



**TÜRK KAHVESİ TELVESİNDEN ELDE EDİLEN
BİYOKÖMÜR İLE MATERYAL TASARIMI VE
GÜNEŞ ENERJİSİ İLE SU BUHARI ÜRETİMİ
UYGULAMASI**

Şeyda SEFA

Yüksek Lisans Tezi

Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Ezgi TOPÇU

2025

(Her hakkı saklıdır)

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

**TÜRK KAHVESİ TELVESİNDEN ELDE EDİLEN BİYOKÖMÜR İLE MATERYAL
TASARIMI VE GÜNEŞ ENERJİSİ İLE SU BUHARI ÜRETİMİ UYGULAMASI**

(Material Design with Biochar Obtained from Turkish Coffee Grounds and Its Application of
Solar Steam Generation)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şeyda SEFA

Danışman: Doç. Dr. Ezgi TOPÇU

Erzurum
Ağustos, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**TÜRK KAHVESİ TELVESİNDEN ELDE EDİLEN BİYOKÖMÜR İLE MATERYAL
TASARIMI VE GÜNEŞ ENERJİSİ İLE SU BUHARI ÜRETİMİ**

Doç. Dr. Ezgi TOPÇU danışmanlığında, Şeyda SEFA tarafından hazırlanan bu çalışma, 21/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Analitik Kimya Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...) ile** kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Doç.Dr. Kader DAĞCI KIRAŞAN Aslı ıslak imzalıdır
Atatürk Üniversitesi

Danışman: Doç. Dr. Ezgi TOPÇU Aslı ıslak imzalıdır
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Doktor Öğretim Üyesi Mehtap AYGÜN Aslı ıslak imzalıdır
ÇAĞLAR
Erzurum Teknik Üniversitesi

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

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

Aslı ıslak imzalıdır

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Ezgi Topçu danışmanlığında sunulan “Türk Kahvesi Telvesinden Elde Edilen Biyokömür ile Materyal Tasarımı ve Güneş Enerjisi İle Su Buharı 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	5	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Metot	5	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	17	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
Şeyda Sefa	Doç. Dr. Ezgi Topçu
8.8.2025	8.8.2025
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.

Çalışmalarımın her safhasında her türlü desteği sağlayan çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ezgi TOPÇU'ya derin minnet ve şükranlarımı sunarım.

İlgi ve yardımlarından dolayı başta Sayın Doç. Dr. Kader DAĞCI KIRANŞAN ve çalışma esnasında desteğini, yardımını gördüğüm Sayın Dr. Öğr. Üyesi Elif ERÇARIKÇI'ya teşekkür ederim.

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

Her zaman beni destekleyen, gösterdikleri maddi ve manevi desteklerinden ve sevgilerinden dolayı aileme sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Şeyda SEFA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRK KAHVESİ TELVESİNDEN ELDE EDİLEN BİYOKÖMÜR İLE MATERYAL TASARIMI VE GÜNEŞ ENERJİSİ İLE SU BUHARI ÜRETİMİ UYGULAMASI

Şeyda SEFA

Danışman: Doç. Dr. Ezgi TOPÇU

Amaç: Su kıtlığı, insanlığın karşı karşıya olduğu küresel sorunlardan biri olduğundan temiz suya ulaşım bir o kadar da güç olmaktadır. Amacımız, doğa dostu, düşük maliyetli, üretimi ve ulaşımı kolay bir fototermal materyal tasarlayarak, güneş enerjisiyle deniz sularından, atık sulardan, asit/baz ve ağır metal içerikli sulardan temiz su elde etmektir.

Yöntem: Ülkemizde en çok tüketilen içeceklerden olan Türk kahvesinin içildikten sonra tavelerinden piroliz işlemi ile biyokömür elde edildi. Doğal selülozik bir süngerin üzerinin elde edilen biyokömür ile kaplanmasıyla tasarlanan yeni bir buharlaştırıcı materyal ile güneş enerjisiyle tuzlu/kirli sulardan temiz su elde edildi.

Bulgular: Hazırlanan buharlaştırıcı materyal, güneş enerjisiyle su buharı eldesinde $1,63 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 'lik bir su buharlaşma hızı sergiledi ve %81'lik bir fototermal dönüşüm verimliliğine ulaştı. Bu materyal ile güneş enerjisiyle tuzlu/kirli sulardan temiz su elde edilebildiği belirlendi.

Sonuç: 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 gerçekleştirildi.

Anahtar Kelimeler: Türk kahvesi telvesi, biyokömür, güneş enerjisi ile su buharı üretimi, tuzdan arındırma

Ağustos 2025, 90 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

MATERIAL DESIGN WITH BIOCHAR OBTAINED FROM TURKISH COFFEE GROUNDS AND APPLICATION OF SOLAR STEAM GENERATION

Şeyda SEFA

Supervisor: Assoc. Prof. Ezgi TOPÇU

Purpose: Since water scarcity is one of the global problems humanity faces, access to clean water is also becoming increasingly difficult. We aim to obtain clean water from seawater, wastewater, acid/base, and heavy metal waters by designing a photothermal material that is environmentally friendly, low-cost, easy to produce, and transport.

Method: Biochar was obtained from the grounds of Turkish coffee, one of the most consumed beverages in our country, by pyrolysis. Clean water was obtained from salty/polluted waters with sunlight using a new evaporator material designed to coat a natural cellulosic sponge with the obtained biochar.

Findings: The prepared evaporator material exhibited a water evaporation rate of $1.63 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ in obtaining water vapor with solar energy and reached a photothermal conversion efficiency of 81%. It was determined that clean water could be obtained from salty/polluted waters with this material.

Conclusion: The design of a sustainable and economical evaporator and the application of solar water vapor production for solar energy-powered desalination and purification systems aiming to eliminate the global shortage of potable water have been successfully realized.

Keywords: Biochar, dye, heavy metal, photothermal material, Turkish coffee, solar energy, sustainable technology.

August 2025, 90 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
GİRİŞ.....	1
Güneş Enerjisiyle Buhar Üretiminde Kullanılan Başlıca Teknolojiler.....	1
Parabolik oluklu kolektör sistemleri (Parabolic Trough Collectors – PTC).....	1
Merkezi alıcılı sistemler (Solar Power Tower Systems).....	1
Parabolik çanak sistemleri (Dish-Stirling Systems).....	2
Güneş havuzları (Solar Ponds).....	2
Doğrudan güneş enerjisiyle buhar üretimi-GBÜ-(Direct Solar Steam Generation)	2
Biyokömür	4
Türk Kahvesi	5
KURAMSALSAL TEMELLER	8
MATERYAL ve YÖNTEM	28
Materyal	28
Yöntem.....	30
Solar simülatör	30
X ışınları difraksiyon spektroskopisi (XRD)	31
X ışınları fotoelektron spektroskopisi (XPS)	32
UV görünür bölge spektroskopisi	33
Raman spektroskopisi	34
Taramalı elektron mikroskopisi (SEM)	35
Enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX)	36
Endüktif eşleşmeli plazma kütle spektrometrisi (ICP-MS)	37
Kızıl ötesi (IR) termal kamera.....	38
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	40

Türk Kahvesi Atıklarının Toplanması	40
Türk kahvesi atıklarından biyokömür elde edilmesi.....	40
SONUÇ ve ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	75



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. S ve KB-S'nin Buharlaşıma Entalpileri.....	53
Tablo 2. Simüle Edilmiş Deniz Suyunun KB-S ile Güneş Enerjisiyle Tuzdan Arındırılmasından Sonra İyon İçerikleri	58
Tablo 3. Karadeniz Deniz Suyunun KB-S ile Güneş Enerjisiyle Tuzdan Arındırılmasından Sonra İyon İçerikleri	58
Tablo 4. Ağır Metal Çözeltilisinin KB-S ile Güneş Enerjisiyle Arıtma Sonrası İyon İçerikleri	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Güneş enerjisiyle çalışan ara yüzey su buharı üretiminin ilkeleri için temsili gösterim. Gözenekli bir güneş emici su üzerinde yüzer. Güneş ışığı altında su buharı üretimi güneş enerjisiyle sağlanır. Eş zamanlı olarak su, buhar üretimi için yığın sudan buharlaşma yüzeyine taşınır. Oluşan su buharının yoğunlaştırılmasıyla temiz su elde edilir	3
Şekil 2. Biyokömür	4
Şekil 3. Türk kahvesi tozu ve pişirilmiş Türk kahvesi	6
Şekil 4. Türk kahvesi içildikten sonra fincan dibinde kalan telve atıkları	6
Şekil 5. GBÜ sistemlerinin evrimi: Doğal ısıtma, alt ısıtma, yığın ısıtma ve arayüz ısıtma	8
Şekil 6. GBÜ tuzdan arındırma sisteminin deneysel kurulumu. Buharlaştırıcının (fototermal materyal) sıcaklığı güneş radyasyonu ile artar ve deniz suyunun buharlaşmasına neden olur. Buhar, ortam havasına ısı transferi yoluyla yoğunlaşarak tatlı su üretir	9
Şekil 7. Doğal kaynaklı güneş soğurucularına dayalı bir GBÜ sisteminin geliştirilmesinin şematik gösterimi	12
Şekil 8. Su üzerinde yüzen CES'in resmi	14
Şekil 9. Hiyerarşik olarak gözenekli güneş emici C-PE'nin üretim yolu ve morfolojilerinin şematik gösterimi	16
Şekil 10. BGD'ler tarafından petrolle kirlenmiş deniz suyundan güneş enerjisiyle çalışan eş zamanlı buhar üretimi ve sürekli petrol geri kazanımının şematik gösterimi	17
Şekil 11. Lufa kullanılarak güneş enerjili buhar üretim cihazının tasarımının şematik gösterimi	18
Şekil 12. (a) Yosundan çıkılarak hazırlanan GBÜ cihazının şematik gösterimi. (b) Cihazın 1 güneş ışığı altında fotoğrafları	19
Şekil 13. Mantar esaslı güneş enerjisiyle su buhar üretimi cihazının şematik gösterimi. b) Mantarın fiziksel resmi. c) Karbonizasyondan sonra mantarın fiziksel resmi	20
Şekil 14. Baggase'den çıkılarak hazırlanan buharlaştırıcı cihazının şematik gösterimi	21
Şekil 15. Yakın silindirik (NC) güneş emici tabanlı un bloğunun hazırlama sürecinin şeması. a) Doğal buğday. b) Ticari olarak temin edilebilen un. c) Hamur figür teknolojisi kullanılarak yakın silindirik (FNC) yapıya sahip un bloğunun	

