



**ATIK TÜRK ÇAYINDAN SENTEZLENEN
BİYOKÖMÜR İLE MATERYAL TASARIMI VE
GÜNEŞ ENERJİSİ İLE BUHAR ÜRETİMİ
UYGULAMASI**

Serap KATRANLI

Danışman: Doç. Dr. Ezgi TOPÇU

Yüksek Lisans Tezi

Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

**ATIK TÜRK ÇAYINDAN SENTEZLENEN BİYOKÖMÜR İLE MATERYAL
TASARIMI VE GÜNEŞ ENERJİSİ İLE BUHAR ÜRETİMİ UYGULAMASI**
(Material Design and Solar Steam Production Application with Biochar Synthesized from
Waste Turkish Tea)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serap KATRANLI

Danışman: Doç. Dr. Ezgi TOPÇU

Erzurum
Aralık, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Serap KATRANLI tarafından hazırlanan “Atık Türk Çayından Sentezlenen Biyokömür İle Materyal Tasarımı ve Güneş Enerjisi İle Buhar Üretimi Uygulaması” başlıklı çalışması 23 /12/2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanobilim ve Nanomühendislik Bilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Doç. Dr. Kader DAĞCI KIRANŞAN
Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Danışman: Doç. Dr. Ezgi TOPÇU
Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Mehtap AYGÜN ÇAĞLAR
Erzurum Teknik Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
tarih .../.../20.. ve
.....sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma Çok Disiplinli Araştırma Projesi-ÇDAP (BAP) kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FCD-2024-14600

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Ezgi TOPÇU danışmanlığında sunulan “Atık Türk Çayından Sentezlenen Biyokömür ile Materyal Tasarımı ve Güneş Enerjisi ile Buhar Üretimi Uygulaması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	4	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Metot	12	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	4	20
Sonuçlar	1	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Serap KATRANLI	Doç. Dr. Ezgi TOPÇU
23/12/2025	23/12/2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışması olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümünde yapılmıştır.

Bu çalışmanın yürütülmesi sürecinde ve yüksek lisans eğitimim boyunca destekleri için değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ezgi TOPÇU'ya teşekkür ederim.

İlgi ve yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Kader DAĞCI KIRANŞAN'a ve çalışma boyunca laboratuvar imkanlarını kullanmamı kolaylaştıran ve tecrübelerini paylaşan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Elif ERÇARIKÇI'ya teşekkür ederim.

FCD-2024-14600 numaralı BAP projesi ile sağladığı desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Serap KATRANLI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK TÜRK ÇAYINDAN SENTEZLENEN BİYOKÖMÜR İLE MATERYAL TASARIMI VE GÜNEŞ ENERJİSİ İLE BUHAR ÜRETİMİ UYGULAMASI

Serap KATRANLI

Danışman: Doç. Dr. Ezgi TOPÇU

Amaç: Su kaynaklarının azalması, küresel çevre sorunları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Çay posası, gıda tüketimi sonrası oluşan bir organik atık olarak değerlendirilmiş ve çevre dostu bir uygulama için kullanılmıştır. Çalışma, yenilikçi ve pratik bir su arıtma yöntemi sunarak sürdürülebilir atık yönetimi ve temiz su üretimi açısından önemli bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Yöntem: Sevilerek tüketilen çayın demleme sonrasında kalan yapraklarından piroliz yöntemiyle biyokömür elde edilmiştir. Bu biyokömür, doğal selülozik süngerin yüzeyine kaplanarak güneş ışığını etkin bir şekilde emen ve ısıya dönüştüren bir materyal oluşturmuştur. Materyalin ürettiği ısı, suyun daha hızlı buharlaşmasını sağlamaktadır. Süngerin gözenekli selülozik yapısı ise hızlı ve sürekli su taşıma kapasitesi sunarak etkili bir buharlaşmaya olanak tanımaktadır.

Bulgular: Hazırlanan fototermal materyal, tek güneş aydınlatması altında $1,42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ su buharlaşma hızına ve %83'lük bir fototermal dönüşüm verimliliğine ulaşmıştır. Bu performans, materyalin tuzdan arındırma ve su arıtma gibi büyük ölçekli uygulamalar için umut verici düşük maliyetli bir buharlaştırıcı olduğunu göstermektedir.

Sonuç: Güneş enerjisiyle su buharı üretimi amacıyla geliştirilen buharlaştırıcı malzeme tasarımı başarıyla uygulanmıştır. Bu sistem, kirli ve tuzlu sulardan arıtılmış su elde edilmesine olanak sağlayarak düşük maliyetli, sürdürülebilir ve çevre dostu bir çözüm sunmaktadır. Böylece içilebilir su üretimi için yenilikçi bir yaklaşım ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, fototermal materyal, biyokömür, su arıtma, tuzdan arındırma, sürdürülebilirlik.

Aralık 2025, 93 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

MATERIAL DESIGN AND SOLAR STEAM PRODUCTION APPLICATION WITH BIOCHAR SYNTHESIZED FROM WASTE TURKISH TEA

Serap KATRANLI

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ezgi TOPÇU

Purpose: The depletion of water resources occupies a significant place among global environmental issues. Tea residue, an organic waste generated after food consumption, has been utilized for an eco-friendly application. This study aims to provide an innovative and practical water purification method, making an important contribution to sustainable waste management and clean water production.

Method: Biochar was obtained from tea leaves remaining after brewing, which is a widely consumed beverage, through the pyrolysis process. This biochar was coated onto the surface of a natural cellulosic sponge to create a material capable of efficiently absorbing sunlight and converting it into heat. The heat generated by the material enables water evaporation, while the porous cellulosic structure of the sponge provides rapid and continuous water transport, thereby facilitating effective evaporation.

Findings: The prepared photothermal material achieved a water evaporation rate of $1,42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ under one sun illumination and a photothermal conversion efficiency of 83%. This performance demonstrates that the material is a promising, low-cost solar evaporator for large-scale applications such as desalination and water purification.

Conclusion: The design developed for solar-driven water vapor generation was successfully implemented. This system provides a low-cost, sustainable, and environmentally friendly solution by enabling the purification of contaminated and saline water. Thus, it introduces an innovative approach to the production of potable water.

Keywords: Solar energy, photothermal material, biochar, water purification, desalination, sustainability.

December 2025, 93 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
Su Krizi	1
Güneş Enerjisi ile Tuzlu ve Atık Suların Geri Dönüşümü.....	3
Doğrudan Güneş Enerjisiyle Buhar Üretimi (Direct Solar Steam Generation)	4
Biyokömür (Biochar)	6
Çay (<i>Camellia sinensis</i>)	8
KURAMSAL TEMELLER.....	10
MATERYAL ve YÖNTEM	30
Materyal	30
Yöntem.....	32
Güneş simülatörü (Solar simulator)	32
X-ışını Difraksiyon Spektroskopisi (XRD).....	34
X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	35
Ultraviyole-Görünür Işık (UV-Vis) Spektroskopisi	36
Raman Spektroskopisi.....	38
Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDX) ile Birleştirilmiş Taramalı Elektron	
Mikroskobu (SEM)	39
Endüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometrisi (ICP-MS).....	40
Kızıl Ötesi (IR) Termal Kamera	41
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	43
Türk Çayı Atıklarının Toplanması	43
Türk Çayı Atıklarından Biyokömür Elde Edilmesi	43

SONUÇ ve ÖNERİLER	68
KAYNAKÇA	73
ÖZGEÇMİŞ.....	79



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. S ve ÇB-S'nin Buharlaşıma Entalpileri	56
Tablo 2. Simüle Edilmiş Deniz Suyunun ÇB-S ile Güneş Enerjisiyle Tuzdan Arındırılmasından Sonra İyon İçerikleri	62
Tablo 3. Karadeniz Deniz Suyunun ÇB-S ile Güneş Enerjisiyle Tuzdan Arındırılmasından Sonra İyon İçerikleri	62
Tablo 4. Ağır Metal Çözeltilisinin ÇB-S İle Güneş Enerjisiyle Arıtma Sonrası İyon İçerikleri	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Türkiye’deki 65 ilde tarım ve su kaynaklarında ciddi meteorolojik kuraklık.....	2
Şekil 2. Güneş enerjisiyle tuzdan arındırmanın sınıflandırılması	4
Şekil 3. GBÜ ve yapısal tasarımlarının örümcek grafiğinin şematik gösterimi.....	5
Şekil 4. Biyokömür	7
Şekil 5. Biyokömür üretimi ve uygulaması.....	8
Şekil 6. Yeşil çay yaprakları ve kurutulması sonucu oluşan siyah çay otu.....	9
Şekil 7. Güneş enerjisiyle su buharı oluşumu	10
Şekil 8. Farklı güneş su buharı üretim süreçlerinde enerji bağlantısı.	12
Şekil 9. Farklı potansiyel fototermal mekanizmalar	13
Şekil 10. Güneş spektral ışınlamı.....	15
Şekil 11. 0 boyutlu karbon kuantum noktaları (CQDs) ile 2 boyutlu MXene ($Ti_3C_2T_x$) malzemelerini birleştirerek hibrit fototermal yapı’nın ışık Emilimi ve 1 güneş ışınlamında sıcaklık değişimleri.....	16
Şekil 12. Güneş enerjisiyle çalışan ara yüzey su buharlaşmasının şematik gösterimi.....	17
Şekil 13. PU süngerinin ve GS örneğinin simüle edilmiş çizimi	17
Şekil 14. Lokalize ısıtma tasarımı olan ve olmayan kızılötesi görüntüler T, sıcaklık	18
Şekil 15. Karbon siyahı ile modifiye edilmiş selüloz asetat (CB@CA) kaplamalı pamuklu kumaş (CB@CA/CF)	19
Şekil 16. RW/ZMG buharlaştırıcının çalışma prensibine ait temsili gösterim	20
Şekil 17. Janus aerogel buharlaştırıcıya dayalı arayüz fototermal su buharlaşmasının şematik gösterimi.....	21
Şekil 18. N-katkılı grafen ağlarına dayalı aerogeller içindeki gradyan dikey kanalların şematik gösterimi.....	22
Şekil 19. (a) düşük ve (b) yüksek doğal ahşap levha büyütmelemlerini gösteren SEM görüntüleri	23
Şekil 20. Pirinç samanından yapılan fototermal malzeme.	24
Şekil 21. Demir (III) esaslı hindistan cevizi kabuğu fototermal malzemenin grafiksel özetini	25
Şekil 22. FW'nin fototermal karbonlu malzemelere dönüştürülmesi ve bunlara karşılık gelen yapısal karakterizasyonlar.....	27
Şekil 23. Kemik atığından geliştirilen güneş enerjili buhar üretim cihazı	28

Şekil 24. PVA sünger, PU sünger ve doğal selülozik süngere ait resimler.....	31
Şekil 25. GBÜ için biyokömür-çıkışlı materyal tasarımı.....	31
Şekil 26. XRD tekniğinin ve X-ışınlarının kristal yapıda kırınımının temsili olarak gösterimi	35
Şekil 27. UV-Vis spektrofotometresindeki ana bileşenlerin basitleştirilmiş şeması.....	37
Şekil 28. SEM/EDX analizinde X-ışını oluşum mekanizması.....	39
Şekil 29. ICP-MS cihazının ana bileşenleri.....	41
Şekil 30. (a) Kimya Bölümü çay ocağında demlenen çaylar. (b) Çay içiminden sonra çaydanlık dibinde kalan nemli çay otu atığı. (c) Kurutulmuş atık çay yaprakları.....	43
Şekil 31. Atık çay, piroliz işleminde kullanılan silindir fırın ve Ar tüpü ve çay biyokömürünün (ÇB) fotoğrafları	44
Şekil 32. Farklı sıcaklıklarda piroliz işlemi ile elde edilen ÇB'lerin fotoğrafı	44
Şekil 33. 300, 400 ve 500 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB'lerin XRD spektrumu.....	45
Şekil 34. 300, 400 ve 500 °C'de hazırlanan ÇB'lerin 77 K'de elde edilen N ₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi.	45
Şekil 35. (a, b) 400 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB'nin farklı büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri	46
Şekil 36. 400 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB'nin EDS spektrumu. İç şekil: Elementleri ve atomik yüzdeleri gösteren tablo	47
Şekil 37. 400 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB'nin Raman spektrumu.....	47
Şekil 38. 400 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB'nin genel (a) ve ayrıntılı C 1s (b) ve O 1s (c) XPS spektrumları	48
Şekil 39. ÇB'nin UV-vis-NIR absorpsiyon spektrumu.....	49
Şekil 40. Kuru ve ıslak haldeki süngerin su emme kapasitesi.....	49
Şekil 41. Fototermal materyalin (ÇB-S) hazırlanmasına ait gösterim	50
Şekil 42. Farklı ÇB miktarlarıyla hazırlanan ÇB-S'nin buharlaşma hızı	51
Şekil 43. Farklı S yükseklikleriyle hazırlanan ÇB-S'nin buharlaşma hızı	51
Şekil 44. Farklı büyütmelelerde S (a-b) ve ÇB-S'nin (c-d) FESEM görüntüleri.....	52
Şekil 45. GBÜ cihazının (a) ve vakum yalıtımlı çift cidarlı cam kaptaki ÇB-S'nin (b) fotoğrafı	53
Şekil 46. 1 güneş ışınımı altında ÇB-S, sade S ve saf su ortamında suyun zamana bağlı kütle değişimi	53
Şekil 47. 1 güneş ışınımı altında ÇB-S, sade S ve saf suyun zamana bağlı yüzey sıcaklık değişimi	54
Şekil 48. Saf su, sade S ve ÇB-S'nin farklı zamanlardaki kızılötesi görüntüleri	54

Şekil 49. 60. saniyedeki güneş ışınlamı altında (a) sade S ve (b) ÇB-S'nin fotoğrafları	55
Şekil 50. Farklı güneş ışınları altında ÇB-S ile zamana bağlı suyun kütle değişimi	55
Şekil 51. Saf su, sade S ve ÇB-S'nin 1 güneş ışınlamı altında buharlaşma hızı ve fototermal verimi	57
Şekil 52. ÇB-S fototermal malzeme için enerji dengesi ve ısı transferi diyagramı	58
Şekil 53. Asit, baz, tuz, ağır metal ve MB içeren çözeltiler ve saf su, için 1 güneş ışınlamı altında ÇB-S'nin fototermal verimi ve buharlaşma hızı	59
Şekil 54. Farklı çözelti ve saf su ortamında ÇB-S ile zamana bağlı suyun kütle değişimi	60
Şekil 55. Ağır metal, tuz, asit ve MB içeren çözeltilerde yüzen ÇB-S'nin kızılötesi görüntüleri	60
Şekil 56. ÇB-S ile güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve arıtma için deney düzeneği.....	61
Şekil 57. ÇB-S ile tuzdan arındırma öncesi ve sonrası Na^+ , K^+ , Mg^{+2} ve Ca^{+2} konsantrasyonunun karşılaştırılması	61
Şekil 58. ÇB-S ile 200 ppm Pb^{+2} , 180 ppm Ni^{+2} , 175 ppm Cu^{+2} ve 210 ppm Cr^{+3} içeren ağır metal çözeltisinin güneş enerjisiyle arıtma öncesi ve sonrası Pb^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} ve Cr^{+3} konsantrasyonunun karşılaştırılması	63
Şekil 59. Asidik (pH 2) ve alkali (pH 12) çözeltilerin ÇB-S ile güneş enerjisiyle arıtma öncesi ve sonrası pH değerlerinin fotoğrafları	64
Şekil 60. Farklı zamanlarda (0., 1., 30., 60., 90. ve 120. dakikalarda) ÇB-S ile yapılan güneş enerjisiyle MB boyar madde içerikli çözeltinin arıtılmasının (a-f) ve arıtma sonrası damıtılmış suyun (g) fotoğrafları. İç Şekil: Arıtmadan önce ve sonra MB çözeltisinin fotoğrafı. (h) ÇB-S ile MB boyar madde içerikli çözeltinin güneş enerjisiyle arıtmadan önce ve sonra UV-görünür bölge absorpsiyon spektrumu	64
Şekil 61. 0, 30 ve 60 dakika sonrasında ÇB-S ile hazırlanan GBÜ sisteminin açık havada gerçek güneş ışığı altındaki fotoğrafları	65
Şekil 62. GBÜ için açık havada gerçek güneş ışığı altında ÇB-S ile yapılan deneyde, günlük saat dilimlerine göre güneş akısındaki, ÇB-S'nin yüzeyindeki sıcaklığın ve suyun buharlaşması sonucu su kütlesindeki değişim	65
Şekil 63. Aynı yöntem ile hazırlanan 4 ÇB-S'nin buharlaşma hızı	66
Şekil 64. ÇB-S'nin uzun vadeli GBÜ performansı. İç Şekil: 20 döngüden sonra ÇB-S'nin fotoğrafı	66
Şekil 65. ÇB-S ile diğer biyokütle kaynaklı GBÜ malzemelerinin fototermal verim ve buharlaşma hızı açısından karşılaştırılması	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AM 1.5	: Air Mass (Hava Kütlesi). Güneş ışınlarının 48,2° açıyla yaklaşık 1000 W/m ² ışıınım sağlaması
Ar-Ge	: Araştırma ve Geliştirme
ÇB	: Çay biyokömürü
ÇB-S	: Çay biyokömür-Sünger fototermal materyal
FW	: Gıda atıkları
GBÜ	: Güneş enerjisi ile su buhar üretimi
PV	: Fotovoltaik sistemler
PVA	: Polivinil Alkol
S	: Sünger
T	: Sıcaklık
WHO	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)

GİRİŞ

Su Krizi

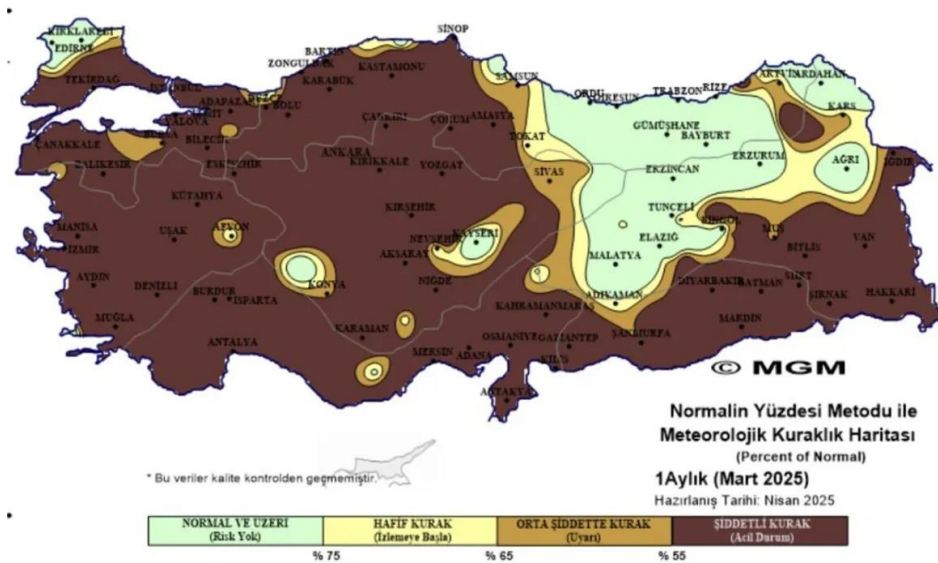
Çevre kirliliği, insan faaliyetleri sonucunda doğal kaynakların kirlenmesi ve ekosistem dengesinin bozulması olarak tanımlanır. Hava, su ve toprak gibi temel çevresel bileşenler üzerinde yarattığı olumsuz etkiler hem ekolojik sistemleri hem de insan sağlığını ciddi biçimde tehdit etmektedir. Endüstriyel atıklar, fosil yakıt kullanımı, tarımda kimyasal ilaçlar ve hızlı şehirleşme, çevre kirliliğinin başlıca nedenleri arasında yer almakta; bu faktörler doğal döngüleri bozarak biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açmaktadır. Özellikle su kirliliği, çevre kirliliğinin en tehlikeli türlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Dünya Ekonomik Forumu'nun 2020 raporunda su krizi, önümüzdeki on yılın en önemli sosyal risklerinden biri olarak tanımlanmıştır. İklim değişikliği ve nüfus artışı, kişi başına düşen tatlı su miktarını kritik eşiklerin altına indirerek su kıtlığı sorunlarını derinleştirmektedir. Araştırmalar, iklimsel ve toplumsal faktörlerin su mevcudiyetini etkilediğini ve insan müdahaleleri ile iklim değişikliğinin su döngüsünü olumsuz yönde değiştirdiğini ortaya koymuştur (Liu *et al.* 2024). Küresel nüfus artışı, sanayileşme ve kalkınma isteği su talebini hızla yükseltmiş; kötü yönetimle birleşerek birçok bölgede ciddi su krizlerine yol açmıştır. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su, stratejik bir kaynak haline gelmektedir. Geçmişte baraj inşası, yeraltı suyu yenileme, tuzdan arındırma ve su transferi gibi arz odaklı çözümler uygulanmış olsa da bu yaklaşımlar uzun vadede krizi derinleştirebilmektedir. Su, tarım ve gıda güvenliği arasındaki güçlü bağımlılık nedeniyle, sürdürülebilir ve entegre çözümler geliştirmek su kıtlığını ve gıda güvenliği risklerini azaltmanın temel yoludur (Jamali *et al.* 2025). Çağımızda su kaynaklarının yönetimi, sürdürülebilir kalkınma için kritik öneme sahiptir (Liu *et al.* 2024). Tarımsal su tüketimi ve yeraltı suyu yönetiminde yanlış uygulamalar, su kıtlığının başlıca nedenlerinden biridir. 1980–2015 döneminde yapılan kapsamlı bir analiz, Çin, Hindistan ve ABD gibi dünyanın en kalabalık ülkelerinde mavi su talebinin belirgin şekilde arttığını ve birçok alt havzanın yılın önemli bir bölümünde su kıtlığı yaşadığını ortaya koymuştur. Bulgular, özellikle tarımsal sulama için artan su taleplerinin mevcut kaynakları zorladığını ve küresel su sürdürülebilirliği için acil çözümler gerektiğini göstermektedir (Deng *et al.* 2025). Ayrıca Huang ve arkadaşları (2021), 2050 yılında küresel su açığının Batı ABD, Kuzey Çin ve Orta Doğu gibi kurak bölgelerde daha da şiddetleneceğini öngörmektedir. Uyarlanabilir havza içi su tahsisi önlemleri, tarım dışı sektörlere öncelik vererek su kıtlığına

maruz kalan nüfusu azaltma potansiyeli taşırken, sulanabilir tarım arazilerinde su kıtlığını artırma gibi zorluklar da barındırmaktadır. Bu nedenle, sektörler arası su kullanım rekabetini dengeleyen ve uzun vadeli sürdürülebilir su yönetimi sağlayan stratejilerin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir.

Su kıtlığının azaltılması için tarımsal su tüketimi ve yeraltı suyu yönetiminde doğru stratejilerin uygulanması sürdürülebilir kalkınma açısından kritik bir adımdır. Ancak bu tek başına yeterli değildir. 2050'ye kadar endüstriyel üretimin su ayak izinin, tüm sektörler arasında en hızlı büyümeyi yaşayacağı öngörülmektedir. Bu durum, tarım ve evsel su talebindeki artışla birleştiğinde mevcut su kaynakları üzerindeki baskıyı daha da artıracaktır. Dolayısıyla gelecekte su kıtlığı yalnızca tarımsal değil, endüstriyel ve kentsel taleplerin hızla yükselmesiyle çok daha karmaşık ve kritik bir sorun haline gelecektir (Deng *et al.* 2025). Gelecek senaryolarına göre (2021–2090), su kıtlığının en fazla Afrika'da genişlemesi beklenmektedir. Bulgular, özellikle bu bölgede yaklaşan su kıtlığına uyum sağlamak için acil önlemler alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Liu *et al.* 2024).

Türkiye, yaygın inanışın aksine su zengini bir ülke değildir. Kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı yaklaşık 1.519 m³ olup bu değer ülkeyi “su sıkıntısı yaşayan” kategorisine yerleştirmektedir. Nüfus artışıyla birlikte bu miktarın 2030'da 1.200 m³, 2040'ta 1.116 m³ ve 2050'de 1.069 m³ seviyelerine kadar gerilemesi öngörülmektedir. Bu tahminler, Türkiye'nin önümüzdeki yıllarda ciddi su kıtlığı sorunlarıyla karşı karşıya kalacağını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Türkiye'deki 65 ilde tarım ve su kaynaklarında ciddi meteorolojik kuraklık

İklim değişikliğine bağlı sıcaklık artışları ve düzensiz mevsim geçişleri, kuraklık riskini daha da artırmaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Mart 2025 verilerine dayalı kuraklık

haritası, ülkenin büyük bölümünde kritik seviyelere ulaşıldığını göstermektedir (Şekil 1). Bu durum, tarım başta olmak üzere içme suyu, enerji üretimi ve turizm gibi sektörlerde önemli tehditler yaratmaktadır. Uzmanlar, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için entegre ve acil önlemler alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

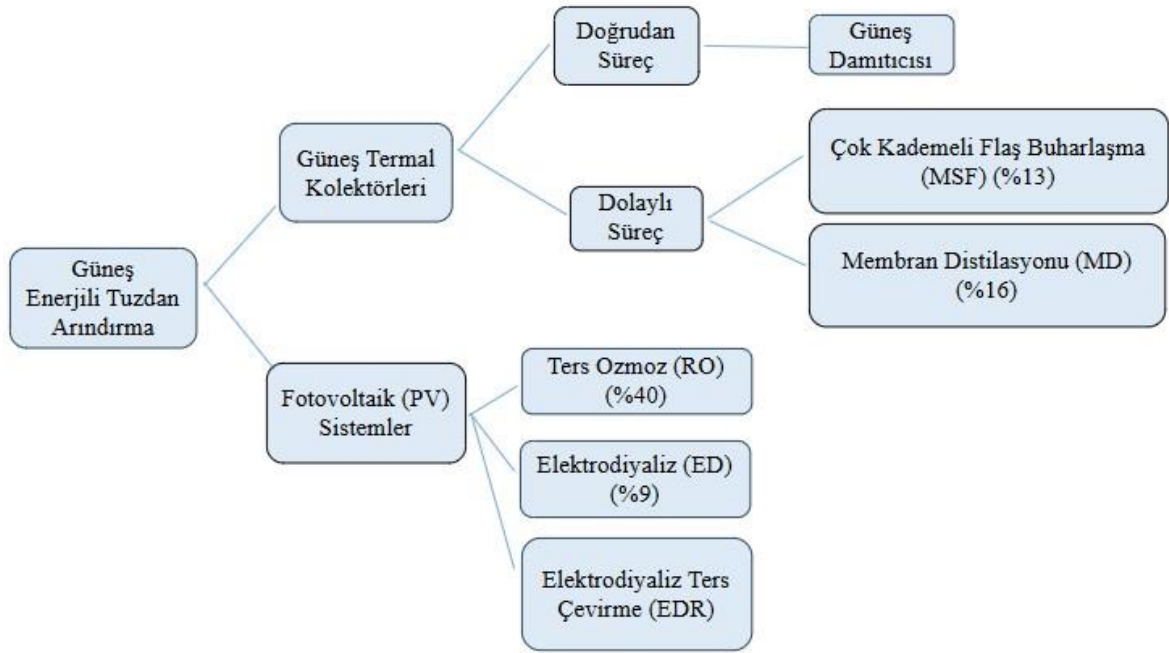
Güneş Enerjisi ile Tuzlu ve Atık Suların Geri Dönüşümü

Temiz ve tatlı su kaynakları, hidrolojik döngü içerisinde insan yaşamının sürdürülebilirliği ve sosyoekonomik kalkınma açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle etkin su yönetimi stratejileri büyük önem taşımaktadır. Doğal buharlaşma ve terleme süreçleri, suyu atmosferde dolaştırarak küresel su döngüsünü sağlar; ancak artan nüfus ve sanayileşme, ciddi kirlilik ve temiz su kıtlığına yol açmıştır (Zhang *et al.* 2019). Son yüzyılda su kullanımı altı kat artmış ve her yıl yaklaşık %1 oranında büyümeye devam etmektedir. Bu durum, daha temiz ve ekonomik tatlı su üretimi için alternatif çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Onggowarsito *et al.* 2022). Fosil enerji tüketiminin çevreye verdiği geri dönüşü olmayan zararlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Jiang *et al.* 2023) ve küresel su kıtlığına çözüm sağlamak amacıyla tatlı su üretimi için çeşitli ileri teknolojiler geliştirilmiştir (Li *et al.* 2023). Güneş enerjisiyle tuzdan arındırma teknolojisi, fosil yakıt kullanmadan su arıtımı sağlayarak sera gazı emisyonlarını önler ve karbon nötrlüğüne katkıda bulunur (Huang *et al.* 2025).

Yaşamın temel kaynağı olan tatlı suyun güneş enerjisiyle buharlaştırılması ile elde edilebilmesi, enerji sürdürülebilirliği çağında çevre dostu ve etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Liu *et al.* 2023). Güneş enerjisi, dünyanın en büyük kullanılabilir, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynağı olup, yeryüzüne insanların bir yılda tükettiği enerjinin yaklaşık 10.000 katı kadar enerji sağlamaktadır (Zhang *et al.* 2019). Bu nedenle, güneş enerjisiyle çalışan su arıtma yöntemleri; deniz suyu, nehir ve göl suları ile kirlı su gibi içilemez kaynaklardan çevre dostu ve sürdürülebilir şekilde temiz su üretimi için cazip bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Chen *et al.* 2019).

Wang ve He (2024), deniz suyu ve tuzlu akiferlerin (yeraltında bulunan, yüksek tuzluluk içeren su rezervuarları) dünya su kaynaklarının %97,5'ini oluşturduğunu ve güneş enerjisiyle tuzdan arındırmada termal ve membran esaslı yöntemlerin karbon emisyonu yaratmadan su kıtlığını çözmeye sürdürülebilir bir yaklaşım sunduğunu belirtmektedir. Ancak, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri, düşük verimlilik, teknik zorluklar ve düzenleyici engeller nedeniyle bu teknolojinin küresel yaygınlığı sınırlıdır. Son kırk yılda maliyetlerde azalma görülse de verimlilik artışı sınırlı kalmıştır. Yazarlar, PV ve lityum-iyon batarya sektörlerinden öğrenilen ölçek ekonomisi, Ar-Ge ve standart metrikler gibi stratejilerin uygulanmasının, maliyet

düşüşünü hızlandırarak güneş enerjili tuzdan arındırmanın küresel su güvenliğine katkısını artırabileceğini vurgulamaktadır.



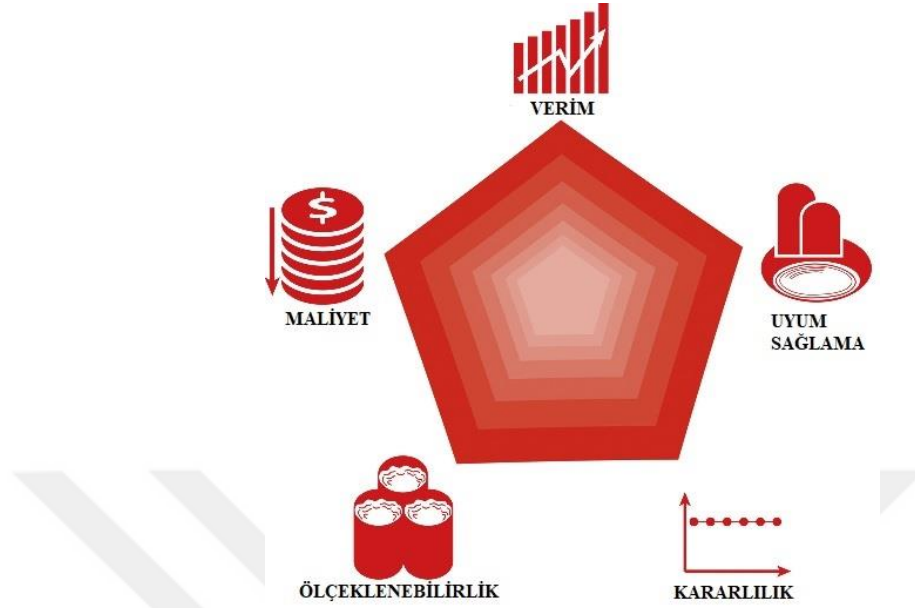
Şekil 2. Güneş enerjisiyle tuzdan arındırmanın sınıflandırılması (Wang ve He, 2024)

Geniş kapsamda yaptıkları araştırma sonucunda Wang ve He (2024) tarafından Şekil 2'deki sınıflandırma oluşturulmuştur. Güneş enerjisiyle tuzdan arındırma teknolojileri, termal ve membran esaslı yöntemler olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Güneş enerjisiyle entegre edilen tuzdan arındırma sistemlerinin küresel dağılımına bakıldığında Şekil 2'de gösterildiği üzere, bu sistemlerde en yaygın kullanılan teknoloji %40 oranıyla Ters Ozmoz (RO) olup, bunu %16 ile Membran Distilasyonu (MD), %13 ile Çok Kademeli Flaş Buharlaşma (MSF) ve %9 ile Elektrodiyaliz (ED) takip etmektedir.

Doğrudan Güneş Enerjisiyle Buhar Üretimi (Direct Solar Steam Generation)

Tatlı su ve sanitasyon eksikliği, küresel ölçekte en yaygın karşılaşılan sorunlardan biridir. Mevcut öngörüler, 2050 yılına kadar dünya nüfusunun yaklaşık %75'inin su kıtlığı riskiyle karşı karşıya kalacağını göstermektedir. Bu durum, suyun dezenfeksiyonu ve dekontaminasyonu için yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesini ve su arzının ekonomik, enerji açısından verimli ve çevresel etkileri minimize eden yöntemlerle artırılmasını zorunlu kılmaktadır. Günümüzde baskın olan membran tabanlı arıtma ve tuzdan arındırma teknolojileri, yüksek enerji gereksinimleri ve çevresel maliyetler nedeniyle sürdürülebilirlik açısından sınırlıdır (Liu *et al.* 2017). Bu sorunlara çözüm olarak, güneş enerjisiyle su buhar üretimi (GBÜ) gibi düşük maliyetli, yüksek performanslı ve çevre dostu alternatif teknolojiler giderek daha fazla ilgi görmektedir (Şekil 3) (Liu *et al.* 2017; Sun *et al.* 2021; Chen *et al.* 2019).

Fototermal buharlaştırıcılar, güneş ışığını termal enerjiye dönüştürerek buhar üretimi sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerin verimliliği, kullanılan fototermal malzemelerin ışık absorpsiyonu, su taşıma kapasitesi ve yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Sun *et al.* 2021).



Şekil 3. GBÜ ve yapısal tasarımlarının örümcek grafiğinin şematik gösterimi (Chen *et al.* 2019)

Güneş enerjili ara yüzey buharlaşma sistemleri, son yıllarda su arıtımı ve enerji üretimi alanlarında sürdürülebilir çözümler sunan yenilikçi teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, özellikle şebekeden bağımsız bölgelerde tatlı su ve enerji ihtiyacını karşılamak için büyük potansiyele sahiptir. Literatürde, buharlaştırıcıların tuz direnci, fototermal verimlilik ve çok işlevlilik gibi özellikleri sürekli olarak geliştirilmektedir (Li *et al.* 2023). Ayrıca, güneş enerjisinin termal enerjiye dönüştürülmesinde temel hedef, biyoparçalanabilir, çevre dostu, ekonomik ve yüksek buhar üretim verimliliğine sahip yenilikçi fototermal malzemelerin geliştirilmesidir (Erçarıkcı *et al.* 2024).

GBÜ’de güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanabilmek için fototermal malzemenin aşağıdaki özellikleri taşıyor olması gerekir (Li *et al.* 2023):

- Güneş spektrumunun tamamında yüksek ışık Emilimi sağlamak için gelişmiş fototermal dönüştürücü malzemelerin tasarımı, buharlaştırma verimliliğini artırmada temel bir stratejidir.
- Termal kayıpları azaltmak için buharlaştırıcı su yüzeyine yerleştirilmeli ve yalıtım teknolojileriyle ısı iletimi ile radyasyon kayıpları kontrol edilmelidir.
- Verimli güneş enerjisiyle çalışan ara yüzey fototermal dönüşüm su buharlaştırma süreci için, gözenekli yapıların kılcal hareket yoluyla yeterli su taşınımını sağlaması ve malzemelerin iyi su ıslanabilirliğine sahip olması gerekmektedir.

