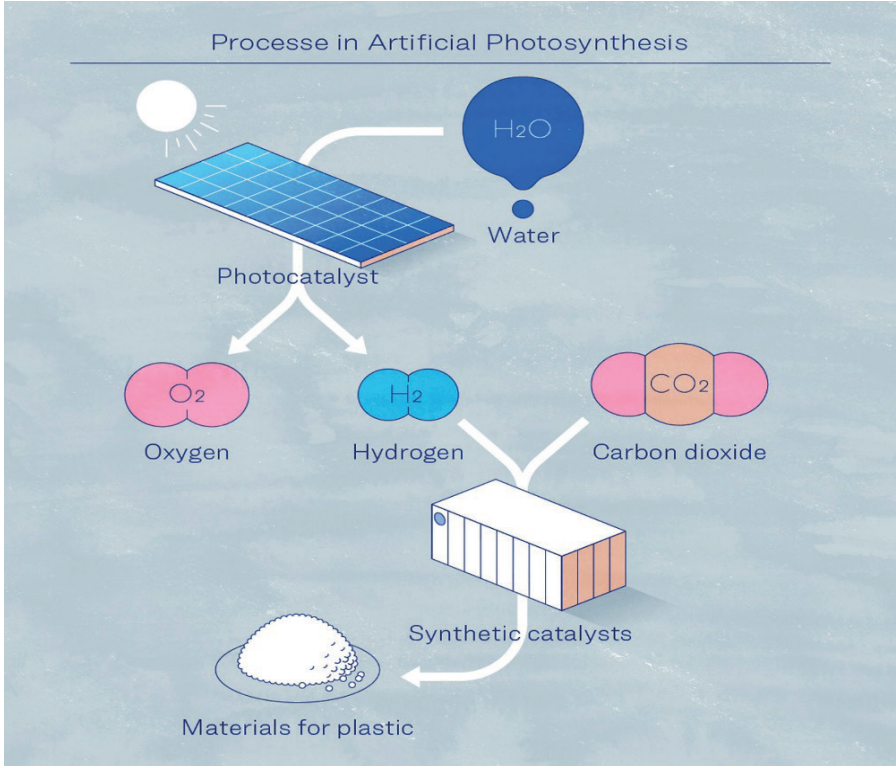


Şekil 4.  $\text{CO}_2$  foto-redüksiyon reaksiyon sisteminin şematik diyagramı (Li ve ark., 2016; Nawaz ve ark., 2019)

YF süreci,  $\text{CO}_2$  emisyonlarını azaltmanın ve güneş yakıtı üretmenin en doğrudan ve güçlü yolu olarak doğrulanmıştır. Bu sürecin en önemli lokomotifi hiç şüphesiz güneş ışığı ile birlikte  $\text{CO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  reaksiyonlarının katalize edilmesidir. Bu bağlamda güneş hücrelerinde, fotovoltaiik cihazlarda ve fotokatalizde mükemmel performansa sahip bir yarı iletken malzeme sınıfını ifade eden kurşun içermeyen perovskit ayarlanabilir bir bant aralığı ve yüksek kuantum verimliliği sergilemektedir. Bu özellikler fotojenlenmiş taşıyıcı kompleks verimliliğini artırarak katalitik reaksiyonları hızlandırmasını sağlamaktadır. Kurşunsuz perovskitin sayılan özellikleri, verimli fototermal katalizörlerin gereksinimine uygunluk göstermektedir. Bununla ilgili olarak Wang ve ark. (2021),  $\text{CO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  arasındaki reaksiyonu herhangi bir yardımcı

katalizör eklemeksizin CO ve CH<sub>4</sub> üretmek için başarıyla gerçekleştiren yeni bir kurşunsuz perovskit Cs<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>I<sub>9</sub> fototermal katalizörü geliştirmişlerdir. Bu katalizör ile 0,1 Wcm<sup>-2</sup> ışık yoğunluğuna sahip tam spektrumlu ışık ışınlamı ile 235 °C'de 95,7 μmolg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>e kadar ulaşan yüksek verim elde etmişlerdir. Bu oranın, saf fotokatalizden 87 kat ve saf termal katalizden 5,2 kat daha yüksek olduğu ayrıca, literatürdeki daha önceki çalışmalara göre daha yüksek olduğu da belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda Cs<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>I<sub>9</sub> ışıkla ısınlandığında, I<sup>-</sup>'nin I<sup>0</sup>ye dönüştürülmek üzere elektron kaybettiğini ve böylece oksidasyon reaksiyonu için aktif bölge görevi gördüğünü ortaya koymuşlardır. Ayrıca, Sb<sup>3+</sup>'ün de indirgeme reaksiyonu için aktif bölge olarak davrandığı ve termal etkinleştirme sonucu oluşan I<sup>-</sup> aktif bölgesi ve ışığa bağlı enerji geçişinin sinerjisi elektron transferini hızlandırmakla birlikte CO<sub>2</sub>'nin adsorpsiyon ve aktivasyonunu iyileştirdiği ifade edilmektedir (Wang ve ark., 2021).