hazırlanması. d) Dondurarak kurutulmuş (FFNC) örnek. e) Dondurarak kurutulmuş (C-FFNC) örneğin karbondioksitleme süreci. f) GBÜ cihazının şematik resmi. g) 1 güneş ışınlamı altında 1 dakikada GBÜ cihazının IR fotoğrafı	22
Şekil 16. Buhar üretimi ve toplanması için deneysel kurulum.....	23
Şekil 17. Biyokütleden türetilen malzemeler, su arıtma için fototermal buharlaştırıcılar olarak hizmet veren gözenekli hidrojelere dönüştürülebilir. Bazı çalışmalarda kullanılan biyopolimerler; kabukluların dış iskeletinden elde edilen kitosan, bakteriden elde edilen gellan sakızı ve kırmızı deniz yosunundan elde edilen agardır. Şekilde bu maddelerin kimyasal ve ağ yapıları verilmiştir	23
Şekil 18. Suyun arıtılması için fototermal buharlaştırıcı görevi gören gözenekli yapı için kömürleşmiş ve fırınlanmış doğal malzemeler uygulanabilir. Biyokütle malzemeleri, kurutulmuş gübre, toprak ve yaprak olabilir. Şekilde kömürleştirme/pişirme işleminden önceki ve sonraki gözenekli yapı görüntüleri verilmiştir.....	24
Şekil 19. (a) Sıvı fazda dondurarak kurutma ve Ca^{2+} -çapraz bağlanma yaklaşımıyla CG-CA hidrojel oluşturulmaya yönelik temsili gösterim. (b) Buharlaşma test sisteminin temsili gösterimi.....	25
Şekil 20. (a) Kömürleşmiş kahve telvesi (KKT) ve (b) hidrofobik kömürleşmiş kahve telvesinin (HKKT) su damlalarının profili. (c) Suda yüzdürme testinin görüntüsü. (d) (i) 0, (ii) 60, (iii) 180 ve (iv) 360 saniye boyunca 1 güneş ışıgı altında HKKT ile kaplı su örneğinin kızılötesi termal görüntüleri.....	25
Şekil 22. PVA sünger, PU sünger ve doğal selülozik süngere ait resimler.....	29
Şekil 23. GBÜ için fototermal buharlaştırıcının hazırlanmasına ait temsili gösterim	29
Şekil 24. GBÜ çalışmalarında kullanılan solar simülatörün fotoğrafı	31
Şekil 25. XRD tekniğinin ve X-ışınlarının kristal yapıda kırınımının temsili olarak gösterimi.....	32
Şekil 26. XPS cihazının çalışma prensibinin temsili gösterimi.....	33
Şekil 27. UV-görünür bölge spektroskopisi cihazını oluşturan kısımların temsili gösterimi.....	34
Şekil 28. Rayleigh ve Raman saçılımının molekül enerji diyagramı temsili gösterimi	35
Şekil 29. SEM cihazının temsili gösterimi (Inkson 2016)	36
Şekil 30. ICP-MS cihazının temsili gösterimi.....	38
Şekil 31. FLIR T620 IR termal kameranın fotoğrafı	39
Şekil 32. (a) Türk kahvesi içiminden sonra fincan dibinde kalan Türk kahvesi taveleri. (b) Kurutulmuş atık Türk kahvesi taveleri.....	40

Şekil 33. Biyokömür eldesinde kullanılan silindir fırın ve Ar gaz tüpünün fotoğrafı.	41
Şekil 34. Atık Türk kahvesinin ve kahve biyokömürünün (KB) fotoğrafı	41
Şekil 35. Farklı sıcaklıklarda piroliz işlemi ile elde edilen KB'lerin fotoğrafı.....	41
Şekil 36. (a) 300 °C'de, (b) 400 °C'de, (c) 500 °C'de ve (d) 600 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen KB'lerin FESEM görüntüleri.....	42
Şekil 37. (a) 500 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen KB'nin EDS spektrumu. İç şekil: Elementleri ve atomik yüzdeleri gösteren tablo. (b) 300, 400, 500 ve 600 °C'de hazırlanan KB'lerin 77 K'de elde edilen N ₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi. Ek: Numunelerin BJH gözenek boyutu dağılımları.....	43
Şekil 38. 400, 500 ve 600 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen KB'lerin XRD spektrumu	44
Şekil 39. 500 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen KB'nin Raman spektrumu	44
Şekil 40. 500 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen KB'nin (a) genel ve ayrıntılı (b) C 1s ve (c) O 1s spektrumları	45
Şekil 41. KB'nin UV-VIS-NIR absorpsiyon spektrumu.....	46
Şekil 42. Kuru ve ıslak haldeki süngerin su emme kapasitesi.....	46
Şekil 43. Fototermal materyalin (KB-S) hazırlanmasına ait gösterim	47
Şekil 44. Farklı KB miktarlarıyla hazırlanan KB-S'nin buharlaşma hızı	47
Şekil 45. Farklı S yükseklikleriyle hazırlanan KB-S'nin buharlaşma hızı	47
Şekil 46. Farklı büyütme ölçeklerinde S (a-b) ve KB-S'nin (c-d) FESEM görüntüleri	48
Şekil 47. GBÜ cihazının (a) ve vakum yalıtımlı çift cidarlı cam kaptaki KB-S'nin (b) fotoğrafı	49
Şekil 48. 1 güneş ışınımı altında KB-S, sade S ve saf su ortamında suyun zamana bağlı kütle değişimi	49
Şekil 49. 1 güneş ışınımı altında KB-S, sade S ve saf suyun zamana bağlı yüzey sıcaklık değişimi	50
Şekil 50. Saf su, sade S ve KB-S'nin farklı zamanlardaki kızılötesi görüntüleri	51
Şekil 51. 60. saniyedeki güneş ışınımı altında (a) sade S ve (b) KB-S'nin fotoğrafları.....	51
Şekil 52. Farklı güneş ışınları altında KB-S ile zamana bağlı suyun kütle değişimi	52
Şekil 53. Saf su, sade S ve KB-S'nin 1 güneş ışınımı altında buharlaşma hızı ve fototermal verimi	53
Şekil 54. KB-S fototermal malzeme için enerji dengesi ve ısı transferi diyagramı	54
Şekil 55. Asit, baz, tuz, ağır metal ve MB içeren çözeltiler ve saf su, için 1 güneş ışınımı altında KB-S'nin fototermal verimi ve buharlaşma hızı.....	55

Şekil 56. Farklı çözelti ve saf su ortamında KB-S ile zamana bağlı suyun kütle değişimi	56
Şekil 57. Ağır metal, tuz, asit ve MB içeren çözeltilerde yüzen KB-S'nin kızılötesi görüntüleri	56
Şekil 58. KB-S ile güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve arıtma için deney düzeneği	57
Şekil 59. KB-S ile tuzdan arındırma öncesi ve sonrası Na^+ , K^+ , Mg^{+2} ve Ca^{+2} konsantrasyonunun karşılaştırılması	57
Şekil 60. KB-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.....	58
Şekil 61. Asidik (pH 2) ve alkali (pH 12) çözeltilerin KB-S ile güneş enerjisiyle arıtma öncesi ve sonrası pH değerlerinin fotoğrafları	59
Şekil 62. Farklı zamanlarda (0., 1., 30., 60., 90. ve 120. dakikalarda) KB-S ile yapılan güneş enerjisiyle MB boyar madde içerikli çözeltinin arıtılmasının (a-f) ve arıtma sonrası damıtılmış suyun (g) fotoğrafları. (h) KB-S ile MB boyar madde içerikli çözeltinin güneş enerjisiyle arıtmadan önce ve sonra UV-görünür bölge absorpsiyon spektrumu. İç Şekil: Arıtmadan önce ve sonra MB çözeltisinin fotoğrafı	59
Şekil 63. 2, 30 ve 60 dakika sonrasında KB-S ile hazırlanan GBÜ sisteminin açık havada gerçek güneş ışığı altındaki fotoğrafları	60
Şekil 64. GBÜ için açık havada gerçek güneş ışığı altında KB-S ile yapılan deneyde, günlük saat dilimlerine göre güneş akısındaki, KB-S'nin yüzeyindeki sıcaklığın ve suyun buharlaşması sonucu su kütlesindeki değişim	61
Şekil 65. Aynı yöntem ile hazırlanan 4 KB-S'nin buharlaşma hızı.....	61
Şekil 66. KB-S'nin uzun vadeli GBÜ performansı. İç Şekil: 20 döngüden sonra KB-S'nin fotoğrafı	62
Şekil 67. KB-S ile diğer biyokütle kaynaklı GBÜ malzemelerinin fototermal verim ve buharlaşma oranı açısından karşılaştırılması.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BDCF	: Bagasse' ten Türetilmiş Selüloz Lifi
BET	: Brunauer-Emmett-Teller
BGD	: Bi-Fonksiyonel Grafen Tabanlı Cihaz
BJH	: Barrett-Joyner-Halenda
BPK	: Biyokütle- çıkışlı porlu karbon
CA-CG	: Kalsiyum Aljinat-Kahve Telvesi
CB	: Karbonize Malzeme
CG	: Kahve telvesi
CK	: Biyokütleden Karbonize Fototermal Malzeme
EDS/EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını spektroskopisi
FESEM	: Taramalı elektron mikroskobu
GI	: Güneş ışığı
GBÜ	: Güneş enerjisi ile su buharı üretimi
GWS	: Kompozit geliştirilmiş sistem
HKKT	: Hidrofobik Kömürleşmiş Kahve Telvesi
ICP-MS	: İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometri Sistemi
KB	: Kahve Biyokömürü
KB-S	: Kahve Biyokömür-Sünger materyali
KKT	: Kömürleşmiş Kahve Telvesi
PU	: Poliüreten
PE	: Pleurotus eryngii
PEG	: Polietilen Glikol
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TB	: Theabrownin
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UV	: Mor ötesi (Ultra viyole)
XPS	: X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	: X- Işını Difraktometresi
WHO	: Dünya sağlık örgütü

GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacının artmasıyla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi hızla artmaktadır. Fosil yakıtların çevresel etkileri, tükenebilir olmaları ve maliyetlerinin artışı, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, güneş enerjisi ön plana çıkan en önemli kaynaklardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Güneş enerjisiyle buhar üretimi (solar steam generation), güneş ışığını doğrudan kullanarak suyun buharlaştırılmasını sağlayan bir teknolojidir. Bu teknoloji, deniz suyunun tuzdan arındırılması, atık suyun arıtılması ve sterilizasyon gibi alanlarda etkin şekilde kullanılmaktadır.

Güneş Enerjisiyle Buhar Üretiminde Kullanılan Başlıca Teknolojiler

Güneş enerjisiyle buhar üretimi, termal enerjiyi doğrudan kullanarak suyun buharlaştırılması ilkesine dayanır. Bu buhar; elektrik üretimi, endüstriyel ısıtma ve arıtma sistemleri gibi birçok alanda kullanılabilir. Geliştirilen teknolojiler genel olarak yoğunlaştırılmalı (konsantre) ve yoğunlaştırmaz (non-concentrated) sistemler olarak iki ana gruba ayrılır.

Parabolik oluklu kolektör sistemleri (Parabolic Trough Collectors – PTC)

Güneş enerjisiyle buhar üretimi teknolojileri arasında en yaygın kullanılan sistemlerden biridir. Bu sistemlerde, uzunlamasına yerleştirilmiş U şeklindeki parabolik aynalar, güneş ışığını kolektör ekseninde bulunan cam borular üzerine odaklar. Bu boruların içinde genellikle ısı transferi sağlayan termal yağlar dolaşır. Güneş ısınımı, bu akışkan aracılığıyla yüksek sıcaklıklara (150–400 °C) ulaşır ve bu ısı, suyun buharlaştırılmasında veya elektrik üretiminde kullanılır. Yüksek ısı verim sunması ve termal enerji depolama sistemleriyle uyumlu olması nedeniyle sanayi uygulamalarında sık tercih edilir. Ancak, mekanik izleme sistemlerinin gerekliliği ve kurulum maliyetlerinin yüksek olması, bu teknolojinin bazı dezavantajlarını oluşturmaktadır.

Merkezi alıcılı sistemler (Solar Power Tower Systems)

Heliostat adı verilen çok sayıda hareketli aynanın güneş ışığını yüksek bir kulede bulunan merkezi alıcıya odaklamasıyla çalışan ileri düzey bir teknolojidir. Alıcı bölümde genellikle su, erimiş tuz ya da başka bir ısı taşıyıcı sıvı bulunur. Bu sistemler, 500 °C'nin üzerinde sıcaklıklar elde edebilme kapasitesine sahiptir ve bu sayede buhar türbinleriyle

elektrik üretiminde yüksek verimlilik sağlar. Ayrıca, erimiş tuzlar gibi termal depolama çözümleriyle gece kullanımı da mümkündür. Ancak sistemin karmaşıklığı, büyük alan ihtiyacı ve maliyeti gibi sınırlayıcı faktörleri bulunmaktadır.

Parabolik çanak sistemleri (Dish-Stirling Systems)

Güneş ışığını tek bir noktada yoğunlaştıran çanak biçimindeki parabolik aynalarla çalışır. Odak noktasında genellikle Stirling motoru yer alır ve bu motor, ısıyı doğrudan mekanik enerjiye çevirerek elektrik üretir. Bu sistemler, 250–700 °C gibi oldukça yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmektedir. Termodinamik verimliliği açısından en gelişmiş güneş enerjisi teknolojilerinden biri olmasına rağmen, maliyetlerinin yüksek oluşu ve hassas hizalama ihtiyacı, büyük ölçekli uygulamalar önünde engel teşkil etmektedir. Bununla birlikte, modüler yapısı sayesinde uzak bölgelerde elektrik ihtiyacının karşılanmasında etkili olabilir.

Güneş havuzları (Solar Ponds)

Yoğunluğu farklı üç katmandan oluşan tuzlu su gölleri kullanılarak çalışan sistemlerdir. Üst katmanda düşük yoğunluklu tatlı su, orta katmanda bir geçiş bölgesi ve alt katmanda yoğun tuzlu su yer alır. Güneş ışımasını doğrudan gölün alt kısmına ulaştırarak burada hapsolür ve bu bölüm 60–90 °C sıcaklıklara kadar ısınabilir. Güneş havuzları, düşük maliyetli ve uzun süreli ısı depolama sağlayabilen sistemlerdir. Ancak, düşük sıcaklık üretmeleri ve geniş alan gereksinimi, onları daha çok düşük sıcaklıklı ısıtma uygulamaları için uygun hâle getirir.

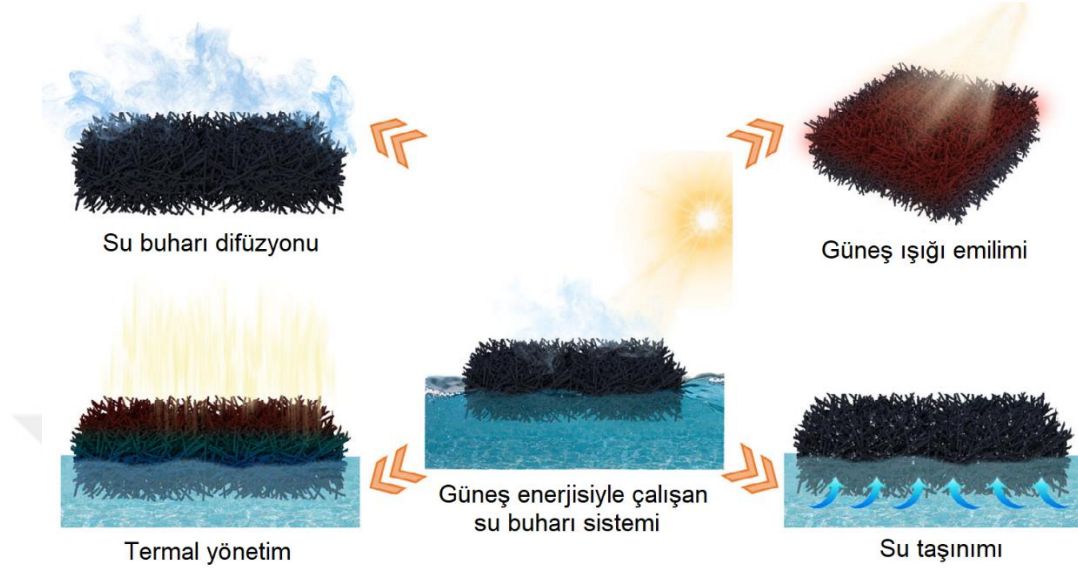
Doğrudan güneş enerjisiyle buhar üretimi-GBÜ-(Direct Solar Steam Generation)

Isı transfer sıvılarına ihtiyaç duymadan, güneş ışığını doğrudan su üzerine odaklayarak buhar üretimi sağlayan sistemlerdir. GBÜ teknolojisi, güneş ışığını absorbe eden bir yüzey aracılığıyla suyun yüzeyinde lokal ısı oluşturularak buharlaştırılması esasına dayanır. Bu teknoloji, son yıllarda artan su kıtlığı, enerji talebi ve sürdürülebilirlik gereklilikleri doğrultusunda giderek önem kazanmaktadır. Özellikle içme suyu temini, deniz suyunun tuzdan arındırılması (desalinasyon), endüstriyel atık suların arıtımı, sterilizasyon uygulamaları ve enerji üretimi gibi çok sayıda alanda etkin çözümler sunmaktadır.

GBÜ sistemlerinde kullanılan fototermal materyallerin belirli özelliklere sahip olması gereklidir (Liu *et al.* 2023):

- Yüksek güneş ışığı absorpsiyonu: Geniş spektrumda (UV-görünür-IR) ışık emme kapasitesi.
- Düşük termal iletkenlik: Isının suyun alt kısımlarına iletilmesini engelleyerek yüzeyde kalmasını sağlar.

- Gözenekli yapı: Su taşınımını sağlayan kapiler etkiyle sürekli bir buharlaşma süreci mümkün olur.
- Yüzer sistemler: Materyalin su yüzeyinde konumlandırılabilmesi, sistemin enerji verimliliğini artırır.