- Isı kayıplarını azaltmak ve buharlaşma oranlarını yükseltmek için, ara yüzde ısıyı yoğunlaştıran ve aşağı doğru iletim, taşınım ve radyasyon kayıplarını sınırlayan yalıtım tasarımları büyük önem taşımaktadır.

Güneş enerjisiyle çalışan ara yüzey buharlaşma teknolojileri, güneş ışığını kullanarak atık suyu arıtabilir ve temiz su, gıda, enerji, mineraller ile kimyasal kaynaklar üretebilir. Bu sistemler, su veya enerji altyapısı olmayan kırsal ve uzak bölgelerde kullanılabilir. Örnekler arasında deniz suyundan tatlı su üreten yüzer güneş enerjisiyle damıtma sistemleri ve su arıtma tesislerine entegre edilen malzemeler bulunur. Ayrıca tarım için kara ve deniz üzerinde tatlı su sağlayan Tuzdan Arındırma Yoluyla Okyanusta Tarım sistemi gibi tasarımlar geliştirilmiştir. Bu teknolojiler, metallerin (ör. lityum) geri kazanımı veya katalitik sistemlerle hidrojen üretimi için de kullanılabilir. Yeni tasarımlar, fotovoltaiik paneller ve rüzgâr türbinleriyle entegre edilerek aynı anda elektrik ve diğer kaynakların üretimini mümkün kılar (Song *et al.* 2025).

Biyokömür (Biochar)

Sanayileşme, ulaşım ve tarımsal faaliyetler, modern toplumların temel ihtiyaçlarını karşılamak için hızla artan süreçlerdir. Ancak bu süreçler, sera gazı emisyonlarının yükselmesine neden olarak hava kirliliği ve iklim değişikliği gibi küresel çevre sorunlarını derinleştirmektedir. Bu bağlamda, toprak, su ve hava kalitesinin korunması için çevre ve tarımın sürdürülebilir yönetimi kritik bir öneme sahiptir. Yoğun tarımsal üretim ve sanayi kaynaklı baskılar altında ekosistemlerin korunması, yenilikçi ve çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Panahi *et al.* 2020).

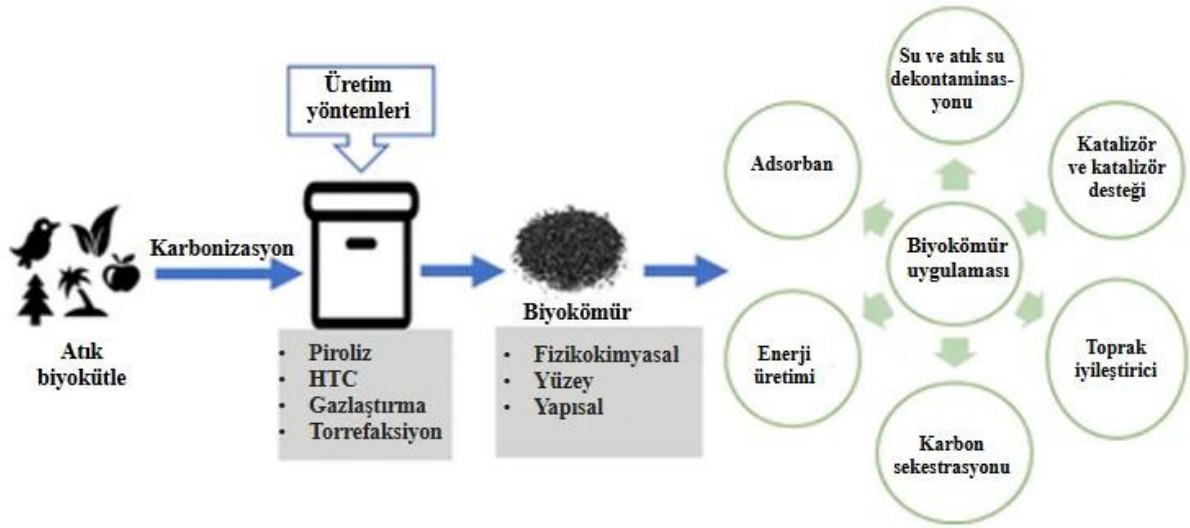
Bu zorluklara karşı umut vadeden çözümlerden biri, organik biyokütlenin piroliziyle elde edilen karbonca zengin bir ürün olan biyokömür (biochar) kullanımına dayanmaktadır. Biyokömür (Şekil 4), düşük oksijenli ortamda yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan biyokütlenin termokimyasal dönüşümü sonucu oluşan yüksek gözenekli bir karbon yapısıdır (Pandao *et al.* 2023). Üretim sürecinde sıcaklık, ısınma hızı ve bekleme süresi gibi parametreler, biyokömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemektedir (Panahi *et al.* 2020). Piroliz işlemi sırasında katı (biyokömür), sıvı (biyoyağ) ve gaz (pirogaz) ürünler elde edilmekte; bu yan ürünler enerji üretimi ve kimyasal sentez gibi alanlarda değerlendirilebilmektedir.



Şekil 4. Biyokömür

Biyokömür üretiminde kullanılan hammaddeler arasında tarımsal artıklar, ormancılık kalıntıları, organik atıklar (gıda atıkları, hayvan gübresi, arıtma çamuru) ve biyoenerji üretim yan ürünleri (lignoselülozik biyokütle, alg biyokütlesi) yer almaktadır (Şekil 5) (Pandao *et al.* 2023). Bu yaklaşım hem atık yönetimi hem de enerji üretimi açısından sürdürülebilir bir çözüm sunmakta; fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak karbon nötrlüğüne katkıda bulunmaktadır (Huang *et al.* 2025). Ayrıca, biyokömür uygulaması sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli bir potansiyel taşımaktadır. Nitekim 2010 yılında yapılan bir tahmine göre, biyokömür kullanımı küresel CO₂ emisyonlarını yaklaşık 1,8 milyar metrik ton azaltabilir; bu miktar insan kaynaklı sera gazı salınımlarının yaklaşık %12'sine karşılık gelmektedir (Panahi *et al.* 2020).

Biyokömürün çevresel faydaları yalnızca karbon tutma kapasitesiyle sınırlı değildir. Yüksek gözenekliliği ve yüzeyindeki fonksiyonel gruplar sayesinde, toprak ve su ortamlarında ağır metallerin ve organik kirleticilerin adsorpsiyonunda etkin bir malzeme olarak kullanılabilir. Bu özellikleri, biyokömürü hem tarımsal verimliliği artıran bir toprak iyileştirici hem de su arıtımında kullanılan bir adsorbent haline getirmektedir (Akgül, G. 2017). Ayrıca, biyokömürün termal özelliklerinden yararlanılarak geliştirilen fototermal malzemeler, temiz su üretimi için güneş enerjisiyle çalışan sistemlerde umut verici bir alternatif sunmaktadır.



Şekil 5. Biyokömür üretimi ve uygulaması (Pandao *et al.* 2023)

Güneş enerjisi ile buhar üretiminde biyokömür esaslı sistemler, düşük maliyetleri, yenilenebilirlikleri ve çevre dostu özellikleri sayesinde sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle güçlü bir uyum içerisinde. Özellikle tarımsal atıkların bolca bulunduğu ve güneş ışığı yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde bu teknolojiler, temiz suya erişimi artırmak ve enerji üretiminde fosil yakıt bağımlılığını azaltmak için ideal çözümler sunmaktadır (Huang *et al.* 2025).

Biyokömür üretimi ve kullanımı, atık yönetimi, enerji üretimi ve çevresel koruma alanlarında stratejik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi teknolojileriyle entegrasyonu hem iklim değişikliğiyle mücadelede hem de sürdürülebilir tarım ve su yönetimi uygulamalarında önemli bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, beslenme sonucu ortaya çıkan organik atıkların enerji üretiminde değerlendirilmesi, çevre kirliliğinin azaltılmasına ve atık yönetiminin etkinliğine anlamlı katkılar sağlamaktadır.

Çay (*Camellia sinensis*)

Camellia sinensis: çay bitkisi yapraklarından elde edilen çay (Şekil 6), dünyada en çok tüketilen alkolsüz içeceklerin başında gelmektedir (Guo *et al.* 2021). 2020 yılında 6,3 milyon tona ulaşan küresel çay tüketiminin önümüzdeki beş yılda 7,4 milyon tona çıkacağı tahmin edilmektedir (Debnath *et al.* 2022). Kendi ülkemize bakacak olursak; Türkiye’de kişi başı yaş çay tüketimi son beş yılda ortalama 14-15 kg, kuru çay tüketimi ise 3,5–4,0 kg seviyelerindedir. Türkiye kişi başına çay tüketiminde dünya ülkeleri arasında birinci sıradadır (ÇAYKUR, 2023). Çay tüketimi ve demleme sonrasında önemli miktarda atık ortaya çıkmaktadır. Biyokütle kaynağı olarak kullanılabilmesine rağmen çok büyük miktarda siyah çay atığı genellikle atılmakta ve böylece maalesef herhangi bir ekonomik değer göstermemektedir (Güçlü *et al.*

2021; Arie *et al.* 2019). Bu bağlamda, bu atığın değerlendirilmesi oldukça arzu edilen ve gerekli bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6. Yeşil çay yaprakları ve kurutulması sonucu oluşan siyah çay otu

KURAMSAL TEMELLER

Ara yüzey güneş buharı teknolojisi, bol ve temiz güneş enerjisi ile suyu kullanarak hem ısıtma hem de soğutma sağlayabilen, çevre ve enerji sorunlarını hafifletmeye yönelik umut verici bir çözümdür. Bu teknoloji, özellikle su arıtma, sterilizasyon, enerji üretimi ve güneş paneli soğutması gibi alanlarda kritik rol oynamaktadır (Li *et al.* 2022). Güneş buharı sistemleri, ışığın ısıya dönüşmesiyle başlayan ve buharlaşma ile yoğunlaşma süreçlerini içeren üç aşamalı bir enerji dönüşüm mekanizmasıyla çalışır (Şekil 7).



Şekil 7. Güneş enerjisiyle su buharı oluşumu

Güneş enerjisiyle buharlaştırma, kirli suyun arıtılması, deniz suyunun tuzdan arındırılması, elektrik üretimi, buhar sterilizasyonu ve yakıt üretimi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmakta olup, sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyel taşımaktadır. Son yıllarda ara yüzey güneş buharlaştırma teknolojisinde kaydedilen ilerlemeler, yalnızca hava-sıvı ara

yüzeyinin ısıtılmasını mümkün kılarak dökme suyun ısıtılmasına kıyasla enerji verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Bu gelişme, özellikle fototermal malzemelerdeki yenilikler ve fototermal yapı mühendisliğindeki ilerlemeler sayesinde, düşük güneş konsantrasyonlarında dahi yaklaşık %90'a varan termal verimlilik elde edilmesini sağlamıştır. Tarihsel olarak içme suyu üretiminde kullanılan buharlaştırma yöntemleri, günümüzde ileri malzeme teknolojileriyle birleşerek daha verimli, ekonomik ve çevre dostu sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Chen *et al.* 2019).

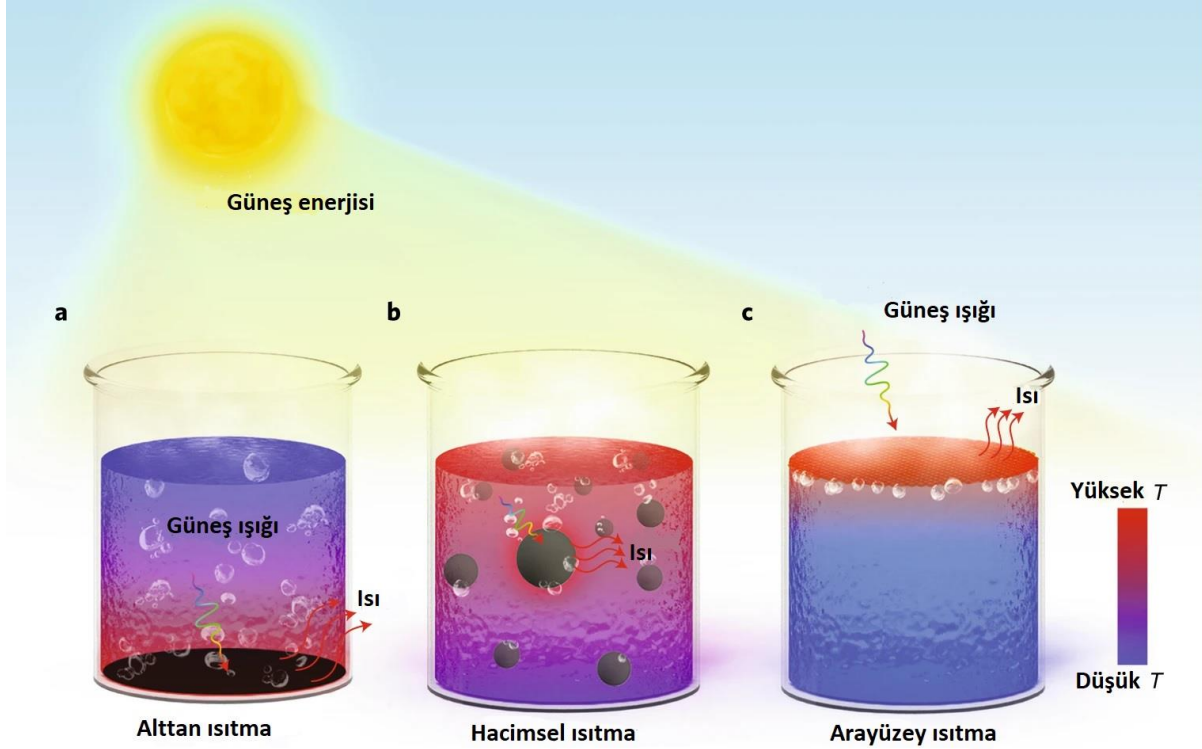
Onggowarsito ve arkadaşları (2022), güneş enerjisi ile su buhar üretimi (GBÜ) sistemlerinin temel amaçlarını ve tasarım sürecinde dikkate alınması gereken unsurları şu şekilde özetlemiştir:

“GBÜ sistemleri, basit üretimleri, malzeme bolluğu, maliyet etkinliği ve çevre dostu tatlı su üretimi nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu sistem, temiz ve sürekli bir damıtma işlemi için fototermik malzemeler ve su emici substratlara dayanmaktadır. Bu işlemi optimize etmek için, güneş soğurucu ve su emici malzemelerin seçimi ve ardından verimli su buharlaştırma, yüzdürme ve filtrasyon kapasitesi için mikro/makro yapısal sistem tasarımı gibi dikkate alınması gereken faktörler vardır” (Onggowarsito *et al.* 2022).

Su buharlaşmasının temelinde, hidrojen bağlarının kırılması yer alır. Bu bağların zayıflatılması veya sayıca azaltılması, buharlaşma için gerekli enerjiyi düşürür. Güneş enerjisiyle çalışan buhar üretimi sistemlerinde buharlaşma entalpisini azaltmak amacıyla üç temel mekanizma öne çıkmaktadır: Ara su, zayıf hidrojen bağlarına sahip olduğu için daha az enerjiyle buharlaşır; kümelenmiş su, moleküllerin grup halinde buharlaşmasıyla enerji verimliliği sağlar; kılcal su ise gözenekli yapılarda geniş buharlaşma yüzeyi oluşturarak enerji ihtiyacını azaltır (Wei *et al.* 2023).

Güneş enerjisiyle çalışan buhar üretim sistemlerinde buharlaşma entalpisini azaltmaya yönelik fiziksel tasarım stratejileri, suyun moleküler düzeydeki özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Fototermal malzemenin konumuna göre bu sistemler üç ısıtma türüne ayrılır: alttan, hacimsel (toplu) ve ara yüzey ısıtma (Tao *et al.* 2018). Alt ısıtma yönteminde (Şekil 8a), ısı üretimi ile buharlaşma yüzeyleri arasında mesafe bulunması nedeniyle yüksek termal kütle ve verimlilik kayıplarına yol açmaktadır. Bu sistemde suyun tamamı ısıtılır, bu da daha fazla enerji tüketimi anlamına gelir. Hacimsel ısıtma yönteminde (Şekil 8b), ısı suyun içine yerleştirilen özel parçacıklarla üretilir. Bu yöntem biraz daha verimli olsada yüksek sıcaklık gerektiren buharlaşma için yeterli değildir. Ayrıca bu parçacıkların uzun süreli kullanımı zordur. Bu sistemlerde, suyun tamamı ısıtıldığından, hidrojen bağlarının kırılması için gereken enerji miktarı artmakta ve buharlaşma entalpisi düşürülememektedir. Son yıllarda geliştirilen

ara yüzey buharlaştırma yöntemi (Şekil 8c), ısıyı doğrudan hava-sıvı ara yüzüne yönlendirerek yalnızca buharlaşan kısmı hedef alır. Bu seçici ısıtma, düşük entalpiye sahip ara su ve kılcal suyun etkin buharlaşmasını desteklerken, kümelenmiş su moleküllerinin grup halinde buharlaşmasını kolaylaştırarak sistem verimliliğini artırır. Bu sayede enerji kaybı azalır, kullanılan malzeme miktarı düşer ve buhar üretimi daha verimli hale gelir. Bu sistemler, taşınabilir ve bağımsız çalışabilen yapıları sayesinde farklı alanlarda kolayca kullanılabilir.



Şekil 8. Farklı güneş su buharı üretim süreçlerinde enerji bağlantısı. (a) Güneş ışığının bir güneş soğurucu tarafından emildiği ve toplu sıvıyı alttan ısıtmak için termal enerjiye dönüştürüldüğü alt ısıtma tabanlı buharlaştırma. (b) Homojen olarak dağılmış güneş soğurucuların gelen güneş fotonlarını termal enerjiye dönüştürerek sıvıyı ısıttığı hacimsel ısıtma tabanlı buharlaştırma. (c) Güneş-termal dönüşüm ve ısıtmanın hava-sıvı arayüzünde lokalize olduğu arayüz ısıtma tabanlı buharlaştırma, T , sıcaklık (Tao *et al.* 2018)

Fototermal emilim tabakası, sistemin temel bileşeni olarak güneş ışığını absorbe ederek bunu termal enerjiye dönüştürme işlevi görmektedir. Bu tabaka, güneş radyasyonunun maksimum düzeyde emilimini sağlamak amacıyla yüksek verimli fototermal dönüşüm malzemeleriyle tasarlanır. Fototermal emilim tabakasının üst kısmında bulunan buharlaşma tabakası, güneş enerjisinin termal enerjiye dönüşümünü takiben suyun faz değişimini gerçekleştiren aktif bölge olarak görev yapar. Kılcal etkiyle nemi ısı yoğunluğu yüksek bölgeye taşıyarak buharlaşma sürecini hızlandırır (Zhou *et al.* 2025).

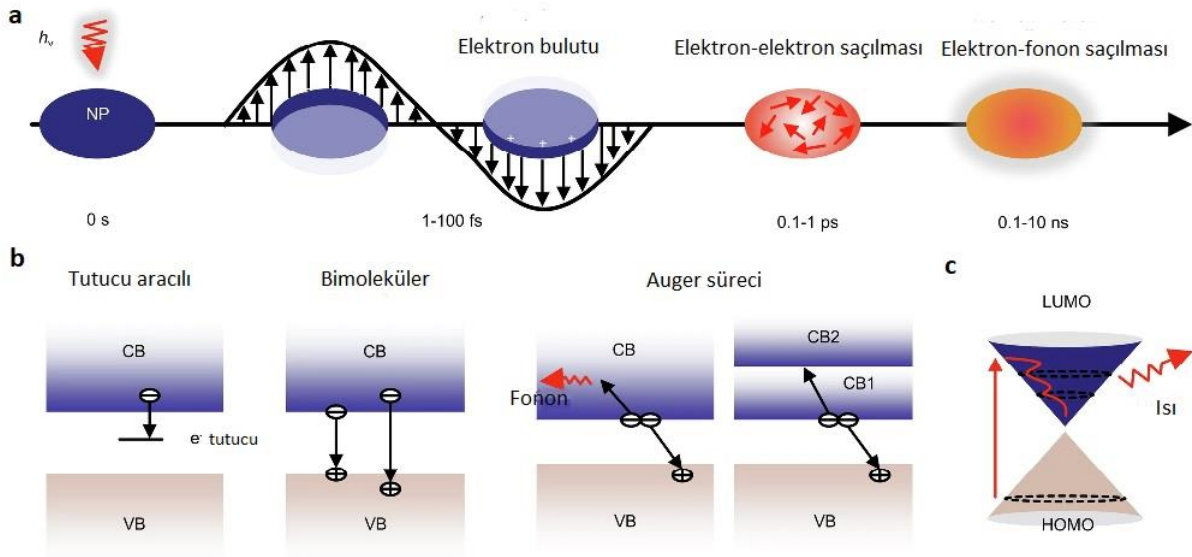
Dolayısıyla, fototermal malzemenin optik ve termal özellikleri, buhar üretim performansını belirleyen kritik faktörlerdir. Etkili bir fototermal dönüşüm için düşük termal emisivite, geniş spektral absorpsiyon kapasitesi ve yüksek fototermal dönüşüm verimliliği, bu

malzemelerin performans kriterleri arasında yer alır. Ayrıca, kimyasal stabilite ve çevresel dayanıklılık, uzun süreli ve pratik uygulamalarda sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir (Liu *et al.* 2023).

Fotothermal malzemeler, kimyasal bileşimlerine ve ışık-ısı dönüşüm mekanizmalarına göre dört ana grupta sınıflandırılmaktadır: karbon esaslı malzemeler, plazmonik metaller, yarı iletkenler ve konjuge polimerler. Karbon esaslı malzemeler, geniş yüzey alanı ve yüksek ışık absorpsiyonu ile düşük maliyetli ve çevresel olarak sürdürülebilir seçenekler sunar.

Plazmonik metaller, yüzey plazmon rezonansı yoluyla güçlü ışık soğurma kapasitesine sahip olup düşük ışık koşullarında dahi yüksek verimlilik sağlar. Yarı iletkenler, bant aralığına bağlı olarak ışıkla uyarılan taşıyıcıların fonon yayılımı yoluyla ısı üretimini mümkün kılar. Konjuge polimerler ise esnek yapıları ve ayarlanabilir optoelektronik özellikleri sayesinde çeşitli cihaz mimarilerine kolayca entegre edilebilir. Bu malzeme türlerinin uygun şekilde seçimi, güneş buharlaştırma sistemlerinin fotothermal dönüşüm verimliliğini doğrudan etkileyen temel bir tasarım kriteridir.

Fotothermal dönüşüm, güneş enerjisiyle çalışan deniz suyu arıtma sistemlerinin performansını belirleyen temel parametrelerden biridir. Bu süreçte, fotothermal malzemeler güneş ışığını emerek farklı fiziksel mekanizmalar aracılığıyla ısıya dönüştürür. Malzeme türüne bağlı olarak bu dönüşüm mekanizmaları değişiklik göstermektedir.



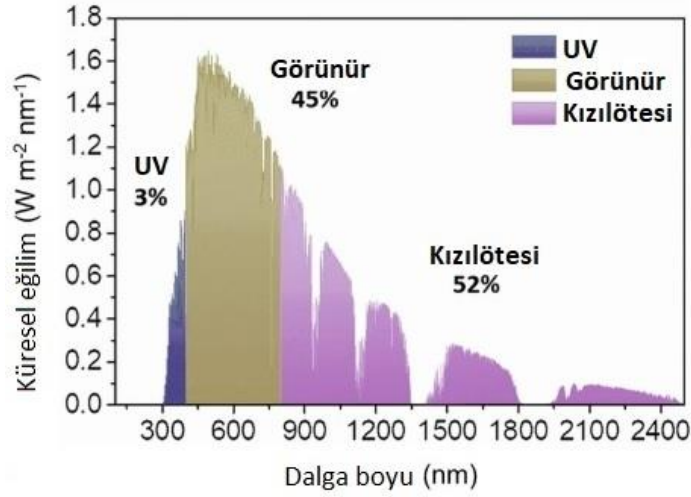
Şekil 9. Farklı potansiyel fotothermal mekanizmalar (a) Metal yüzeyinde ışıkla uyarılan elektronların sıcak elektronlara dönüşerek ısı üretmesi süreci. (b) Yarı iletkenlerde elektron-delik çiftlerinin non-radyatif gevşemesiyle fonon üretimi ve ısıya dönüşüm mekanizması. (c) Karbon malzemelerde $\pi \rightarrow \pi^*$ geçişiyle uyarılan elektronların geri dönüşü sırasında ısı üretimi (Zhou *et al.* 2025)

Metaller (örneğin Au, Ag, Cu, Al, Pt), ışıkla uyarıldıklarında sıcak elektronlar üretir; bu elektronlar yüksek kinetik enerjiye sahip olup ışık enerjisini ısıya dönüştürür. Bu süreçte ışığın saçılması ve radyatif ya da radyatif olmayan bozunmalar gözlemlenir. Yarı iletkenlerde (örneğin MoS₂, Ti₃O₄, CuS, Fe₃O₄), ışıkla uyarılan elektron-delik çiftleri bant aralığının kenarına radyatif olmayan biçimde gevşeyerek fonon yayar ve böylece ısı üretimi gerçekleşir. Karbon bazlı malzemelerde (örneğin karbon nanotüpler, grafen oksitler), π orbitallerindeki serbest elektronlar güneş ışığıyla uyarılarak π^* orbitallerine geçer; ardından temel duruma dönerken açığa çıkan enerji ısıya dönüşür (Şekil 9). Bu farklı fototermal dönüşüm mekanizmaları, malzeme seçiminin güneş enerjili buharlaştırma sistemlerinin verimliliği üzerindeki kritik etkisini ortaya koymaktadır. Özellikle ara yüzey güneş buharlaştırma teknolojilerinde, bu malzemelerin doğru mühendisliği sayesinde düşük güneş yoğunluklarında dahi yüksek termal verimlilik elde edilebilmekte, bu da sürdürülebilir su arıtma çözümleri için büyük bir avantaj sunmaktadır (Wang *et al.* 2021).

Yüksek performanslı güneş buharlaştırma cihazları, tüm güneş spektrumunda güçlü ışık emilimi ve verimli ışık-ısı dönüşümü sağlayan malzeme ve yapısal tasarıma dayanır. Güneş buharlaştırma sistemlerinde yüksek performans, geniş dalga boylarında güçlü ışık emilimi ve verimli ışık-ısı dönüşümü ile sağlanır. Isı kaybını azaltan yapı tasarımı, iyi yalıtım ve etkili su iletimiyle desteklenerek buharlaşma verimliliği artırılır (Chen *et al.* 2019).

Güneş soğurması, bir malzemenin güneş ışığını ne kadar iyi emdiğini gösterir. Bu, gelen güneş radyasyonuna göre ne kadarının emildiğiyle ölçülür (Wu *et al.* 2019). Hesaplama yapılırken, malzemenin farklı dalga boylarındaki soğurma özellikleri, standart güneş spektrumu AM 1.5 kullanılarak değerlendirilir. AM 1.5, güneş ışığının atmosferden geçerken uğradığı değişimi temsil eden ve güneş enerjisi sistemlerinin performansını test etmek için kullanılan referans bir spektrumdur.

Işık emici, tüm güneş spektrumu boyunca ışığı etkili şekilde emmeli, yansıma ve geçirgenliği minimumda tutmalıdır. Işık emici katman, 300–2500 nm dalga boyu aralığında yüksek absorpsiyon kapasitesine sahip olmalıdır. Bu dalga boyu aralığı, AM 1.5 güneş spektrumunun tamamını kapsar ve üç bölgeye ayrılır. 300-400 nm dalga boyu aralığındaki UV ışığı, toplam güneş spektrumunun %3'ünü oluşturur. 400-700 nm dalga boyu aralığındaki görünür ışık, toplam güneş spektrumunun %45'ini oluşturur. 700-2500 nm dalga boyu aralığındaki kızılötesi ışık, toplam güneş spektrumunun %52'sini oluşturur (Şekil 10) (Wang *et al.* 2021; Zhou *et al.* 2025).



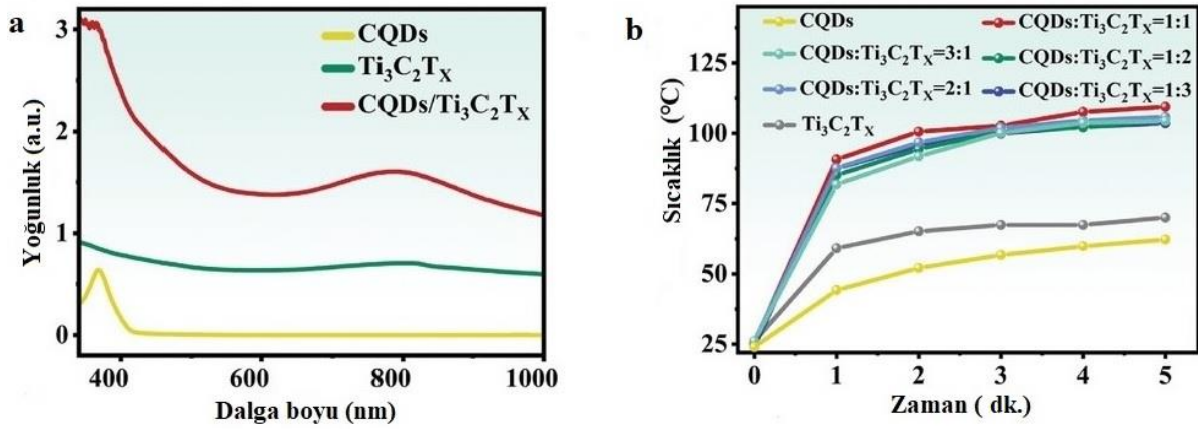
Şekil 10. Güneş spektral ışınmı (AM 1.5) (Zhou *et al.* 2025)

Karbon malzemeler, gelişmiş ışık Emilimi sağlamak amacıyla çeşitli yapılar halinde kolaylıkla üretilmekte ve farklı alt tabaka malzemeleri ile buharlaşma sistemlerine entegre edilebilmektedir (Chen *et al.* 2019). Bu malzemeler, aynı zamanda diğer fototermal bileşenlerle birleştirilerek üstün özelliklere sahip kompozit yapılar oluşturabilir. Malzemeler arası sinerjik etkileşim hem ışık Emilimini hem de tuzdan arındırma verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Liu *et al.* 2023). Son yıllarda, karbon temelli fototermal sistemlerin performansını daha da geliştirmek amacıyla metaller, yarı iletkenler ve biyokütle gibi farklı malzemelerle hibrit yapılar oluşturulmuştur. Bu kompozit sistemlerde ışık Emilimi, ısı yalıtımı ve su iletimi gibi özellikler optimize edilerek güneş enerjisinin ısıya dönüşüm verimliliği artırılmıştır (Wang *et al.* 2021).

Erçarıkcı ve arkadaşları (2024) tarafından geliştirilen porfirin türevi supramoleküller (PRF) ile modifiye edilmiş gradyan grafen sünger malzeme (PRF/GGSM), güneş ışığını geniş bir dalga boyu aralığında etkin şekilde absorbe edebilen fototermal bir dönüştürücü olarak tanımlanmıştır. Supramoleküllerin π -konjuge sistemleri sayesinde ışık Emilim kapasitesi artırılmış; optimize edilen modifikasyon parametreleriyle elde edilen mikro gözenekli ve gradyan hidrofilik yapı, 1 güneş altında %92'ye varan güneş ısı dönüşüm verimliliği ve $3,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ buharlaşma oranı sağlamıştır. Ayrıca PRF/GGSM, farklı kaynaklardan (deniz suyu, atık su, asidik/alkalik çözeltiler) temiz su üretiminde yüksek performans göstermiştir.

Jing ve arkadaşları (2024), 0 boyutlu karbon kuantum noktaları (CQDs) ile 2 boyutlu MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) malzemelerini birleştirerek hibrit bir fototermal yapı geliştirmiştir. CQDs geniş spektrumda ışık Emilimi ve yüksek fotoluminesans özellikleri sunarken, MXene malzemesi yüksek elektriksel iletkenliği ve lokalize yüzey plazmon rezonansı (LSPR) etkisiyle güçlü ışık-ısı dönüşümü sağlamaktadır (Şekil 11). Bu iki bileşen, elektrostatik etkileşim yoluyla birleştirilmiş ve sodyum karboksimetil selüloz (CMC) ile poliakrilamid (PAM) esaslı çift

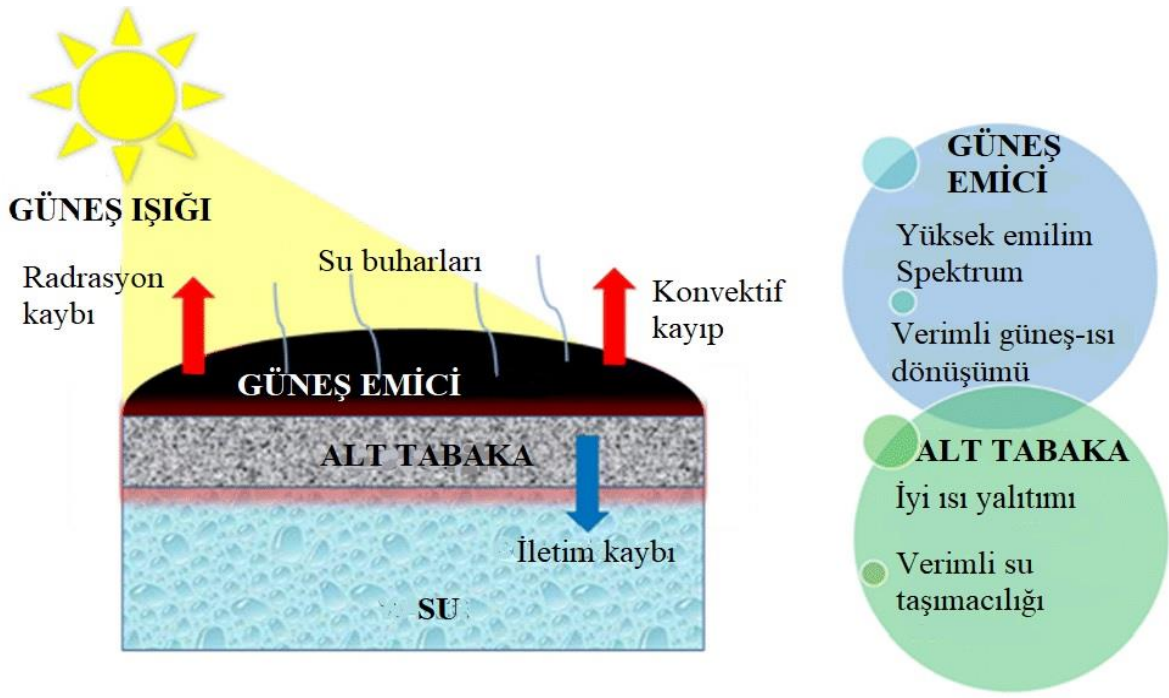
katmanlı hidrojel matrise entegre edilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen sistem 1 güneş ışınımı altında $1,93 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ ve 2 güneş altında $2,86 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ buharlaşma hızına ulaşarak, çok amaçlı güneş buharlaştırma sistemleri için yüksek verimli ve çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 11. (a) CQDs, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{TX}$ ve $\text{CQDs}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{TX}$ 'nin ışık emilimi. (b) CQDs, $\text{CQDs}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{TX}$ (3:1), $\text{CQDs}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{TX}$ (2:1), $\text{CQDs}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{TX}$ (1:1), $\text{CQDs}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{TX}$ (1:2), $\text{CQDs}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{TX}$ (1:3) ve $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{TX}$ 'nin 1 güneş ışınımında sıcaklık değişimleri (Jing *et al.* 2024).

Arayüz ısıtması için kullanılan tek katmanlı fototermal malzemeler, su yüzeyinde yüzerken güneş ışığını termal enerjiye dönüştürerek yalnızca üst kısmı ısıtır. Bu sayede enerji verimliliği artar; ancak suyla doğrudan temas nedeniyle ısı alttaki suya iletilir ve konveksiyonla yayılır, bu da verimliliği sınırlar. Güneş buhar üretim sistemlerinde malzeme ve yapısal tasarımın temel amacı, buharlaşma yüzeyinde sürdürülebilir şekilde düşük su içeriği sağlayarak termal kayıpları en aza indirmektir. Bu düşük su içeriği, iletim, konveksiyon ve radyasyon yoluyla gerçekleşen ısı transferini azaltarak sistemin enerji verimliliğini artırır (Zhao *et al.* 2020).