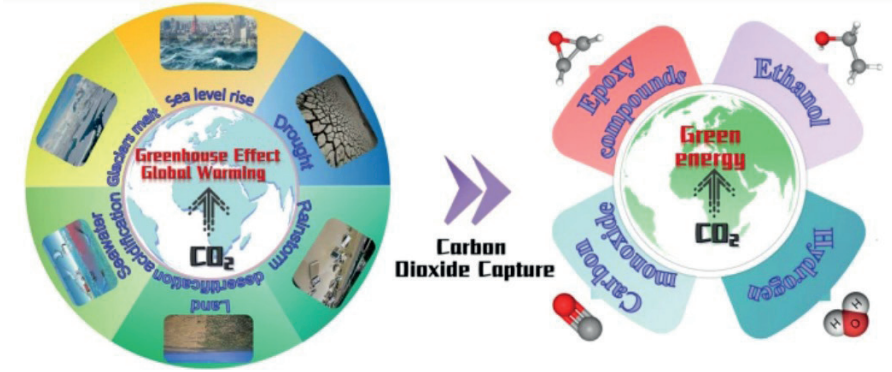
KAITEKI Solution Center' e bağlı Mitsubishi Chemical Corporation (MCC) tarafından YF ile sudan elde edilen hidrojeni fabrikalardan ve enerji santrallerinden yayılan CO<sub>2</sub>'yi olefin üretmek için kullanırken CO<sub>2</sub> yayan kimyasal ürün üretim süreçlerinden CO<sub>2</sub> emilim sürecine büyük bir geçiş yapılmış olacağı belirtilmektedir. MCC, üç adımda gerçekleşen bu sürecin tümü için teknolojik geliştirme yapmaktadır. İlk adımda güneş ışığı ve fotokatalizör yardımıyla suyun oksijen ve hidrojene ayrılması söz konusu olup karışık gazdan hidrojeni ayırmak için ayırma membranının kullanılması ikinci adımı oluşturmaktadır. Son adımda ise, yine olefin elde etmek üzere CO<sub>2</sub> ve hidrojen arasındaki reaksiyonun gerçekleşmesi için katalizör kullanılmaktadır. Bu süreçten verim alınması geliştirilecek olan katalizörlerle birlikte kullanılacak olan membrana bağlıdır. Bu bağlamda büyük boyutta üretilen ve maliyetleri düşürmesi beklenen bir fotokatalitik levha kullanılarak 2030 yılına kadar %10 enerji dönüşüm verimliliği sağlanması ve levhanın on binlerce metrekaresine bir alanda açık havada test edilerek verimlilik oranlarının doğrulanması hedeflenmektedir. Bu ve benzeri çalışmalar karbondioksit kullanan plastik üretim teknolojisinin gelişmesine önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Olefin üretme sürecinin sematize hali **Şekil 5**'te görülmektedir (Oyamada, 2023).



Şekil 5. Olefin üretim sürecine ait şema (Oyamada, 2023)

Net karbondioksit emisyonlarını azaltmak amacıyla, karbon bazlı kaynakların daha sürdürülebilir ve verimli kullanımına yönelik önemli çabalar sarf edilmektedir. CO<sub>2</sub>'nin yüksek değerli kimyasal ürünler ve yenilenebilir enerjiye dönüştürülmesine yönelik ileri teknikler sayesinde, çevrenin iyileştirilmesi ve ekonomik büyümenin desteklenmesi yönünde önemli ilerlemeler kaydedilebilir ve nihayetinde karbon nötrlüğüne ulaşılabilir. CO<sub>2</sub>'nin yenilenebilir yakıtlara fotokatalitik dönüşümü, aşırı CO<sub>2</sub> birikiminin neden olduğu iklim değişikliklerine karşı koymak için umut verici bir stratejidir ve aynı zamanda yenilenebilir kaynaklardan elde edilen kimyasal enerji depolama için potansiyel bir yol sunmaktadır. Li ve ark. (2024) tarafından yapılan derleme çalışmasında CO<sub>2</sub>'nin fotokatalitik dönüşümü, CO, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH ve HCOOH gibi kimya endüstrisi açısından yüksek katma değeri olan ürünlerin üretebileceği ifade edilmektedir. Bunlar arasında etanolün, yüksek enerji yoğunluğu (26,8 MJ/kg) ve kolay taşınması nedeniyle sağlık, tarım, yakıt kimyası ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan çok yönlü mükemmel bir aday olduğu rapor edilmektedir. CO<sub>2</sub> emisyonu artışının küresel ısınmaya olan etkilerini gösteren ve CO<sub>2</sub> yakalama