Şekil 1. Güneş enerjisiyle çalışan ara yüzey su buharı üretiminin ilkeleri için temsili gösterim. Gözenekli bir güneş emici su üzerinde yüzer. Güneş ışığı altında su buharı üretimi güneş enerjisiyle sağlanır. Eş zamanlı olarak su, buhar üretimi için yığın sudan buharlaşma yüzeyine taşınır. Oluşan su buharının yoğunlaştırılmasıyla temiz su elde edilir (Liu *et al.* 2023)

Güneş'in dünyaya 1 saatte sağladığı toplam enerji miktarının, insanın bir yılda tükettiği enerjiden daha fazla olduğu tahmin edilmektedir (Chen *et al.* 2022). Fosil enerji tüketmeden ve çevre kirliliğine yol açmadan, deniz suyunun tuzdan arındırılması ve kirli suyun arıtılması için güneş enerjisinden faydalanılması, çevre dostu ve sürdürülebilir bir strateji olarak karşımıza çıkmaktadır (Fan *et al.* 2020). Bugüne kadar güneş enerjisi ile su arıtımı için; metalik plazmonik nanopartiküller (Li *et al.* 2020; Sun *et al.* 2019), polimerler (Qi *et al.* 2020; Zhang *et al.* 2019.b) ve karbon esaslı malzemeler (Jiang *et al.* 2022; Wang *et al.* 2018) gibi foto-termal dönüşüm kapasitesine sahip çeşitli malzemeler rapor edilmiştir. Ancak bu malzemelerin çoğu hem maliyetli hem de karmaşık üretim süreçleri gerektirir. Sürdürülebilir kalkınma perspektifinden bakıldığında, güneş enerjisiyle temiz su elde etmek için hâlâ düşük maliyetli, kendi kendine yüzebilme özelliğine sahip ve üretimi kolay yeni bir malzeme üretimine büyük ihtiyaç duyulmaktadır (Shan *et al.* 2021; İbrahim 2021).

Son yıllarda özellikle biyokömür esaslı materyaller, sürdürülebilirlik, düşük maliyet ve çevre dostu üretim süreçleri nedeniyle ön plana çıkmaktadır.

Biyokömür

“Biochar (biyokömür)” kelimesi, 20. yüzyılın sonlarında Yunanca’da hayat anlamına gelen “bios” ve katı karbonlu malzeme anlamına gelen “char” kelimesinden türetilmiştir. Amazonlarda yaşayan yerlilerin ağaçları ve dalları çukurlarda yaktıktan sonra oluşan kömürlerin toprağa gömülmesi sonucu koyu renge sahip olan ve yüksek karbon ve organik maddeleri içeren verimli toprakların keşfedilmesi sonrasında ortaya çıktığı anlaşılmıştır (Zhang *et al.* 2020). Dünyanın el değmemiş ormanlarında yaşayan yerli halkın çok eski zamanlardan beri mısır koçanlarını, pirinç kabuklarını, fındık, fıstık, ceviz kabuklarını, ağaç kabuklarını veya işlenmiş kâğıt atıkları gibi doğada bulunan malzemeleri toprağa gömerek, koyu renk almış, karbon miktarı ve organik madde miktarı bakımından zenginleşmiş toprakların keşfiyle bulunmuştur. Modern anlamda biyokömür teknolojisi, ara ara kullanılmaya başlansa da biyokömür oluşumu uzun yıllar almaktadır. El değmemiş ormanlarda siyah renge sahip topraklar meydana gelmektedir. Bu topraklar, organik maddeler bakımından diğer topraklara oranla daha zengindir.



Şekil 2. Biyokömür

Biyokömür, hammadde olarak biyokütle malzemeleri veya biyokütle esaslı malzemeler kullanılarak, oksitleyici bir maddenin yokluğunda veya sınırlandırıldığında, yanma, gazlaştırma, hidrotermal karbonizasyon, kavurma ve piroliz gibi termokimyasal işlemlerle üretilen, karbon ve mineral elementlerden oluşan katı bir üründür. Biyokömür eldesinde, çok eski tarihlerden beri biyokütle olarak odun kullanılsa da mısır koçanları, pirinç kabukları, fıstık ve ağaç kabukları, işlenmiş kâğıt atıkları ve kentsel atıklardan da biyokömür üretilabilmektedir (Dündar *et al.* 2021).

Biyokömür, çevresel sürdürülebilirlik ve atık yönetimi alanlarında giderek daha fazla önem kazanan bir malzeme haline gelmiştir. Geniş yüzey alanı, mikrogözenekli yapısı, yüksek karbon içeriği ve kimyasal stabilitesi sayesinde hem tarımsal uygulamalarda toprak düzenleyici olarak hem de ileri malzeme teknolojilerinde adsorban, katalizör taşıyıcısı ve enerji depolama

aracı olarak değerlendirilmektedir. Biyokömürün bu çok yönlü özellikleri, üretiminde kullanılan biyokütle türü, uygulanan termokimyasal işlem türü ve işlem parametreleri (sıcaklık, süre, ortam atmosferi vb.) ile doğrudan ilişkilidir.

Genel olarak piroliz işlemi, biyokömür üretiminde en yaygın kullanılan yöntem olup, biyokütlenin oksijensiz veya sınırlı oksijenli ortamda 250–700 °C sıcaklık aralığında ısıtılmasından geçirilmesiyle gerçekleştirilir. Düşük sıcaklıkta yapılan piroliz işlemleri genellikle daha yüksek verimde biyokömür elde edilmesini sağlarken, yüksek sıcaklıkta yapılan işlemler daha gelişmiş gözenek yapısı ve yüzey alanı sunar. Bu nedenle, elde edilecek biyokömürün kullanım amacına göre süreç parametrelerinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Son yıllarda tarımsal atıkların ve organik kentsel atıkların değerlendirilmesi kapsamında biyokömür üretimi önemli bir geri dönüşüm stratejisi olarak ön plana çıkmaktadır. Kahve telvesi, mısır koçanı, çay atığı, zeytin çekirdeği, meyve kabukları gibi lignoselülozik içerikli biyokütleler; karbon içeriği yüksek ve yüzey özellikleri gelişmiş biyokömürler elde etmek için uygun kaynaklar arasında yer almaktadır. Bu tür atıkların değerlendirilmesiyle hem katma değerli bir ürün elde edilmekte hem de çevresel yük azaltılmaktadır.

Biyokömürün yüzey özellikleri ve kimyasal yapısı, fototermal uygulamalar gibi çevresel ve enerji odaklı sistemlerde işlevsel materyal olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle ışığı absorbe etme kapasitesinin yüksek olması, düşük termal iletkenliği ve hidrofobik-hidrofilik dengenin kontrol edilebilir olması gibi özellikleri sayesinde biyokömür, güneş enerjisiyle su buharı üretimi gibi sürdürülebilir enerji uygulamalarında potansiyel bir malzeme olarak değerlendirilmektedir.

Türk Kahvesi

Türk kahvesi, dünya kahve kültürleri arasında özgün bir yere sahiptir ve UNESCO tarafından 2013 yılında “Somut Olmayan Kültürel Miras” olarak tescillenmiştir. Kahvenin Osmanlı topraklarına gelişi, 16. yüzyılda Yemen Valisi Özdemir Paşa'nın Habeşistan seferi dönüşünde kahve çekirdeklerini İstanbul'a getirmesiyle başlamıştır. İstanbul'da kısa sürede büyük bir ilgi gören kahve, saray mutfağında ve halk arasında yaygınlaşmış, zamanla kahvehanelerin açılmasıyla sosyal yaşamın vazgeçilmez bir parçası olmuştur.

Türk kahvesi yalnızca bir içecek değil, aynı zamanda misafirperverlik, sohbet, nişan ve evlilik gelenekleri, bayramlaşmalar gibi pek çok sosyal ritüelin merkezinde yer almaktadır. “Bir fincan kahvenin kırk yıl hatırı vardır” atasözü, bu içeceğin toplumsal değerini ve sembolik anlamını yansıtan ifadelerdendir.

Türk kahvesi, esasen Arabica türü kahve çekirdeklerinin orta derecede kavrulması ve çok ince (pudra kıvamında) öğütülmesiyle elde edilir. Bu öğütülmüş kahve, su ve isteğe bağlı olarak şekerle birlikte cezve adı verilen küçük bir kapta yavaşça pişirilir. Pişirme esnasında karıştırılmayan kahve, fokurdayarak kabardığında ocaktan alınır ve fincana köpüğüyle birlikte dökülür (Şekil 3). Köpük, Türk kahvesinin kalitesini belirleyen en önemli unsurlardan biridir.

Kahvenin suyla birlikte kaynatılması, filtrelenmeden servis edilmesi ve telvesiyle birlikte içilmesi, bu yöntemi dünyadaki diğer kahve hazırlama yöntemlerinden ayıran temel özelliklerdir.



Şekil 3. Türk kahvesi tozu ve pişirilmiş Türk kahvesi

Türk kahvesi, telvesiyle servis edilen tek kahve türü olup, bu yönüyle gıda atığı açısından da dikkat çeker. Pişirme sonrası fincanda dibe çöken kahve telvesi (Şekil 4), genellikle atık olarak değerlendirilir. Ancak bu telve, içerdiği yüksek karbon oranı, antioksidan bileşenler, yağ ve fenolik maddeler sayesinde kozmetik, gübre, biyoyakıt ve biyomalzeme üretimi gibi birçok alanda potansiyel kullanım sahalarına sahiptir.