Güneş enerjili ara yüzey buharlaştırma sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilen çift katmanlı tasarımlar, ısı yönetimini optimize ederek buharlaşma sürecini iyileştirir (Şekil 12). Bu sistemlerde, güneş ışığını emen fototermal katmanın altına yerleştirilen yalıtım katmanı sayesinde, ısı iletimi baskın olarak üst yüzeye yönlendirilir ve alttaki su kütlesine doğru gerçekleşen iletim ve konveksiyon yoluyla oluşan enerji kayıpları önemli ölçüde azaltılır. Alt yalıtım katmanının düşük ısı iletkenliği, termal kayıpları minimize ederken; gözenekli yapısı ve yüksek kılcal emme kapasitesi, buharlaşma yüzeyine sürekli ve dengeli su iletimini sağlar. Bu özellikler, sistemin uzun vadeli yapısal stabilitesini korurken verimli su yönetimini mümkün kılar. Ayrıca, su taşıma ve ısı yalıtımı işlevlerini birlikte üstlenen bu alt katman, fototermal dönüşüm katmanı ile sinerjik bir şekilde çalışarak buhar üretim hızını artırır ve genel enerji verimliliğini belirleyen temel bir bileşen haline gelir (Zhao *et al.* 2020; Huang *et al.* 2021).



Şekil 12. Güneş enerjisiyle çalışan ara yüzey su buharlaşmasının şematik gösterimi (Sinhamahapatra & Kumar, 2023)

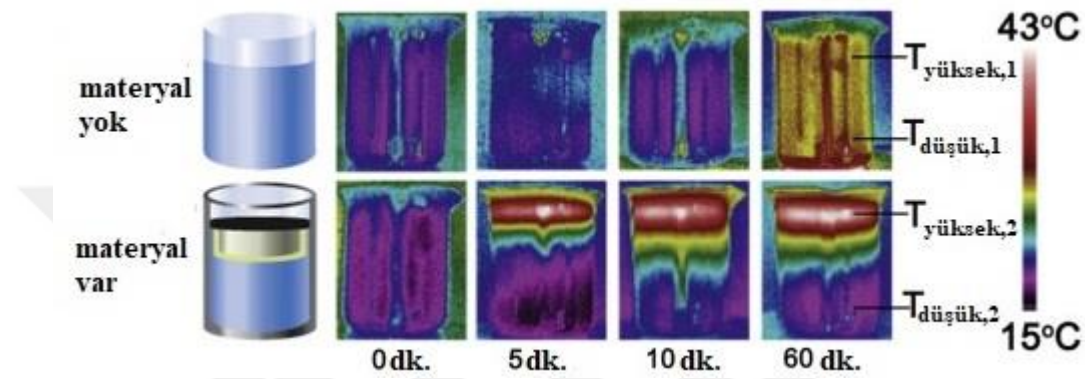
Düşük ısı iletkenliği ve yüksek gözeneklilik özellikleriyle öne çıkan selüloz köpük, poliüretan (PU), polistiren (PS) köpük, anodik alüminyum oksit (AAO), doğal ahşap, pamuk ve kâğıt gibi malzemeler ile katmanlı tasarımlara sahip Janus yapılar (çift yüzeyli) gibi özel tasarımlar, fototermal buharlaştırma sistemlerinde buharlaşma verimliliğini artırabilecek uygun alt tabaka seçenekleri arasında yer almaktadır (Zhou *et al.* 2025).

Zhang ve arkadaşları (2019), güneş enerjisiyle buhar üretimi için iki katmanlı yapıya sahip fototermal malzemelerin yüksek buharlaşma verimi ve mekanik dayanıklılık sunduğunu göstermiştir. Bu tez çalışmasında, benzer prensiplerle, polidimetilsiloksan (PDMS) ile modifiye edilmiş grafit tozu kullanılarak poliüretan (PU) sünger yüzeyi kaplanmış ve iki katmanlı bir yapı elde edilmiştir (Şekil 13). Geliştirilen grafit sünger (GS), 1 kW/m^2 ışınlım altında %73,3 buharlaşma verimliliği ve $1,118 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ buharlaşma hızı ile yüksek performans sergilemiştir. Bu değer, saf suya kıyasla yaklaşık 2,6 kat daha yüksek olup, modifiye edilmemiş PU süngerin (%36,0) performansını önemli ölçüde aşmaktadır. Bir aylık suya maruz kalma sonrasında dahi yapısal ve kimyasal stabilitesini koruyan GS örneği, uzun vadeli kullanım açısından dayanıklı bir yapı sunmaktadır.



Şekil 13. PU süngerinin ve GS örneğinin simüle edilmiş çizimi (Zhang *et al.* 2019)

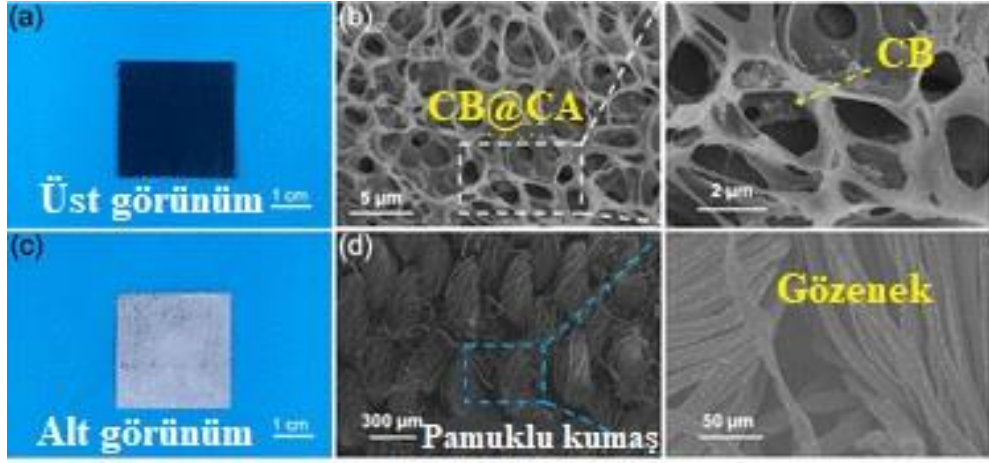
Wu ve arkadaşları (2020), poliakrilonitril (PAN) esaslı elektrospun membranı yüksek sıcaklıkta karbonize ederek fototermal özellik kazandırmış ve yüzey oksidasyonu ile hidrofilik yapı elde etmişlerdir. Geliştirilen gözenekli karbon membran, güneş ışığını %95'in üzerinde absorbe edebilmekte ve lokalize ısıtma tasarımı sayesinde termal enerjiyi doğrudan buharlaşma yüzeyine yönlendirerek iletim yoluyla gerçekleşen ısı kaybını minimize etmektedir. Isı yalıtımı amacıyla kullanılan polistiren (PS) köpük ve hidrofilik kaplama, suyun yukarı taşınmasını sağlarken, üst katman ile dökme su arasında elde edilen 25 °C'lik sıcaklık farkı, sistemin buharlaşma verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır (Şekil 14).



Şekil 14. Lokalize ısıtma tasarımı olan ve olmayan kızılötesi görüntüler T, sıcaklık (Wu *et al.* 2020)

Sun ve arkadaşları (2021), temiz suya erişim sorununa çevre dostu bir çözüm sunmak amacıyla, melanin esaslı doğal biyopolimer polidopamin (PDA) ve fototermal malzeme karbon siyahı (CB) kullanarak düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir güneş buharı üretim sistemi geliştirmiştir. Polipropilen (PP) dokumasız kumaş üzerine PDA ve CB kaplanarak oluşturulan fototermal yapı (PDA/CB@PP), 1 güneş ışınımı altında %95 yüksek ışık absorpsiyonu ve 1,68 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ buharlaşma hızı ile %91,5 buharlaşma verimi sağlamıştır. PDA'nın hidrofilik yapısı sayesinde su taşınımı iyileştirilmiş, CB'nin ışık emme kapasitesiyle sinerjik bir etki elde edilmiştir. Sistem, tuz kristalleşmesini önleyerek kendi kendini temizleyebilmiş ve ağır metaller ve organik boyalarla kirlenmiş atık suların arıtımında da %99,9 oranında iyon giderimini sağlamıştır.

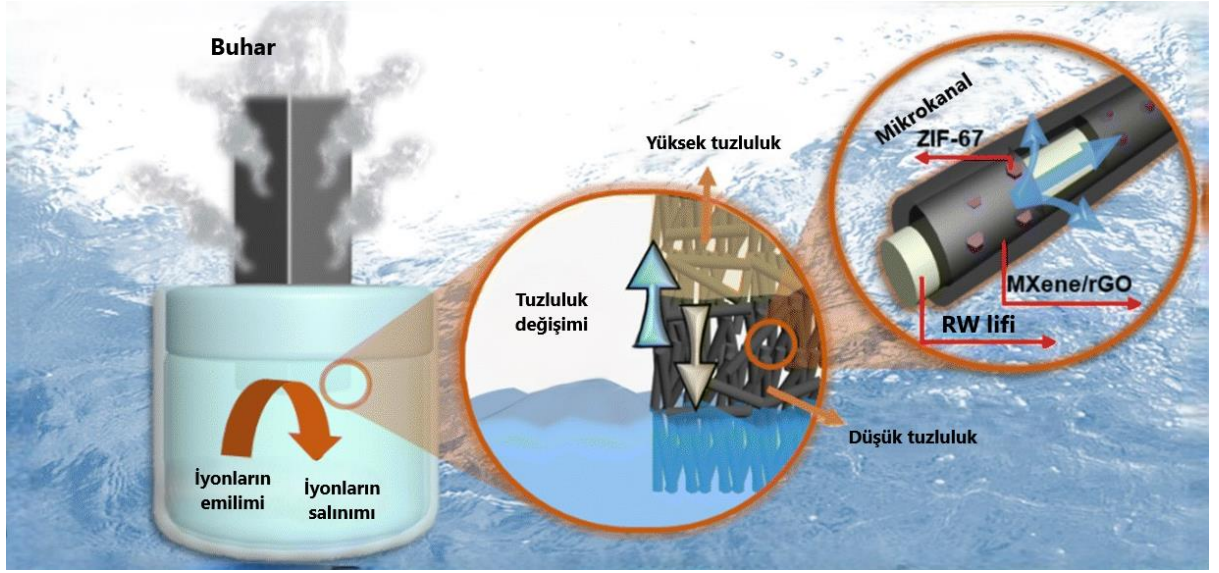
Xia ve arkadaşları (2025), tuz birikimini önlemek ve buharlaşma verimini artırmak amacıyla çift katmanlı, selüloz esaslı bir buharlaştırıcı sistem geliştirmiştir. Karbon siyahı ile modifiye edilmiş selüloz asetat (CB@CA) kaplamalı pamuklu kumaş (CB@CA/CF), yüksek güneş ışığı absorpsiyonu (üst katman) ve etkili kapiller su iletimi (alt katman) sayesinde 1 güneş ışınımı altında 2,08 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ buharlaşma hızına ulaşmıştır. %3,5 NaCl çözeltisiyle yapılan deneylerde 8 saat boyunca tuz birikimi gözlenmemiştir. Sistem, gerçek çevresel koşullarda boyama endüstrisi atık suyu arıtımında da başarılı sonuçlar vermiştir (Şekil 15).



Şekil 15. (a) CB@CA/CF'nin tepesinin dijital fotoğrafı. (b) CB@CA/CF'nin tepesinin SEM görüntüsü ve gözenegin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü. (c) CB@CA/CF'nin tabanının dijital fotoğrafı. (d) CB@CA/CF'nin tabanının SEM görüntüsü ve gözenegin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü (Xia *et al.* 2025)

Hibrit sistemler, farklı enerji dönüşüm teknolojilerini bir araya getirerek güneş enerjisiyle deniz suyu buharlaştırma süreçlerinde yüksek verimlilik ve süreklilik sağlayan yenilikçi çözümlerdir. Bu sistemlerde fototermal buharlaştırıcılar, elektrotermal dönüştürücüler ve faz değişimi ısı depolama malzemeleri gibi bileşenler entegre edilerek hem güneş ışığını doğrudan ısıya dönüştürmek hem de güneşin yetersiz olduğu koşullarda harici ısı kaynaklarıyla süreci desteklemek mümkün hale gelir. Hibrit yapılar, yalnızca farklı malzemelerin entegrasyonu ile değil, aynı zamanda iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) mimari tasarımlarla desteklenerek geliştirilen fototermal sistemler sayesinde ışık Emilimi artırılmakta, ısı kaybı en aza indirilmekte ve bu sayede her türlü hava koşulunda etkin çalışma performansı sağlanmaktadır.

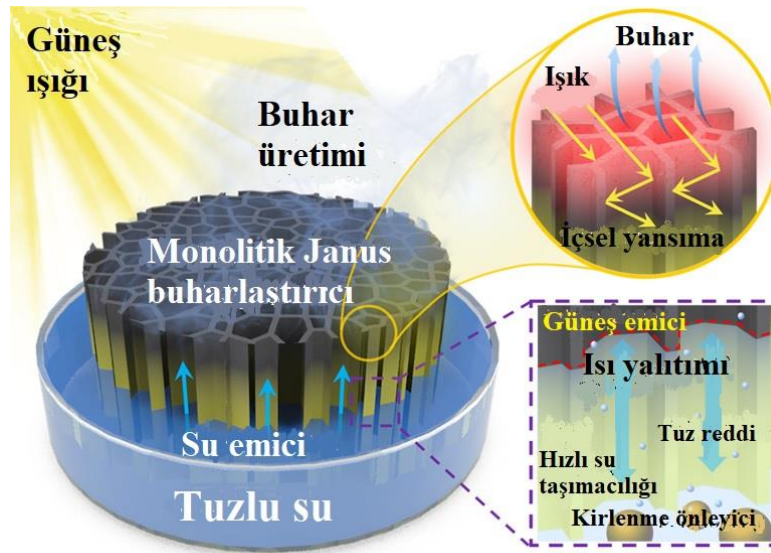
Geri dönüştürülmüş taş yünü (RW) atığı kullanılarak geliştirilen ZIF-67@MXene/rGO (ZMG) hibrit nanokompozitli üç boyutlu (3B) fototermal buharlaştırıcı sistem hem çevresel atıkların değerlendirilmesi hem de sürdürülebilir temiz su üretimi için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. ZMG yapısı, güneş ışığına ek olarak çevresel enerjiyi de kullanarak yan duvarlardan “soğuk buharlaşma” mekanizmasıyla buhar üretimini artırmakta; 3B mimarisi sayesinde ışık Emilimi, su taşınımı ve buharlaşma verimi önemli ölçüde iyileşmektedir (Şekil 16). Sistem, 1 güneş ışığı altında %153,7'lik güneş-ısı dönüşüm verimliliği ile $3,81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ buharlaşma hızına ulaşmıştır ve %99,8 tuz iyonu reddi ile çoklu ortam (azo ve organik boyalar, asidik/bazik çözeltiler ile yağ-su emülsiyonları) arıtımında etkili sonuçlar vermektedir (Ginting *et al.* 2023).



Şekil 16. RW/ZMG buharlaştırıcının çalışma prensibine ait temsili gösterim (Ginting *et al.* 2023)

Jel esaslı hibrit malzemeler, hidrojel ve aerogel yapıların fototermal malzemelerle (örneğin karbon siyahı, grafen, MXene) birleştirilmesiyle elde edilen sistemlerdir. Bu malzemeler, hem fototermal yüzeylerin alt tabakası olarak hem de aktif bileşen olarak kullanılabilir. Hidrojeller yüksek su tutma kapasitesi, düşük buharlaşma entalpisi ve tuz birikimine karşı direnciyle öne çıkarken; aerojeller ultra hafif, yüksek gözenekli yapıları ve düşük ısı iletkenliği sayesinde termal verimliliği artırır. Bu hibrit yapı sayesinde güneş ışığını ısıya dönüştürme verimliliği yükselir, düşük ışık koşullarında dahi buharlaşma sürdürülebilir hale gelir ve tuz birikimi engellenerek sistemin ömrü uzar (Zhou *et al.* 2025).

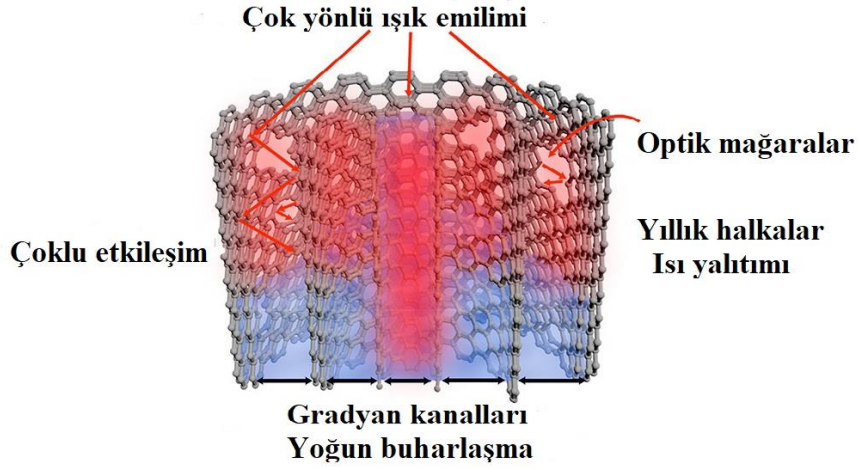
Liu ve arkadaşlarının (2021) çalışmasında geliştirilen güneş enerjili buharlaştırma sistemi, dondurarak kurutma ve yüzey karbonizasyonu işlemleriyle elde edilen Janus yapıdaki kitosan (CS) esaslı aerogel malzemeye dayanmaktadır. Üst katman, çoklu iç yansıma yoluyla geniş bant güneş ışığı absorpsiyonu sağlarken, alt katman düşük termal iletkenlik ($0,053 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ve yüksek hidrofilitiklik sayesinde hem ısı yalıtımı hem de kontrollü su iletimi görevini üstlenir. Mikrokanaletli gözenekli yapı, hızlı kütle taşınımı ve verimli termal yönetim sunar. Bu mimari sayesinde sistem, %91 ışık-buhar dönüşüm verimliliği ile $1,76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ buhar üretim kapasitesine ulaşmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. Janus aerogel buharlaştırıcıya dayalı arayüz fototermal su buharlaşmasının şematik gösterimi (Liu *et al.* 2021)

Meng ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında, N-katkılı indirgenmiş grafen oksit (N-RGO) esaslı halka yapılı 3B aerogel kullanılarak, gradyan mikrokannallar ve yüzey karbonizasyonu ile yüksek verimli bir güneşle buharlaştırma sistemi geliştirilmiştir. Dondurarak kurutma öncesi uygulanan konsantrasyon gradyanı sayesinde dikey mikrokannallar oluşturulmuş, bu yapı suyun sıcak bölgelere yönlendirilmesini sağlayarak ara yüzey buharlaşmayı optimize etmiştir. Sistem, %90,3 güneş-buhar verimliliği ve $2,53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ buharlaşma hızı sunarken, yüksek tuz konsantrasyonlarında ve mekanik stres altında yapısal kararlılığını korumuştur (Şekil 18).

Wei ve arkadaşları (2021), sıvı metal EGaIn'i stearik asit ile mekanokimyasal olarak işleyerek, ışık emme kapasitesi artırılmış ve bant aralığı daraltılmış toz morfolojili bir fototermal malzeme (STA-EGaIn) geliştirmiştir. Bu malzeme, lignin ve selüloz nanokristallerle birleştirilerek çift katmanlı bir güneş buharlaştırıcısı (SLC aerogel) oluşturulmuş; çekirdeksiz ayçiçeğinden esinlenilen ters piramit topografyası sayesinde çoklu ışık yansıması azaltılarak enerji verimliliği artırılmıştır. Geliştirilen IP-SLC aerogel, 1 güneş altında %94 buharlaştırma verimi ve kanalizasyon ile deniz suyunda %99'a varan arıtma ve tuzdan arındırma başarısı göstermiştir. Ayrıca, bu hibrit sistemin elektrik üretimi ve elektronik sensörler gibi alanlarda da potansiyel uygulamalara sahip olacağı belirtilmiştir.



Şekil 18. N-katkılı grafen ağlarına dayalı aerojeller içindeki gradyan dikey kanalların şematik gösterimi (Meng *et al.* 2020)

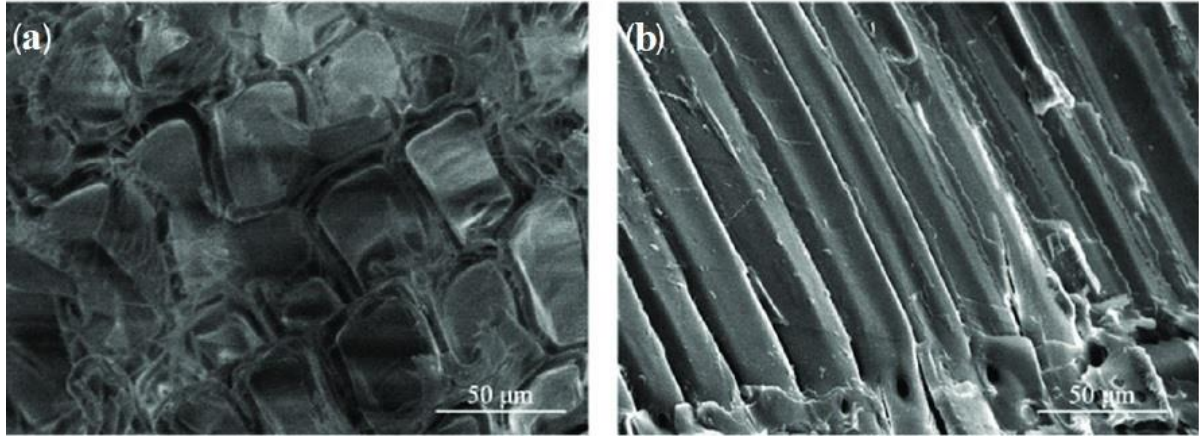
Qian ve arkadaşları (2025), kumaş esaslı üç boyutlu güneş enerjili arayüz evaporatörlerinin, geleneksel iki boyutlu sistemlerin sınırlı buharlaşma yüzeyi ve düşük enerji verimliliğini aşmak amacıyla geliştirildiğini belirtmektedir. Kumaşların esnek ve modifiye edilebilir yapısı sayesinde bu sistemler, fototermal dönüşüm, su taşıma ve çevresel adaptasyon arasında güçlü bir etkileşim kurarak yüksek buharlaşma oranı, tuz direnci, düşük maliyet ve her hava koşuluna uyum gibi avantajlar sunmaktadır. Çalışmada, tasarım stratejileri üç ana başlık altında sınıflandırılmıştır: malzeme sistemi (karbon, yarı iletken, polimer ve metal nanopartiküller), dokuma yöntemleri (dokuma, örme vb.) ve yapısal biçimler (çok katmanlı, 3D mimari, biyo-ilhamlı). Bu stratejik yaklaşımlar, kumaş esaslı buharlaştırıcıların farklı çevresel senaryolara uyum sağlayarak sürdürülebilir ve ölçeklenebilir su arıtma teknolojileri geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Bazı malzemeler çok iyi güneş ışığı emer ve az ısı kaybeder, ama buharlaşma hızları yine de düşük olabilir. Bu yüzden, sadece malzemenin optik özelliklerine değil, enerji-su dengesine de dikkat etmek gerekir. Buharlaştırıcıların yenilikçi tasarımları, su taşıma katmanlarının optimizasyonu yoluyla termal kayıpları azaltmaya ve fototermal buharlaştırıcılarda daha az su kullanımıyla buharlaşma oranını artırma üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Enerji eşleştirme, güneşle çalışan buharlaştırma sistemlerinde verilen enerji ile buharlaşacak su miktarının uyumlu hale getirilerek verimliliğin artırılmasını amaçlayan bir dengeleme stratejisidir (Mu *et al.* 2020). Bu çalışmada, karbon nanotüp aerogel kaplı ahşap kullanılarak çift katmanlı bir fototermal buharlaştırıcı tasarlanmış ve su taşıma hızını kontrol eden üç aşamalı bir yapı entegre edilmiştir. Bu yapı sayesinde, buharlaşma yüzeyine ulaşan su miktarı optimize edilerek giriş enerjisi ile buharlaşma için gerekli enerji arasında daha iyi bir

eşleşme sağlanmıştır. Böylece enerji-su dengesi kurulmuş, fazla suyun enerji tüketimini engelleyen ve enerjinin doğrudan buharlaşmaya yönlendirilmesini sağlayan bir sistem elde edilmiştir. Sonuç olarak buharlaşma oranı $2,22 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ 'ye ulaşmış ve güneş-buhar dönüşüm verimliliği %93,2'ye çıkarılmıştır. Ayrıca, polietilen köpük, arojel ve kalın ahşap levhadan oluşan üç katmanlı ısı yalıtım sistemiyle termal kayıplar minimize edilerek sistemin genel enerji verimliliği artırılmıştır (Şekil 19).

Li ve arkadaşları (2020), mürekkep balığı suyu esaslı biyogüvenli bir güneş enerjisi emici geliştirerek fototermal malzemeye fazla suyun ulaşmasını sınırlandırarak dikkat çekici sonuçlar elde etmişlerdir. Araştırmada, melamin köpük iskelet üzerine hidroforik SiO_2 nanoparçacıkları eklenerek su taşınımı kontrollü hale getirilmiş, böylece ısı kayıpları azaltılmış ve buharlaşma verimi %85,8'e kadar yükseltilmiştir. Bu yaklaşım, GBÜ sistemlerinin enerji verimliliğini artırmada önemli bir katkı sunmaktadır.



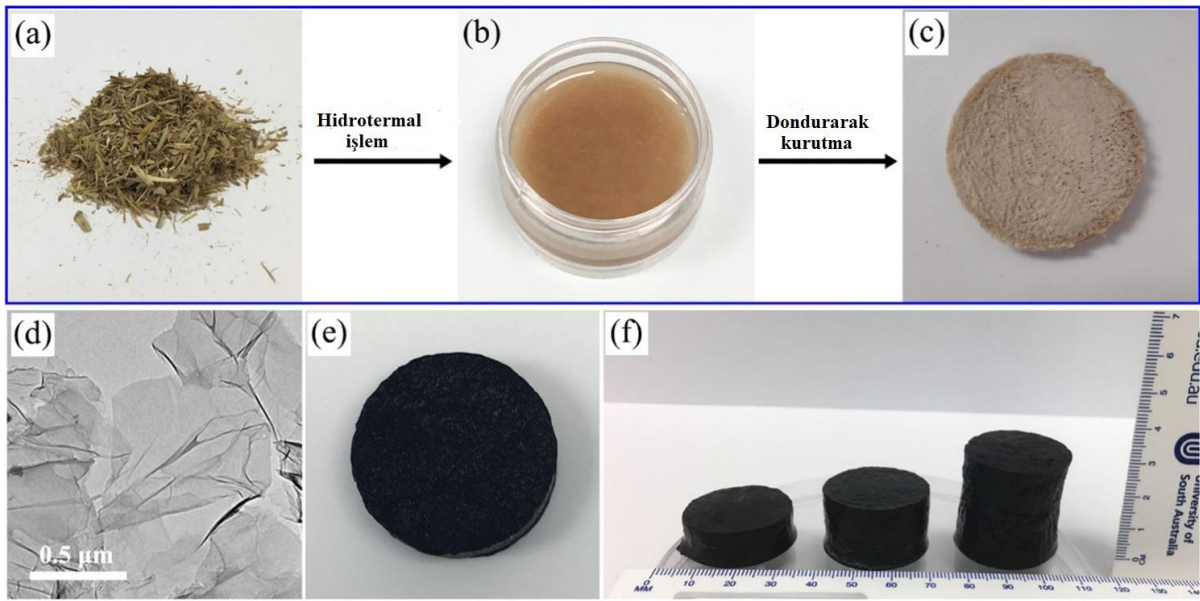
Şekil 19. (a) düşük ve (b) yüksek doğal ahşap levha büyütme gösteren SEM görüntüleri (Mu *et al.* 2020)

Doğal biyokütle malzemeleri, güneş buharı evaporatörlerinde tercih edilmelerini sağlayan bir dizi yapısal avantaja sahiptir. Geniş spektrumda ışık emilimiyle yüksek fototermal dönüşüm sağlarlar. Gözenekli ve lifli yapıları sayesinde suyu etkin biçimde yüzeye taşırlar. Yenilenebilir ve çevre dostu olmaları sürdürülebilir kalkınma ile uyumludur. Zorlu çevre koşullarına dayanıklı yapıları uzun ömürlü kullanım sunar. Isı yalıtımı özellikleriyle enerji verimliliğini artırır. Bu nitelikler, onları ekonomik ve çevresel açıdan ideal kılar (Huang *et al.* 2025).

Yenilenebilir kaynakların etkin değerlendirilmesine yönelik yürütülen araştırmalar, atık biyokütlenin çevre dostu ve enerji verimli buharlaştırıcı sistemlerin üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Li *et al.* 2023). Bu kapsamda, biyokütle temelli malzemelerin çok işlevli güneş buharlaştırıcılar olarak değerlendirilmesi hem düşük maliyetli

hem de geri dönüştürülebilir çözümler sunarak sürdürülebilir teknolojiler alanında literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

Li ve arkadaşları (2023) atık çay yapraklarından elde edilen mikrokristalin selülozu kullanarak yönlendirilmiş kanallara sahip üç boyutlu bir aerogel (TPPA-5) geliştirmiştir. Bu aerogel, simüle güneş ışığı altında saatte 3,39 kg/m² buharlaşma oranına ulaşmakta ve %95,95 enerji verimliliği ile maksimum 67.534 mV çıkış voltajı üretmektedir. Malzemenin yüksek gözenekliliği (%94,72) ve düşük ısı iletkenliği (0.07 W/m·K), buharlaşma sürecinde ısı kaybını minimize ederek verimliliği artırmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen sistem, su arıtımı ve enerji üretimini eş zamanlı olarak gerçekleştirebilme kapasitesiyle kojenerasyon yaklaşımının yenilikçi bir örneğini sunmaktadır.

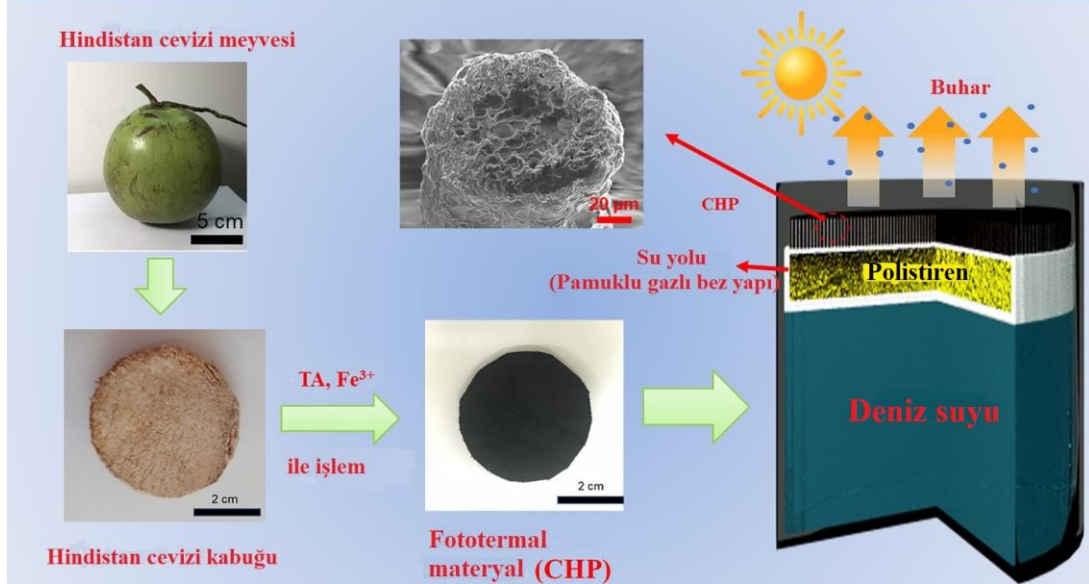


Şekil 20. Pirinç samanından yapılan fototermal malzeme. (a) İşlenmemiş pirinç samanının, (b) hidrotermal işlemden sonra elde edilen selüloz elyaf süspansiyonunun ve c dondurarak kurutma işleminden sonra elde edilen son saf selüloz aerogelin dijital fotoğrafları. (d) RGO nano tabakalarının transmisyon elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri. (e) Ca²⁺ çapraz bağlama işleminden sonra elde edilen RGO–SA–selüloz aerogelin ve (f) farklı yüksekliklerdeki RGO–SA–selüloz aerogelin fotoğrafları (Storer *et al.* 2020)

Storer ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında, pirinç samanı gibi tarımsal atıkların selüloz içeriği ve lifli yapısıyla aerogel üretiminde değerli bir kaynak olarak değerlendirilebileceği ortaya konmuştur. Bu çalışmada, indirgenmiş grafen oksit (RGO) ile birlikte kullanılan pirinç samanı lifleri, aerogelin mekanik dayanımını artırırken grafen kullanımını %43,5 oranında azaltmıştır. Sodyum aljinat (SA) ise yapının bağlayıcısı olarak görev almıştır. Elde edilen RGO–SA–selüloz aerogel, esnek ve süperhidrofilik özellikleri sayesinde yüksek su emme kapasitesi göstermiş; 1.0 güneş ışınımı altında %88,9 enerji dönüşüm verimliliğiyle 2,25 kg/m² h buharlaşma oranına ulaşmıştır. Gerçek deniz suyu ile gerçekleştirilen testlerde, elde edilen buharın tuzluluk oranı yalnızca 0,37 ppm olarak ölçülmüş;

bu da sistemin tuzdan arındırma uygulamaları için oldukça uygun olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, atık bir malzeme olan pirinç samanı, ileri teknoloji bir uygulamada hem maliyeti düşüren hem de performansı artıran bir bileşen olarak değerlendirilmiş; taşınabilir ve uzun süreli güneşle çalışan su arıtma sistemleri için umut vadeden bir alternatif sunmuştur (Şekil 20).

Pham ve arkadaşları (2021), güneş enerjisiyle çalışan buhar üretim sistemlerinde verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği artırmak amacıyla, hindistan cevizi kabuğundan elde edilen demir (III) kompleksli yenilikçi bir fototermal malzeme CH-TA-Fe³⁺ (CHP) geliştirmiştir. Tanik asit (TA) ve demir (III) klorür ile işlenen bu malzeme, siyah yüzeyi sayesinde güneş ışığını %97 oranında emerek yüksek fototermal verimlilik sağlamaktadır. CHP'nin iç yapısında yer alan kokofiberler ve petek benzeri cocopeat yapısı, suyun etkin taşınmasını ve yüzeye eşit dağılmasını desteklerken; süperhidrofilik yüzey ve düşük ısı iletkenliği, buhar üretimini hızlandırmakta ve enerji kaybını azaltmaktadır. Ayrıca, hızlı su taşıma kapasitesi sayesinde tuz birikimi önlenmekte ve yüzeydeki tuz kristalleri sistem içinde çözülerek suya geri taşınmaktadır. CHP, 1 güneş ışınımı altında 1,83 kg/m² h buharlaşma oranı ve %73,2 enerji verimliliği ile hem laboratuvar hem de dış ortam koşullarında tatlı su üretimi sağlayarak, düşük maliyetli ve dayanıklı bir fototermal malzeme olarak öne çıkmaktadır (Şekil 21).