ile yüksek katma değerli ürünlerin üretilmesine ilişkin şema Şekil 6'da görülmektedir (Li ve ark., 2024).



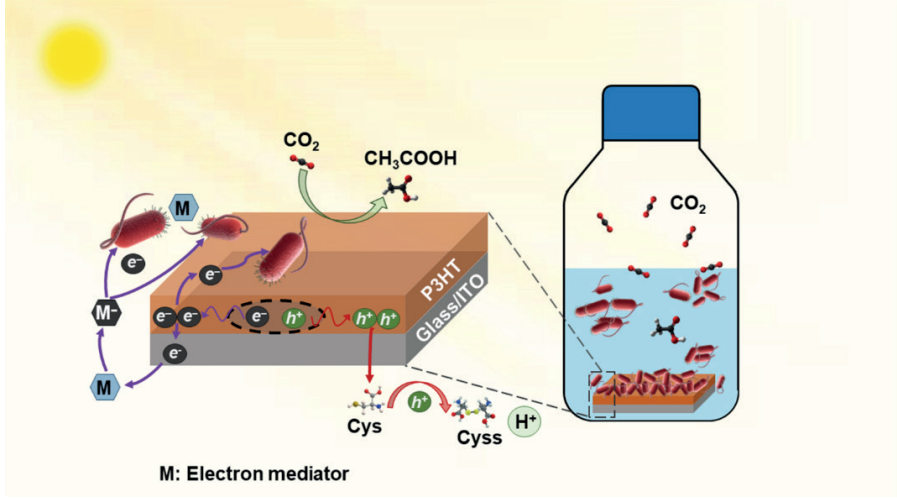
Şekil 6. CO<sub>2</sub> emisyonunun olumsuz etkilerini ve CO<sub>2</sub> yakalama sonucu yeşil enerjiye dönüştürülmesini gösteren şema (Li ve ark., 2024)

### Biyo-yapay fotosentetik sistem ve uygulamaları

Kaliforniya Üniversitesi'nden kimyager Peidong Yang, 2015 yılında sentetik bir yaprak gibi davranan ve fotosentez yapmak için silikon yarı iletkenler ve canlı bakteriler kullanan ilk fotosentetik biyohibrit sistemi oluşturmayı başardı. Bu sistem, bakterilerin yarı iletkenlerden elektron alması ve karbondioksiti sıvı yakıtlara dönüştürmesi olaylarının gerçekleşmesi ile çalışmaktadır. Yang, farklı bakteri türleriyle de deneyler yaparak doğal yapraklardaki dönüşüm verimliliğine benzer şekilde, %0,38'e kadar güneşten kimyasala enerji dönüşüm verimliliğine ulaştı. Japonya'dan uluslararası bir ekip de yakın zamanda bakterilerde kızılötesi ışığı emebilen ve YF sürecini önemli ölçüde hızlandırabilen bir klorofil molekülü keşfetti (Mu, 2021).