Şekil 4. Türk kahvesi içildikten sonra fincan dibinde kalan telve atıkları

Son yıllarda yapılan çalışmalar, Türk kahvesi telvesinin biyokömür üretimi, adsorban materyal geliştirilmesi, metan gazı üretimi, gıda katkısı, organik gübre ya da kompost hammaddesi olarak değerlendirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda

Türk kahvesi telvesi, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmektedir.

Türk kahvesi telvesi, pişirme işleminden sonra kalan posa olup, içerisinde hem çözünmeyen karbon yapılar hem de bazı çözünür kalıntılar barındırır. Genel olarak telve; yüksek oranda karbonun yanı sıra lignin, selüloz ve az miktarda lipit (yağ) ve kafein içerir. Bu kimyasal bileşim, Türk kahvesi telvesini piroliz gibi termokimyasal işlemlerle karbon esaslı malzeme üretimi için uygun bir öncül materyal haline getirir.

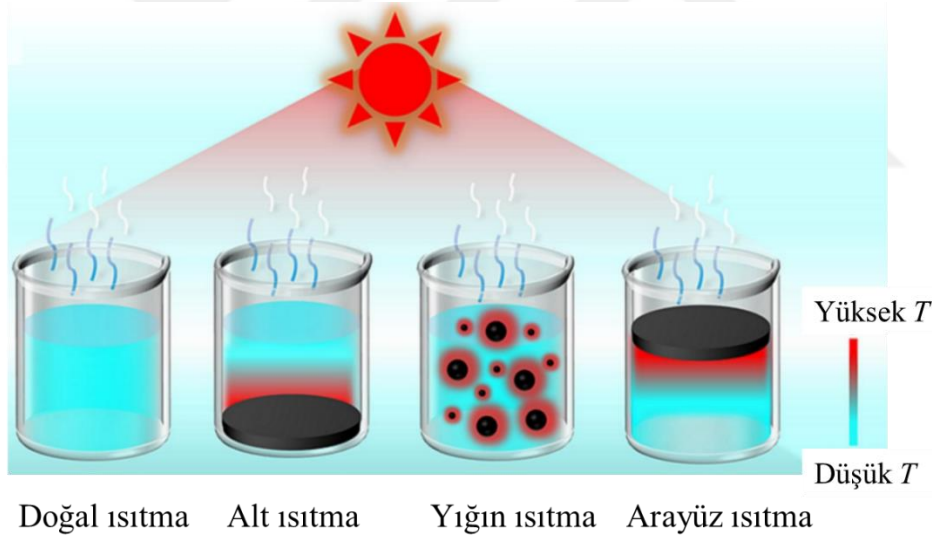
Türk kahvesi, ülkemizde en çok tüketilen içecekler arasında yer almaktadır. Türk kahvesinin içildikten sonra telvesi atıktır. Tuzlu/kirli su arıtma masraflarını azaltmak amacıyla atıkların kullanılması, atık yönetiminin sürdürülebilir ve ekonomik bir yolu olarak değerlendirilmektedir.

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 kahvesinden 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, güneş enerjisi ile su buharı üretimi uygulamasında, tuz, ağır metal ve boyar madde içeren sulardan temiz su elde etmek için kullanılmıştır.

Tez konusu, hem ülkemizde çokça tüketilen kahve atıklarının dönüşümünün sağlanması, hem de kirli/tuzlu sudan güneş enerjisiyle temiz su elde etmek için yeni bir malzeme tasarlanması yönüyle, çevre ve ekonomi açısından büyük önem taşımaktadır. Güneş enerjisiyle su buharı üretimi için çevreci bir yaklaşımla hazırlanan buharlaştırıcı materyal, karbon içerikli biyokömür ile yüksek buharlaşma performansı ve yüksek güneş ışığı Emilimi; boşluklu yapıdaki selülozik sünger ile hızlı ve sürekli su taşınım/iletim kapasitesi göstermiş ve sonuç olarak iyi bir ışık-ısı-su etkileşimi sergilemiştir.

KURAMSALSAL TEMELLER

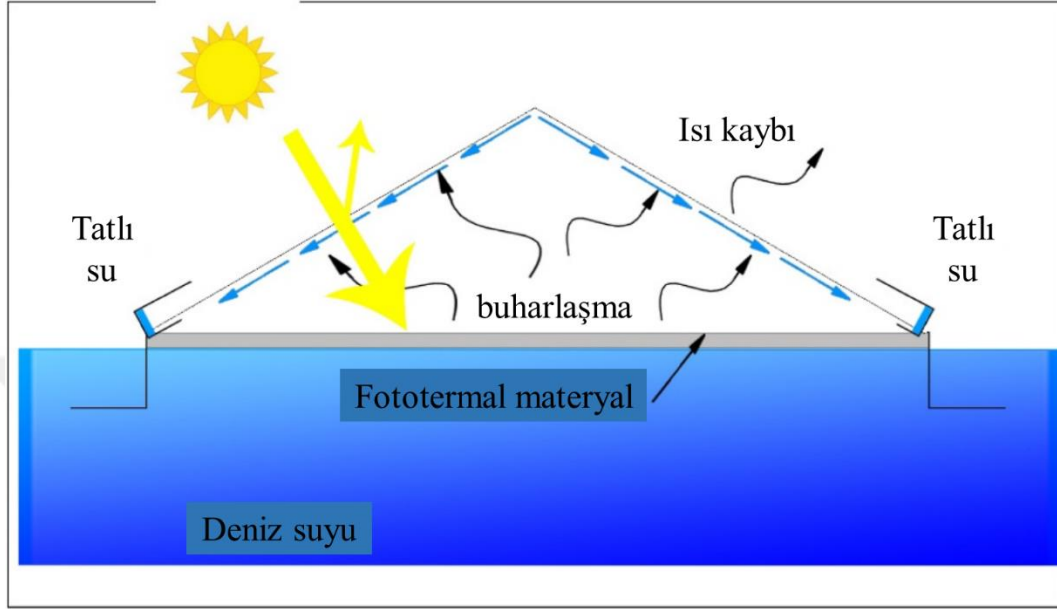
Eski çağlardan beri, GBÜ temiz su üretmek için kullanılmıştır. Son zamanlarda, güneş enerjili su buharlaştırma ile tuzdan arındırma teknolojisi yüksek fototermal dönüşüm verimliliğiyle dikkat çekmektedir. Bu sistem Şekil 5'de üç türe ayrılabilir: Alttan ısıtmalı, yığın (hacim) ısıtmalı ve ara yüz ısıtmalı (Miao *et al.* 2023). Alttan ısıtmalı tip, altta ısı üretir ve bu da önemli ısı kaybına ve daha düşük buharlaşma verimliliğine (%30-45) neden olur. Hacim ısıtmalı tip ise, güneş enerjisini emmek için bir nanoakışkan kullanır ve bu da verimliliği biraz artırır da uzun vadede kararlılık sorunlarıyla karşı karşıyadır. Ara yüz ısıtma yöntemi, ısıyı buharlaşan yüzeydeki ince bir su tabakasında yoğunlaştırarak yaklaşık %90 buharlaşma verimliliği sağlar. Bu yöntem, ısı dağılımını en aza indirerek malzeme kullanımını ve ısı kaybını azaltırken enerji verimliliğini de artırır. Dolayısıyla, su-gaz ara yüzündeki bu buharlaşmanın büyük avantajları vardır.



Şekil 5. GBÜ sistemlerinin evrimi: Doğal ısıtma, alt ısıtma, yığın ısıtma ve arayüz ısıtma (Miao *et al.* 2023)

Fototermal dönüşüm etkisi temelinde geliştirilen güneş destekli tuzdan arındırma sistemleri, güneş ışığını doğrudan ısıya çevirerek buharlaşmayı hızlandırır. Rahimi-Ahar *et al.* (2025), yaptığı derleme çalışmasında, özellikle karbon esaslı nanoyapılar, metal parçacıklar ve hibrit kompozit malzemeler gibi fototermal ajanların kullanımıyla yüzeyde lokalize ısı üretimini ve suyun doğrudan buharlaştırılmasını incelemiştir (Şekil 6). Uygulanan teknik güneş ışığını absorbe eden malzeme ile buharlaştırıcı yüzeyin doğrudan teması halinde yüzeyin buharlaşması modeline dayanmaktadır. Ara yüzeyel ısıtma, geleneksel hacimsel ısıtma

sistemlerine kıyasla daha düşük enerji kaybı ve daha yüksek buharlaşma hızı ile dikkat çekmekte ve kullanılan malzemenin özelliklerine göre değişmekle birlikte fototermal verimlilikte %80 üzerinde değerlere ulaşıldığı belirtilmektedir. Bu gibi sistemler, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminde kritik rol oynamakta ve düşük maliyetli, çevresel olarak sürdürülebilir ve yüksek verimlilik sağlamaktadır.



Şekil 6. GBÜ tuzdan arındırma sisteminin deneysel kurulumu. Buharlaştırıcının (fototermal materyal) sıcaklığı güneş radyasyonu ile artar ve deniz suyunun buharlaşmasına neden olur. Buhar, ortam havasına ısı transferi yoluyla yoğunlaşarak tatlı su üretir (Rahimi *et al.* 2025)

Chen *et al.* (2022), tarafından yapılan çalışma, güneş enerjisiyle çalışan buharlaştırma sistemlerinin verimliliğini arttırmak amacıyla geliştirilen fototermal malzemelerin hiyerarşik gözenekli yapılarıyla dikkat çekmektedir. Bu malzemeler geniş spektrumlu güneş ışığını etkin bir şekilde absorbe ederek ısıya dönüştürmekte ve bu ısıyı suyu buharlaştırmak için kullanmaktadır. Hiyerarşik gözenekli yapılar mikro ve makro düzeydeki gözeneklerin birleşimiyle suyun kapiler hareketini, buharlaşma yüzey alanını arttırmakta ve buhar üretim hızını yükseltmekte, termal iletkenliği optimize ederek ısı kayıplarını minimize etmektedir. Bu yapıların ışık absorpsiyonunu ve ısı tutma kapasitesini geliştirerek sistem performansını optimize ettiği rapor edilmiştir.