Şekil 21. Demir (III) esaslı hindistan cevizi kabuğu fototermal malzemenin grafiksel özeti (Pham *et al.* 2021)

Karbon malzemeler, düzensiz kıvrımlı yapılara sahip yarım silindirik gözenek kanalları, katmanlar arası boşluklar ve grafen yüzeyinde ya da üretim sürecinde oluşan yapısal kusurlar sayesinde gözenekli bir yapı kazanır (Wang *et al.* 2021). Bu gözenekli yapı, geniş özgül yüzey alanı sağlayarak güneş ışığının daha verimli emilmesine katkıda bulunur. Siyah yüzey özellikleri sayesinde karbon malzemeler, görünür ışık spektrumunun büyük bir kısmını etkili

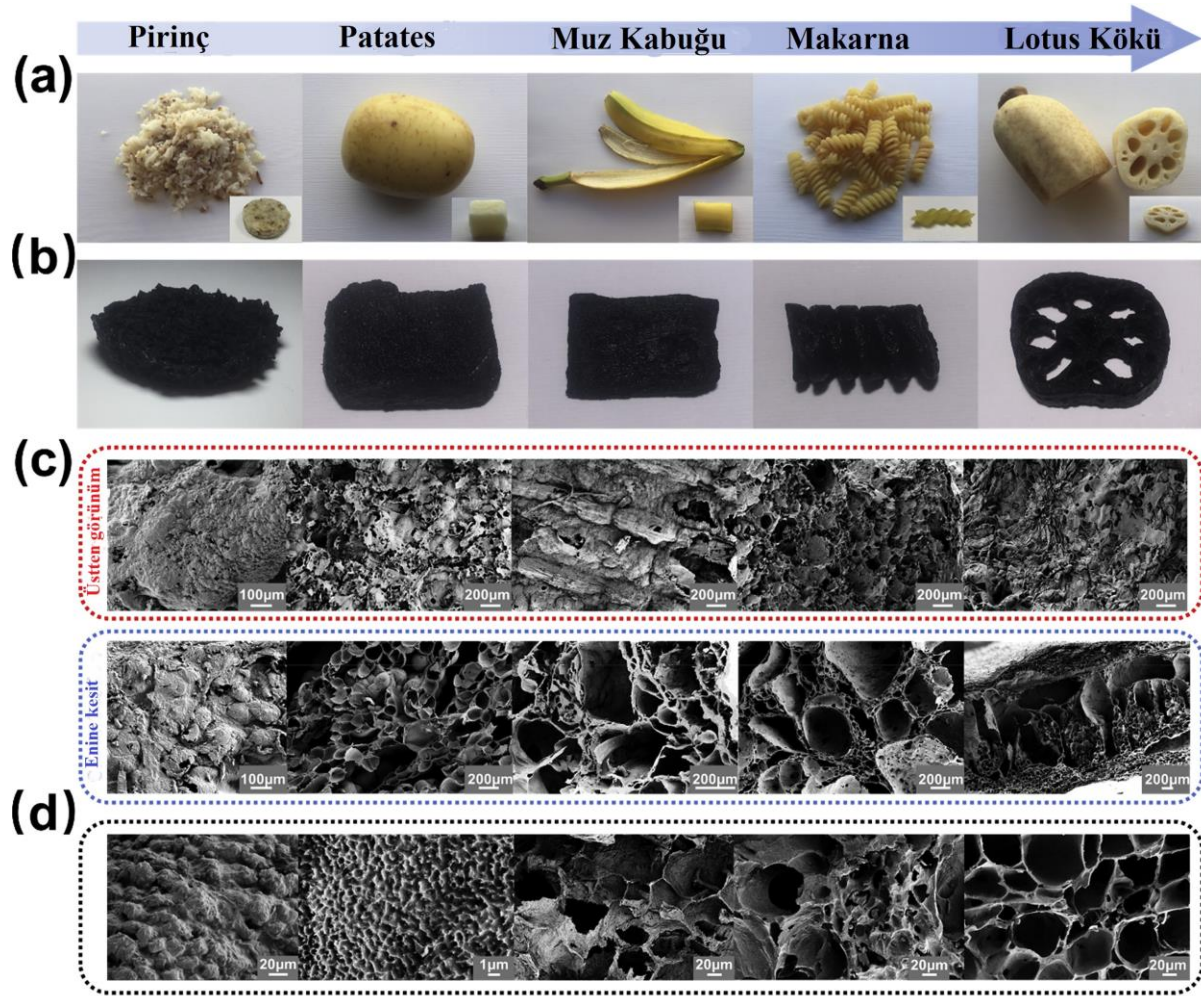
biçimde absorbe edebilir. Bu malzemeler; grafit türevleri (grafit, grafen, grafen oksit, indirgenmiş grafen oksit), karbon nanotüpler (CNT'ler), amorf karbon türleri (karbon siyahı, aktif karbon) ve çeşitli karbon kompozitlerini içermektedir (Liu *et al.* 2023). Karbon esaslı malzemeler, düşük maliyetleri, bol bulunabilirlikleri, ölçeklenebilir üretim olanakları, kimyasal kararlılıkları ve çevre dostu yapıları sayesinde fototermal uygulamalarda en uygun adaylar arasında yer almaktadır. Özellikle biyokütle kaynaklı hammaddeler (örneğin ağaçlar, mantarlar, çimenler, pamuk ve diğer bitkiler), basit karbonizasyon işlemleriyle sert karbon yapısına dönüştürülebilmekte ve bu yönüyle sürdürülebilir üretim açısından büyük avantaj sunmaktadır (Chen *et al.* 2019). Bu doğrultuda, karbonizasyon işlemi; biyokütle kaynaklı hammaddelerin yüksek verimlilikte fototermal karbon malzemelere dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır.

Karbonizasyon, biyokütle esaslı malzemelerin yüksek sıcaklıkta oksijensiz ortamda işlenerek karbon açısından zengin bir yapıya dönüştürülmesi sürecidir. Bu işlem, biyokütlenin doğal mikro yapısını koruyarak ışık Emilimi, su iletimi ve buharlaşma verimliliği gibi özelliklerini optimize eder. Ara yüzey güneş buharlaştırıcılarında karbonize biyokütle kullanımı, sürdürülebilirlik ve performans açısından avantaj sağlamakta; özellikle tuz birikimi gibi sorunların azaltılmasında etkili olmaktadır.

Tian ve arkadaşları (2021), bol miktarda bulunan çiftlik atıklarının enerjiye dönüştürülmesini sağlayan verimli bir yaklaşım olarak karbonize gübre (CM) temelli bir fototermal buharlaştırma sistemi geliştirmiştir. Gübredeki selüloz liflerinin karbonizasyonu ile elde edilen CM, büyük ve küçük kanalların birlikte bulunduğu hiyerarşik gözenekli yapısı sayesinde yüksek güneş ışığı absorbanı sunar. Bu yapı, düşük ısı iletkenliği ile ısıyı buharlaşma yüzeyinde lokalize ederken, karbon fiberler arasındaki güçlü kılcal kuvvetler sayesinde suyun üst yüzeye hızlı taşınmasını sağlar. Polistiren köpükle yalıtılmış bu sistem, %15 NaCl çözeltisiyle yapılan deneylerde $2,02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ buharlaşma oranına ulaşmış ve %20 tuzlulukta dahi tuz birikimi gözlenmemiştir (Tian *et al.* 2021).

Gıda atıkları (FW), küresel sera gazı emisyonlarının önemli kaynaklarından biridir. Geleneksel bertaraf yöntemleri, özellikle yakma ve çöp sahası depolama, organik bileşenlerin tamamen karbondioksit (CO_2) veya metana (CH_4) dönüşmesine neden olarak iklim değişikliğini hızlandırmaktadır. Bu bağlamda, FW'nin karbon esaslı fototermal malzemelere dönüştürülmesi gibi çevre dostu alternatifler, emisyonların azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Gıda atıklarının bertarafında karbonizasyon yöntemi, düşük sıcaklıkta işleme sayesinde atıkların içerdikleri karbonun büyük kısmını malzeme yapısında tutarak, geleneksel yakma yöntemlerine kıyasla çok daha düşük CO_2 salımı üretmektedir. Yaşam döngüsü analizlerine göre karbonizasyonun emisyon faktörü yaklaşık $0,01 \text{ kg CO}_2 \text{ e/kg}$ olup, bu değer

yakma yöntemlerinden belirgin şekilde düşüktür. Ayrıca, buhar üretimi sırasında oluşan sıcaklık farkı termoelektrik modüllerle elektrik üretimine dönüştürülebilmekte, böylece çift yönlü enerji kazanımı sağlanmaktadır (Zhang *et al.* 2019).

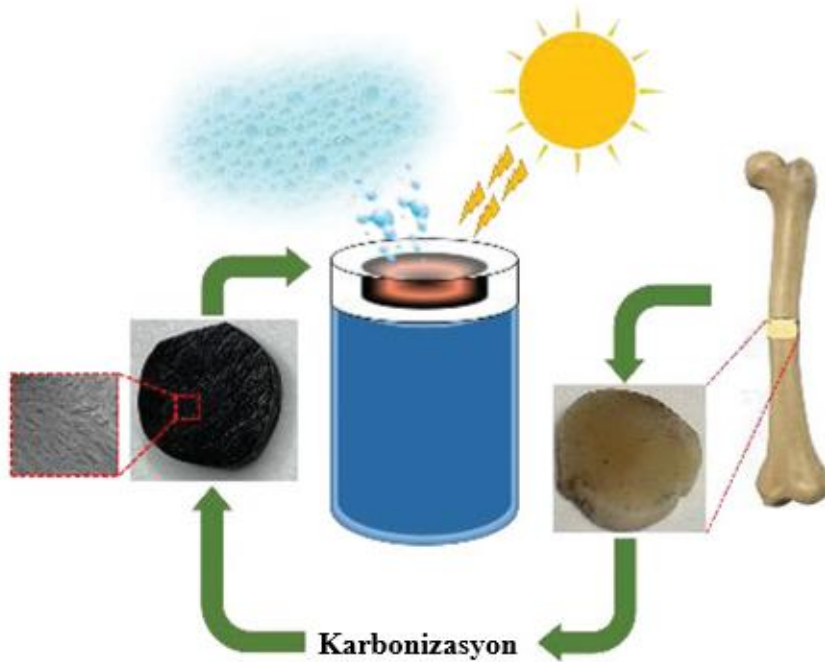


Şekil 22. FW'nin fototermal karbonlu malzemelere dönüştürülmesi ve bunlara karşılık gelen yapısal karakterizasyonlar. (a) taze FW'lerin ve (b) karbonize FW' nin fiziksel fotoğrafları. (c) Gözenekli yapıları gösteren karbonize FW'lerin üstten görünüm (ilk sıra) ve enine kesit görünümü (ikinci sıra) SEM görüntüleri. (d) Ayrıntılı yüzey morfolojisinin büyütülmüş SEM görüntüleri (Zhang *et al.* 2019)

Gıda atıklarının sürdürülebilir enerji ve su arıtma teknolojilerinde değerlendirilmesi, çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, karbonizasyon işlemi, atık gıdaların yüksek yüzey alanına ve gözenekliliğe sahip, ışığı etkin şekilde soğurabilen karbon esaslı malzemelere dönüştürülmesini sağlar. Elde edilen bu malzemeler, güneş ışığını yüksek verimle ısıya çevirerek, suyun buharlaştırılmasını ve dolayısıyla tuzdan arındırılmasını mümkün kılar. Ayrıca, mikro ve makro gözenekli yapıları sayesinde suyun yüzeye taşınmasını kolaylaştırarak arıtma sürecinin etkinliğini artırır (Şekil 22). Atık gıdaların bol ve ucuz olması, karbonizasyonu ekonomik açıdan da cazip kılar, fosil yakıt kullanımını

azaltarak çevre dostu ve karbon nötr sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlar (Huang *et al.* 2025).

Zafar ve arkadaşları (2021), biyoesaslı ve gıda atığı kaynaklı karbonize malzemelerin basit yöntemlerle başarıyla hazırlanabildiğini ve sürdürülebilir fototermal uygulamalarda etkili biçimde kullanılabileceğini göstermiştir. Çalışmada, en bol biyolojik atıklardan biri olan sığır kemiği, 600°C’de karbonize edilerek elde edilen CB600 örneğiyle değerlendirilmiştir (Şekil 23). CB600, yüksek gözeneklilik, geniş yüzey alanı ve süper ıslanabilirlik gibi özellikleri sayesinde 1 güneş ışığı altında saatte 1,82 kg/m² buhar üretimi sağlamıştır. Ayrıca, deniz suyundaki tuz ve metal iyonlarının %99,99 oranında giderilmesiyle elde edilen su, Dünya Sağlık Örgütü’nün içme suyu standartlarını karşılamaktadır. Bu yaklaşım, Birleşmiş Milletler’in sürdürülebilir kalkınma hedeflerinden SDG6 (temiz suya erişim) ve SDG12 (sorumlu tüketim ve üretim) ile uyumlu olarak hem su arıtımı hem de gıda atıklarının değerlendirilmesi açısından çevresel açıdan yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 23. Kemik atığından geliştirilen güneş enerjili buhar üretim cihazı, su kıtlığı ve gıda atığı yönetimi sorunlarına sürdürülebilir bir şekilde çözüm getirebilecek yeşil bir alternatiftir (Zafar *et al.* 2021)

Sun ve arkadaşları (2021), doğal biyokütle kaynaklarının düşük sıcaklıkta karbonize edilerek fototermal özellikler kazandırılmasının, ara yüzey güneş buharı üretimi sistemlerinde verimliliği artıran sürdürülebilir bir yaklaşım olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle mısır üretiminin yan ürünü olan mısır koçanı, özgün mikrokanal yapısı sayesinde su taşınımını hızlandırmakta ve çevresel enerjiyle desteklenen buhar üretimini mümkün kılmaktadır. Çalışmada, karbonize edilen mısır koçanı (C-mısır koçanı), %90’ı havada kalacak şekilde su

yüzeyine yerleştirilmiş; bu sayede güneş ışığına maksimum maruz kalma ve ısı kaybının azaltılması sağlanmıştır. Deneysel bulgular, C-mısır koçanının 4,16 kg/m²·h gibi yüksek bir buharlaşma hızına ulaştığını ve güneş ışığı olmaksızın dahi buhar üretimini sürdürebildiğini göstermektedir. Ayrıca, 26 günlük döngüsel testlerde tuz birikimi gözlenmemiş ve malzemenin yapısal stabilitesini koruduğu tespit edilmiştir.



MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

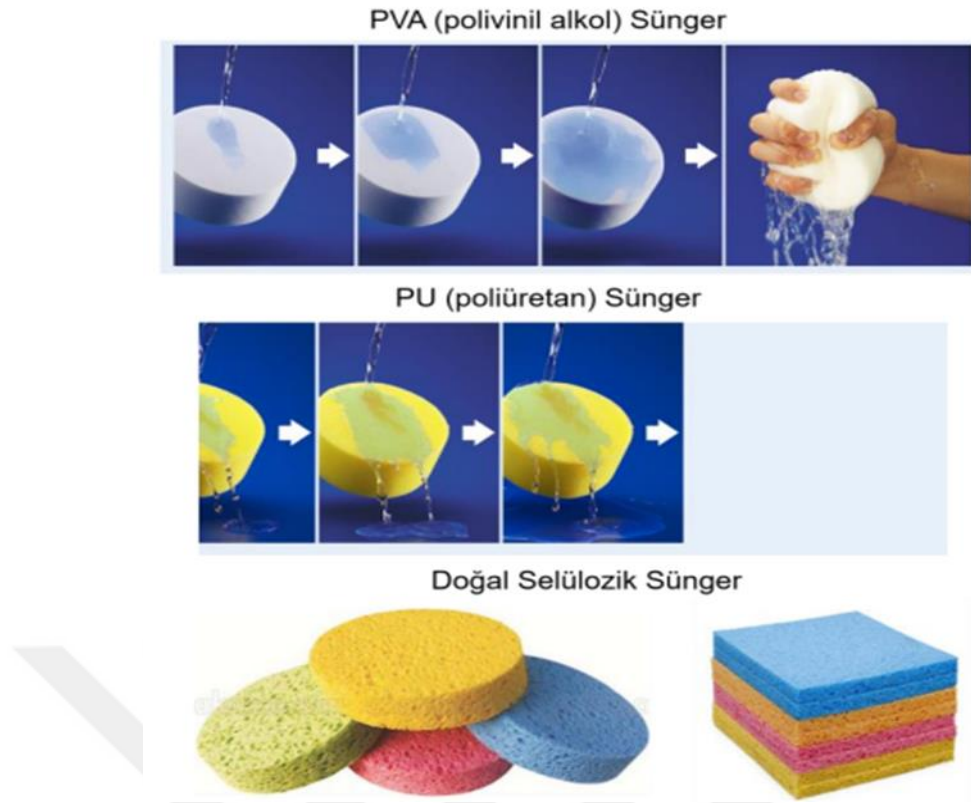
Sürdürülebilir ve düşük maliyetli su arıtımını hedefleyen bu tez çalışmasında, güneş enerjisi kullanılarak atık Türk çayından elde edilen biyokömür ile kaplanmış doğal selüloz sünger esaslı yeni bir fototermal malzeme geliştirilmiştir. Bu malzeme; kirli ve tuzlu su kaynaklarından temiz su elde edilmesine yönelik çevre dostu ve ekonomik bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım hem çevresel atıkların değerlendirilmesini hem de sürdürülebilir su arıtma teknolojilerinin geliştirilmesini desteklemektedir.

Türkiye'de yaygın olarak sıcak içecek şeklinde tüketilen Türk çayının demlenmesi sonrasında çaydanlıkta kalan çay otu atıkları, bu çalışmada hammadde olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen çay atıkları, yıkama ve kurutma işlemlerinin ardından inert atmosfer altında piroliz yöntemiyle işlenerek biyokömür üretimi gerçekleştirilmiştir. Atık Türk çayından farklı sıcaklıklarda elde edilen biyokömür örnekleri (Çay biyokömürü-ÇB), çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Tez kapsamında, güneş enerjisiyle su buharı üretimi amacıyla geliştirilen materyal tasarımında iyi bir su taşıyıcı ve ısı yalıtımı sağlayan alt tabaka olarak doğal selülozik sünger kullanılmıştır. Bu çalışmada temel hedef, düşük maliyetli ve basit üretim yöntemleriyle ilerlemek olduğundan, alt tabaka seçimi ekonomik ve işlevsel kriterler doğrultusunda yapılmıştır. PU sünger (bulaşık süngeri), PVA sünger (polivinil alkol sünger) ve doğal selülozik sünger arasında fiyat açısından benzerlik bulunmasına rağmen, doğal selülozik sünger; su tutma kapasitesi, biyolojik uyumluluk ve çevresel sürdürülebilirlik gibi özellikleriyle aranan niteliklere en iyi şekilde cevap verdiği için tercih edilmiştir (Şekil 24).

Çalışma süresince maliyeti uygun olan aynı markaya ait ticari bir bebek banyo süngeri kullanılmıştır. Bununla birlikte, bebek banyo ürünleri satan farklı marketlerden temin edilen çeşitli marka doğal selülozik süngerlerin genel ürün özellikleri incelenmiş; bu özelliklerin tez kapsamında geliştirilecek materyal için en uygun yapıyı sunduğu görülerek tercih sebebi olmuştur. Bu tercih, aşağıda sıralanan özelliklere dayanmaktadır:

Doğal selülozik süngerler, temel olarak viskoz elyaf ahşap hamurundan üretilir. %100 bitki özlü yapıları sayesinde çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir ürünlerdir. Ağaç liflerinden elde edildikleri için doğaldırlar ve kullanım sonrası doğada tamamen yok olurlar.



Şekil 24. PVA sünger, PU sünger ve doğal selülozik süngere ait resimler

Bu süngerlerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, yüksek su emme kapasiteleridir. Gözenekli yapılarında bulunan hava baloncukları sayesinde ağırlıklarının 20–30 katı kadar suyu kolaylıkla absorbe edebilirler. Bu yapı aynı zamanda süngerin hafif olmasını sağlar.

Selülozik dokusu sayesinde sünger, suyu hızlıca emer ve durulandıktan kısa bir süre sonra tamamen kurur. Bu özelliği, bakteri ve mikrop üremesini önleyerek hijyenik bir kullanım sunar. Dermatolojik olarak test edilmiş ve anti-alerjenik özellik göstermesiyle sağlık açısından da güvenlidir.

Ayrıca, ısı ve nem altında yapısını koruyarak (yüzey stabilitesi) uzun süreli kullanım sunar ve farklı boyut ve şekillerde kolayca kesilerek uygulamaya uygun hale getirilebilir.

Güneş enerjisiyle su buharı üretimi (GBÜ) için selülozik süngerin üst yüzeyi ÇB ile kaplanarak materyal hazırlanır. Sünger yüzeyinin modifikasyonu, ÇB tozlarının sünger üst yüzeyine sürülmesi ile gerçekleştirilir (Şekil 25).



Şekil 25. GBÜ için biyokömür-çıkışlı materyal tasarımı

Yöntem

Güneş simülatörü (Solar simulator)

Dünyanın birincil enerji kaynağı Güneş'ten gelen ışıyım enerjisidir. Bir konumun aldığı güneş radyasyonunun miktarı ve yoğunluğu; enlem, rakım, mevsim, günün saati ve bulut örtüsü gibi çeşitli faktörlere bağılıdır. Güneş'ten yayılan ışıyımın büyük bir kısmı atmosferde emilir, yansır veya saçılır. Yeryüzüne doğrudan gelen güneş enerjisine doğrudan radyasyon denir. Atmosfere girerken saçılan ışıya ise dolaylı veya küresel radyasyon denir.

Güneş simülatörleri, güneşin spektral dağılımını, yoğunluğunu ve ışıyım özelliklerini belirli standartlara uygun şekilde taklit ederek enerji sistemleri ve malzemelerin performansını ölçmek için kullanılan bir araçtır. Bir güneş simülatörü ile filtreler ve optik düzenekler kullanılarak Dünya'daki farklı koşullarda gözlemlenen radyasyon simüle edilebilir. Hatta uzayda gözlemlenen radyasyon bile taklit edilebilir. Güneş simülatörleri, sadece beyaz ışıyık yayan herhangi bir ışıyık kaynağı değildir. Güneş simülatörleri, doğal güneş ışığını yakından taklit eden bir aydınlatma sağlamak için kullanılır ve güneş enerjisi ile su buharı üretimi (GBÜ) çalışmalarının gelişmesinde büyük katkı sağlamıştır. Güneş simülatörleri GBÜ çalışmalarında doğrudan buhar üretmek için değil, kontrollü ve tekrarlanabilir güneş ışığı koşulları sağlamak amacıyla kullanılır. Bu özellik, özellikle laboratuvar ortamında veya prototip testlerinde büyük önem taşır. Böylece farklı cihazların performansını test etmek ve çeşitli araştırma projeleri yürütmek mümkün olur. Fotovoltaik endüstri, malzeme bilimi, kozmetik ve uzay teknolojileri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş simülatörleri ile gerçekleştirilen çalışmalar arasında şunlar yer alır:

- Güneş enerjisi ile su buharı üretimi (GBÜ)
- Fotovoltaik cihazların (örneğin güneş panelleri) test edilmesi
- Kimyasal piller için performans analizleri
- Kozmetik ürünlerin ışıyık dayanıklılık testleri
- Termal güç jeneratörlerinin verimlilik ölçümleri
- Cep telefonları, kameralar ve fotokromik lensler gibi tüketici elektroniğı ürünlerinin ışıyık koşullarında değerlendirilmesi
- Plastik, boya ve tekstil gibi endüstriyel veya yapı malzemelerinin ışıyık etkisine karşı dayanıklılık testleri
- Uzay malzemelerinin UV dayanıklılık testleri.
- Biyolojik ve tıbbi bilimlerde araştırmalar, örneğin: kanser araştırmaları, kimyasal sentez çalışmaları, biyosensör analizleri

Güneş simülatörünün temel bileşenleri

Bir güneş simülatörü, dikkatle monte edilmiş optik ve elektrik bileşenlerden oluşan bir sistemdir. Bu sistemin amacı, güneş ışığını mümkün olduğunca gerçekçi şekilde taklit etmektir. Başlıca bileşenler şunlardır:

- Lamba Kaynağı: Farklı voltajlarda çalışabilen lambalar kullanılır. Watt değeri; aydınlatılacak alanın büyüklüğüne, ışığın homojenliği ve ışınların ne kadar paralel (kolime) olması gerektiğine bağlı olarak seçilir.
- Lamba Muhafazası: Işığın dışarı sızmasını engelleyen kapalı bir yapı, güvenlik ve verimlilik açısından önemlidir.
- Optik Bileşenler: Lensler, reflektörler ve ateşleyici gibi parçalar ışığın yönlendirilmesi ve odaklanmasını sağlar.
- Güç Kaynağı: Lambanın çalışması için gerekli enerjiyi sağlar.
- Hava Kütle Filtresi: Işık demetini güneş spektrumuna uyacak şekilde filtreler. Kullanılacak filtre, taklit edilmek istenen spektral koşullara göre değişir (AM 1.5G, AM 0 vb.).
- Opsiyonel Filtreler:
 - Nötr Yoğunluk Filtreleri: Işık yoğunluğunu ayarlamak için kullanılır.
 - Uzun ve Kısa Dalga Geçiren Filtreler: Belirli dalga boylarını izole etmek amacıyla tercih edilir.

Özetle, güneş simülatörünü sıradan bir ışık kaynağından ayıran en önemli özellik, güneş ışığını spektral ve yönsel olarak taklit edebilme yeteneğidir.

Güneş simülatörlerinin temel özellikleri

- Güneş simülatörleri, farklı test uygulamaları için belirli standartlara göre tasarlanır.
- Simülatör, güneş spektrumuna mümkün olduğunca yakın bir ışık spektrumu üretmelidir.
- Aydınlatma alanı, güneş ışığına benzer şekilde mekânsal olarak homojen olmalıdır.
- Işık çıkışı, belirli bir süre boyunca kararlı kalmalıdır.
- Bazı uygulamalarda, güneşin güç yoğunluğunu taklit edebilme özelliği gerekebilir.
- Belirli testler için ışık demetinin yüksek derecede kolime (paralel) olması istenebilir.
- Güneş simülatörünün başarısı, spektral doğruluk, homojenlik, kararlılık ve gerektiğinde kolimasyon gibi özellikleri sağlayabilmesine bağlıdır.

Bu çalışmada, güneş enerjisiyle su buharı üretimi için Optosense OPT-S500F Xenon ışık kaynağı kullanılmıştır. Cihaz, 300–1100 nm aralığında tam spektrumlu ışınım sağlayarak UV, görünür ve IR bölgelerini kapsamakta ve 0–15 güneş ışığı ($0\text{--}15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) ışık şiddetiyle çalışmaktadır. Bu özellikler, deneylerin kontrollü ve gerçekçi güneş simülasyonu koşullarında gerçekleştirilmesine olanak tanımıştır.

X-ışını Difraksiyon Spektroskopisi (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), kristal yapıların atomik düzeyde karakterizasyonu için kullanılan temel bir difraksiyon tekniğidir. Bu yöntem, kristal fazların tanımlanması, kafes parametrelerinin belirlenmesi, kristal boyutu ve gerilme analizi gibi yapısal özelliklerin incelenmesinde yüksek doğruluk sağlar. Malzeme bilimi, mineraloji, kimya ve biyoteknoloji gibi disiplinlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

X-ışını kırınımı (XRD) sistemleri üç temel bileşenden oluşur: X-ışını tüpü, örnek sahnesi ve dedektör. X-ışını tüpü yüksek enerjili X-ışınlarını üretir; örnek sahnesi, analiz edilecek kristal numuneyi sabitler; dedektör ise kırınımına uğrayan X-ışınlarını algılayarak veri toplar. Bir XRD deneyinde, analiz edilecek örnek cihazın merkezine yerleştirilir ve monokromatik X-ışını demetiyle aydınlatılır. X-ışını tüpü ile dedektör, belirli bir geometriye göre senkronize biçimde hareket eder. Örnekten saçılan X-ışınları dedektör tarafından algılanır ve elde edilen sinyal, kırınım desenini gösteren bir grafik olarak kaydedilir. Bu grafikteki kırınım zirveleri, örneğin kristal yapısına özgü atomik düzlemlerle ilişkilidir.

Çoğu katı malzeme, mikroskobik boyutta çok sayıda kristal tanecikten oluşur. Her kristal, periyodik bir atomik dizilim sergileyen düzenli bir yapıdadır. Atomlar, pozitif yüklü bir çekirdek ve çevresindeki negatif yüklü elektron bulutundan meydana gelir. X-ışınları, elektromanyetik spektrumun yüksek enerjili bölgesinde yer alan ve dalga boyları atomlar arası mesafeye yakın olan ışık dalgalarıdır. Bu özellikleri sayesinde, kristal içindeki atomik düzlemlerle etkileşime girerek kırınım adı verilen özel bir girişim olayı oluştururlar.

X-ışınlarının kristal yapı ile etkileşimi sonucunda iki tür girişim gözlemlenebilir:

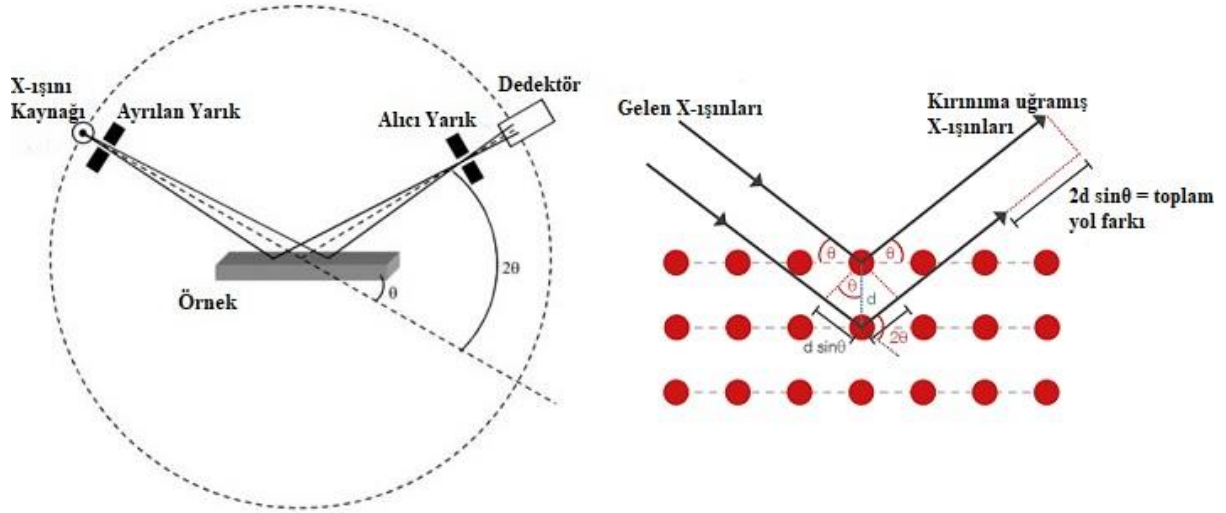
- **Yapıcı girişim:** Saçılan dalgalar faz uyumlu olduğunda sinyalin şiddeti artar.
- **Yıkıcı girişim:** Dalgalar faz uyumsuz olduğunda sinyal zayıflar veya yok olur.

Bir X-ışını atomla etkileşime girdiğinde, enerjisi elektronlar tarafından absorbe edilir. Ancak bu enerji, elektronu bulunduğu enerji seviyesinden koparmaya yetmediğinde, X-ışını aynı enerjiyle yeniden yayımlanır. Bu olay elastik saçılma olarak adlandırılır.

Kristal yapılar, belirli aralıklarla dizilmiş atomik düzlemler içerir. X-ışını demeti bu düzlemlere çarptığında, saçılan ışınlar belirli açılarda yapıcı girişim oluşturarak kırınım desenini meydana getirir. Gelen ve saçılan ışınlar arasındaki açığa 2θ (iki teta) denir. Yapıcı girişimin gerçekleşmesi için saçılan dalgaların faz uyumu içinde olması gerekir; bu da ikinci dalgaının yol farkının tam dalga boyunun katı olmasıyla sağlanır (Şekil 26).

Bu koşul, Bragg Yasası ile matematiksel olarak ifade edilir: $n\lambda = 2d \sin\theta$

- n : girişim derecesi (tam sayı),
- λ : X-ışınının dalga boyu,
- d : atomik düzlemler arası mesafe
- θ : kırınım açısının yarısıdır.



Şekil 26. XRD tekniğinin ve X-ışınlarının kristal yapıda kırınımının temsili olarak gösterimi

ÇB numunesi toz haline getirilmiş ve kristal yapı analizi, Rigaku MiniFlex model X-ışını difraktometresi (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), kimyasal analiz için Elektron Spektroskopisi (ESCA) olarak da bilinir ve malzeme bilimi alanında son derece güçlü bir yöntemdir. Bu teknik, yüzeye yüksek duyarlılığı ve kantitatif analiz yeteneği sayesinde çok çeşitli malzeme problemlerinin çözümünde kullanılır. Temel prensip, bir malzemenin yüzeyi X-ışınları ile uyarıldığında açığa çıkan fotoelektronların kinetik enerjisinin ölçülmesine dayanır. Bu enerji, elektronların atom içindeki bağlanma enerjisiyle doğrudan ilişkilidir; dolayısıyla elementin kimliği ve kimyasal durumu hakkında bilgi verir.

XPS'in yüzey hassasiyetinin nedeni, yalnızca yüzeye yakın bölgelerde üretilen elektronların enerjilerini kaybetmeden dedektöre ulaşabilmesidir. Bu durum, ölçümlerin

malzemenin en üst birkaç nanometresine özgü olmasını sağlar. Yüzey seçiciliği ve kimyasal durumların nicel olarak belirlenebilmesi, XPS'i malzeme karakterizasyonunda vazgeçilmez bir araç haline getirir.

Bu yöntemle bir malzemenin elementel bileşimi, deneysel formülü, kimyasal ve elektronik durumu belirlenebilir. XPS spektrumları, katı bir yüzeyin X-ışını demetiyle ışınlaması ve aynı anda yüzeyin yaklaşık 1 ila 10 nanometrelik kısmından yayılan elektronların kinetik enerjisinin ölçülmesiyle elde edilir. Böylece XPS hem elementel hem de kimyasal bileşim hakkında ayrıntılı bilgi sunar. Yüzeye son derece duyarlı olması ve yüzeyin kimyasal yapısını doğrudan ölçebilmesi, bu tekniği malzeme bilimi ve yüzey analizinde eşsiz bir konuma taşır.

XPS, çok çeşitli uygulamalarda yüzey ve arayüzlerin kimyasını anlamak için kullanılır. Örneğin; pil malzemelerinin yüzey kimyasını ortaya çıkararak performans ve elektrolit etkileşimlerini anlamada, katalitik aktivite değişimlerini ve üretim hatalarını ortaya çıkarmada, biyomedikal cihazlarda biyolojik aktivite ve cihaz performansını geliştirmede, ultra ince filmlerin kimyasal modifikasyonunu analiz ederek uygulama gereksinimlerine uygun performans tasarımını mümkün kılmada, yüzeyde veya bir arayüzde sorun olduğunda, kusurlara veya delaminasyona neden olan kimyasal değişiklikleri belirlemede, fotovoltaiik malzemelerin kimyasal bileşimi ve elektronik yapısını diğer spektroskopi teknikleriyle birlikte kapsamlı şekilde analiz etmede, otomotiv, mimari ve biyolojik uygulamalarda cam malzemelerde katman yapısının doğruluğunu doğrulamak için cam malzemelerin analizlerinde, metal ve oksit yüzeylerdeki koruyucu oksit filmlerin bileşimi ve kalınlığını belirleyerek pigmentler, kataliz, cam kaplamalar ve biyomalzemeler dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamaların performansın anlaşılmasını ve optimize edilmesini sağlar.

ÇB numunesi toz haline getirilmiş ve yapısal karakterizasyonu için SPECS EA 300 marka XPS cihazı kullanılmıştır.