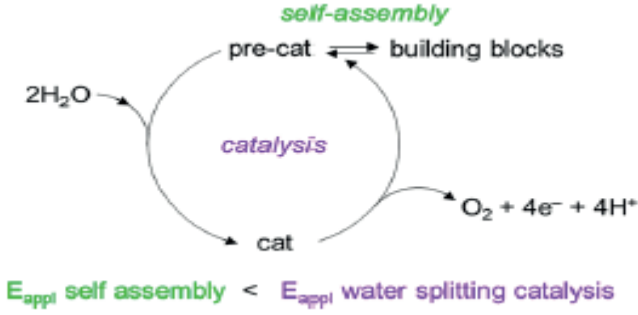
Wen ve ark. (2024), organik fotovoltaiik yapılardan esinlenerek, polimer yarı iletken filmler ve bakterilerin hibridizasyonuna dayanan bir biyo-yapay fotosentetik sistem ile polimer bazlı yarı iletken filmin; fotosentetik olmayan bakterileri CO<sub>2</sub>'yi asetata dönüştürmeye verimli bir şekilde yönlendirebileceğini öne sürmüşlerdir. Ölçeklenebilir yüzen yapay biyo-yaparak sistemin, bir haftada gram ölçeğinde asetat üretebildiğini tespit etmişlerdir. Özellikle, yarı iletken filmin geri dönüşümü kolaydır ve istikrarlı performansını korur, bu da sistemin iyi sürdürülebilir üretim kapasitesini gösterir. Doğal yaprakların morfolojisini ve işlevini simüle etmek için agar kullanılarak yarı katı hal yapay biyo-yaparak araştırmacılar tarafından başarıyla

hazırlanmıştır. Biyo-yapay fotosentetik sistem ile asetat üretimine ait şema Şekil 7’de verilmiştir (Wen ve ark., 2024).



Şekil 7. Biyo-yapay fotosentetik sisteme ait elektron transfer prensibinin şematik diyagramı (Wen ve ark., 2024)

Her ne kadar yapay fotosentetik süreçte güneş ışığının yakıtı veya enerjiye dönüştürülmesi doğal fotosentezden daha yüksek olsa da genellikle karbon fiksasyonu için çevrimi tamamlamak üzere hiçbir işlem kurulmadan hidrojenle sonlanmaktadır. Bu sınırlama, güneş ışığı altında su ayrışmasının H<sub>2</sub> oksitleyen mikroorganizmalarla arayüzlenmesiyle aşılabilmektedir. Bu amaçla, karbon fiksasyonunu biokütle ve sıvı yakıtlar biçiminde gerçekleştirmek için tek başlangıç malzemesi olarak güneş ışığını, havayı ve suyu kullanan hibrit biyolojik-inorganik yapılar geliştirilmiştir. Bu yapay fotosentetik döngü, doğal fotosentezin güneş sürecini gerçekleştiren yapay yaprak ile başlamaktadır. Bu şekilde suyun güneş ışığı kullanılarak hidrojen ve oksijene ayrışması gerçekleşmektedir. Geliştirilen yapay yaprak için katalizörün kendi kendini iyileştirme özelliği kritik bir öneme sahiptir. Kendi kendini iyileştiren katalizörler, herhangi bir su kaynağı kullanılarak su ayrıştırılmasına izin vermektedir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, biyonik yapay yaprak adı verilen hibrit biyolojik-inorganik yapı su ayrıştırma katalizinin silikon gibi malzemeler ve biyoorganizmalarla kolayca etkileşimine izin vermektedir. Biyonik Yaprak, doğal fotosentezin en yüksek güneş-biyokütle verimliliklerini büyük ölçüde aşan güneş-biyokütle ve güneş-sıvı yakıt verimliliklerinde çalışmaktadır. Kendi kendini onaran kataliz için tasarım konseptine ait şema Şekil 8’de verilmektedir (Dogutan ve Nocera, 2019).



Şekil 8. Kendi kendini onaran kataliz için tasarım konseptine ait şema (Dogutan ve Nocera, 2019)

## Sonuç ve Öneriler

YF, çok sayıda potansiyel uygulama alanına sahiptir.

- Yenilenebilir enerji üretimi açısından güneş enerjisini kullanarak doğrudan kimyasal enerji üretimi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için umut verici bir yöntemdir.
- Karbon depolama ve dönüşümü açısından bakıldığında YF, atmosferdeki fazla karbondioksiti doğrudan geri dönüştürebilir, bu da iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir adım olabilir.
- Yeşil yakıtlar ve kimyasalların üretimi bakımından düşünüldüğünde YF ile metanol, metan gibi yeşil yakıtlar üretmek, sürdürülebilir enerji ve kimyasal üretimi için büyük bir potansiyel taşır.
- Dünya çapında ilginin yeşil enerjiye yönelmesiyle birlikte YF teknolojisi büyüdükçe toplumu daha sürdürülebilir bir geleceğe doğru bir adım daha ileriye taşıyacaktır.
- Fotokataliz üzerine önemli ölçüde araştırmalar yapılmış olsa da düşük kuantum verimliliği hala büyük ölçekli gelişimini ve endüstriyel uygulamalarını sınırlamaktadır. Bu nedenle sentez yöntemlerinin optimize edilmesi, yarı iletkenlerin band aralığı, boya duyarlılığı ve yüzey modifikasyonu konuları üzerinde detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir.
- YF teknolojisi, özellikle 2020'lerden sonra büyük bir ivme kazanmış ve çeşitli yenilikçi uygulamalar geliştirilmiştir. Bu gelişmeler hem çevre dostu enerji üretimi hem de karbon salınımını azaltma konusunda önemli adımlar atılmasına imkan sağlamaktadır.