Güneş enerjisiyle çalışan ara yüz yüzeysel buharlaştırma teknolojileri sürdürülebilir yapıları su arıtım alanında enerji verimliliği ve çevresel uyumluluk açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Uygun malzeme seçimi ve yapılandırma ile bu sistemlerin buharlaştırma verimliliğinin artırılabilirliğini ve farklı su kaynaklarının arıtımında etkili çözümler sunabileceğini gösterilmiştir (Kumar *et al.* 2023).

Fototermal dönüşüm malzemeleri, güneş enerjisinin buharlaştırma işlemlerine etkin aktarımını sağlar. Lee *et al.* (2024) tarafından yapılan çalışma, farklı yapıdaki materyallerin optik soğurma özellikleri, ısı iletkenlikleri ve yüzey morfolojilerinin buharlaşma verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Araştırmada, karbon esaslı yapılar, metal organik iskeleler, yarı iletken ve hibrit kompozitlerin fototermal performans açısından karşılaştırılması yapılmış; özellikle nano yapıli karbon malzemelerin, düşük maliyetli ve çevre dostu alternatifler olarak öne çıktığı vurgulanmıştır. Buharlaşma sistemlerinde suyun yönlendirilmesi, ısı kayıplarının azaltılması ve uzun vadeli stabilite gibi parametrelerin, malzeme tasarımıyla doğrudan ilişkili olduğu belirtilmiştir. Yapılan kapsamlı incelemede, bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini, üretim yöntemlerini ve uygulama alanlarını detaylandırarak güneş enerjili buharlaştırma sistemlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesinde malzeme mühendisliği temelli stratejilerin belirleyici rol oynayacağı rapor edilmiştir.

Karbon esaslı malzemeler, GBÜ sistemlerinde öne çıkan fototermal dönüştürücüler arasında yer almakta ve yüksek ışık soğurma kapasiteleriyle termal enerjiyi etkili bir biçimde su buharına çevirmektedir. Bu malzemelerin güneş buharlaştırma verimliliği üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş, grafen, karbon nanotüpler, biyokömür ve diğer karbon türevlerinin yapısal avantajlarına dikkat çekilmiştir (Tang *et al.* 2022). Ayrıca karbon esaslı malzemelerin gözeneklilik, yüzey alanı, hidrofobik-hidrofiliklik ve termal iletkenlik gibi özelliklerinin, ısı lokalizasyonu ve suyun buharlaştırma hızındaki rolü kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Özellikle, biyolojik atıklardan türetilen karbon materyallerin hem çevre dostu hem de maliyet açısından avantaj sağladığı belirtilmiş ve karbon esaslı malzemelerin fototermal sistemlerde kullanılmasının sadece enerji verimliliğini arttırmakla kalmayıp aynı zamanda sürdürülebilir malzeme döngüsüne katkı sağladığı vurgulanmıştır.

Birçok çalışmada, güneş destekli su arıtma teknolojileri için fototermal malzemeler ve sistem tasarımları temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Geliştirilen güneş destekli arıtma sistemlerine entegre edilen malzeme türleri kapsamlı bir şekilde ele alınmış, fototermal malzemelerin ısı yönetimi, su taşınımı, tuz geri çökeltme gibi süreçlerdeki etkinliği analiz edilmiştir (Zhang *et al.* 2023). Karbon esaslı yapılar, metal nano parçacıklar, polimerler ve kompozit sistemler hem laboratuvar ortamındaki verimlilikleri hem de saha uygulamalarındaki dayanıklılıkları açısından karşılaştırılmış ve buharlaştırma verimliliğini etkileyen çok katmanlı yapı tasarımları ve tuz birikiminin engellenmesine yönelik çözümler ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Zhang *et al.* (2023) bu teknolojilerin prensiplerini, güncel gelişmelerini ve karşılaşılan zorlukları detaylandırarak malzeme bilimindeki ilerlemelerin, güneş destekli su arıtma sistemlerinin ölçeklenebilirliği ve uzun vadeli kullanılabilirliği açısından belirleyici

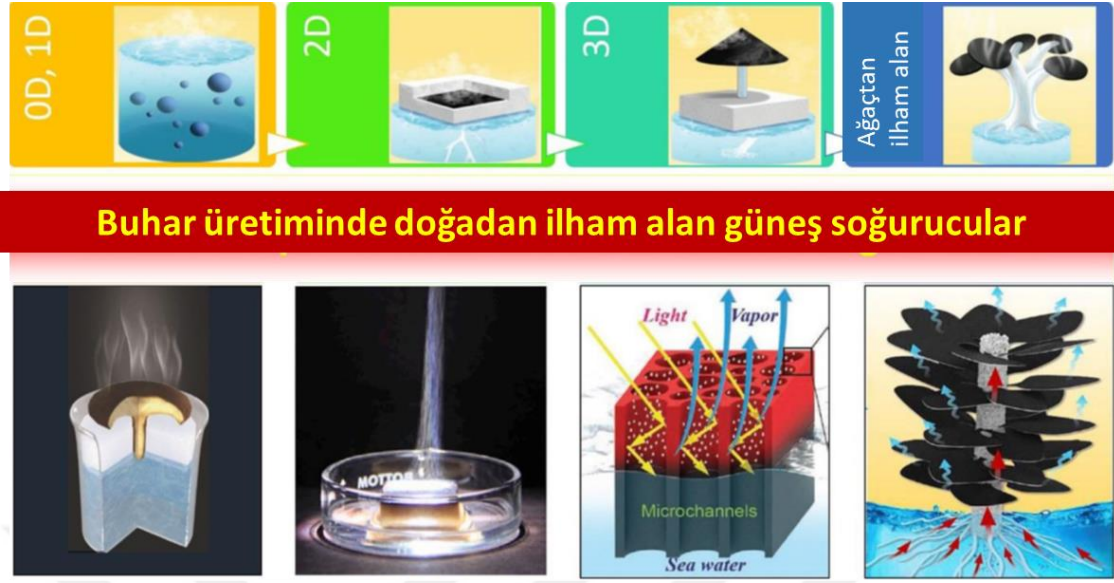
olduğunu, aynı zamanda bu sistemlerin karşılaştığı teknik ve ekonomik zorluklara yönelik çözümler sunduğunu belirtmiştir.

Wen *et al.* (2025) tarafından yapılan çalışmada, yüksek performanslı fototermal sistemler için $Ti_3C_2T_x$ esaslı MXene aerogel membranı sentezlenmiş; çok katmanlı ve gözenekli yapısı sayesinde güneş ışığını %90'ın üzerinde absorbe eden, yüzey sıcaklığını 55–65 °C'ye çıkartan bir sistem geliştirmiştir. Bu yapı, yüzeyde buharlaştırma mekanizmasıyla çalışarak bir güneş ışınımında yaklaşık 1,4 kg/m²·h buharlaşma hızı sağlamış, asimetrik ısılatma tasarımı ile tuz kristallerinin yüzeyde birikimini önlemiş ve hem saf hem tuzlu su ortamında uzun süreli performans ve kararlılık göstermiştir. Mekanizma olarak, güneş enerjisinin doğrudan suya iletilmesiyle buharlaşma hızlanmakta ve geleneksel ısı iletimine ilişkin enerji kayıpları minimize edilmektedir. Bu sistem, özellikle içme suyu üretimi, deniz suyundan tuz arındırma ve çevresel su arıtma teknolojileri gibi uygulamalarda fototermal verimlilik, tuz engelleme ve maliyet açısından sürdürülebilir çözümler sunmaktadır (Wen *et al.* 2025).

Miao *et al.* (2025) tarafından yürütülen çalışmada, güneş enerjisine dayalı yüzeysel buharlaştırma teknolojisine ilişkin fototermal malzeme tasarımı, yoğunlaştırucu birim entegresi ve pratik uygulama odaklı stratejiler sistematik olarak değerlendirilmiştir. Optik emilimi maksimuma çıkaran, termal izolasyonu iyileştiren ve su taşıma kapasitesini artıran çok katmanlı yapılar geliştirilmiş, bu yapıların güneş ışığını doğrudan yüzeyde ısıya dönüştürerek buharlaşma sürecini hızlandırdığı gözlenmiştir. Tasarım prensipleri, materyal bileşimleri ve yoğunlaştırma birimi optimizasyonu ile tuzlu suyun arıtılması, içme suyu üretimi gibi uygulamalarda yüksek verimlilik elde edilmiştir. Ayrıca çalışma, farklı fototermal malzemelerin performans karşılaştırmalarını sunmakta ve sisteme entegre edilen yoğunlaştırucu modül ile toplam su toplama hacminde artış sağlandığını rapor etmektedir (Miao *et al.* 2025).