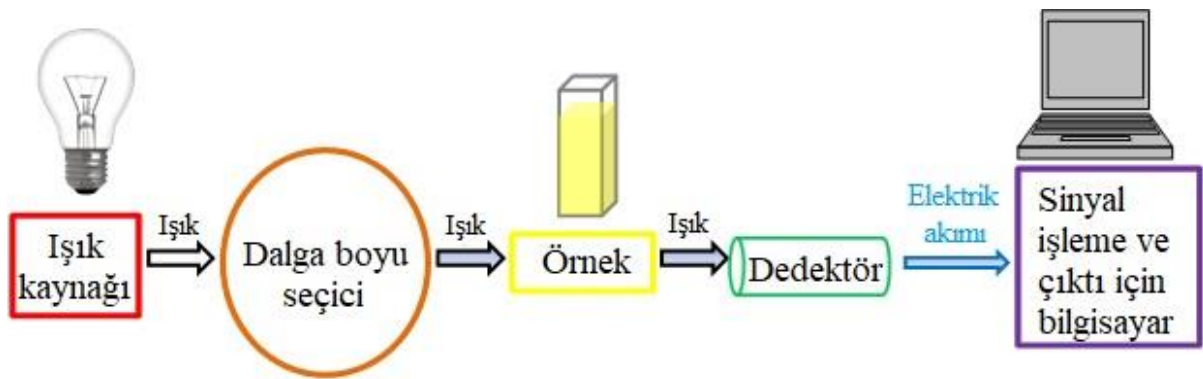
Ultraviyole-Görünür Işık (UV-Vis) Spektroskopisi

Ultraviyole-görünür ışık (UV-Vis) spektroskopisi; bakteri kültürleri, ilaç tanımlama, nükleik asit saflık kontrolü ve kantitasyonu gibi biyolojik analizlerden, içecek endüstrisinde kalite kontrol ve kimyasal araştırmalara kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir.

UV-Vis spektroskopisi, bir numune tarafından emilen veya numuneden iletilen UV veya görünür ışığın ayrı dalga boylarının miktarını, referans veya boş bir numuneyle karşılaştırarak

ölçen analitik bir tekniktir. Bu özellik, numunenin bileşiminden etkilenir ve potansiyel olarak numunede ne olduğu ve konsantrasyonu hakkında bilgi sağlar.

Işık, dalga boyuna ters orantılı bir enerjiye sahiptir; kısa dalga boyları daha fazla, uzun dalga boyları ise daha az enerji taşır. Elektronları daha yüksek enerji seviyesine çıkarmak için belirli bir enerji gerekir ve bu enerji, elektronun bulunduğu bağlanma ortamına göre değişir. Bu nedenle farklı maddeler farklı dalga boylarında ışığı soğurur. İnsan gözü yaklaşık 380–780 nm aralığındaki görünür ışığı algılar; mor ışık en kısa, kırmızı ışık en uzun dalga boyuna sahiptir. UV ışığı ise görünür ışıktan daha kısa dalga boyludur (yaklaşık 100 nm). UV-Vis spektroskopisi, maddelerin maksimum absorbans gösterdiği dalga boylarını belirleyerek kimyasal analiz ve tanımlama için kullanılır.



Şekil 27. UV-Vis spektrofotometresindeki ana bileşenlerin basitleştirilmiş şeması

UV-Vis spektrofotometresi, Şekil 27' de gösterilen dört ana bileşenden oluşur:

- **Işık kaynağı:** Işık tabanlı tekniklerde geniş dalga boyu aralığı için sabit bir ışık kaynağı gerekir. Tek ksenon lamba UV ve görünür ışıktaki yüksek yoğunluk sağlar ancak pahalı ve kararsızdır. Bu nedenle cihazlarda genellikle iki kaynak kullanılır: görünür ışık için tungsten/halojen, UV için döteryum. Tarama sırasında kaynak geçişi, 300–350 nm aralığında pürüzsüz şekilde yapılır.
- **Dalga boyu seçimi:** Numune analizinde dalga boyu seçimi için en yaygın yöntem monokromatörlerdir; kırınım ızgaralarıyla ışığı dar bir aralığa ayırır ve holografik ızgaralar daha kaliteli sonuç verir. Filtreler ise belirli dalga boylarını seçmek için kullanılır ve hassasiyet için genellikle monokromatörlerle birlikte uygulanır.
- **Numune analizi:** Işık, seçilen dalga boyunda numuneden geçirilir ve dedektörde absorbans ölçülür. Analiz öncesinde, numuneyle aynı çözücü içeren bir referans (boş) ölçümü yapılır; ardından numune ölçümü ile karşılaştırılarak analitin konsantrasyonu belirlenir.
- **Tespit:** UV-Vis spektroskopisinde ışık, dedektör tarafından elektrik sinyaline dönüştürülür. En yaygın dedektör olan fotoçoğaltıcı tüp (PMT), ışığa maruz kaldığında

elektronları serbest bırakır ve bunları çoğaltarak ışık yoğunluğuna orantılı güçlü bir akım üretir; bu sayede çok düşük ışık seviyeleri bile hassas şekilde tespit edilir. Yarı iletken dedektörler ise ışığa maruz kaldığında, ışık yoğunluğuna orantılı elektrik akımı üretir. En yaygın türleri fotodiyotlar ve yük bağlantılı cihazlar (CCD'ler)dir. Kullanılan dedektörden elektrik akımı üretildikten sonra, sinyal algılanır ve bir bilgisayara veya ekrana aktarılır.

Bu tez kapsamında, boyar madde giderimi ile ÇB'nin absorpsiyon özelliklerinin incelenmesinde Shimadzu Europe UV-3101 PC spektrofotometresi kullanılmıştır.

Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, kimyasal yapı, faz ve polimorfizm, kristallik derecesi ve moleküler etkileşimler hakkında ayrıntılı bilgi sağlayan tahribatsız bir kimyasal analiz yöntemidir. Bu teknik, ışığın malzeme içerisindeki kimyasal bağlarla etkileşimine dayanmaktadır.

Raman spektroskopisi, bir molekülün yüksek yoğunluklu bir lazer ışık kaynağından gelen fotonları saçtığı inelastik saçılma prensibine dayanır. Saçılan ışığın büyük bir kısmı, lazer kaynağı ile aynı dalga boyuna sahip olup analitik açıdan bilgi sağlamaz; bu elastik saçılma süreci Rayleigh saçılımı olarak adlandırılır. Buna karşılık, saçılan ışığın çok küçük bir kısmı (yaklaşık %0,0000001), analitin kimyasal yapısına bağlı olarak farklı dalga boylarında saçılır; bu inelastik saçılma süreci ise Raman saçılımı olarak tanımlanır. Raman saçılması, fotonların moleküler titreşimsel enerji seviyeleriyle etkileşime girerek enerji değiştirmesi nedeniyle esnek değildir. Saçılan ışık enerji kaybettiğinde Raman saçılmasına 'Stokes' denir. Saçılan ışık enerji kazandığında ise Raman saçılmasına 'anti-Stokes' denir.

Raman spektrumu, her biri belirli bir titreşim moduna karşılık gelen bantlardan oluşan bir yapıya sahiptir. Bu spektrum, analiz edilen malzemeye özgü karakteristik özellikler taşır ve malzemenin tanımlanmasına olanak sağlar. Bazı araştırmacılar, her bir Raman bandının ilgili titreşim modlarıyla ilişkisini ayrıntılı olarak açıklamayı amaçlarken, çoğu analist örneklerin tanımlanmasında spektral kütüphanelerden yararlanmaktadır.

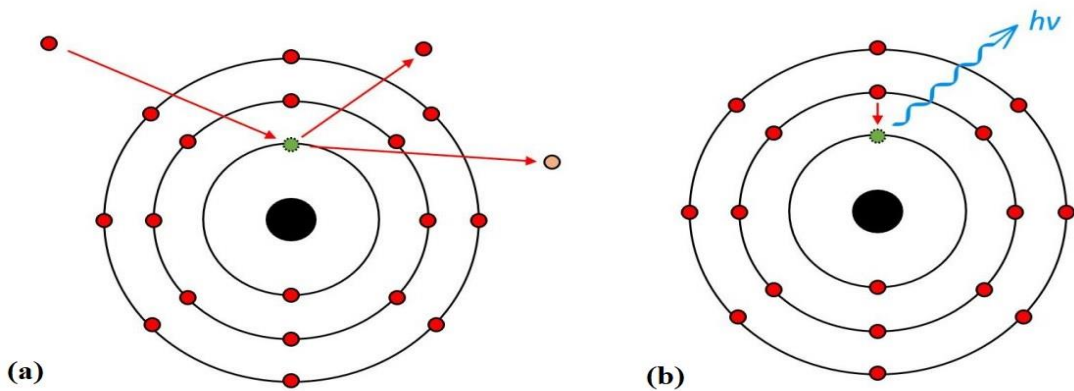
Raman spektroskopisi ölçümleri, elde edilen verilerin Raman spektrumları şeklinde grafiksel olarak sunulmasıyla ifade edilmektedir. Bu spektrumlarda, y eksenini saçılan ışığın yoğunluğunu, x eksenini ise ışığın enerjisini (frekansını) göstermektedir. Analizde temel olarak Raman saçılmasında meydana gelen frekans kaymaları incelenmektedir. Bu nedenle, x eksenindeki frekans değerleri lazerin frekansına göre düzenlenmekte ve bu eksen "Raman kayması" olarak adlandırılmaktadır.

ÇB'nin yapısal karakterizasyonu, Renishaw Invia marka Raman spektroskopisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDX) ile Birleştirilmiş Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM/EDX) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüzey analizi için en yaygın kullanılan tekniklerdir. SEM, yüksek odaklı birincil elektron demeti ile yüzey topografyasının yüksek çözünürlüklü görüntülerini üretir. Birincil elektronlar (0,5–30 kV), yüzeye girerek düşük enerjili ikincil elektronlar oluşturur; bu elektronların yoğunluğu yüzey topografyasına bağlıdır ve görüntüleme için temel alınır. Birincil elektron demetinin <10 nm odaklanabilmesi, yüksek mekansal çözünürlük sağlar. Ayrıca, <1 kV enerji kullanımı, yüzeyin en dış tabakasındaki (<5 nm) topografik özelliklere duyarlılığı artırır. Birincil elektron bombardımanı geri saçılmış elektronlar ve X-ışınları da üretir; geri saçılmış elektron yoğunluğu atom numarasıyla ilişkili olduğundan, örnek hakkında nitel element bilgisi elde edilebilir.

Daha nicel analiz için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS/EDX) kullanılır. Bu teknik, elektron bombardımanı sonucu oluşan karakteristik X-ışınlarının enerjisine dayanır; her element kendine özgü enerjiye sahip X-ışınları yayar. Bu X-ışınları, bir atomun iç kabuğunda elektron boşluğu oluştuğunda, üst enerji seviyesindeki elektronların dış kabuktan geçiş yaparak bu boşluğu doldurması sırasında ortaya çıkar. Bu geçişte yayılan X-ışınları, her element için belirli enerji değerine sahip karakteristik X-ışınlarıdır ve elementlerin tanımlanmasında temel alınır (Şekil 28). Bu özellik, elementlerin hızlı kalitatif tespitini mümkün kılar. Ayrıca X-ışını yoğunluğu, kantitatif analiz ve element dağılımının haritalanmasında kullanılır. Analizler, yaklaşık $1 \mu\text{m}^3$ gibi küçük hacimlerde gerçekleştirilebilir.



Şekil 28. SEM/EDX analizinde X-ışını oluşum mekanizması. (a) SEM elektron demetinden gelen bir elektron, numunedeki bir atomun iç kabuk elektronuyla çarpışır. Bu çarpışma, bir iç çekirdek elektronunun emisyonuyla sonuçlanır ve geride bir iç kabuk boşluğu bırakır. (b) Dış kabuk elektronlarından biri, yeni oluşan iç kabuk boşluğunu doldurmak üzere gevşer. Gevşeme sırasında, elektronik geçişin enerjisine eşit olan $h\nu$ enerjili karakteristik bir X-ışını yayılır

X-ışını analiziyle birlikte uygulanan SEM, yüzey analizine nispeten hızlı, ucuz ve temelde tahribatsız bir yaklaşım olarak kabul edilir. Genellikle, daha yüzey hassasiyetine sahip ve özel tekniklere geçmeden önce yüzey analitik problemlerini incelemek için kullanılır.

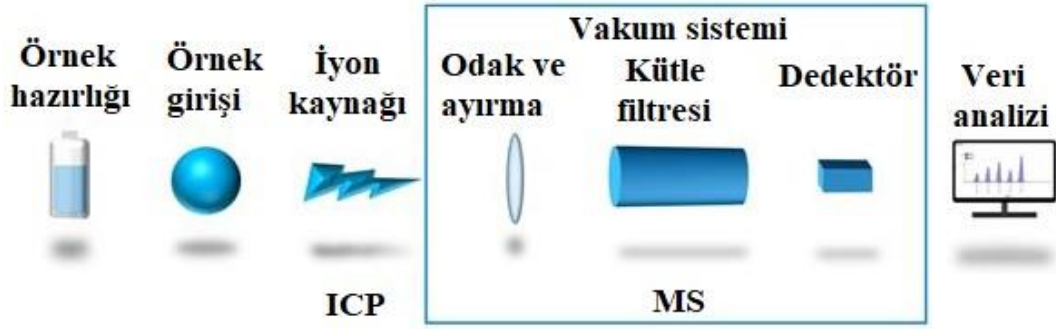
Materyal tasarımında kullanılan sünger ve ÇB kaplı süngerin yüzey morfolojileri, FEI-INSPECT S50 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntülenmiştir. Ayrıca, ÇB'nin toz formundaki numunesi, aynı cihazın EDX ünitesi ile analiz edilmiş ve görüntülenmiştir.

Endüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometrisi (ICP-MS)

ICP-MS (Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometrisi), element analizi için kullanılan ileri bir tekniktir. Bu yöntem, numuneyi iyonlaştırmak amacıyla argon plazması (ICP) kullanır ve oluşan iyonları kütle spektrometresi (MS) ile doğrudan ölçer. ICP-MS, çoklu elementlerin hızlı analizini mümkün kılar ve son derece düşük tespit limitleri sayesinde eser element analizinde üstünlük sağlar. Çevre izleme, gıda ve ilaç kontrolü, metalurji ve jeokimyasal analiz gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılan rutin bir analiz yöntemine dönüşmüştür. Artan popülaritesinin temel nedenleri, düşük tespit limitlerini korurken yüksek üretkenlik sağlaması ve analitik gereksinimler ile düzenleyici standartlara uyum kapasitesidir.

ICP-MS cihazı, temel olarak bir numune giriş sistemi, iyon kaynağı (ICP), bir kütle spektrometresi (MS) ve bir iyon dedektöründen oluşur (Şekil 29). Numuneler genellikle sıvı çözelti olarak hazırlanır ve plazmaya enjekte edilmeden önce aerosol damlacıklarına dönüştürülür. ICP, atmosferik basınçta çalışan bir argon plazmasıdır; burada numune sırasıyla buharlaştırılır, atomize edilir ve iyonize edilir. Oluşan iyonlar, vakum altında çalışan kütle spektrometresine yönlendirilir.

Kütle spektrometresi, iyonları kütle-yük oranlarına göre ayırır ve rutin uygulamalarda genellikle taramalı dört kutuplu (kuadrupol) bir kütle filtresi kullanılır. İyonların doğru şekilde iletilmesi için cihazda vakum pompası, vakum arayüzü ve elektrostatik iyon merceklere bulunur. Bu merceklere, iyonları sistem boyunca odaklar ve yönlendirir. Modern ICP-MS sistemleri ayrıca spektral girişimleri azaltmak için çarpışma/reaksiyon hücresi gibi ek mekanizmalar içerebilir. Son aşamada, iyonlar dedektöre ulaşır ve burada ölçülerek analitik veriler elde edilir.



Şekil 29. ICP-MS cihazının ana bileşenleri

ICP-MS, çok elementli analiz kapasitesi sayesinde farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca uygulamalar arasında içme suyu ve atık suyun çevresel izlenmesi, gıda güvenliği analizleri ve farmasötik ürünlerde safsızlıkların belirlenmesi yer alır. Ayrıca tüketici ürünleri (örneğin oyuncaklar, tekstil), yarı iletken ve saf kimyasal üretimi, yaşam bilimleri, klinik araştırmalar, jeokimya, madencilik, nükleer bilimler, malzeme araştırmaları, metroloji ve akademik çalışmalar ICP-MS'in yoğun olarak kullanıldığı alanlardır.

Tuzlu su çözeltisi, ağır metal içeren çözelti ve Karadeniz'den alınan deniz suyu örnekleri test öncesinde hazırlanmıştır. Bu sulardan, ÇB kaplı sünger kullanılarak buharlaştırma yöntemiyle elde edilen su örnekleri ile başlangıçta hazırlanan su örneklerinin iyon analizlerini karşılaştırmak ve sonuçları değerlendirmek için Agilent 7800 model ICP-MS cihazı kullanılmıştır.

Kızıl Ötesi (IR) Termal Kamera

Kızılötesi (IR) termal görüntüleme, nesnelerin yaydığı ısı enerjisini algılayarak görünür hale getiren ileri bir teknolojidir. İnsan gözü yalnızca elektromanyetik spektrumun küçük bir bölümünü, yani görünür ışığı algılayabilir. Ancak mutlak sıfır sıcaklığın üzerindeki tüm nesneler kızılötesi radyasyon yayar. Görünür ışık kullanarak resim oluşturan geleneksel kameraların aksine termal kameralar, 14.000 nanometreye kadar uzanan uzun dalga boylu kızılötesi spektrumda çalışır. Bu özellik, karanlık, sis, duman gibi görsel engellerin bulunduğu ortamlarda bile görüntüleme imkânı sağlar.

Termal görüntüleme sistemleri, kızılötesi enerjiyi algılayan özel dedektörler ve optik bileşenler kullanır. Yakalanan radyasyon, sensör dizisi üzerinde odaklanır ve binlerce pikselden oluşan bir ızgarada işlenir. Ardından, kameranın yazılımı bu verileri renk kodlu bir termal görüntüye dönüştürür. Genellikle sıcak bölgeler kırmızı, soğuk bölgeler ise mavi tonlarla ifade edilir. Bu yöntem, invaziv olmayan bir ölçüm tekniği olarak hem güvenli hem de hızlıdır.

Kameranın ölçebileceği sıcaklık aralığı genellikle -20 °C ile 2000 °C arasında değişir. Uygulama alanına göre uygun sıcaklık aralığı seçilmelidir. Örneğin, endüstriyel fırınların izlenmesi için yüksek sıcaklık aralığına sahip kameralar tercih edilirken, bina yalıtım analizlerinde daha düşük aralık yeterlidir.

Termal kameraların performansını belirleyen iki temel unsur çözünürlük ve hassasiyettir. Çözünürlük, görüntüdeki detay seviyesini belirler; piksel sayısı arttıkça detay seviyesi de artar. Yaygın çözünürlükler arasında 80×60, 160×120, 320×240 ve 640×480 piksel bulunur. Yüksek çözünürlüklü kameralar küçük sıcaklık farklarını daha net gösterir ve bu nedenle doğruluk gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Hassasiyet ise kameranın algılayabileceği minimum sıcaklık değişimini ifade eder. Yüksek hassasiyet, özellikle endüstriyel testler, enerji verimliliği analizleri ve laboratuvar çalışmaları gibi doğruluk gerektiren uygulamalarda önemli bir yere sahiptir.

Bu teknoloji, savunma sanayiinden enerji sektörüne, tıbbi teşhislerden yapı denetimine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin, elektrik panolarındaki aşırı ısınma noktalarının tespiti, güneş panellerinin verimlilik kontrolü veya arama-kurtarma operasyonlarında canlıların yerinin belirlenmesi termal kameraların sağladığı avantajlardandır. Güneş enerjisi ile su buhar üretimi (GBÜ) sistemlerinde ise termal kameralar, yüzey sıcaklıklarının izlenmesi ve ısı kayıplarının tespiti için önemlidir. Bu sayede sistemin verimliliği artırılır ve enerji dönüşüm süreçleri optimize edilir.

GBÜ çalışması kapsamında tasarlanan ÇB kaplı sünger ile gerçekleştirilen deneylerde 640x480 piksel çözünürlüklü FLIR T620 marka termal kamera kullanılmıştır.

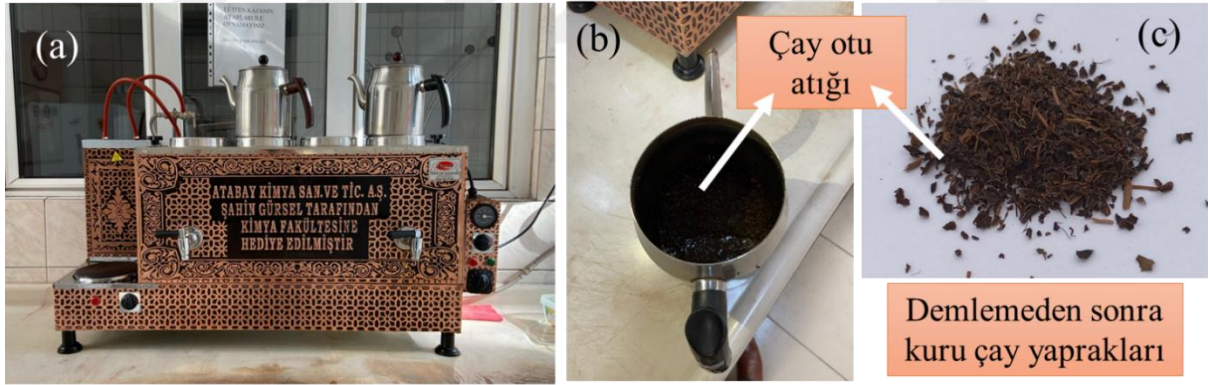
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez çalışmasında, güneş enerjisi kullanılarak farklı kirletici içeren sulardan, tuzlu sudan ve deniz suyundan düşük maliyetli ve pratik bir yöntemle temiz su elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, yenilikçi bir materyal tasarlanmıştır: doğal ticari selülozik süngerin üst yüzeyi, Türk çayı atıklarından üretilen biyokömür ile kaplanarak bir buharlaştırıcı materyal hazırlanmıştır.

Çalışmada, ilk olarak Türk çayı atıklarından biyokömür sentezlenmiş ve yapısal özellikleri farklı karakterizasyon teknikleri kullanılarak detaylı biçimde incelenmiştir.

Türk Çayı Atıklarının Toplanması

Türk çayı için, Kimya Bölümü'nde günde birden fazla demleme işleminden sonra demlik içinde kalan çay yaprağı kalıntıları toplanmıştır. Bu sayede proje için gerekli olan hammadde bol ve maliyetsiz bir şekilde elde edilmiştir. Toplanan çay atıkları yıkanmış ve süzildükten sonra 60°C'de kurutulmuştur (Şekil 30).



Şekil 30. (a) Kimya Bölümü çay ocağında demlenen çaylar. (b) Çay içiminden sonra çaydanlık dibinde kalan nemli çay otu atığı. (c) Kurutulmuş atık çay yaprakları

Türk Çayı Atıklarından Biyokömür Elde Edilmesi

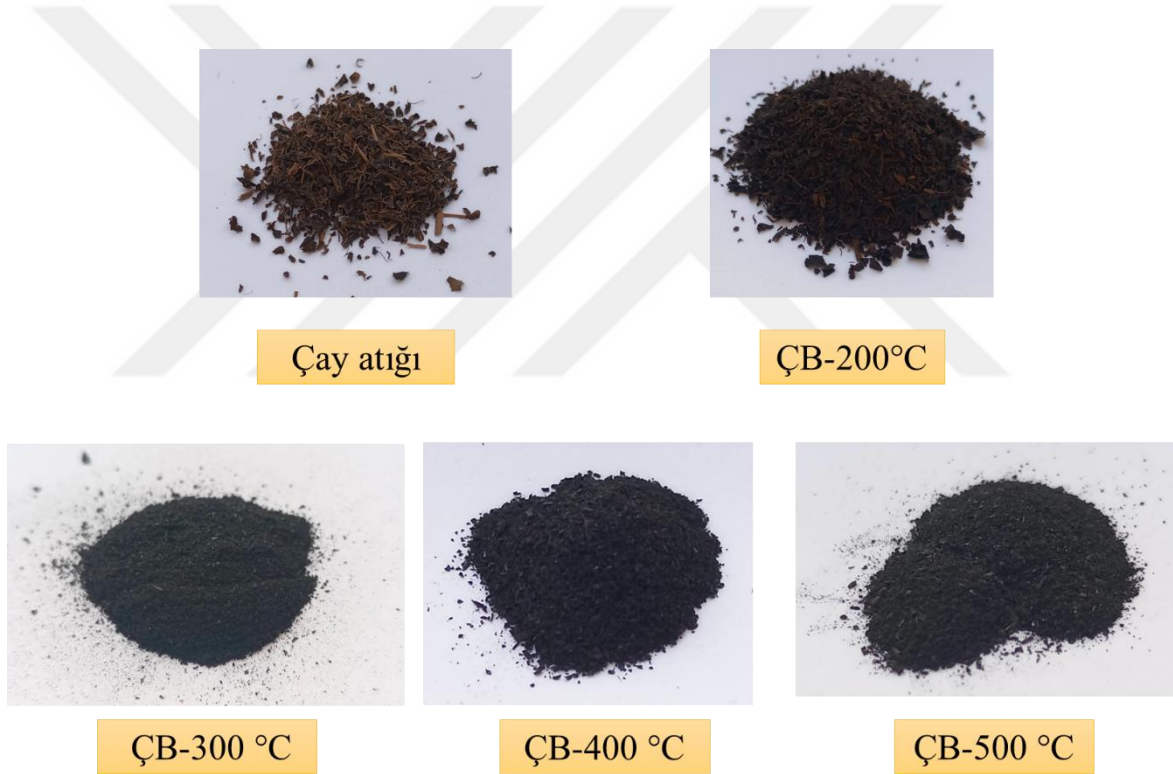
Türk çayı atıklarının piroliz işlemi ile kömürleştirilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla Şekil 31'deki silindir fırında, Argon gaz atmosferi altında, 2 saat boyunca (Pimenta *et al.* 2007; Tu *et al.* 2019; Eom *et al.* 2021) piroliz işlemi gerçekleştirilmiş ve Türk çayı atıklarından çay biyokömürü (ÇB) elde edilmiştir.

Türk çayı atıkları farklı sıcaklıklarda piroliz edilmiş ve bu sıcaklıklarda elde edilen ÇB ürünleri Şekil 32'de sunulmuştur. Şekil 32'deki ÇB'lerin görüntüleri incelendiğinde, 200 °C

piroliz sıcaklığında elde edilen ÇB'nin renk olarak daha çok atık çaya benzediği gözlenmiştir. Bu nedenle optimizasyon çalışması için piroliz sıcaklıkları 300, 400 ve 500 °C olarak belirlenmiştir.

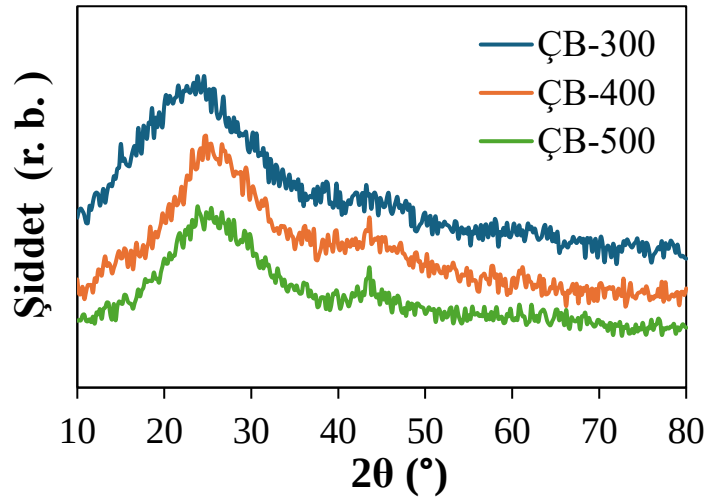


Şekil 31. Atık çay, piroliz işleminde kullanılan silindirik fırın ve Ar tüpü ve çay biyokömürünün (ÇB) fotoğrafları



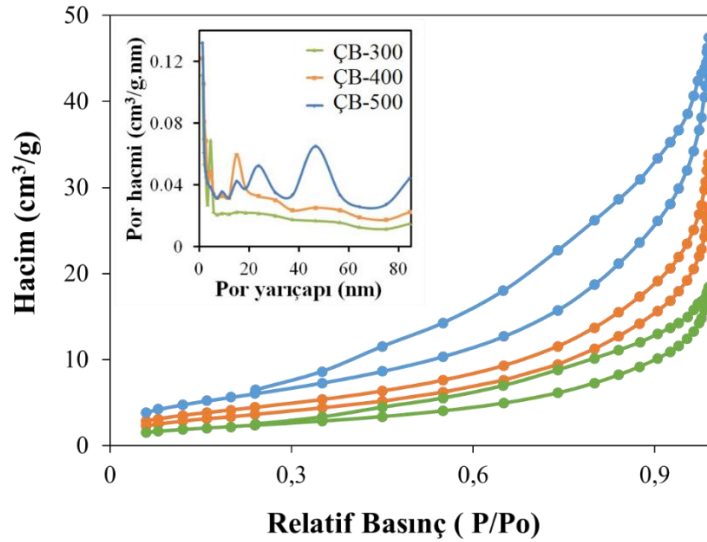
Şekil 32. Farklı sıcaklıklarda piroliz işlemi ile elde edilen ÇB'lerin fotoğrafı

Karbonize edilmiş örneklerin kristal yapısı X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile karakterize edilmiştir. Şekil 33'te görüldüğü üzere, ÇB-300 örneğinin XRD verileri 23°'de belirgin bir pik göstermektedir; bu pik, grafitik karbonun (002) düzlemine karşılık gelmektedir. Ayrıca yaklaşık 43° civarında gözlenen geniş pik, sp² hibritleşmiş karbon bal peteği yapılarının (100) düzlemine ait kırınım ile ilişkilidir (Choi *et al.* 2016; Bhoyate *et al.* 2017).



Şekil 33. 300, 400 ve 500 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB’lerin XRD spektrumu

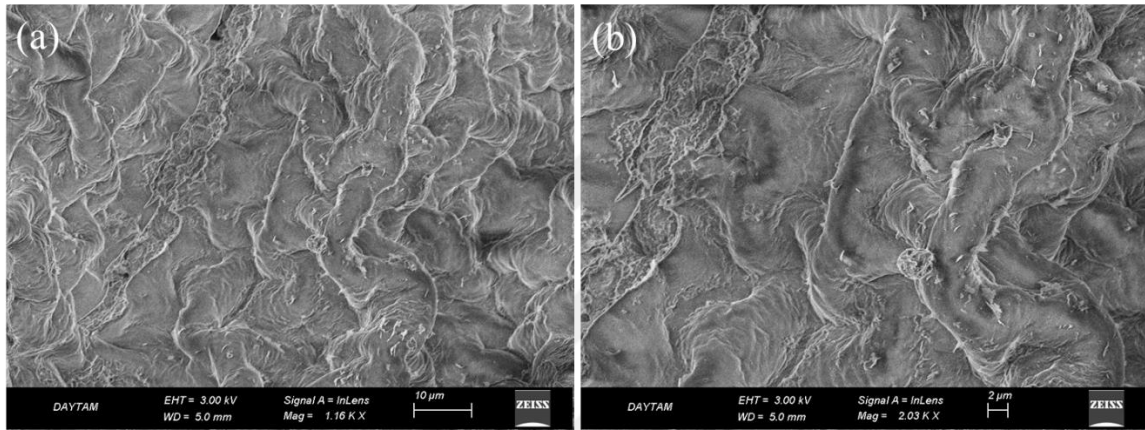
Piroliz sıcaklığı arttıkça, grafitik karbon piki daha yüksek 2θ değerlerine kayarken, (100) düzlemine ait kırınımın yoğunluğu artış göstermiştir. Bu hafif kayma, katmanlar arası mesafenin azalmasından kaynaklanmaktadır. Bragg Yasası’na göre hesaplanan katmanlar arası mesafe (d_{002}) değerleri ÇB-300, ÇB-400 ve ÇB-500 için sırasıyla 0,364 nm, 0,347 nm ve 0,347 nm olarak bulunmuştur. ÇB-400 ve ÇB-500 örnekleri, daha düşük d_{002} değerlerine sahip olduklarından ÇB-300’e kıyasla daha kompakt bir yapıya sahiptir; bu durum ısı iletimini artırma potansiyeli taşımaktadır. ÇB-400 ve ÇB-500 aynı d_{002} değerini gösterdiği için, ÇB hazırlığında enerji verimliliği açısından 400 °C piroliz sıcaklığı tercih edilmiştir.



Şekil 34. 300, 400 ve 500 °C’de hazırlanan ÇB’lerin 77 K’de elde edilen N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi. **İç Şekil:** Numunelerin BJH gözenek boyutu dağılımları

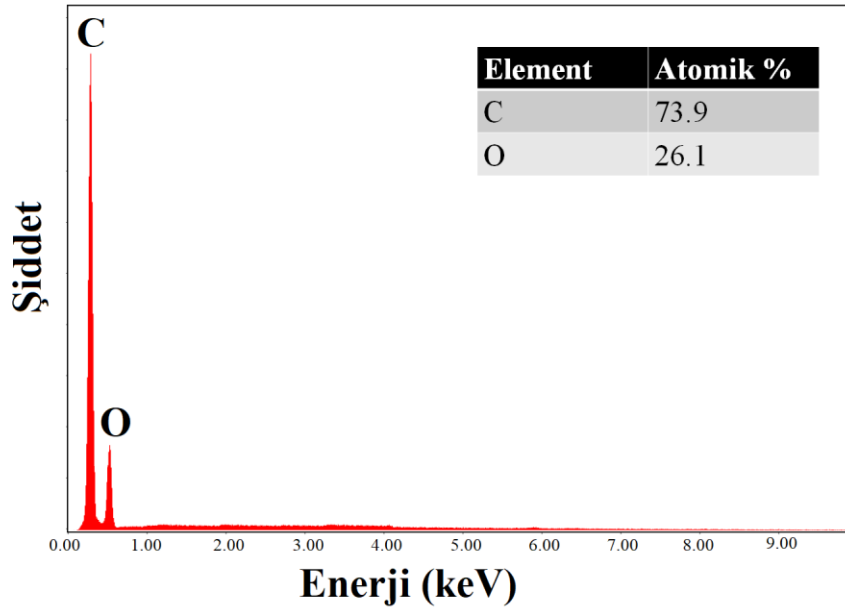
Şekil 34’te 300, 400 ve 500 °C’de hazırlanan ÇB’lerin N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermelerini ve gözenek boyutu dağılımlarını göstermektedir. Numunelerin özgül yüzey alanları Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemi kullanılarak hesaplanmış, gözenek hacimleri

ve ortalama gözenek boyutları ise Barrett-Joyner-Halenda (BJH) yöntemine göre belirlenmiştir. Farklı piroliz sıcaklıklarında elde edilen ÇB numuneleri için gözenek boyutlarının artan sıcaklıkla birlikte; 300 °C'de yaklaşık 2 nm, 400 °C'de yaklaşık 2-22 nm ve 500 °C'de 2-50 nm aralığında değiştiği gözlenmiştir. Bu değişim, sıcaklık artışının organik yapıların ayrışmasıyla gaz salınımının arttığını ve dolayısıyla gözenek yapısının arttığını göstermektedir. 300, 400 ve 500 °C'de hazırlanan ÇB'lerin BET yüzey alanları sırasıyla 98,5, 115,6 ve 125,3 m² g⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, GBÜ uygulamalarında fototermal malzeme olarak ÇB hazırlamak için piroliz sıcaklığı olarak 400 °C seçilmiştir, çünkü bu sıcaklık yüzey alanı ve gözenek yapısı arasında uygun bir denge sağlamaktadır.

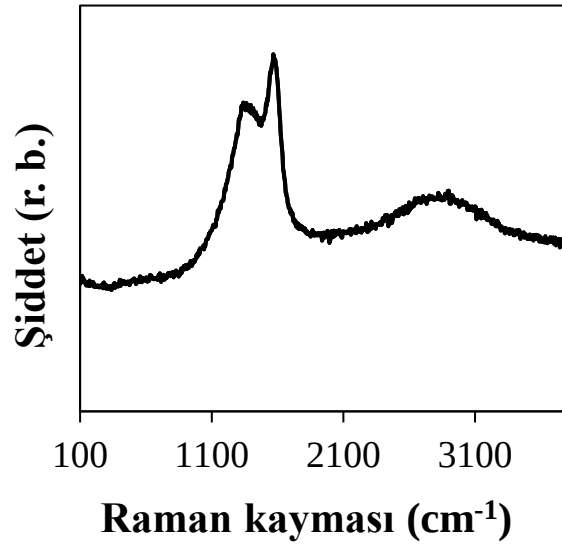


Şekil 35. (a, b) 400 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB'nin farklı büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

Şekil 35'te ÇB-400 örneğinin FESEM görüntüleri, buruşuk ve katmanlı bir morfoloji sergilemektedir. Bu yapı, karbonizasyon sürecinde oluşan grafitik tabakaların düzensiz bir şekilde istiflenmesiyle ilişkilendirilebilir. Elementel analiz amacıyla gerçekleştirilen EDS spektrumu, ÇB-400'ün bileşimini doğrulamış ve örneğin %73,9 oranında karbon (C) ile %26,1 oranında oksijen (O) içerdiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, ÇB'nin başarılı bir şekilde hazırlandığını ortaya koymaktadır (Şekil 36).