- YF sürecinde gelişmeler kaydedildikçe karbon salımlarını dengelemek ve (net zero) net sifıra ulaşmak daha kolay bir hale gelecektir.
- Bununla birlikte birey, aile, toplum ve millet ekseninde bilinçli ve duyarlı olmak yapay fotosentez yönteminde gelinen en son teknoloji kadar önem arz etmektedir. Bu konu gelecek nesillere temiz ve sürdürülebilir bir çevre bırakmak için hem Ülkemiz hem de gezegenimizde yaşayan tüm insanlığın öncelikli ve asla ihmal edilmemesi gereken konularının en başında yer almaktadır.
- Yenilenebilir enerji olarak güneş enerjisinde dünyanın en yüksek potansiyeline sahip ülkeleri arasındayız ve rüzgar enerjisi de dahil olmak üzere bu potansiyeli verimli bir şekilde kullanmaktayız. 2035 yılına kadar güneş ve rüzgâr enerjisi toplamında 120 bin MW kurulu güç hedefine ulaşılması beklenmektedir.
- Su kaynakları bakımından su stresi yaşayan ülkeler arasında bulunmaktayız. Yapay fotosentez uygulamaları ile daha az su kullanılarak su verimliliği ve sürdürülebilir tarım mümkün olacaktır.
- Ülkemizin biyoçeşitliliği göz önünde bulundurulacak olursa biokütle enerjisinin temiz ve yaşanabilir çevreye katkısı göz ardı edilemez.
- 2025 yılı sonuna kadar bir bölümünün devreye girmesi planlanan Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nde sıfır emisyon hedefi ile çevreye zararlı sera gazı salımı yapılmadan kesintisiz elektrik üretimi yapılabilecektir. Aynı zamanda elektrik üretimi için doğal gaz ithalatına gerek kalmayacak ve CO<sub>2</sub> emisyonu olmayacaktır.
- Son olarak, YF teknolojisinin CO<sub>2</sub> yakalama ve dönüşümündeki potansiyeli ile birlikte toprağa ve ekosisteme olan etkilerinin de dikkatle ele alınması gerekmektedir. Ayrıca, geniş çaplı araştırmalar sonucunda besin döngüsüne nasıl entegre edileceği belirlendikten sonra büyük ölçekte ve küresel anlamda uygulanması mümkün olacaktır.