Dao *et al.* (2024) tarafından yapılan derleme çalışmasında, doğadan ilham alınarak tasarlanmış yaprak benzeri bir fototermal soğurucular incelenmiş ve bu biyomimetik yapıların hem ışık emilimini maksimize eden morfolojiye hem de ısıyı etkili şekilde yönetebilen içsel termal iletkenlik kanallarına sahip olduğu belirtilmiştir (Şekil 7). Bu yapıların sentezinde, doğadaki yaprak damar sistemini taklit eden mikro/mezoporöz ağ mimarisinin kullanıldığı ve yüzeyin hem hidrofobik hem de hidrofilik olmayan bölgelere sahip şekilde Janus-tipi tasarlandığı, böylece su taşınımının kolaylaştırıldığı ve tuz birikiminin engellendiği rapor edilmiştir. Güneş ışığını geniş banda yayılmış olarak %90'ı aşan verimle absorbe eden bu sistemler, buharlaşma yüzeyini doğrudan ısıtarak 1 güneş ışığı altında yüksek buharlaşma hızına ulaşmış ve enerji kullanımı açısından yüksek etkinlik göstermiştir. Mekanizma olarak, yapının içindeki damar yapısı suyu verimli şekilde yüzeye taşıırken, termal kanallar alt sıcaklık kayıplarını minimize etmiş; sonuçta sistem, özellikle deniz suyunu tuzdan arındırma ve temiz

su üretimi gibi saha uygulamalarında sürdürülebilir, enerji ve malzeme açısından verimli çözümler sunmuştur.



Şekil 7. Doğal kaynaklı güneş soğurucularına dayalı bir GBÜ sisteminin geliştirilmesinin şematik gösterimi (Dao *et al.* 2024)

Geleneksel güneşle buharlaştırma sistemleri çoğunlukla yalnızca temiz su üretimiyle sınırlıyken, yeni nesil hibrit sistemler bu yaklaşımı daha geniş bir enerji kullanım konseptine taşımaktadır. Ding *et al.* (2021), hibrit solar kaynaklı ara yüzeysel buharlaştırma sistemlerinin yalnızca suyun buharlaştırılması değil, aynı zamanda güneş enerjisinin çok yönlü kullanımını hedefleyen yenilikçi bir yaklaşımla tasarlandığını vurgulamaktadır. Çalışmada, fototermal materyallerin yalnızca su arıtımı amacıyla değil, aynı zamanda elektrik üretimi, termokimyasal reaksiyonlar ve ısı yönetimi gibi çeşitli uygulamalara entegrasyon potansiyeli tartışılmıştır. Bu hibrit sistemlerde kullanılan yapılar, yüksek ışık absorpsiyon kapasitesine, düşük ısı iletimine ve yüksek yüzey alanına sahip olup enerji dönüşüm süreçlerini maksimum verimle gerçekleştirecek şekilde optimize edilmiştir. Ayrıca, bu sistemlerin mimarisi, enerji geri kazanımı ve çok fonksiyonlu kullanım açısından sürdürülebilirliği destekleyici yönde geliştirilmiştir. Bu bağlamda, çalışma yalnızca GBÜ sistemlerinin verimliliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda güneş enerjisinin çok yönlü ve entegre biçimde değerlendirilmesinin önünü açan bir yaklaşımı temsil etmektedir.

Jing *et al.* (2024) tarafından yapılan çalışmada, hidrojellerin sahip olduğu yüksek su tutma kapasitesi, gözenekli yapısı, ışık absorpsiyonunu destekleyen bileşenleri ve düşük ısı iletkenliği gibi özelliklerin, fototermal buharlaştırma süreçlerindeki avantajları analiz edilmiştir. Çalışmada, doğal polimerler ve sentetik polimerler kullanılarak geliştirilen hidrojel yapılarının, yüzey mühendisliği teknikleriyle modifiye edilerek ışık emme verimlerinin artırıldığı, aynı zamanda su taşınımının kontrollü biçimde optimize edildiği belirtilmektedir. Bu

hidrojellerin, özellikle düşük maliyetli, çevre dostu ve sürdürülebilir arıtma teknolojileri arayışında öne çıktığı, kıyı bölgeleri, kurak alanlar ve gelişmekte olan ülkelerdeki temiz su temini gibi kritik alanlarda kullanılabileceği vurgulanmaktadır. Ayrıca, yapay güneş simülasyonları altında yapılan testlerde bu yapıların yüksek buharlaşma oranları ve uzun süreli kararlılık gösterdiği rapor edilmiştir. Çalışma, hidrojellerin malzeme kompozisyonu, mikro/makro yapı özellikleri ve fototermal performansları arasındaki ilişkilerin derinlemesine analizini sunmakta, bu bağlamda ileri düzey su arıtma teknolojileri için yeni nesil fototermal materyal platformları geliştirilmesine yönelik güçlü bir perspektif sağlamaktadır.

Güneş enerjisiyle çalışan buharlaştırma sistemlerinde uzun süreli performansı etkileyen başlıca sorunlardan biri, tuz birikimi ve biyolojik kirlilik kaynaklı tıkanmalardır. Wang *et al.* (2022), bu sorunlara çözüm sunan hizalanmış aerogellerin tasarım ve performansını detaylı biçimde incelemişlerdir. Geliştirilen aerogeller, yönlendirilmiş gözenek yapıları sayesinde suyun kapiler hareketini hızlandırmakta ve yüzeyde biriken tuzun sistem dışına taşınmasını mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda bu yapıların düşük ısı iletkenlik, yüksek güneş ışığı absorpsiyonu ve buharlaşma verimliliği ile birleşerek enerji dönüşüm sürecini optimize ettiği gösterilmiştir. En dikkat çekici özelliklerden biri ise bu aerogellerin anti-biokirlenme özellikli olmasıdır; bu sayede mikrobiyal oluşumların yüzeye yapışması engellenerek uzun vadeli ve sürdürülebilir kullanım sağlanmaktadır. Bu çalışma, özellikle tuzlu ve biyolojik olarak kirli su kaynaklarının arıtımında kullanılan GBÜ sistemlerinin dayanıklılığını ve verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi malzeme yaklaşımlarına güçlü bir örnek teşkil etmektedir.

Güneş destekli deniz suyu arıtımı, sürdürülebilir temiz su temininde enerji verimliliği ve çevresel etki açısından önemli bir çözüm yolu olarak öne çıkmaktadır. Li *et al.* (2013) bu alanda gerçekleştirdikleri kapsamlı derlemede, güneş enerjisiyle çalışan deniz suyu tuzdan arındırma sistemlerinin teknik altyapısını, uygulama çeşitliliğini ve performansını ele almışlardır. Çalışmada, özellikle fotovoltaiik ve termal güneş sistemlerinin çeşitli membran teknolojileri ve çok etkili damıtma yöntemleriyle entegre edilerek hem enerji tüketiminin azaltıldığı hem de arıtma verimliliğinin artırıldığı gösterilmiştir. Ayrıca, sistem tasarımlarının bulunduğu coğrafyaya ve iklim koşullarına göre uyarlanabilirliği sayesinde, bu teknolojilerin merkezi olmayan su arıtım çözümleri için ideal olduğu vurgulanmıştır. Güneş destekli tuzdan arındırma sistemleri, düşük karbon ayak izi, yenilenebilir enerji kullanımı ve çevreye duyarlı yapısıyla, özellikle su sıkıntısı çeken bölgelerde uygulanabilirliği yüksek, sürdürülebilir alternatifler sunmaktadır.

Ara yüzeysel GBÜ teknolojilerinin verimliliğini artırmak için geliştirilen yeni nesil fototermal malzemeler, enerji dönüşüm süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Cheng *et al.* (2019), indirgenmiş grafen oksit (rGO) esaslı kompozit zar yapıları (GWS: kompozit

geliştirilmiş sistem) kullanarak GBÜ sistemlerinin performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir (Şekil 8). Bu çalışmada geliştirilen rGO membranlar, yüksek güneş ışığı absorpsiyonu, düşük ısı iletkenliği ve su taşınımını kolaylaştıran gözenekli yapıları sayesinde buharlaşma verimini artırmakta; ayrıca termal lokalizasyon yoluyla ısıyı sadece buharlaşma yüzeyinde yoğunlaşmasını sağlayarak enerji kayıplarını minimize etmektedir. Kompozit yapıların ayrıca mekanik dayanıklılık ve uzun süreli kararlılık özellikleriyle öne çıktığı, bu yönüyle sistemin sürdürülebilir kullanımına katkı sağladığı vurgulanmaktadır. Bu araştırma, fototermal malzeme mühendisliğinde indirgenmiş grafen oksit esaslı membranların çok yönlü kullanım potansiyelini ortaya koymakta ve GBÜ sistemlerinin ileri düzey uygulamaları için önemli bir temel oluşturmaktadır.



Şekil 8. Su üzerinde yüzen CES'in resmi (Cheng *et al.* 2019)

Günümüzde doğal malzemelere dayalı ara yüzeysel GBÜ sistemleri, sürdürülebilir temiz su temininde umut vadeden bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Zhang *et al.* (2024) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı derlemede, bitkisel lifler, odun esaslı yapılar, deniz kabukları ve karbonize edilmiş doğal malzemeler gibi çevre dostu kaynakların GBÜ sistemlerinde kullanımı detaylı şekilde incelenmiştir. Bu doğal yapıların gözenekli yapısı, yüksek su taşıma kapasitesi, düşük termal iletkenlik ve güneş ışığını etkili şekilde absorbe etme yetenekleri sayesinde buharlaştırma verimliliğini artırdığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin düşük maliyetli, biyolojik olarak parçalanabilir ve geniş ölçekte erişilebilir olmaları, sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Çalışma, özellikle biyokömür gibi doğal kaynaklardan elde edilen karbon esaslı yapıların, ışık absorpsiyonu ve ısı tutma özellikleri sayesinde fototermal performansı güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamlı değerlendirme, doğal malzemelerin GBÜ sistemlerine entegre edilmesinin yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik açılardan da önemli katkılar sunduğunu göstermektedir.