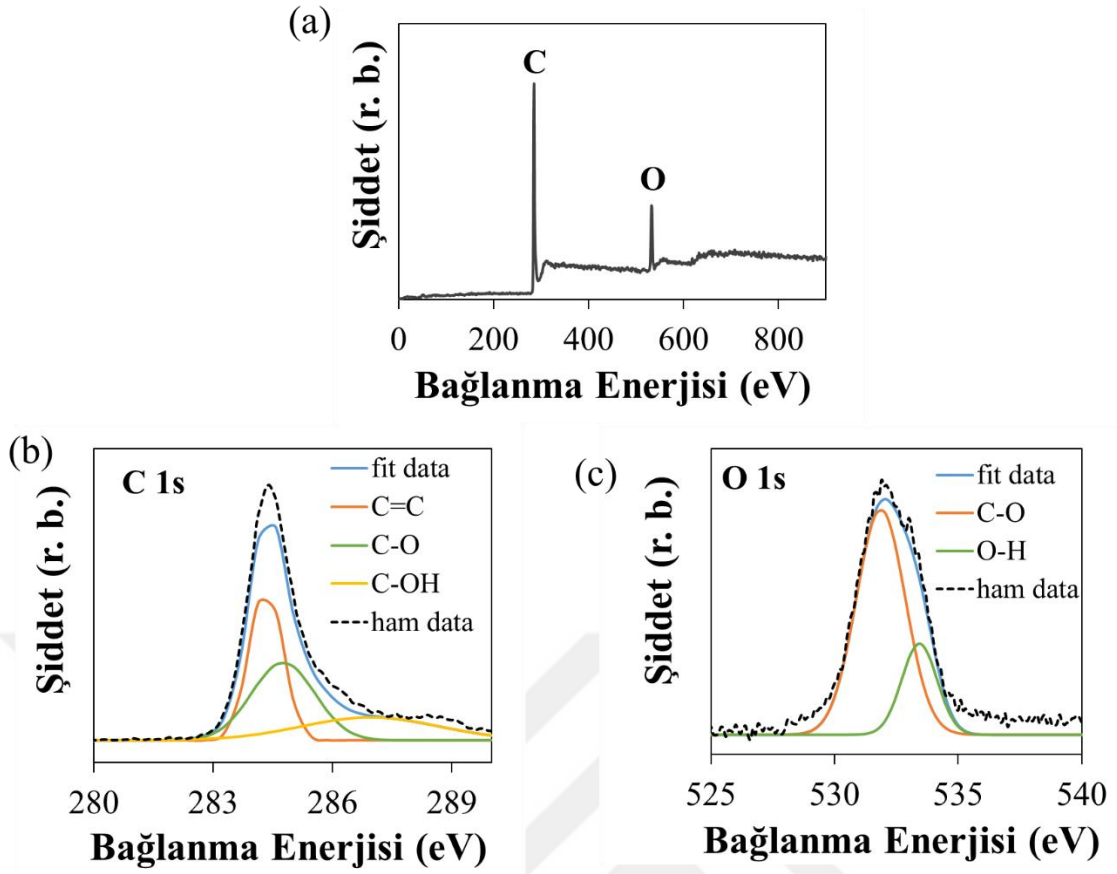


Şekil 36. 400 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB’nin EDS spektrumu. İç şekil: Elementleri ve atomik yüzdeleri gösteren tablo



Şekil 37. 400 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB’nin Raman spektrumu

Şekil 37’de ÇB-400 örneğinin Raman spektrumu gösterilmektedir. Yaklaşık 1583 cm^{-1} ve 1367 cm^{-1} ’de gözlenen iki karakteristik pik, sırasıyla 2D hekzagonal C=C sp^2 atomlarının E_{2g} fononuna (G bandı) ve düzensiz grafitteki sp^3 karbon atomlarının titreşimlerine (D bandı) karşılık gelmektedir (Cañado *et al.* 2011). Pik yoğunlukları oranı (I_D/I_G), grafitleşme derecesinin bir göstergesi olup ÇB-400 için 0,87 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, karbonize yapıda yapısal kusurların varlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca yaklaşık 2900 cm^{-1} ’de gözlenen geniş Raman piki, D+G kombinasyon moduyla ilişkilendirilmekte ve bu durum düzensizlikten kaynaklanmaktadır (Pimenta *et al.* 2007).

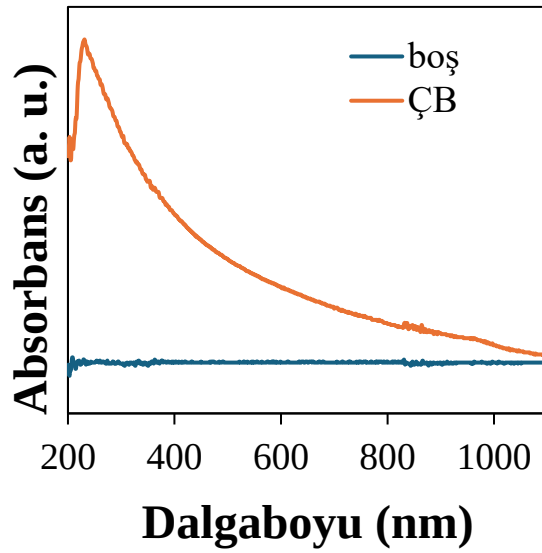


Şekil 38. 400 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen ÇB’nin genel (a) ve ayrıntılı C 1s (b) ve O 1s (c) XPS spektrumları

Şekil 38a’da gösterildiği üzere, ÇB-400’ün kimyasal yapısı XPS analizi ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elementel bileşim olarak %71 karbon (C) ve %29 oksijen (O) bulunması, ÇB’nin başarılı bir şekilde hazırlandığını doğrulamaktadır. Şekil 38b ve c’de C 1s (285,0 eV) ve O 1s (532,0 eV) bölgelerindeki pikler fit edilmiştir. Elde edilen pikler, C 1s için C=C, C—O ve C—OH; O 1s için ise C—O ve O—H kimyasal bağlarına atfedilmektedir (Eom *et al.* 2021).

Tüm bu bulgular dikkate alındığında, ÇB hazırlamak için piroliz sıcaklığı 400 °C olarak optimize edilmiş ve ÇB-400’den üretilen fototerml malzeme sonraki GBÜ çalışmalarında kullanılmıştır.

Şekil 39’da ÇB’nin UV–vis–NIR absorpsiyon spektrumları gösterilmektedir. Analizler özellikle 250–1000 nm dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir. 233 nm’de gözlenen absorpsiyon piki, C—C bağlarının $\pi-\pi^*$ geçişine atfedilmekte olup, bu bulgu literatürde daha önce rapor edilen sonuçlarla tutarlıdır (Abdolkarimi-Mahabadi *et al.* 2021). ÇB, UV bölgesine ek olarak, görünür ve NIR bölgelerinde de belirgin absorpsiyon özellikleri sergilemektedir. Bu durum, ÇB’nin fototerml bir malzeme olarak geniş spektrumlu ışık absorpsiyon kabiliyetine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 39. ÇB'nin UV-vis-NIR absorpsiyon spektrumu

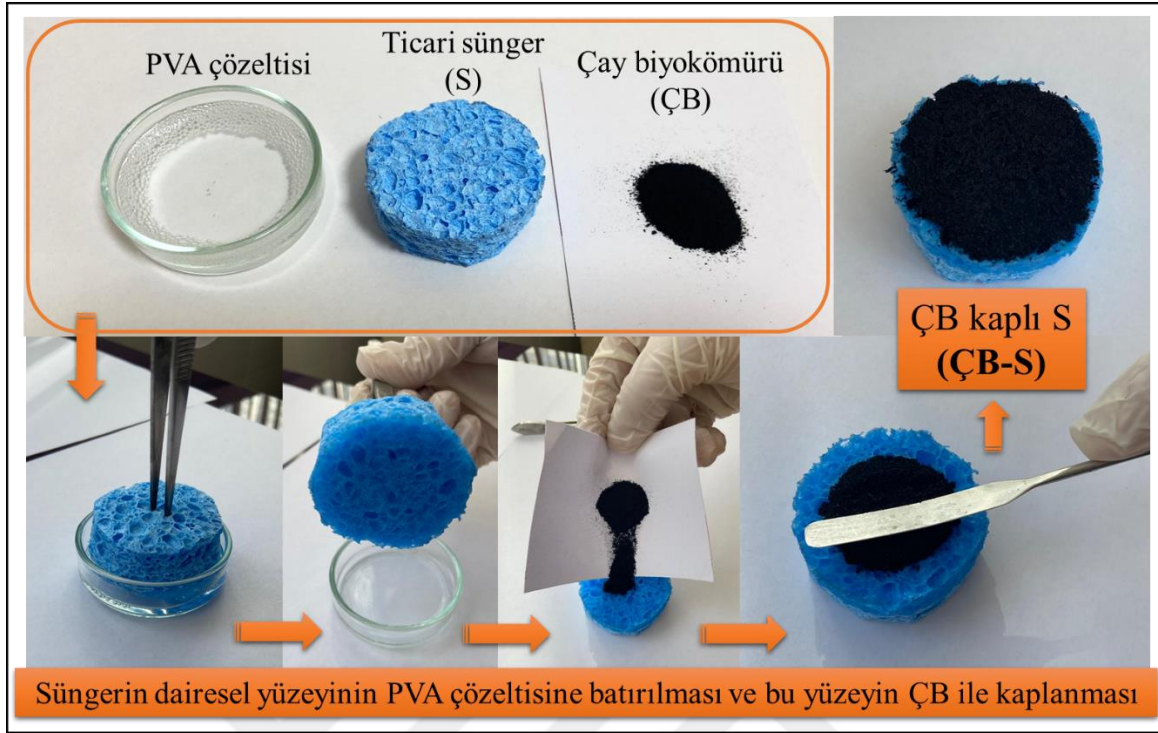
Verimli ve hızlı su alımı, buharlaştırıcıların GBÜ performansını etkileyen kritik bir parametredir. Bu nedenle, doğal selülozik süngerin su absorpsiyon kapasitesi değerlendirilmiştir. Çapı 4 cm ve yüksekliği 1,5 cm olan sünger, 1 dakika boyunca suya daldırılmıştır. Süngerin ağırlığı, daldırma öncesi ve sonrası ölçülmüştür (Şekil 40). Kuru ve ıslak ağırlıklar sırasıyla 1,6110 g ve 20,0084 g olarak kaydedilmiştir. Yaklaşık 12 katlık bu artış, doğal süngerin kuru ağırlığının yaklaşık 11 katı kadar su absorbe edebildiğini göstermektedir.



Şekil 40. Kuru ve ıslak haldeki süngerin su emme kapasitesi

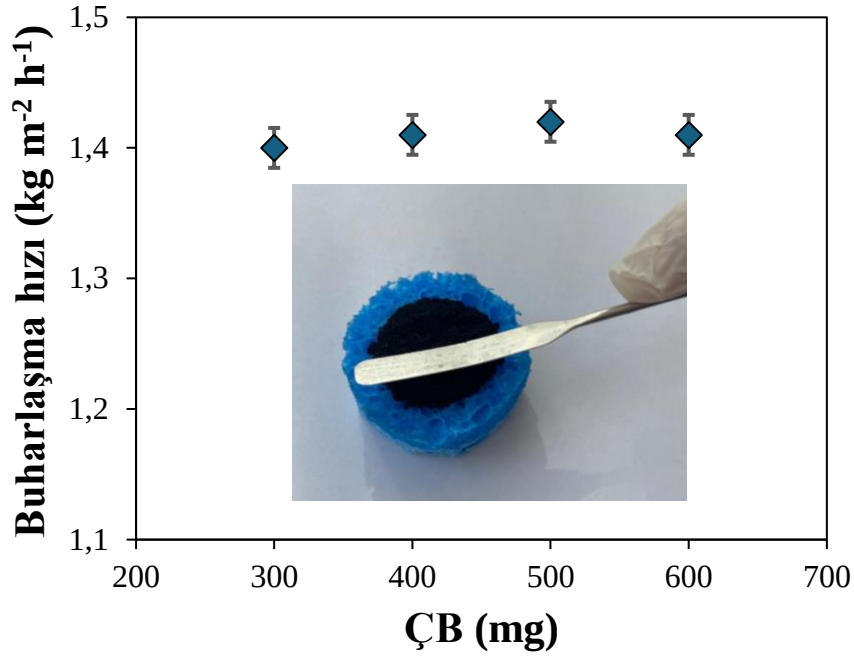
Fototermal buharlaştırıcının hazırlanması için öncelikle ticari doğal selülozik sünger (S), yaklaşık 4 cm çapında silindirik bir forma kesilmiştir (Şekil 41). Ardından, bir polivinil alkol (PVA) çözeltisi hazırlanmış ve süngerin dairesel yüzeyinin bir kısmı bu çözeltiye daldırılmıştır. Daha sonra bu yüzey farklı miktarlardaki ÇB ile kaplanmış ve yüzeydeki ÇB

miktarının optimizasyon çalışması yapılmıştır (Şekil 42). Yüzeyde PVA çözeltisi, ÇB'nin sünger yüzeyine sabitlenmesini sağlamıştır (Şekil 41).



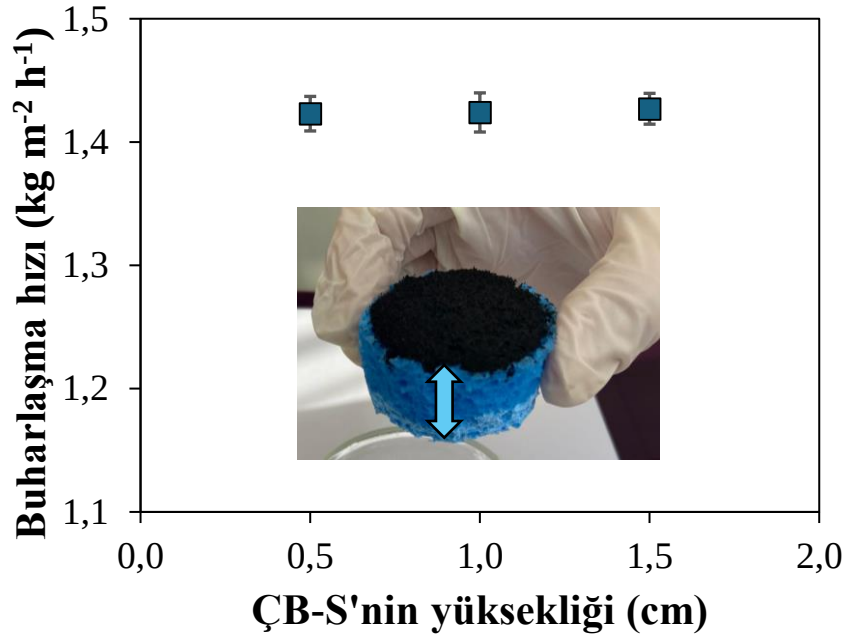
Şekil 41. Fototermal materyalin (ÇB-S) hazırlanmasına ait gösterim

ÇB-S'nin hazırlanmasında sünger yüzeyine kaplanan ÇB miktarının etkisi incelenmiştir. Farklı miktarlarda ÇB ile kaplanan ÇB-S örneklerinin buharlaşma hızları belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 42'de gösterilmiştir. ÇB-S örnekleri, sırasıyla 300, 400, 500 ve 600 mg ÇB kaplamasına karşılık ÇB-3, ÇB-4, ÇB-5 ve ÇB-6 olarak adlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yüzeydeki ÇB miktarı arttıkça buharlaşma hızının yükseldiğini, ancak ÇB-6 örneğinde ÇB-5'e kıyasla hafif bir düşüş olduğunu göstermektedir. Bu durum, aşırı ÇB miktarının sünger aracılığıyla taşınan suyun yeterli şekilde ıslanmasını engelleyerek etkin ısı transferini ve buhar oluşumunu sınırlamasına bağlanmaktadır.



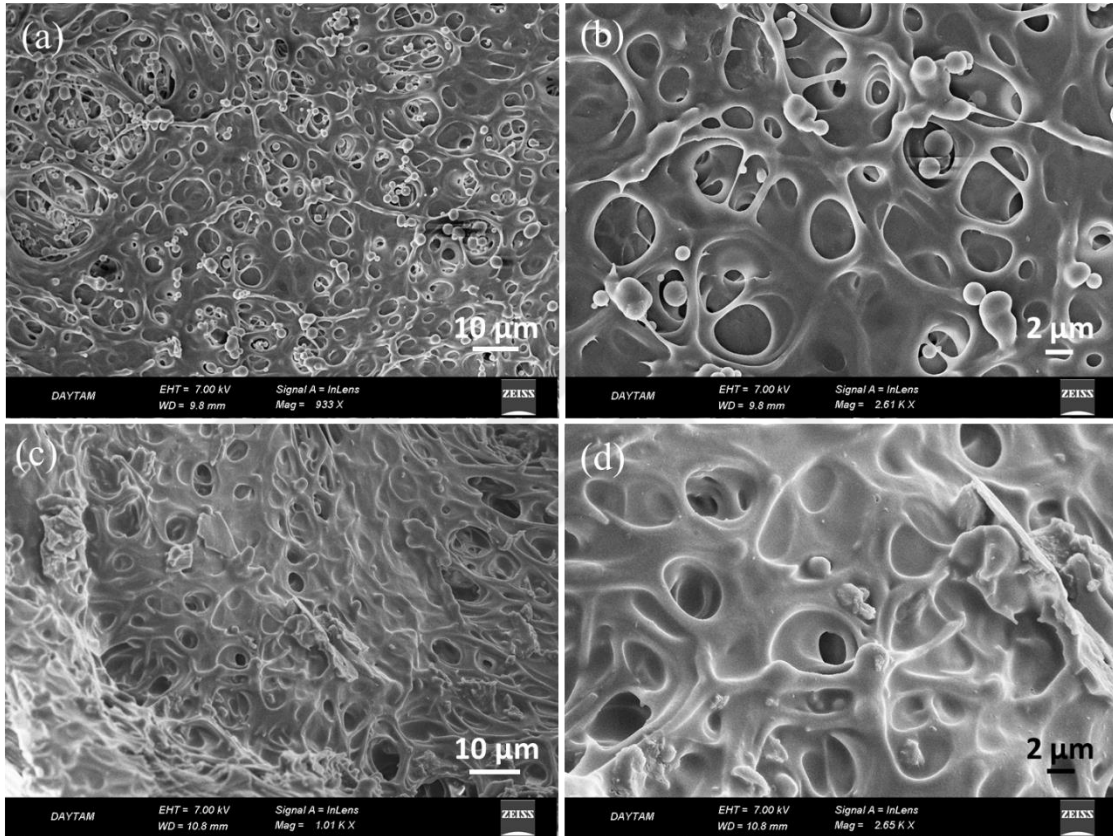
Şekil 42. Farklı ÇB miktarlarıyla hazırlanan ÇB-S'nin buharlaşma hızı

ÇB-S'nin hazırlanmasında sünger yüksekliğinin etkisi de ayrıca araştırılmış ve yüzeyleri 500 mg ÇB ile kaplanan farklı yüksekliklerdeki (0,5; 1,0 ve 1,5 cm) süngerlerin buharlaşma hızları karşılaştırılmıştır. Şekil 43'te gösterilen sonuçlar, sünger yüksekliğinin fototermal malzemenin buharlaşma hızı üzerinde neredeyse hiçbir etkisinin olmadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, hazırlama kolaylığı sağlamak amacıyla fototermal buharlaştırıcı, süngerin satın alındığı haliyle (1,5 cm yükseklik) kullanılarak hazırlanmıştır.



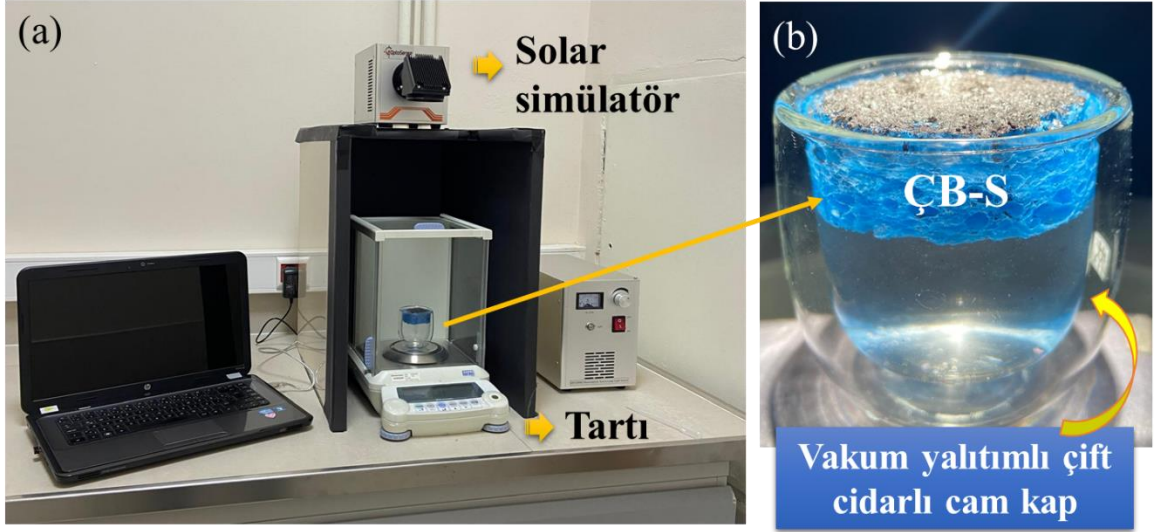
Şekil 43. Farklı S yükseklikleriyle hazırlanan ÇB-S'nin buharlaşma hızı

Sade sünger (S) ve ÇB kaplı süngerin (ÇB-S) yüzey morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (FESEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Şekil 44a ve b’de görüldüğü üzere, S farklı boyutlarda gözeneklerden oluşan gözenekli bir ağ yapısı sergilemektedir. Bu düzensiz şekilde dağılan gözenekler, su alımını artırmak ve buharlaşmayı teşvik etmek açısından avantaj sağlamaktadır. Şekil 44c ve d’de ise ÇB’nin sünger matrisi içerisinde homojen bir şekilde kaplandığı gözlenmektedir. ÇB tabakalarının birikimi, yüzey pürüzlülüğünü artırmakta ve bu artış, güneş ışığı absorpsiyonunun iyileştirilmesine katkıda bulunarak buharlaşma performansını geliştirmektedir.



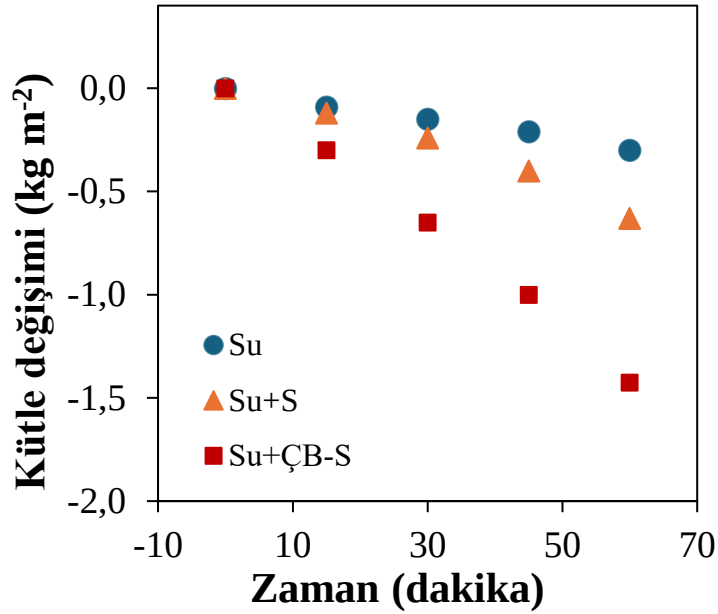
Şekil 44. Farklı büyütmelerde S (a-b) ve ÇB-S’nin (c-d) FESEM görüntüleri

Belirlenen optimum koşullarda hazırlanan buharlaştırıcı materyal (ÇB-S), GBÜ uygulamalarında kullanılmak üzere Şekil 45a’da gösterilen sistemde test edilmiştir. Sistem; bir güneş simülatörü, suyun buharlaşması sonucu oluşan kütle değişimini ölçmek için elektronik analitik terazi ve zamana bağlı buharlaşma oranını belirlemek için bilgisayardan oluşmaktadır. GBÜ deneyleri, çevresel ısı kaybını önlemek amacıyla yalıtımlı çift cidarlı bir kapta bulunan su üzerinde yüzen ÇB-S ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 45b). Deney sırasında sıcaklık değişimleri termal kamera ile izlenmiştir.



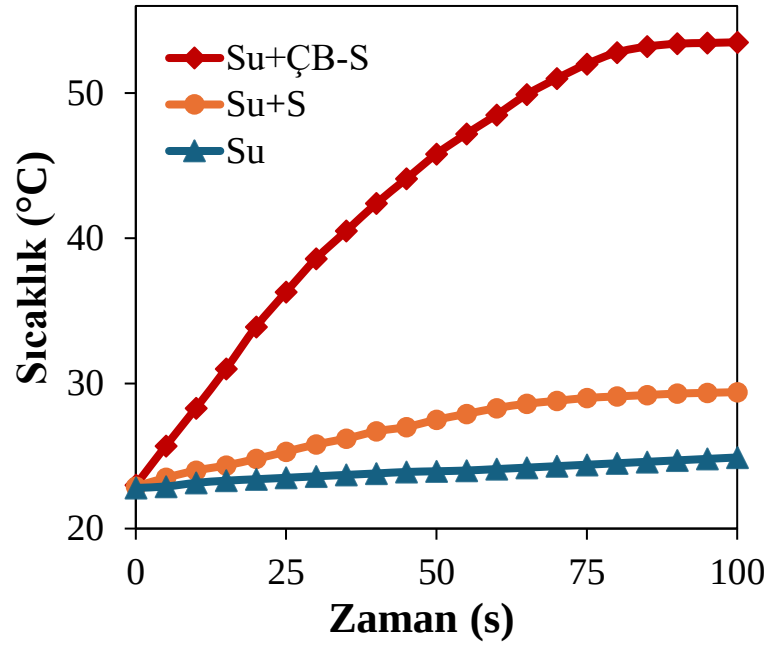
Şekil 45. GBÜ cihazının (a) ve vakum yalıtımlı çift cidarlı cam kaptaki ÇB-S'nin (b) fotoğrafı

ÇB-S'nin buharlaşma performansını değerlendirmek amacıyla, 1 güneş ışınımı altında 60 dakika boyunca suyun kütle kaybı ölçülmüştür (Şekil 46). ÇB-S'nin zamana bağlı buharlaşma hızı $1,42 \text{ kg m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ olarak hesaplanmış olup, bu değer saf suya ($0,31 \text{ kg m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) göre yaklaşık 4,6 kat ve sade süngere ($0,65 \text{ kg m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) göre yaklaşık 2,2 kat daha yüksektir.



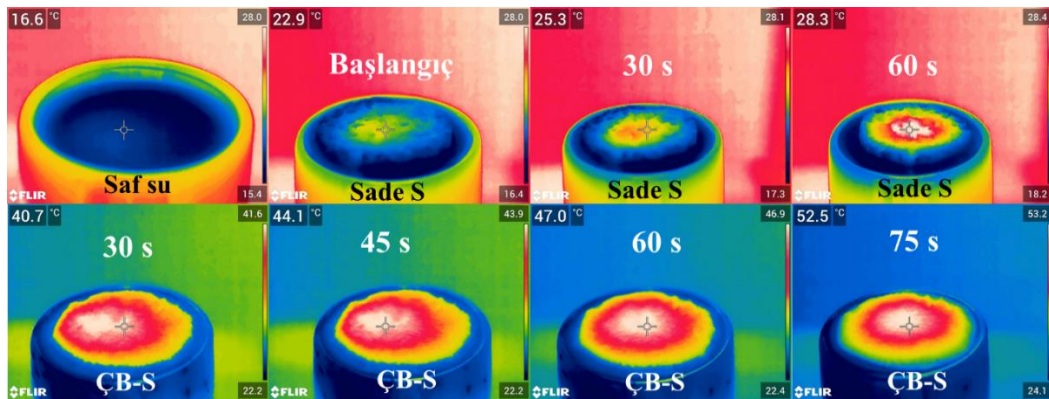
Şekil 46. 1 güneş ışınımı altında ÇB-S, sade S ve saf su ortamında suyun zamana bağlı kütle değişimi

Şekil 47'de saf su, sade S ve ÇB-S'nin 100 saniyelik güneş ışınımı altında yüzey sıcaklık profilleri gösterilmektedir. 100 saniye sonunda saf su ve sade S'nin yüzey sıcaklıkları sırasıyla $24,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $29,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşırken, ÇB-S'nin yüzey sıcaklığı ilk 85 saniyede hızla artmış ve $53,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabitlenmiştir. ÇB-S'nin sade süngere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek yüzey sıcaklığı, karbonize yapının (ÇB) etkin fototermal dönüşüm kabiliyetini ortaya koymaktadır.

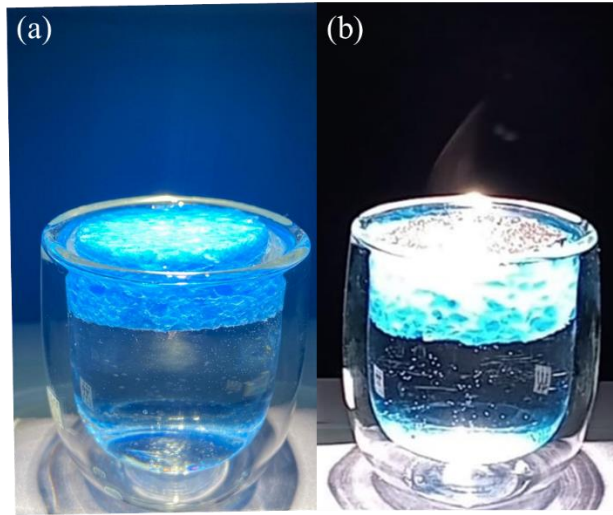


Şekil 47. 1 güneş ışıınımlı altında ÇB-S, sade S ve saf suyun zamana bağılı yüzey sıcaklık değışimi

Şekil 48’de, IR termal kamera kullanılarak 1 güneş ışıınımlı altında saf su, sade S ve ÇB-S’nin zamana bağılı yüzey sıcaklık değışimleri gösterilmektedir. Saf suyun başlangıç yüzey sıcaklığı 16,6 °C olarak kaydedilmiştir. ÇB-S’nin yüzey sıcaklığı ilk 30 saniyede keskin bir artış göstermiş ve 30, 45, 60 ve 75. saniyelerde sırasıyla 40,7 °C, 44,1 °C, 47,0 °C ve 52,5 °C’ye ulaşmıştır. Buna karşılık, sade sünger yüzey sıcaklığı yalnızca 25,3 °C’den 28,3 °C’ye yükselmiştir. ÇB-S ve sade süngerin buharlaştırıcı olarak çalışırken çekilmiş dijital fotoğrafları Şekil 49’da sunulmuştur. ÇB-S’nin yüzeyinde mikro su damlacıklarından oluşan bulut benzeri bir yoğunlaşma deseni gözlenmiş olup, bu durum ÇB yapısının buharlaşma sürecini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

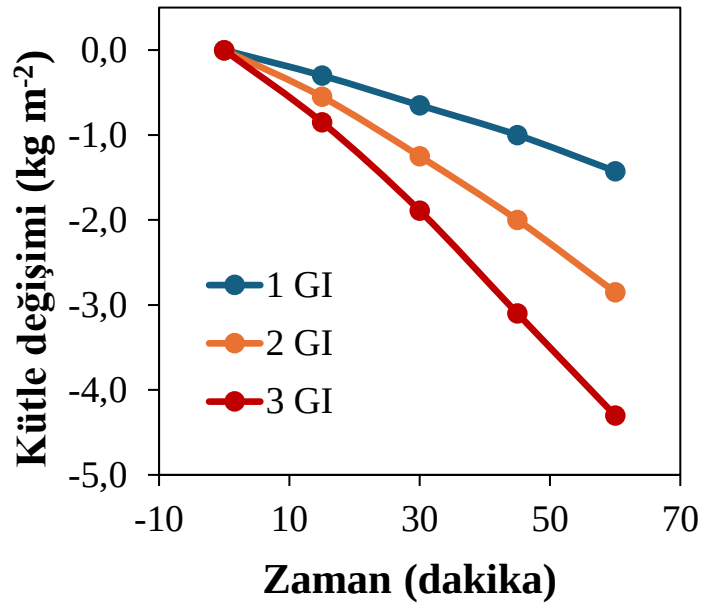


Şekil 48. Saf su, sade S ve ÇB-S'nin farklı zamanlardaki kızılötesi görüntüleri



Şekil 49. 60. saniyedeki güneş ışınımı altında (a) sade S ve (b) ÇB-S'nin fotoğrafları

Şekil 50'de görüldüğü üzere, buharlaşan su miktarı güneş ışınımı yoğunluğu ile orantılı olarak artmıştır. ÇB-S'nin buharlaşma hızları 2 güneş ve 3 güneş ışınımı altında sırasıyla $2,86 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ve $4,34 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ olarak kaydedilmiştir. Bu durum, fototermal malzemenin güneş ışığının miktarına duyarlı olarak iyi bir ışık emilimi gösterdiğini doğrulamıştır.



Şekil 50. Farklı güneş ışınları altında ÇB-S ile zamana bağlı suyun kütle değişimi

ÇB-S, sade S ve saf suyun birim zamanda ve birim alan başına oluşan ısı miktarı yani fototermal verim (buhar dönüşüm verimi) hesaplanmıştır. Güneş buharı dönüşümünün verimi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\eta = \frac{m \cdot h_{LV}}{I} \quad (1)$$

Burada η güneş enerjisiyle fototermal verim, m buharlaşma hızı, h_{LV} hissedilir ısıнын toplam entalpisi ile sıvının faz değişim entalpisi toplamı ve I ise güneş ışığının enerjisidir (Kim *et al.* 2021).

Su molekülleri, üzerlerinde herhangi bir tabaka olmadığı durumlarda tek bir molekül veya molekül kümeleri olarak buharlaştırılabilir. Fakat su moleküllerinin gözenekli bir ortamdan geçerken, tek molekül yerine kümeler halinde buharlaşma olasılıklarının daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Frank *et al.* 2019). Bu sebepten dolayı, ÇB-S ve sade S yüzeyindeki suyun buharlaşma entalpisinin, suyunkinden daha düşük olacağı sonucuna varılmıştır (Zhao *et al.* 2018). Bu nedenle porlu yüzeylerdeki su buharlaşma entalpileri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$m_{su}.h_{su} = m_m.h_m \quad (2)$$

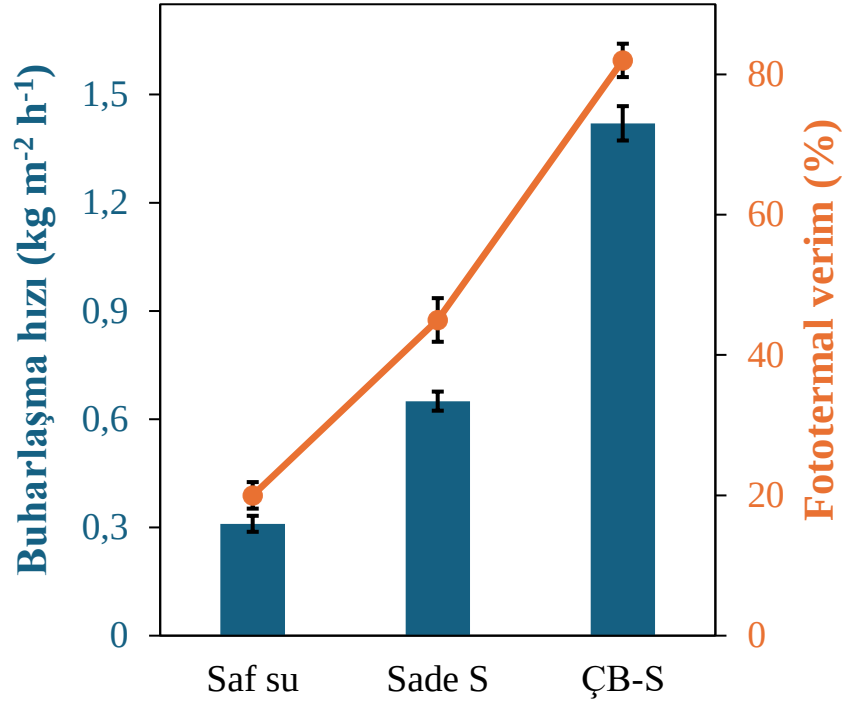
Burada m_{su} ve m_m sırası ile üzerinde herhangi bir materyal bulunmayan suyun ve porlu materyal yüzeyinde bulunan suyun buharlaşma hızlarına ve h_{su} ve h_m ise sırası ile suyun ve porlu materyal yüzeyinde bulunan suyun entalpilerine karşılık gelmektedir (Kim *et al.* 2021). Eşitlik 2 kullanılarak sade S ve ÇB-S için buharlaşma entalpileri hesaplanmış ve Tablo 1’de sunulmuştur. ÇB-S’nin buharlaşma entalpisinin daha düşük olması, karbonize yapının ısı enerjisini daha hızlı transfer edebilmesine ve böylece suyun yığın olarak daha hızlı bir şekilde buharlaşabilmesine atfedilmiştir (Erçarıkcı *et al.* 2024).