## Kaynaklar

- Abas N., Kalair E., Kalair, A., Hasan, Q ul., Khan, N., Nature inspired artificial photosynthesis technologies for hydrogen production: Barriers and challenges. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2020, 45, 20787-20799.
- Azarpour A., Mohammadzadeh O., Rezaei N., Sohrab Zendejboudi S., Current status and future prospects of renewable and sustainable energy in North America: Progress and challenges *Energy Conversion and Management*, 2022, 269, 115945.
- Ar-Ge ve Yenilik Konu Başlıkları:[https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/21566/db-yesil-ar-ge\\_ve\\_yenilik\\_konu\\_basliklari-v7.pdf](https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/21566/db-yesil-ar-ge_ve_yenilik_konu_basliklari-v7.pdf).
- ÇŞİDB-İDB, (2023), İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030), [iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/pdf](https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/pdf).
- ÇŞİDB-İDB, 2024, 2024-2030 İklim Değişikliği Azaltım ve Uyum Strateji ve Eylem Planları Yayınlandı, <https://iklim.gov.tr/2024-2030-iklim-degisikligi-azaltim-ve-uyum-strateji-ve-eylem-planlari-yayinlandi-haber-4239>.
- Deponti, E., Natali, M., Photocatalytic hydrogen evolution with ruthenium polypyridine sensitizers: unveiling the key factors to improve efficiencies. *Dalton Trans.*, 2016, 45, 9136–9147.
- Dogutan D.K., Nocera D.G., Artificial Photosynthesis at Efficiencies Greatly Exceeding That of Natural Photosynthesis, *Acc. Chem. Res.* 2019, 52, 3143-3148.
- Energy Exporter, 2024, 2024 Yılı ilk yarısı için yenilenebilir enerji raporu, <https://energyexporter.com/blog/162/renewable-energy-report-for-the-first-half-of-2024>.
- <https://www.cnnturk.com/video/turkiye/akkuyudan-ilk-elektrik-geliyor-katki-si-ne-olacak-2279382>.
- <https://www.dunya.com/sektorler/turkiye-res-ve-gesc-80-milyar-dolar-yatirim-yapacak-haberi-776007>.
- KIZUNA, 2021, Artificial Photosynthesis: A Step Toward a Carbon-Free Future, [https://www.japan.go.jp/kizuna/2021/03/artificial\\_photosynthesis.html](https://www.japan.go.jp/kizuna/2021/03/artificial_photosynthesis.html).
- Kim J.H., Hansora D., Sharma P., Jang Ji-Wook, Lee J.S., Toward practical solar hydrogen production-an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge, *Chem. Soc. Rev.*, 2019, 48, 1908-1971.
- Li F, Zhang L., Tong J., Liu Y, Xu S., Yan Cao Y., Cao S., Photocatalytic CO<sub>2</sub> conversion to methanol by Cu<sub>2</sub>O/graphene/TNA heterostructure catalyst in a visible-light-driven dual-chamber reactor, *Nano Energy*, 2016, 27, 320–329.
- Li Y., Zhu F.Y., Liu E., Ouyang H., Lu W., Gu H., Ren J., PengW., Hou H., He Y., Carbon dioxide capture and green conversion to clean energy aga-

- inst global warming, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2024, 7(147).
- Mandad T., Chaubey S., Chaubey V., Eco-friendly conversion of carbon dioxide into solar fuels via artificial photosynthetic routes: A review, *Main Group Chemistry*, 2025, 24 (1) 3-16.
- Mu, (2021), <https://www.thecolumbiasciencereview.com/blog/shining-the-light-on-artificial-photosynthesis>.
- Nawaz A., Kuila A., Rani A., Mishra N. S., Sim L. C., Leong K. H., Saravanan P., 2019. Industrial application of light-driven nanomaterial, Chapter 6, *Industrial Applications of Nanomaterials*.
- Pirinç O., Beşer B.H., Küresel ısınmayla mücadelede sera gazı etkisi ve Türkiye'nin Avrupa yeşil mutabakatına uyumuna yönelik bir inceleme, *Journal of Management Theory and Practices Research*, 2024, 5(1), 66-80.
- Saravanan A., Kumarb P.S, Khooc K.S., Showc Pau-Loke, Carolinb C.F, Jackulind C.F, Jeevananthama S., Karishmae S., Showf Kuan-Yeow, Leeg Duu-Jong, Changj Jo-Shu, Biohydrogen from organic wastes as a clean and environment-friendly energy source: Production pathways, feedstock types, and future prospects, *Bioresource Technology*, 2021, 342, 126021.
- Singh, T., Alhazmi, A., Mohammad, A., Srivastava, N., Haque, S., Sharma, S., Singh, R., Yoon, T., Gupta, V.K., Integrated biohydrogen production via lignocellulosic waste: opportunity, challenges & future prospects. *Biore-sour. Technol.* 338, 2021, 125511.
- Oyamada, (2023), Artificial Photosynthesis, [https://www.mcgc.com/english/kaiteki\\_solution\\_center/oursolution/01.html](https://www.mcgc.com/english/kaiteki_solution_center/oursolution/01.html).
- TÜBİTAK, (2024). Ar-Ge ve Yenilik Konu Başlıkları, [https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/21566/db-yesil-ar-ge\\_ve\\_yenilik\\_konu\\_basliklari-v7.pdf](https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/21566/db-yesil-ar-ge_ve_yenilik_konu_basliklari-v7.pdf).
- Wang Y., Zhou Q, Zhu Y., Xu D., High efficiency reduction of CO<sub>2</sub> to CO and CH<sub>4</sub> via photothermal synergistic catalysis of lead-free perovskite Cs<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>I<sub>9</sub>, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 294 (5), 120236.
- Wen N., Jiang Q., Liu D, Polymer semiconductor films and bacteria hybrid artificial bio-leaves, *Sci Adv.* 2024,10(44): eadp8567.