Tablo 1. S ve ÇB-S’nin Buharlaşma Entalpileri

Materyal	Buharlaşma entalpisi (h , J g ⁻¹)
Sade S	1926±16
ÇB-S	1512±23

Suyun buharlaşma entalpisi 25 °C’de 2450 J g⁻¹ olarak alınarak işlemler yapılmıştır.

Sonuçlar 5 farklı günde aynı koşullarda elde edilen buharlaşma hızları kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 51. Saf su, sade S ve ÇB-S'nin 1 güneş ışınımı altında buharlaşma hızı ve fototermal verimi

Saf su, sade S ve ÇB-S için buharlaşma entalpileri hesaplandıktan sonra, Eşitlik 1 kullanılarak bu materyallerin fototermal verimi hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 51'de sunulmuştur. Şekil 51'de gösterildiği üzere, saf su, sade S ve ÇB-S'nin fototermal verimleri sırasıyla %20, %45 ve %83 olarak belirlenmiştir. ÇB-S'nin belirgin şekilde daha yüksek enerji verimliliği ve buharlaşma hızı, karbonize yapının üstün fototermal dönüşüm kabiliyetini ortaya koymaktadır. Ayrıca, sünger yüzeyindeki ÇB kaplaması, çevreye yayılan ısı kaybını en aza indiren bir yalıtım bariyeri görevi görerek genel fototermal verimliliği daha da artırmaktadır.

GBÜ sisteminde, ısı kaybı üç ana yolla gerçekleşebilir. Bunlar radyasyon, konveksiyon ve iletimdir. Hazırlanan sistem üzerinde oluşması muhtemel ısı kayıpları Şekil 52'de temsili olarak gösterilmiş ve materyal üzerine gönderilen güneş ışığı tarafından gelen enerjinin dağılımı özetlenmiştir.



Şekil 52. ÇB-S fototermal malzeme için enerji dengesi ve ısı transferi diyagramı

Şekil 52’de gösterilen ısı kayıplarını belirlemek için aşağıda sunulan hesaplamalar yapılmıştır.

- **Radyasyon**

Radyasyon kaybı Stefan–Boltzmann denklemi ve 1 kW m^{-2} güneş enerjisi kullanılarak hesaplanmıştır (Yang *et al.* 2018).

$$ER = \varepsilon A \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (3)$$

Burada ER ısı akısını, ε emisyonu (0.97 olarak kabul edilmiştir), A yüzey alanını (12.5 cm^2), σ Stefan–Boltzmann sabitini ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T çıkılan maksimum sıcaklığı (maksimum $77 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ve T_{∞} deney sırasındaki ortam sıcaklığını göstermektedir (ortalama $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

- **Konveksiyon**

Konveksiyon kaybı, Newton'un soğuma kanunu ile hesaplanmıştır (Yang *et al.* 2018).

$$Q = Ah(T - T_{\infty}) \quad (4)$$

Burada Q ısıyı, h taşınım ısı transfer katsayısını, A ise yüzey alanını (12.5 cm^2) göstermektedir. Konveksiyon ısı transfer katsayısı yaklaşık $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ’dir. T çıkılan maksimum sıcaklığı (maksimum $77 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ve T_{∞} deney sırasındaki ortam sıcaklığıdır ($\sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

- **İletim**

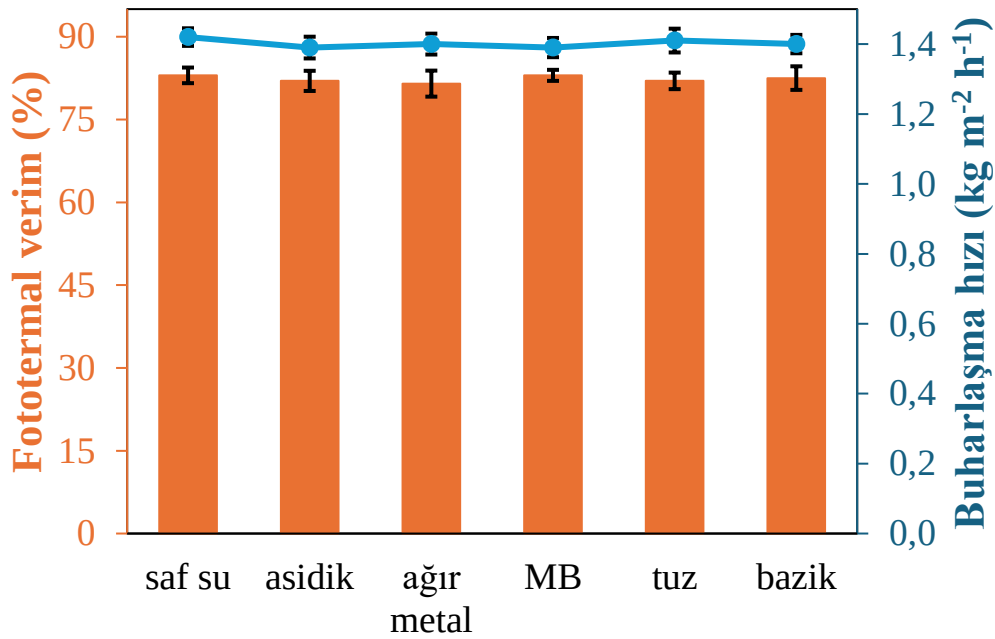
İletim kaybı temel iletim yasası dikkate alınarak hesaplanmıştır (Yang *et al.* 2018).

$$Q = Cm\Delta T \quad (5)$$

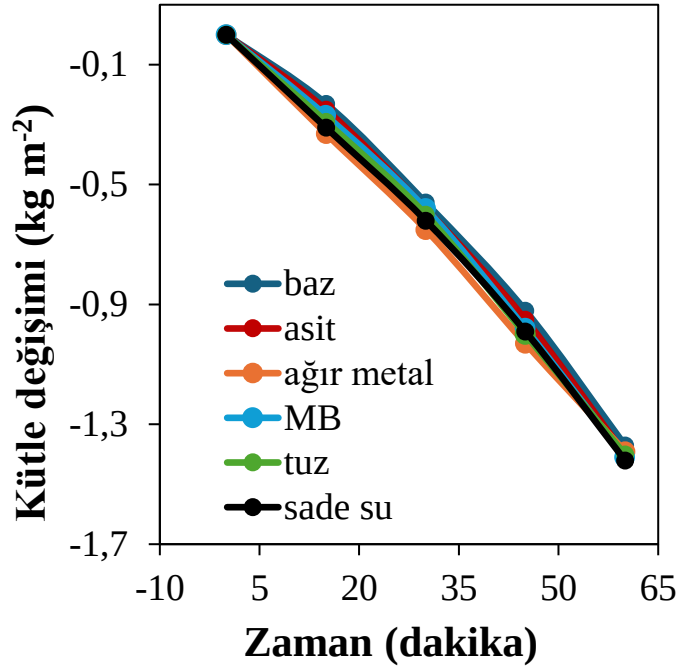
Burada Q ısıyı, C suyun özgül ısı kapasitesini ($4.2 \text{ J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), m su kütlesini ($\sim 30 \text{ g}$) ve ΔT ise 3600 saniyede suyun ısısının ne kadar yükseldiğini gösterir.

Eşitlik 3, 4 ve 5 kullanılarak ÇB-S numunesi için radyasyon, konveksiyon ve iletim kayıpları sırasıyla %5,9, %6,5 ve %4,6 olarak hesaplanmıştır (Yang *et al.* 2018). Bu kadar düşük termal kayıplar, ÇB'nin S yüzeyinde ısı izolasyonunu kolaylaştırdığını göstermektedir.

ÇB-S'nin buharlaştırma performansı; ağır metal (200 mg/L), asit (pH 2), alkali (pH 12), boyar madde (metilen mavisi-MB-1,0 g/L) ve tuz (NaCl-3,5 ağırlık %) içeren farklı çözeltiler için araştırılmıştır. Şekil 53, farklı çözeltilerdeki ÇB-S'nin fototermal verimliliğini ve buharlaşma hızını göstermektedir. Şekil 54'te ise farklı çözeltilerde ÇB-S ile zamana bağlı olarak suyun kütle değişimi sunulmuştur. ÇB-S'nin farklı çözeltiler için gösterdiği fototermal verim, buharlaşma hızı ve suyun kütle değişiminin, saf suyun ÇB-S ile buharlaştırılması için elde edilen sonuçlara yakın olduğu belirlenmiştir. Bu durum hazırladığımız buharlaştırıcının çeşitli çözeltilerde dahi iyi bir GBÜ performansına sahip olduğunu göstermiştir.

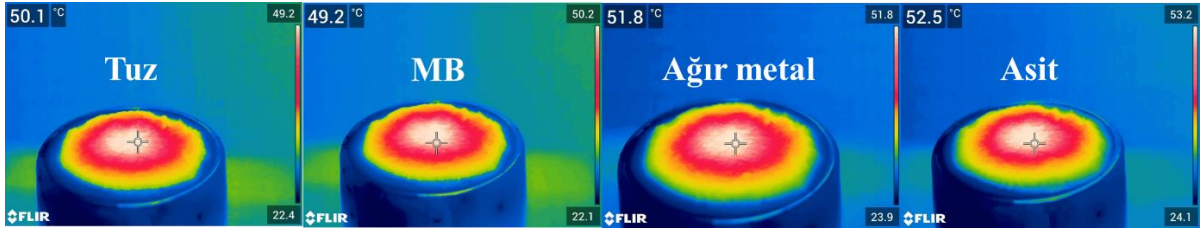


Şekil 53. Asit, baz, tuz, ağır metal ve MB içeren çözeltiler ve saf su, için 1 güneş ışınımı altında ÇB-S'nin fototermal verimi ve buharlaşma hızı



Şekil 54. Farklı çözelti ve saf su ortamında ÇB-S ile zamana bağlı suyun kütle değişimi

Farklı çözelti ortamındaki (tuz, MB, ağır metal ve asit içerikli) ÇB-S'nin yüzey sıcaklığı kütle değişimiyle tutarlı olarak ~50-53 °C aralığında değişim göstermiştir (Şekil 55). Tüm bu bulgular, ÇB-S'nin tuzdan arındırma ve su arıtma uygulamalarında potansiyel bir güneş enerjisiyle su buharlaştırıcısı olduğunu ortaya koymuştur.



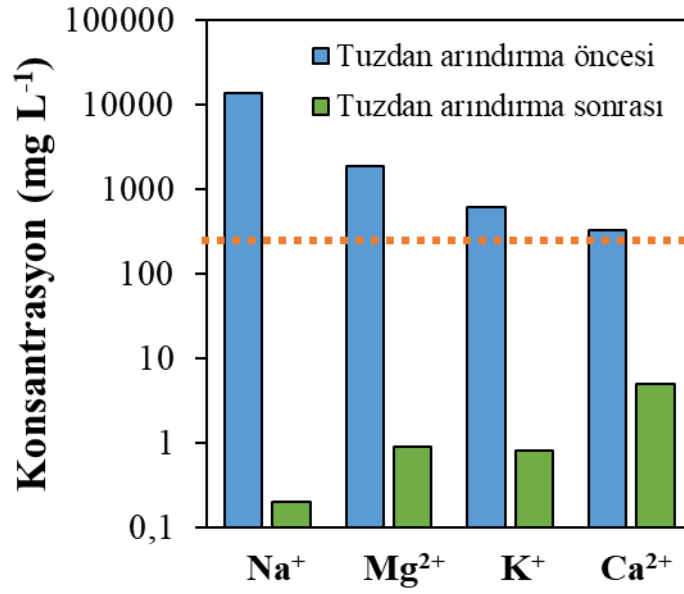
Şekil 55. Ağır metal, tuz, asit ve MB içeren çözeltilerde yüzen ÇB-S'nin kızılötesi görüntüleri

ÇB-S'nin tuzdan arındırma ve kirli suyun arıtılmasındaki performansını araştırmak için, Şekil 56'daki düzenek 10 güneş ışığı altında kullanılmıştır. İlk olarak yaklaşık 20 mL simüle edilmiş deniz suyundan (tuzlu su çözeltisi, kütlece %3,5'lik) 10 mL damıtılmış su elde edilene kadar buharlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 56. ÇB-S ile güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve arıtma için deney düzeneği

ÇB-S ile tuzdan arındırmadan önce ve sonra tuzlu çözeltinin iyon içerikleri ICP-MS kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 57 ve Tablo 2'de sunulan verilere göre, buharlaştırıcımızın yüksek bir tuzdan arındırma performansı sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 57. ÇB-S ile tuzdan arındırma öncesi ve sonrası Na⁺, K⁺, Mg²⁺ ve Ca²⁺ konsantrasyonunun karşılaştırılması

Tablo 2. Simüle Edilmiş Deniz Suyunun ÇB-S ile Güneş Enerjisiyle Tuzdan Arındırılmasından Sonra İyon İçerikleri

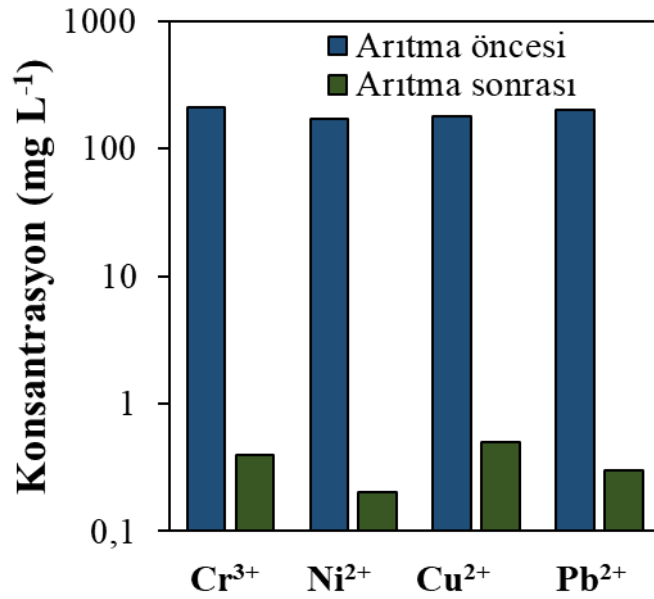
Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ⁺² (ppm)	Ca ⁺² (ppm)
0,2	0,8	0,9	5,0
Başlangıç çözeltinin, 13800 ppm Na ⁺ , 600 ppm K ⁺ , 1845 ppm Mg ⁺² ve 320 ppm Ca ⁺² içerdiği belirlenmiştir.			

ÇB-S'nin tuzdan arındırmadaki güvenilirliğini doğrulamak için GBÜ sisteminde Karadeniz deniz suyu kullanılarak buharlaştırma gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'teki sonuçlar, malzememizin gerçek deniz suyunu başarılı bir şekilde tuzdan arındırdığını göstermiştir. Özellikle, tuzlu suyun ve deniz suyunun güneş enerjisiyle tuzdan arındırılmasından sonra damıtılmış sudaki iyon miktarının, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından içilebilir su için kabul edilen sınırlar içinde olması, malzememizin deniz suyunu tuzdan arındırmada geniş bir uygulamaya sahip olduğunu doğrulamıştır.

Tablo 3. Karadeniz Deniz Suyunun ÇB-S ile Güneş Enerjisiyle Tuzdan Arındırılmasından Sonra İyon İçerikleri

	Na ⁺ (ppm)	Mg ⁺² (ppm)	Ca ⁺² (ppm)
Karadeniz deniz suyu	15571	2112	400
Destilasyon sonrası Karadeniz deniz suyu	0,5	1,1	5,8

Benzer bir çalışma, ağır metal çözeltisinin ÇB-S ile güneş enerjisiyle arıtılması için yapılmış ve sonuçlar Şekil 58 ve Tablo 4'te sunulmuştur. Başlangıçta 200 ppm Pb⁺², 180 ppm Ni⁺², 175 ppm Cu⁺² ve 210 ppm Cr⁺³ içeren çözeltinin konsantrasyonu, ÇB-S ile buharlaştırıldıktan sonra 0,3 ppm Pb⁺², 0,5 ppm Cu⁺², 0,2 ppm Ni⁺² ve 0,4 ppm Cr⁺³ değerlerine düşmüştür (Tablo 4). Buharlaştırıcımızın yüksek güneş enerjisiyle arıtma performansı, iyonların ÇB'ye elektrostatik olarak adsorpsiyonuna atfedilebilir. Öte yandan, asidik ve alkali çözeltilerin ÇB-S ile buharlaştırılması sonrası elde edilen damıtılmış suyun pH değerinin 7'ye yakın olduğu belirlenmiştir (Şekil 59). Tüm bu sonuçlar, ÇB-S fototermal malzemesinin mükemmel güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve arıtma performansına sahip olduğunu ortaya koymuştur.



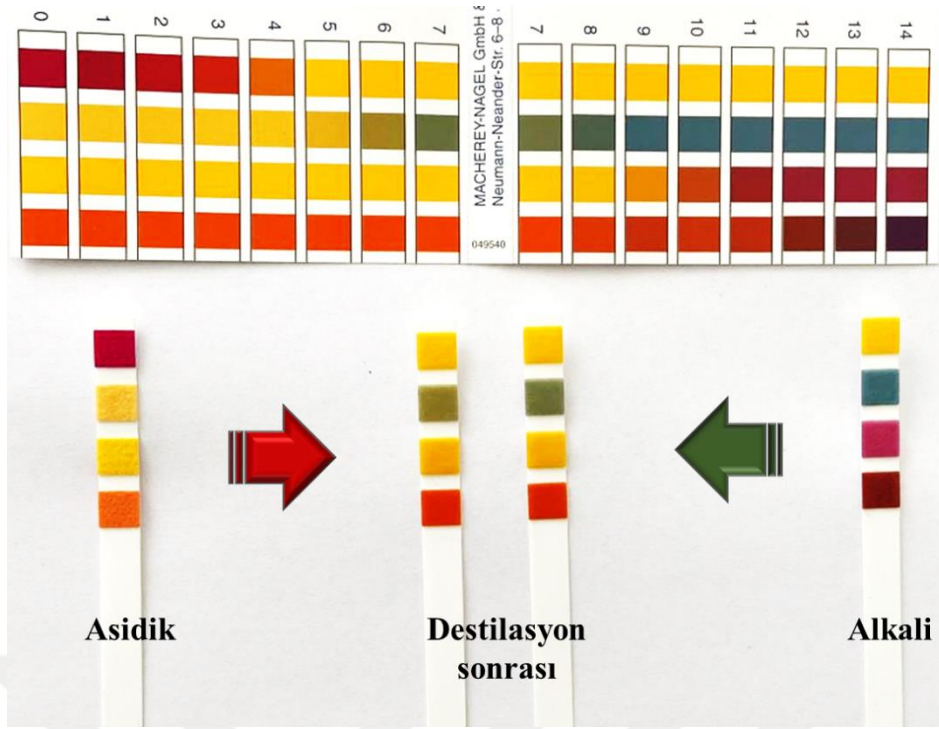
Şekil 58. ÇB-S ile 200 ppm Pb²⁺, 180 ppm Ni²⁺, 175 ppm Cu²⁺ ve 210 ppm Cr³⁺ içeren ağır metal çözeltisinin güneş enerjisiyle arıtma öncesi ve sonrası Pb²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺ ve Cr³⁺ konsantrasyonunun karşılaştırılması

Tablo 4. Ağır Metal Çözeltisinin ÇB-S İle Güneş Enerjisiyle Arıtma Sonrası İyon İçerikleri

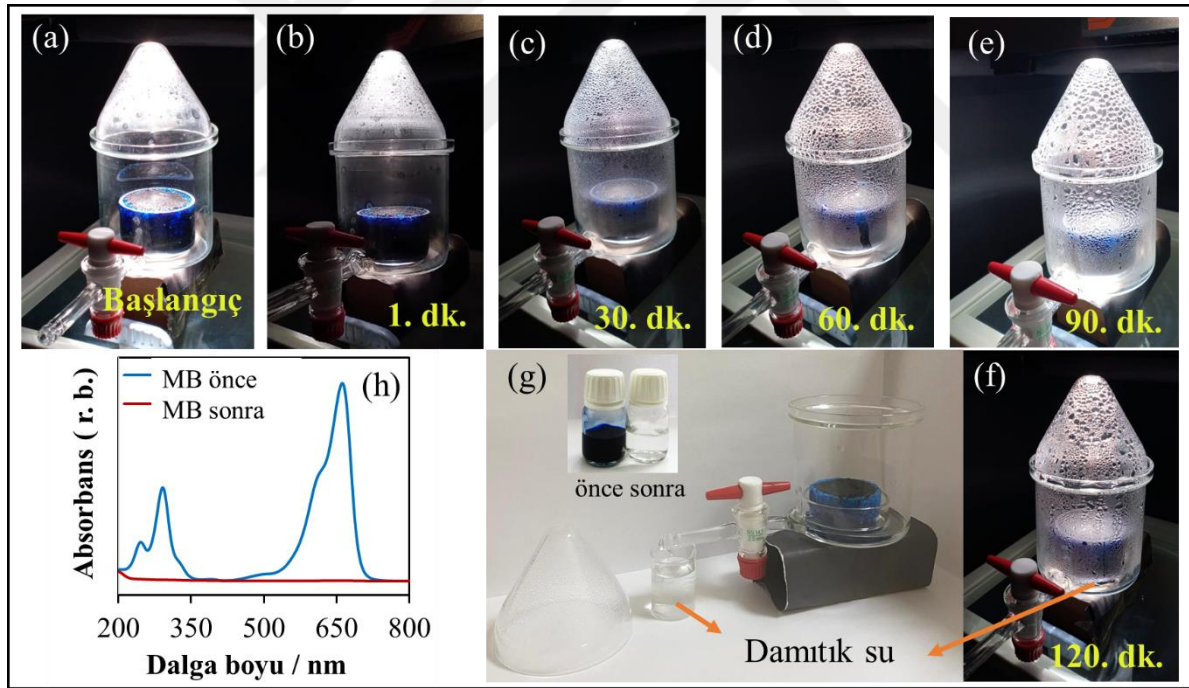
Ağır metal iyonları (ppm)			
Pb ²⁺	Cu ²⁺	Ni ²⁺	Cr ³⁺
0,3	0,5	0,2	0,4

Başlangıç çözeltinin, 200 ppm Pb²⁺, 180 ppm Ni²⁺, 175 ppm Cu²⁺ ve 210 ppm Cr³⁺ içerdiği belirlenmiştir.

ÇB-S'nin boya ile kirlenmiş suyun güneş enerjisiyle arıtılma kapasitesini değerlendirmek amacıyla, 1.0 g L⁻¹ derişime sahip metilen mavisi (MB) çözeltisi GBÜ düzeneğine yerleştirilmiş ve damıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. İki saatlik güneş ışıınımlı ile buharlaştırma sonrasında toplanan su, UV-vis absorpsiyon spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Güneş buharlaştırma sürecini 0, 1, 30, 60, 90 ve 120. dakikalarda belgeleyen fotoğrafik görüntüler Şekil 60a–f' de sunulmaktadır. Kap içerisindeki musluktan elde edilen damıtılmış su (Şekil 60g), görsel olarak berraktır (Şekil 60h iç görüntü) ve UV-vis spektrumu, MB'ye özgü karakteristik absorpsiyon piklerinin tamamen kaybolduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, ÇB-S'nin etkili güneş enerjili arıtma performansını doğrulamakta ve atık su arıtımı uygulamalarındaki potansiyelini vurgulamaktadır.



Şekil 59. Asidik (pH 2) ve alkali (pH 12) çözeltilerin ÇB-S ile güneş enerjisiyle arıtma öncesi ve sonrası pH değerlerinin fotoğrafları



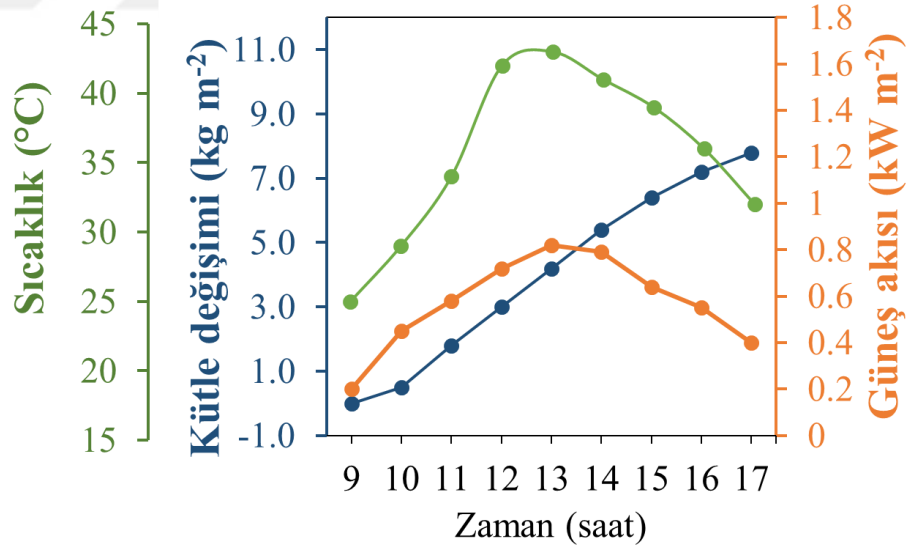
Şekil 60. Farklı zamanlarda (0., 1., 30., 60., 90. ve 120. dakikalarda) ÇB-S ile yapılan güneş enerjisiyle MB boyar madde içerikli çözeltinin arıtılmasının (a-f) ve arıtma sonrası damıtılmış suyun (g) fotoğrafları. İç Şekil: Arıtmadan önce ve sonra MB çözeltisinin fotoğrafı. (h) ÇB-S ile MB boyar madde içerikli çözeltinin güneş enerjisiyle arıtmadan önce ve sonra UV-görünür bölge absorpsiyon spektrumu

Açık hava GBÜ çalışmaları, Ağustos ayında Erzurum koşullarında (ortalama sıcaklık: 30°C; nem: %20; gündeğümü: 05:10; günbatımı: 19:30) Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü bahçesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 61). Şekil 61’de 2, 30 ve 60 dakika

sonrası koni şeklindeki cam kapak içerisinde yoğunlaşan su net bir şekilde gözlenmiştir. Güneş akısındaki, ÇB-S'nin yüzey sıcaklığındaki ve suyun buharlaşması sonucu su kütlesindeki gün içerisindeki zamana göre değişimleri Şekil 62'de sunulmuştur. Şekil 62 incelendiğinde, ÇB-S ile yapılan açık hava deneyleri sonuçlarının laboratuvarında 1 güneş ışığı altında elde edilenler sonuçlara oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, ÇB-S güneş buharlaştırıcımızın doğal güneş ışığı altında GBÜ için kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.



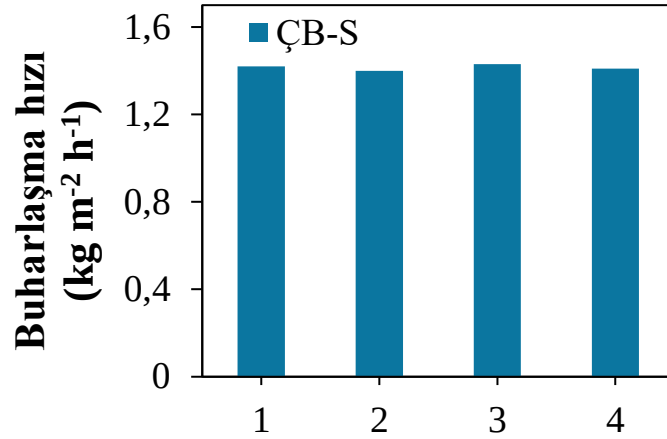
Şekil 61. 0, 30 ve 60 dakika sonrasında ÇB-S ile hazırlanan GBÜ sisteminin açık havada gerçek güneş ışığı altındaki fotoğrafları



Şekil 62. GBÜ için açık havada gerçek güneş ışığı altında ÇB-S ile yapılan deneyde, günlük saat dilimlerine göre güneş akısındaki, ÇB-S'nin yüzeyindeki sıcaklığın ve suyun buharlaşması sonucu su kütlesindeki değişim

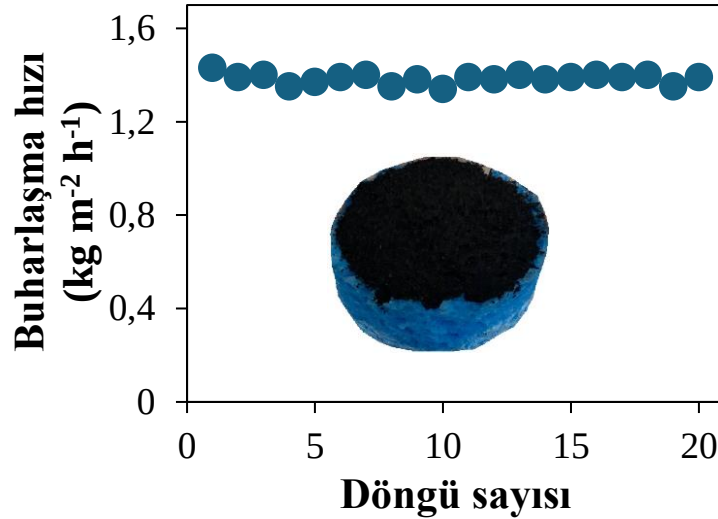
Hazırlanan fototermal buharlaştırıcı malzemenin tekrar üretilebilirliğini test etmek için, aynı yöntem kullanılarak dört ÇB-S hazırlanmış ve GBÜ sisteminde buharlaşma hızı ölçülmüştür (Şekil 63). Her bir ÇB-S'nin buharlaşma hızının birbirine oldukça yakın olduğu

belirlenmiş ve böylece önerilen hazırlama prosedürü kullanılarak aynı yapısal ve kimyasal özelliklere sahip ÇB-S malzemelerin elde edilebileceğini gösterilmiştir.



Şekil 63. Aynı yöntem ile hazırlanan 4 ÇB-S'nin buharlaşma hızı

ÇB-S'nin uzun vadeli GBÜ performans kararlılığını değerlendirmek için, %3,5'lik bir NaCl çözeltisi, bir güneş ışınımı altında 20 ardışık döngü boyunca tuzdan arındırmada kullanılmıştır (Şekil 64). Şekil 64 incelendiğinde, ÇB-S'nin suyun buharlaşma hızı ile (1,43 kg m⁻² h⁻¹) hemen hemen aynı olan 1,39 kg m⁻² h⁻¹'lik ortalama bir buharlaşma hızı gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 64 iç şekilde, 20 döngüden sonra ÇB-S'de belirgin bir deformasyon olmadığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar, ÇB-S'nin mükemmel döngü kararlılığına sahip olduğunu ve birçok kez yeniden kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

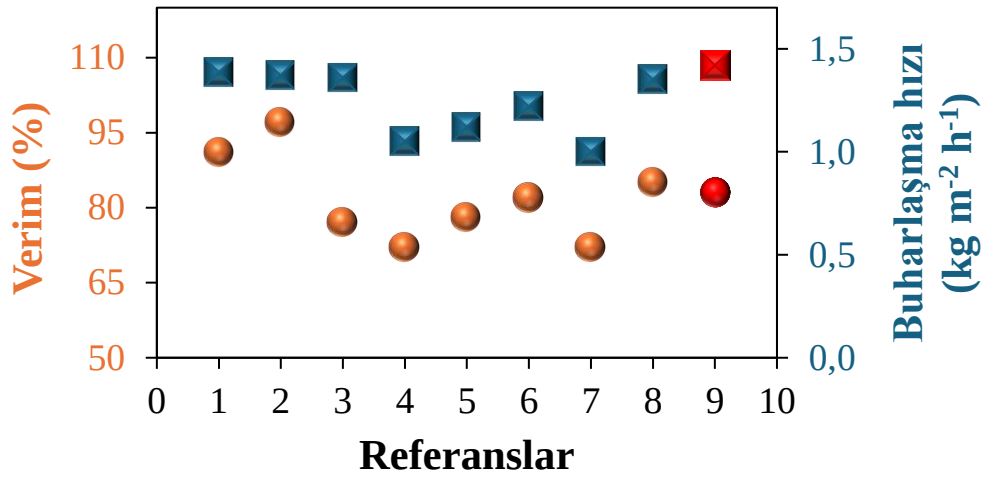


Şekil 64. ÇB-S'nin uzun vadeli GBÜ performansı. İç Şekil: 20 döngüden sonra ÇB-S'nin fotoğrafı

ÇB-S'nin (Şekil 65'teki 9. referans) performansı, literatürde bildirilen biyokütle kaynaklı GBÜ malzemeleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma; gıda atıklarından elde edilen tatlı kireç kabukları (Wilson *et al.* 2020), bir tür mantar olan *Pleurotus eryngii* (Zhou *et al.*

2023), şeker kamışı işleme artıklarından (bagasse) elde edilen selüloz lifleri (Xiong *et al.* 2022), kahve telvesi (Wang *et al.* 2020), mantar temelli bir diğer çalışma (Xu *et al.* 2017), un bazlı absorberler (Li *et al.* 2019), tam çay atığı (Zhou *et al.* 2024) ve yosun kullanımı (Lin *et al.* 2019) üzerine yapılan araştırmalarla gerçekleştirilmiştir (1–8 numaralı referanslar).

ÇB-S'nin, bu malzemelere kıyasla daha üstün buhar üretim hızı ve nispeten yüksek fototermal verimlilik sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, ÇB-S fototermal buharlaştırıcı, güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve atık su arıtımında basit bir hazırlama sürecine sahip düşük maliyetli bir materyal olarak karşımıza çıkmaktadır. Böylece tez kapsamında, küresel açıdan içilebilir su kıtlığını gidermeyi amaçlayan güneş enerjisiyle çalışan tuzdan arındırma ve arıtma sistemleri için sürdürülebilir ve ekonomik bir buharlaştırıcının tasarımı ve güneş enerjisi ile su buharı üretimi uygulaması başarıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 65. ÇB-S ile diğer biyokütle kaynaklı GBÜ malzemelerinin fototermal verim ve buharlaşma hızı açısından karşılaştırılması

SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında; güneş enerjisiyle kirli ve tuzlu sudan temiz su elde etmek için, düşük maliyetli ve kolay bir üretim yaklaşımı ile yeni bir materyal tasarımı hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda; atık Türk çayından elde edilen biyokömür ile ucuz bir selülozik süngerin üst yüzeyi kaplanarak güneş enerjisiyle su buharı üretimi için yeni bir buharlaştırıcı materyal hazırlanmıştır. Bu yeni tasarım materyal, çeşitli teknikler ile karakterize edilmiş ve GBÜ uygulamasında, tuz, ağır metal, boyar madde ve asit/baz içeren sulardan temiz su elde etmek için kullanımı araştırılmıştır. Tez çalışması boyunca elde edilen sonuçlar, aşağıda sıralanmıştır.

ÇB-400 örneğinin FESEM analizleri, buruşuk ve katmanlı bir morfolojiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu yapı, karbonizasyon sürecinde meydana gelen grafitik tabakaların düzensiz istiflenmesi ile ilişkilendirilmektedir. Elementel analiz amacıyla gerçekleştirilen EDS ölçümleri, örneğin kimyasal bileşimini doğrulamış ve %73,9 oranında karbon (C) ile %26,1 oranında oksijen (O) içerdiğini göstermiştir. Elde edilen bu sonuçlar, ÇB'nin hedeflenen özellikler doğrultusunda başarılı bir şekilde hazırlandığını ve karbonizasyon sürecinin etkinliğini kanıtlamaktadır.

ÇB-400 örneğinin XRD analizi, grafitik karbon yapısının belirgin özelliklerini ortaya koymuştur. Analiz sonucunda, yaklaşık 23°'de gözlenen pik, grafitik karbonun (002) düzlemine karşılık gelmektedir. Ayrıca 43° civarında tespit edilen geniş pik, sp² hibritleşmiş karbon bal peteği yapılarının (100) düzlemine ait kırınım ile ilişkilidir. Bragg Yasası'na göre hesaplanan katmanlar arası mesafe (d₀₀₂) değeri 0,347 nm olarak bulunmuştur. Bu değer, ÇB-400 örneğinin daha kompakt bir yapıya sahip olduğunu ve ısı iletim potansiyelinin arttığını göstermektedir.

ÇB-400 örneğinin Raman analizi, grafitik yapının kısmen oluştuğunu ancak belirli kusurlar içerdiğini göstermiştir. 1583 cm⁻¹'deki G bandı sp² karbon titreşimlerine, 1367 cm⁻¹'deki D bandı ise yapısal düzensizliklere işaret etmektedir. I_D/I_G oranı 0,87 olup kusurların varlığını doğrulamaktadır. Ayrıca 2900 cm⁻¹'deki geniş pik, D+G kombinasyon modunu ve düzensizlik kaynaklı yapıyı göstermektedir.

ÇB-400 örneğinin XPS spektrumu incelendiğinde, %71 C ve %29 O elementlerinin varlığına rastlanmıştır. ÇB'nin XPS spektrumunda 285,0 eV'deki C 1s piki fit edildiğinde C=C, CO ve C-OH; 532,0 eV'deki O 1s fit edildiğinde ise C-O, OH kimyasal bağ yapıları tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, ÇB hazırlamak için piroliz sıcaklığı 400 °C

olarak optimize edilmiş ve GBÜ çalışmalarında bu sıcaklıkta üretilen ÇB ile buharlaştırıcı materyal hazırlanmıştır.

ÇB'nin UV-Vis-NIR absorpsiyon spektrumunda 233 nm'deki absorpsiyon piki, C-C bağlarının $\pi-\pi^*$ geçişinden kaynaklanmaktadır. ÇB'nin, UV bölgesine ek olarak, görünür bölgede ve özellikle yakın IR bölgesinde (840-1100 nm) absorpsiyon özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, ÇB'nin fototermal bir malzeme olarak geniş bir dalga boyu aralığında güneş ışığı absorpsiyonuna sahip olduğunu göstermiştir.

S'nin kuru ve ıslak ağırlığı sırasıyla 1,6110 ve 20,0084 g olarak tespit edilmiştir. Kuru ve ıslak S arasında yaklaşık 12 kat fark olmakla birlikte, materyal tasarımında kullanılan doğal süngerin kendi ağırlığının yaklaşık 11 katı kadar su emdiği belirlenmiştir.

300, 400, 500 ve 600 mg ÇB ile kaplanmış ÇB-S'lerin buharlaşma hızları incelendiğinde, yüzeydeki ÇB miktarı arttıkça buharlaşma hızının arttığı, ancak, 600 mg ÇB ile hazırlanan materyalin 500 mg ÇB ile hazırlanan materyale kıyasla buharlaşma hızında hafif bir azalma olduğu gözlenmiştir. Yüzeyde fazlaca bulunan ÇB, sünger tarafından transfer edilen su ile yeterince ıslanmaması ve yeterli ısı-buhar transferi sağlayamaması sonucu düşük bir buharlaşma hızı gözlenmiştir.

Sünger yüksekliğinin ÇB-S'nin buharlaşma hızına etkisi incelenmiş ve yüzeyi 500 mg ÇB ile kaplanmış farklı yüksekliklere (0,5, 1,0 ve 1,5 cm) sahip sünger materyallerin buharlaşma hızları karşılaştırıldığında, süngerin yüksekliğinin fototermal malzemenin buharlaşma hızı üzerinde neredeyse hiç etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle buharlaştırıcı ÇB-S'nin kolay hazırlanması için sünger satın alındığı ilk haliyle (yükseklik: 1,5 cm) kullanılmıştır.

Sade S ve ÇB-S'nin yüzey morfolojisi FESEM ile karakterize edilmiştir. Süngerin farklı boyutlarda gözeneklerden oluşan pürüzlü katmanlı bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Bu düzensiz gözenekler su emilimi ve buharlaşma için avantaj sağlamaktadır. ÇB-S'nin FESEM görüntüsü incelendiğinde, ÇB'nin süngerin gözenekleri içine homojen bir şekilde kaplandığı ve böylece yüzeyin pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir. Bu durumun, materyalin suyu buharlaştırması için daha yüksek bir güneş emilimi sağlamasına katkıda bulunacağı öngörülmüştür.

ÇB-S, sade S ve saf suyun buharlaşma performansını incelemek için 60 dakika boyunca 1 güneş ışınımı altında suyun kütle değişimi incelenmiştir. ÇB-S'nin zamana bağlı buharlaşma hızı $1,42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ olarak hesaplanmış olup, bu değer saf suya ($0,31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) göre yaklaşık 4,6 kat ve sade süngere ($0,65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) göre yaklaşık 2,2 kat daha yüksektir.

Saf su, sade S ve ÇB-S'nin zaman içindeki sıcaklıkları 100 saniyelik ışınlama süresince incelenmiştir. 100 saniye sonunda, saf suyun ve sade S'nin yüzey sıcaklığı sırasıyla 24,9 °C ve 29,4 °C'ye ulaşırken, ÇB-S'nin yüzey sıcaklığı ilk 85 saniye boyunca hızla artmış ve 53,4 °C'de sabitlenmiştir. ÇB-S'nin maksimum yüzey sıcaklığının sade S'ye kıyasla daha yüksek olması karbonize yapının (ÇB) güçlü fototermal dönüşüm etkisini göstermiştir.

Saf su, sade S ve ÇB-S'nin yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi 1 güneş ışınlamı altında kızılötesi kamera ile izlenmiştir. Saf suyun başlangıç sıcaklığı 16,6 °C'dir. ÇB-S'nin yüzey sıcaklığı ilk 30 saniyede keskin bir şekilde artmış ve 30, 45, 60 ve 75. saniye sonra sırasıyla 40,7, 44,1, 47,0, ve 52,5 °C olarak kaydedilmiştir. Buna karşılık, sade S'nin yüzey sıcaklığı, 30 ve 60 saniye sonra sırasıyla 25,3 °C ve 28,3 °C'dir.

ÇB-S ve sade S'nin buharlaştırıcı olarak fotoğrafları incelendiğinde, 60. saniyedeki güneş ışınlamı altında ÇB-S'nin yüzeyinde gözlenen mikro su damlacıklarından oluşan bulutumsu görüntü, ÇB yapısının hızlı buharlaşmayı desteklediğini kanıtlar niteliktedir.

Işık yoğunluğu 2 ve 3 güneş ışığına çıkarıldığında, ÇB-S fototermal malzemenin buharlaşma hızı sırasıyla 2,86 ve 4,34 kg m⁻² h⁻¹'e yükselmiştir. Bu durum, fototermal malzemenin güneş ışığının miktarına duyarlı olarak iyi bir ışık Emilimi gösterdiğini doğrulamıştır.

ÇB-S, sade S ve saf suyun birim zamanda ve birim alan başına oluşan ısı miktarı yani fototermal verim (buhar dönüşüm verimi) hesaplanmıştır. Saf su, sade S ve ÇB-S için fototermal verim sırasıyla %20, %45 ve %83 olarak belirlenmiştir. ÇB-S'nin fototermal veriminin, diğerlerine göre oldukça yüksek olması, karbonize yapının yüksek oranda güneş ışığını absorplama ve termal enerjiye dönüştürme özelliğine atfedilmiştir.

ÇB-S için radyasyon, konveksiyon ve iletim kayıpları sırasıyla %5,9, %6,5 ve %4,6 olarak hesaplanmıştır. Bu kadar düşük termal kayıplar, S yüzeyindeki ÇB'nin ısı izolasyonunu kolaylaştırdığını göstermiştir.

ÇB-S'nin farklı sulu ortamlarda (ağır metal, asidik, bazik, boya ve tuzlu çözeltiler) gösterdiği buharlaşma performansı, saf su ile karşılaştırılabilir düzeyde bulunmuştur. Fototermal verimlilik, buharlaşma hızı ve kütle değişimi verileri, malzemenin çeşitli su koşullarında kararlı SSG performansı sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, yüzey sıcaklıklarının 51–52 °C aralığında sabit kalması, ısı yönetimi açısından etkinliğini doğrulamaktadır. Bu bulgular, ÇB-S'nin güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve su arıtma uygulamaları için yüksek potansiyele sahip, enerji verimli ve sürdürülebilir bir aday olduğunu göstermektedir.

ÇB-S'nin tuzdan arındırma ve kirli suyun arıtılmasındaki performansı araştırılmıştır. İlk olarak yaklaşık 20 mL simüle edilmiş deniz suyundan (tuzlu su çözeltisi, kütlece %3,5'lik) 10 mL damıtılmış su elde edilene kadar buharlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. ÇB-S ile tuzdan arındırmadan önce ve sonra tuzlu çözeltinin iyon içerikleri ICP-MS kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre, buharlaştırıcımızın yüksek bir tuzdan arındırma performansı sergilediği belirlenmiştir.

ÇB-S'nin tuzdan arındırmadaki güvenilirliğini doğrulamak için GBÜ sisteminde Karadeniz deniz suyu kullanılarak buharlaştırma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, malzememizin gerçek deniz suyunu başarılı bir şekilde tuzdan arındırdığını göstermiştir. Özellikle, tuzlu suyun ve deniz suyunun güneş enerjisiyle tuzdan arındırılmasından sonra damıtılmış sudaki iyon miktarının, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından içilebilir su için kabul edilen sınırlar içinde olması, malzememizin deniz suyunu tuzdan arındırmada geniş bir uygulamaya sahip olduğunu doğrulamıştır.

Ağır metal çözeltisinin ÇB-S ile güneş enerjisiyle arıtılması için yapılan çalışmada, başlangıçta 200 ppm Pb^{+2} , 180 ppm Ni^{+2} , 175 ppm Cu^{+2} ve 210 ppm Cr^{+3} içeren çözeltinin konsantrasyonu, ÇB-S ile buharlaştırıldıktan sonra 0,3 ppm Pb^{+2} , 0,5 ppm Cu^{+2} , 0,2 ppm Ni^{+2} ve 0,4 ppm Cr^{+3} değerlerine düşmüştür.

Buharlaştırıcımızın yüksek güneş enerjisiyle arıtma performansı, iyonların ÇB'ye elektrostatik olarak adsorpsiyonuna atfedilebilir.

Asidik ve alkali çözeltilerin ÇB-S ile buharlaştırılması sonrası elde edilen damıtılmış suyun pH değerinin 7'ye yakın olduğu belirlenmiştir.

ÇB-S'nin metilen mavisi (MB) ile kirlenmiş suyun güneş enerjisiyle arıtılmasında yüksek etkinlik gösterdiği belirlenmiştir. İki saatlik güneş ışıını sonrasinda elde edilen distilatın UV-vis analizinde MB'ye özgü absorpsiyon piklerinin tamamen kaybolması, boyanın tamamen uzaklaştırıldığını doğrulamaktadır. Görsel olarak berrak distilat ve spektroskopik veriler, ÇB-S'nin güneş enerjili arıtma sürecinde başarılı bir performans sergilediğini ve atık su arıtımı uygulamalarında güçlü bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Açık hava GBÜ çalışmaları, Ağustos ayında Erzurum koşullarında (ortalama sıcaklık: 30°C; nem: %20; gündeğümü: 05:10; günbatımı: 19:30) Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü bahçesinde gerçekleştirilmiştir. Güneş akısındaki, ÇB-S'nin yüzey sıcaklığındaki ve suyun buharlaşması sonucu su kütlesindeki gün içerisindeki zamana göre değişimler incelendiğinde, ÇB-S ile yapılan açık hava deneyleri sonuçlarının laboratuvar da güneş ışığı altında elde edilenler sonuçlara oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum,

ÇB-S güneş buharlaştırıcımızın doğal güneş ışığı altında GBÜ için kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Hazırlanan fototermal buharlaştırıcı malzemenin tekrar üretilebilirliğini test etmek için, aynı yöntem kullanılarak dört ÇB-S hazırlanmış ve GBÜ sisteminde buharlaşma hızı ölçülmüştür. Her bir ÇB-S'nin buharlaşma hızının birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiş ve böylece önerilen hazırlama prosedürü kullanılarak aynı yapısal ve kimyasal özelliklere sahip ÇB-S malzemelerin elde edilebileceğini gösterilmiştir.

ÇB-S'nin uzun vadeli GBÜ performans kararlılığını değerlendirmek için, %3,5'lik bir NaCl çözeltisi, bir güneş ışıını altında 20 ardışık döngü boyunca tuzdan arıdırmada kullanılmıştır. 20 döngü sonrası, ÇB-S'nin suyun buharlaşma hızı ile ($1,43 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) hemen hemen aynı olan $1,39 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 'lik ortalama bir buharlaşma hızı göstermiştir. Ayrıca, 20 döngüden sonra ÇB-S'de belirgin bir deformasyon olmadığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar, ÇB-S'nin mükemmel döngü kararlılığına sahip olduğunu ve birçok kez yeniden kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

ÇB-S'nin performansı, literatürde bildirilen biyokütle çıkışlı GBÜ karşılaştırılmıştır. ÇB-S'nin, bu malzemelere kıyasla daha üstün buhar üretim hızı ve nispeten yüksek fototermal verimlilik sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, ÇB-S fototermal buharlaştırıcı, güneş enerjisiyle tuzdan arıdırma ve atık su arıtımında basit bir hazırlama sürecine sahip düşük maliyetli bir materyal olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tüm sonuçlar, küresel açıdan içilebilir su kıtlığını gidermeyi amaçlayan güneş enerjisiyle çalışan tuzdan arıdırma ve arıtma işlemleri için sürdürülebilir ve ekonomik bir buharlaştırıcının hazırlandığını ve güneş enerjisi ile su buharı üretimi uygulamasının başarıyla gerçekleştirildiğini göstermiştir.

KAYNAKÇA

- Abdolkarimi-Mahabadi, M., Bayat, A., & Mohammadi, A. (2021). Use of UV-Vis spectrophotometry for characterization of carbon nanostructures: a review. *Theoretical and Experimental Chemistry*, 57(3), 191-198.
- Akgül, G. (2017). Biyokömür: Üretimi ve Kullanım Alanları. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(4), 485-499.
- Arie, A. A., Tekin, B., Demir E., Demir-Cakan, R. 2019. “Hard carbons derived from waste tea bag powder as anodes for sodium ion battery”, *Materials Technology*, 34, 9, 515–524.
- Bhojate, S., Ranaweera, C. K., Zhang, C., Morey, T., Hyatt, M., Kahol, P. K., ... & Gupta, R. K. (2017). Eco-friendly and high performance supercapacitors for elevated temperature applications using recycled tea leaves. *Global Challenges*, 1(8), 1700063.
- Cançado, L. G., Jorio, A., Ferreira, E. M., Stavale, F., Achete, C. A., Capaz, R. B., ... & Ferrari, A. C. (2011). Quantifying defects in graphene via Raman spectroscopy at different excitation energies. *Nano letters*, 11(8), 3190-3196.
- ÇAYKUR (2023). Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2022 Yılı Çay Sektörü Raporu, Mayıs 2023.
- Chen, C., Kuang, Y., & Hu, L. (2019). Challenges and opportunities for solar evaporation. *Joule*, 3(3), 683-718.
- Choi, C., Seo, S. D., Kim, B. K., & Kim, D. W. (2016). Enhanced lithium storage in hierarchically porous carbon derived from waste tea leaves. *Scientific reports*, 6(1), 39099.
- Debnath B., Haldar D., Purkait, M. K. 2022. “Environmental remediation by tea waste and its derivative products: A review on present status and technological advancements”, *Chemosphere*, 300, 134480.
- Deng, Q., Sharretts, T., Ali, T., Ao, Y. Z., Chiarelli, D. D., Demeke, B., ... & Davis, K. F. (2025). Deepening water scarcity in breadbasket nations. *Nature Communications*, 16(1), 1110.
- Ding, T., Zhou, Y., Ong, W. L., & Ho, G. W. (2021). Hybrid solar-driven interfacial evaporation systems: Toward high utilization of solar energy beyond water production. *Materials Today*, 42, 178–191.
- Eom, H., Kim, J., Nam, I., & Bae, S. (2021). Recycling black tea waste biomass as activated porous carbon for long life cycle supercapacitor electrodes. *Materials*, 14(21), 6592.
- Erçarıkçı, E., Demirci Gültekin, D., Topçu, E., Kudas, Z., Alanyalıoğlu, M., & Dağcı Kıranşan, K. (2024). Supramolecular Modification of Graphene Sponge with a Porphyrin Derivative Enhances the Photothermal Conversion Efficiency of a Solar Steam Generator. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(45), 61910-61920.
- Erçarıkçı, E., Topçu, E., Kudaş, Z., Aksu, Z., Alanyalıoğlu, M., & Kıranşan, K. D. (2024). An effective material for solar steam generation applications: Gradient graphene sponge. *Materials Today Sustainability*, 26, 100701.
- Ginting, R. T., Abdullah, H., Barus, D. A., & Fauzia, V. (2023). Extremely high-efficiency solar steam generation, robust and scalable photothermal evaporator based on ZIF-67@

- MXene/rGO decorated rock wool. *Journal of Materials Chemistry A*, 11(10), 5296-5308.
- Gong, F. F., Li, H., Wang, W., Huang, J., Xia, D. D., Liao, J., ... & Papavassiliou, D. V. (2019). Scalable, eco-friendly and ultrafast solar steam generators based on one-step melamine-derived carbon sponges toward water purification. *Nano Energy*, 58, 322-330.
- Guclu, C., Alper, K., Erdem, M., Tekin, K., & Karagoz, S. (2021). Activated carbons from co-carbonization of waste truck tires and spent tea leaves. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 21, 100410.
- Guo, S., Awasthi, M. K., Wang, Y. Xu, P. 2021. "Current understanding in conversion and application of tea waste biomass: A review", *Bioresource Technology*, 338, 125530.
- <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/gunes-enerjisiyle-calisan-su-aritma-cihazı> (01.12.2025)
- <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/sites/default/files/su-aritma.jpg> (01.12.2025)
- <https://i.pinimg.com/736x/96/a0/c3/96a0c309931fe137b22afccc641d6122.jpg> (01.12.2025)
- <https://nano.oxinst.com/> (01.12.2025)
- <https://nano.oxinst.com/campaigns/what-is-eds/edx> (01.12.2025)
- <https://sciencetech-inc.com/home> (01.12.2025)
- <https://sciencetech-inc.com/page/solar-simulator> (01.12.2025)
- <https://sensorpartners.com/en/> (01.12.2025)
- <https://sensorpartners.com/en/thermography/> (01.12.2025)
- <https://wiki.anton-paar.com/en/x-ray-diffraction-xrd/> (01.12.2025)
- <https://www.agilent.com/> (01.12.2025)
- <https://www.agilent.com/en/product/atomic-spectroscopy/inductively-coupled-plasma-mass-spectrometry-icp-ms/what-is-icp-ms-icp-ms-faqs> (01.12.2025)
- <https://www.anton-paar.com/corp-en/> (01.12.2025)
- <https://www.bruker.com/en.html> (01.12.2025)
- <https://www.bruker.com/en/landingpages/bna/technology/what-is-eds.html> (01.12.2025)
- <https://www.fluke.com/en> (01.12.2025)
- <https://www.fluke.com/en/learn/blog/thermal-imaging/how-infrared-cameras-work> (01.12.2025)
- <https://www.horiba.com/tur/scientific/> (01.12.2025)
- <https://www.horiba.com/tur/scientific/technologies/raman-imaging-and-spectroscopy/raman-spectroscopy/> (01.12.2025)
- <https://www.labor.com.tr/kategori/termal-kamera> (01.12.2025)
- <https://www.renishaw.com/tr/renishaw-medikal-sektoru-ve-imalatta-verimlilik-artirir--1030> (01.12.2025)
- <https://www.renishaw.com/tr/what-is-raman-scattering--25805> (01.12.2025)
- <https://www.spectro.com/> (01.12.2025)
- <https://www.spectro.com/inductively-coupled-plasma-mass-spectrometry-icp-ms-principle> (01.12.2025)

<https://www.surfacesciencewestern.com/> (01.12.2025)

[https://www.surfacesciencewestern.com/analytical-services/scanning-electron-microscopy-coupled-with-energy-dispersive-x-ray-semedx-spectroscopy/#:~:text=Scanning%20electron%20microscopy%20with%20energy,scanning%20\(primary\)%20electron%20beam](https://www.surfacesciencewestern.com/analytical-services/scanning-electron-microscopy-coupled-with-energy-dispersive-x-ray-semedx-spectroscopy/#:~:text=Scanning%20electron%20microscopy%20with%20energy,scanning%20(primary)%20electron%20beam) (01.12.2025)

<https://www.technologynetworks.com/> (01.12.2025)

<https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/uv-vis-spectroscopy-principle-strengths-and-limitations-and-applications-349865> (01.12.2025)

<https://www.thermofisher.com/tr/en/home.html> (01.12.2025)

<https://www.thermofisher.com/tr/en/home/electron-microscopy/products/xps-instruments/applications.html> (01.12.2025)

<https://www.thermofisher.com/tr/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/elemental-structural-analysis-information/xrd-academy.html> (01.12.2025)

<https://www.thermofisher.com/tr/en/home/materials-science/learning-center/surface-analysis.html> (01.12.2025)

<https://www.trhaber.com/gundem/meteoroloji-den-carpici-harita-turkiye-nin-yarisi-kuraklik-riski-altinda-h915860.html> (01.12.2025)

<https://www.wwf.org.tr/> (01.12.2025)

https://www.wwf.org.tr/kesfet/tatli_su/turkiyede_su_kaynaklarinin_guncel_durumu/ (01.12.2025)

<https://youtu.be/CcNvrbuMeUI> (01.12.2025)

<https://youtu.be/YOf2N9gMum0> (01.12.2025)

Huang, J., Jing, L., Zhang, Q., Zong, S., & Zhang, A. (2025). Interfacial solar vapor evaporator based on biologically natural composites. *Nano Energy*, 133, 110458.

Huang, Q., Liang, X., Yan, C., & Liu, Y. (2021). Review of interface solar-driven steam generation systems: High-efficiency strategies, applications and challenges. *Applied Energy*, 283, 116361.

Huang, Z., Liu, X., Sun, S., Tang, Y., Yuan, X., & Tang, Q. (2021). Global assessment of future sectoral water scarcity under adaptive inner-basin water allocation measures. *Science of the Total Environment*, 783, 146973.

Jamali, M., Yazdian, H., Bahman, G., & Eslamian, S. (2025). Water agriculture nexus a system dynamics approach for the next three decades. *Scientific Reports*, 15(1), 5946.

Jiang, H., Liu, X., Wang, D., Qiao, Z., Wang, D., Huang, F., ... & Hu, C. (2023). Designing high-efficiency light-to-thermal conversion materials for solar desalination and photothermal catalysis. *Journal of Energy Chemistry*, 79, 581-600.

Jing, X., Chen, L., Li, Y., Yin, H., Chen, J., Su, M., ... & Liu, X. (2024). Synergistic effect between 0D CQDs and 2D MXene to enhance the photothermal conversion of hydrogel evaporators for efficient solar water evaporation, photothermal sensing and electricity generation. *Small*, 20(50), 2405587.

Kim, C., Shin, D., Baitha, M. N., Ryu, Y., Urbas, A. M., Park, W., & Kim, K. (2021). High-efficiency solar vapor generation boosted by a solar-induced updraft with biomimetic 3D structures. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(25), 29602-29611.

- Li, J., Liu, M., Luo, W., Xing, G., Yang, W., Sun, H., ... & Li, A. (2023). 3D tea-residue microcrystalline cellulose aerogel with aligned channels for solar-driven interfacial evaporation co-generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(44), 51979-51988.
- Li, X., Xie, W., & Zhu, J. (2022). Interfacial solar steam/vapor generation for heating and cooling. *Advanced Science*, 9(6), 2104181.
- Li, Y., Shi, Y., Wang, H., Liu, T., Zheng, X., Gao, S., & Lu, J. (2023). Recent advances in carbon-based materials for solar-driven interfacial photothermal conversion water evaporation: assemblies, structures, applications, and prospective. *Carbon Energy*, 5(11), e331.
- Li, Z., Wang, C., Li, Z., Deng, L., Su, J., Shi, J., & An, M. (2019). Efficient interfacial solar steam generator with controlled macromorphology derived from flour via “dough figurine” technology. *Energy Technology*, 7(9), 1900406.
- Li, Z., Zhang, J., Zang, S., Yang, C., Liu, Y., Jing, F., ... & Zhou, Y. (2020). Engineering controllable water transport of biosafety cuttlefish juice solar absorber toward remarkably enhanced solar-driven gas-liquid interfacial evaporation. *Nano Energy*, 73, 104834.
- Lin, Y., Zhou, W., Di, Y., Zhang, X., Yang, L., & Gan, Z. (2019). Low-cost carbonized kelp for highly efficient solar steam generation. *AIP Advances*, 9(5).
- Liu, C., Yin, Z., Hou, Y., Yin, C., & Yin, Z. (2023). Overview of solar steam devices from materials and structures. *Polymers*, 15(12), 2742.
- Liu, J., Li, D., Chen, H., Wang, H., Wada, Y., Kummu, M., ... & Ciais, P. (2024). Timing the first emergence and disappearance of global water scarcity. *Nature Communications*, 15(1), 7129.
- Liu, Z., Qing, R. K., Xie, A. Q., Liu, H., Zhu, L., & Chen, S. (2021). Self-contained Janus aerogel with antifouling and salt-rejecting properties for stable solar evaporation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(16), 18829-18837.
- Liu, Z., Song, H., Ji, D., Li, C., Cheney, A., Liu, Y., ... & Gan, Q. (2017). Extremely cost-effective and efficient solar vapor generation under nonconcentrated illumination using thermally isolated black paper. *Global Challenges*, 1(2), 1600003.
- Meng, X., Yang, J., Ramakrishna, S., Sun, Y., & Dai, Y. (2020). Gradient vertical channels within aerogels based on N-doped graphene meshes toward efficient and salt-resistant solar evaporation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(12), 4955-4965.
- Mu, X., Gu, Y., Wang, P., Shi, J., Wei, A., Tian, Y., ... & Miao, L. (2020). Energy matching for boosting water evaporation in direct solar steam generation. *Solar Rrl*, 4(10), 2000341.
- Onggowarsito, C., Feng, A., Mao, S., Nguyen, L. N., Xu, J., & Fu, Q. (2022). Water harvesting strategies through solar steam generator systems. *ChemSusChem*, 15(23), e202201543.
- Panahi, H. K. S., Dehghani, M., Ok, Y. S., Nizami, A. S., Khoshnevisan, B., Mussatto, S. I., ... & Lam, S. S. (2020). A comprehensive review of engineered biochar: production, characteristics, and environmental applications. *Journal of cleaner production*, 270, 122462.
- Pandao, M. R., Lalitha, G. R., Kishore, A. J., Padhan, S. R., Panotra, N., Gulaiya, S., & Pandey, S. K. (2023). A comprehensive review on biochar. *Int J Environ Clim Change*, 13, 3453-3461.
- Pham, T. T., Nguyen, T. H., Nguyen, T. A. H., Pham, D. D., Nguyen, D. C., Do, D. B., ... & Nguyen, Z. H. (2021). Durable, scalable and affordable iron (III) based coconut husk

- photothermal material for highly efficient solar steam generation. *Desalination*, 518, 115280.
- Pimenta, M. A., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M. S., Cancado, L. G., Jorio, A., & Saito, R. (2007). Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy. *Physical chemistry chemical physics*, 9(11), 1276-1290.
- Qian, Y., Li, Q., Wei, F., Wang, H., Dai, J., & Zhang, W. (2025). A Review: Strategies for Weaving Structure and Dimension Designing of Fabric-Based Three Dimensional Solar-Driven Interfacial Evaporator. *Carbon Neutralization*, 4(5), e70044.
- Sinhamahapatra, A., & Kumar, A. (2023). Review of the progress of solar-driven interfacial water evaporation (SIWE) toward a practical approach. *Energy Advances*, 2(5), 574-605.
- Song, Y., Fang, S., Xu, N., & Zhu, J. (2025). Solar-driven interfacial evaporation technologies for food, energy and water. *Nature Reviews Clean Technology*, 1(1), 55-74.
- Storer, D. P., Phelps, J. L., Wu, X., Owens, G., Khan, N. I., & Xu, H. (2020). Graphene and rice-straw-fiber-based 3D photothermal aerogels for highly efficient solar evaporation. *ACS applied materials & interfaces*, 12(13), 15279-15287.
- Sun, S., Sun, B., Wang, Y., Antwi-Afari, M. F., Mi, H. Y., Guo, Z., ... & Shen, C. (2021). Carbon black and polydopamine modified non-woven fabric enabling efficient solar steam generation towards seawater desalination and wastewater purification. *Separation and Purification Technology*, 278, 119621.
- Sun, Y., Zhao, Z., Zhao, G., Wang, L., Jia, D., Yang, Y., ... & Qiu, J. (2021). High performance carbonized corncob-based 3D solar vapor steam generator enhanced by environmental energy. *Carbon*, 179, 337-347.
- Tao, P., Ni, G., Song, C., Shang, W., Wu, J., Zhu, J., ... & Deng, T. (2018). Solar-driven interfacial evaporation. *Nature energy*, 3(12), 1031-1041.
- Tian, Y., Liu, X., Wang, Z., Caratenuto, A., Chen, F., Wan, Y., & Zheng, Y. (2021). Carbonized cattle manure-based photothermal evaporator with hierarchically bimodal pores for solar desalination in high-salinity brines. *Desalination*, 520, 115345.
- Tu, C., Cai, W., Chen, X., Ouyang, X., Zhang, H., & Zhang, Z. (2019). A 3D-structured sustainable solar-driven steam generator using super-black nylon flocking materials. *Small*, 15(37), 1902070.
- Wang, C. F., Wu, C. L., Kuo, S. W., Hung, W. S., Lee, K. J., Tsai, H. C., ... & Lai, J. Y. (2020). Preparation of efficient photothermal materials from waste coffee grounds for solar evaporation and water purification. *Scientific Reports*, 10(1), 12769.
- Wang, R., & He, W. (2024). Accelerating solar-powered desalination deployment through transferable learning. *Communications Materials*, 5(1), 203.
- Wang, T. Y., Huang, H. B., Li, H. L., Sun, Y. K., Xue, Y. H., Xiao, S. N., & Yang, J. H. (2021). Carbon materials for solar-powered seawater desalination. *New Carbon Materials*, 36(4), 683-701.
- Wei, D., Wang, C., Zhang, J., Zhao, H., Asakura, Y., Eguchi, M., ... & Yamauchi, Y. (2023). Water activation in solar-powered vapor generation. *Advanced Materials*, 35(47), 2212100.
- Wei, Z., Cai, C., Huang, Y., Wang, Y., & Fu, Y. (2021). Biomimetic surface strategy of spectrum-tailored liquid metal via blackbody inspiration for highly efficient solar steam generation, desalination, and electricity generation. *Nano Energy*, 86, 106138.

- Wilson, H. M., Ahirrao, D. J., Ar, S. R., & Jha, N. (2020). Biomass-derived porous carbon for excellent low intensity solar steam generation and seawater desalination. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215, 110604.
- Wu, D., Liang, J., Zhang, D., Zhang, C., & Zhu, H. (2020). Solar evaporation and electricity generation of porous carbonaceous membrane prepared by electrospinning and carbonization. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215, 110591.
- Wu, D., Qu, D., Jiang, W., Chen, G., An, L., Zhuang, C., & Sun, Z. (2019). Self-floating nanostructured Ni–NiO x/Ni foam for solar thermal water evaporation. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(14), 8485-8490.
- Xia, F., Tian, Y., Zhang, X., Gong, Y., Yang, X., Guo, X., ... & Gao, T. (2025). Architecting of all-cellulose-based wicking fabric for a large-scale, low-cost, and highly efficient solar desalination evaporator. *ACS nano*, 19(9), 8608-8620.
- Xiong, J., Zhang, Z., Liu, Y., Yi, J., Wang, Y., Li, B., ... & Peng, J. (2022). Full bagasse bio-waste derived 3D photothermal aerogels for high efficient solar steam generation. *Cellulose*, 29(2), 927-939.
- Xu, N., Hu, X., Xu, W., Li, X., Zhou, L., Zhu, S., & Zhu, J. (2017). Mushrooms as efficient solar steam-generation devices. *Advanced Materials*, 29(28), 1606762.
- Yang, Y., Zhao, R., Zhang, T., Zhao, K., Xiao, P., Ma, Y., ... & Chen, Y. (2018). Graphene-based standalone solar energy converter for water desalination and purification. *ACS nano*, 12(1), 829-835.
- Zafar, M. S., Zahid, M., Athanassiou, A., & Fragouli, D. (2021). Biowaste-derived carbonized bone for solar steam generation and seawater desalination. *Advanced Sustainable Systems*, 5(8), 2100031.
- Zhang, P., Liao, Q., Yao, H., Huang, Y., Cheng, H., & Qu, L. (2019). Direct solar steam generation system for clean water production. *Energy Storage Materials*, 18, 429-446.
- Zhang, Y., Ravi, S. K., & Tan, S. C. (2019). Food-derived carbonaceous materials for solar desalination and thermo-electric power generation. *Nano Energy*, 65, 104006.
- Zhang, Z., Mu, P., He, J., Zhu, Z., Sun, H., Wei, H., Liang, W., & Li, A. (2019). Facile and scalable fabrication of surface-modified sponge for efficient solar steam generation. *ChemSusChem*, 12(2), 426–433.
- Zhao, F., Guo, Y., Zhou, X., Shi, W., & Yu, G. (2020). Materials for solar-powered water evaporation. *Nature Reviews Materials*, 5(5), 388-401.
- Zhao, F., Zhou, X., Shi, Y., Qian, X., Alexander, M., Zhao, X., ... & Yu, G. (2018). Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels. *Nature nanotechnology*, 13(6), 489-495.
- Zhou, J., Xing, R., Wu, Y., Shen, M., Wang, W., Li, M., ... & Min, X. (2024). Full tea waste-based photothermal aerogel with vertical water transport channels for steady solar desalination. *Industrial Crops and Products*, 212, 118363.
- Zhou, Y., Wang, Z., Chen, X., Ji, J., Zhang, L., & Meng, C. (2025). Advancing robust all-weather desalination: a critical review of emerging photothermal evaporators and hybrid systems. *Communications Materials*, 6(1), 29.
- Zhou, Z., Gong, J., Zhang, C., Tang, W., Wei, B., Wang, J., ... & Xia, L. (2023). Hierarchically porous carbonized *Pleurotus eryngii* based solar steam generator for efficient wastewater purification. *Renewable Energy*, 216, 118987.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Serap KATRANLI
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-posta:	
Eğitim	
Lise:	Nene Hatun Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi (Biyoloji)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi (Nanobilim ve Nanomühendislik)
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar: Katranlı, S., Dağcı Kıranşan, K., Erçarıkçı, E., & Topçu, E. (2025). Sustainable and Cost-Effective Solar Steam Generation via Biochar-Modified Natural Sponge Evaporator. <i>Advanced Sustainable Systems</i> , e00626. https://doi.org/10.1002/adsu.202500626	