Karbon esaslı malzemeler, güneş enerjili buharlaştırma sistemlerinde fototermal performans açısından yüksek potansiyele sahip yenilikçi yapılar arasında yer almaktadır. Toyoda *et al.* (2023), çeşitli karbon malzemelerinin (grafit, karbon nanotüpler, grafen, aktif karbon ve biyokömür) güneş ışığını absorbe etme, ısıyı lokalize etme ve su taşınımını kolaylaştırma kapasiteleri bakımından sunduğu avantajları ayrıntılı biçimde değerlendirmiştir. Söz konusu malzemeler, geniş yüzey alanları, kimyasal kararlılıkları, düşük maliyetleri ve çevre dostu üretim yöntemleri sayesinde sürdürülebilir su arıtma uygulamalarında dikkat çekici bir rol üstlenmektedir. Çalışmada özellikle biyokömür gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen karbon materyallerinin, çevresel etkileri azaltması ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu olması bakımından öne çıktığı vurgulanmaktadır. Bu değerlendirme, karbon temelli yapıların GBÜ teknolojilerindeki mevcut ve potansiyel uygulamalarına ışık tutarak, daha etkin ve çevreyle uyumlu sistemlerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Biyokömür, organik atıkların kontrollü piroliz işlemi ile karbonca zengin, gözenekli ve yüksek yüzey alanına sahip katı bir ürüne dönüştürülmesiyle elde edilen çevre dostu bir malzemedir. Çeşitli biyokütle atıklarının biyokömüre dönüştürülmesi, hem atık yönetimi problemlerine çözüm sunmakta hem de su arıtımı, toprak iyileştirme ve enerji üretimi gibi çeşitli uygulamalarda yüksek performans göstermektedir. Piroliz sıcaklığı, süresi ve ortam koşulları gibi parametreler, biyokömürün yapısal özellikleri ve fonksiyonelliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

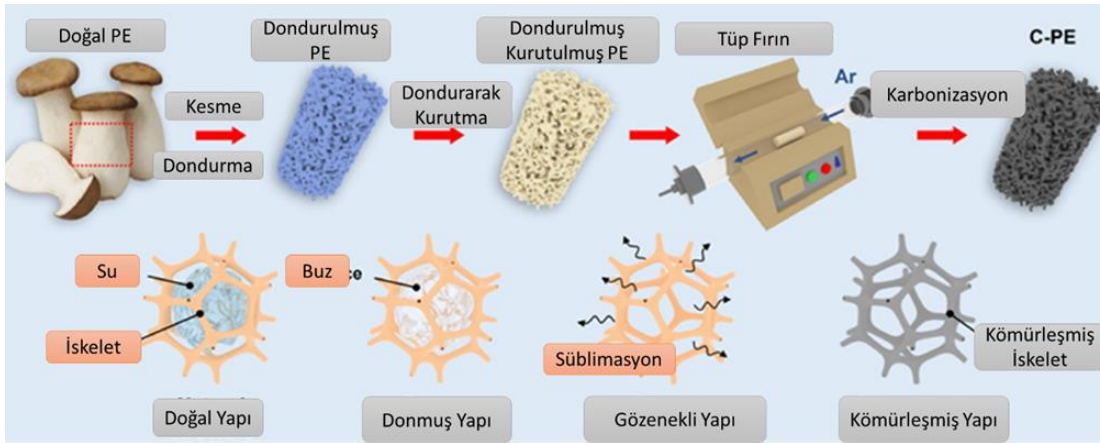
Liu *et al.* (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, biyokütle esaslı malzemelerin güneş enerjisiyle çalışan ara yüzey buhar üretim sistemlerindeki potansiyeli kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmada, hidrojel, karbonize biyokütle ve lif esaslı yapılar gibi çeşitli biyolojik kaynaklı fototermal evaporatörlerin tasarım ilkeleri, ıslanabilirlik özellikleri, termal yönetim stratejileri ve tuz reddetme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Bu malzemelerin, sürdürülebilir ve çevre dostu su arıtma çözümleri sunma potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır. Çalışma, biyokütle esaslı malzemelerin, güneş enerjisiyle çalışan su arıtma sistemlerinde yüksek verimlilik ve düşük maliyetli çözümler sunabileceğini ortaya koymuştur.

Zhu *et al.* (2019), farklı biyokömür hammaddelerinin piroliz sonrası yüzey kimyası ve gözenek özelliklerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, ham maddeden kaynaklanan yapısal farklılıkların biyokömürün çevresel uygulamadaki performansını belirlediği ve odunsu materyallerin daha yüksek yüzey alanı, aromatik yapı sağlarken gıda ve tarım atıklarının ise daha zengin oksijenli işlevsel gruplar içerdiğini ortaya koymuş, piroliz sıcaklığı arttıkça gözenek çaplarında daralma, yüzey alanında artış ve yüzey polaritesinde azalma gözlenmiştir.

Bu sonuçlar, biyokömür seçiminde ham maddenin önemini ortaya koymakta, üretim koşulları elde edilecek biyokömürün kullanım alanına göre optimize edilebileceğini göstermiştir.

Tripathi *et al.* (2016), biyokütle atıklarından biyokömür üretiminde piroliz yönteminin etkisini kapsamlı şekilde incelemiştir. Piroliz işlemi, biyokütlenin oksijensiz ortamda 300-700°C arasında kontrollü ısıtılması ile gerçekleşmekte ve bu termal bozunma sonucu yüksek karbon içerikli biyokömür oluşmaktadır. Çalışmada, piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı ve tutma süresi gibi proses parametrelerinin biyokömürün yapısal özellikleri, kimyasal bileşimi ve gözenekliliği üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Mekanizma olarak, yüksek sıcaklıklarda biyokütlenin hücresel yapısının parçalanmasıyla karbon yoğunluğu artmakta ve mikrogözenek yapısı gelişmektedir. Bu yapısal değişimler, biyokömürün toprak iyileştirme, karbon tutma ve su arıtımı gibi çevresel uygulamalarda etkin kullanılabilmesini sağlamaktadır.

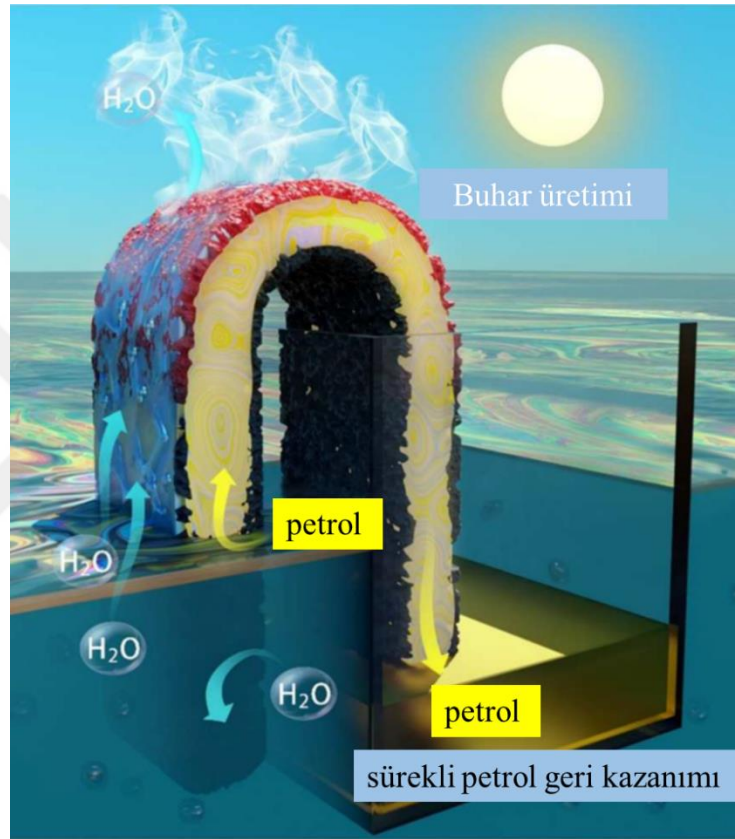
Zhou *et al.* (2023) çalışmalarında, hiyerarşik gözenek yapısına sahip, karbonize edilmiş *Pleurotus eryngii* mantarından üretilen bir güneşle çalışan buharlaştırıcı sistem geliştirmiştir (Şekil 9). Bu sistem, güneş enerjisinin etkili bir şekilde absorbe edilmesini sağlayarak suyun hızlı buharlaşmasını ve kirli sulardan arıtma performansını artırmaktadır. Piroliz yöntemiyle elde edilen karbon malzeme, çok seviyeli gözenek yapısı sayesinde yüksek yüzey alanı ve iyi ışık emme kapasitesi göstermektedir. Mekanizma olarak, güneş ışınımı karbon yüzey tarafından emilerek ısıya dönüştürülmekte ve bu ısı su moleküllerinin buharlaşmasını hızlandırmaktadır. Çalışmada, sistemin arıtma verimliliği, iyon giderimi ve buharlaşma hızı detaylı şekilde test edilmiştir. Sonuçlar, karbonize *Pleurotus eryngii* (PE) esaslı buharlaştırıcıların atık suyun temizlenmesinde yüksek verimlilikle kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 9. Hiyerarşik olarak gözenekli güneş emici C-PE'nin üretim yolu ve morfolojilerinin şematik gösterimi (Zhou *et al.* 2023)

Wu *et al.* (2023) tarafından yapılan çalışmada, güneş enerjisiyle deniz suyunu arıtmak ve yağ emülsiyonu içeren suyun sürekli yağ geri kazanımını sağlamak için bi-fonksiyonel grafen tabanlı cihaz (BGD'ler) tasarlanmıştır. Sistem, dikey grafen levhalar ile ters U-şeklinde

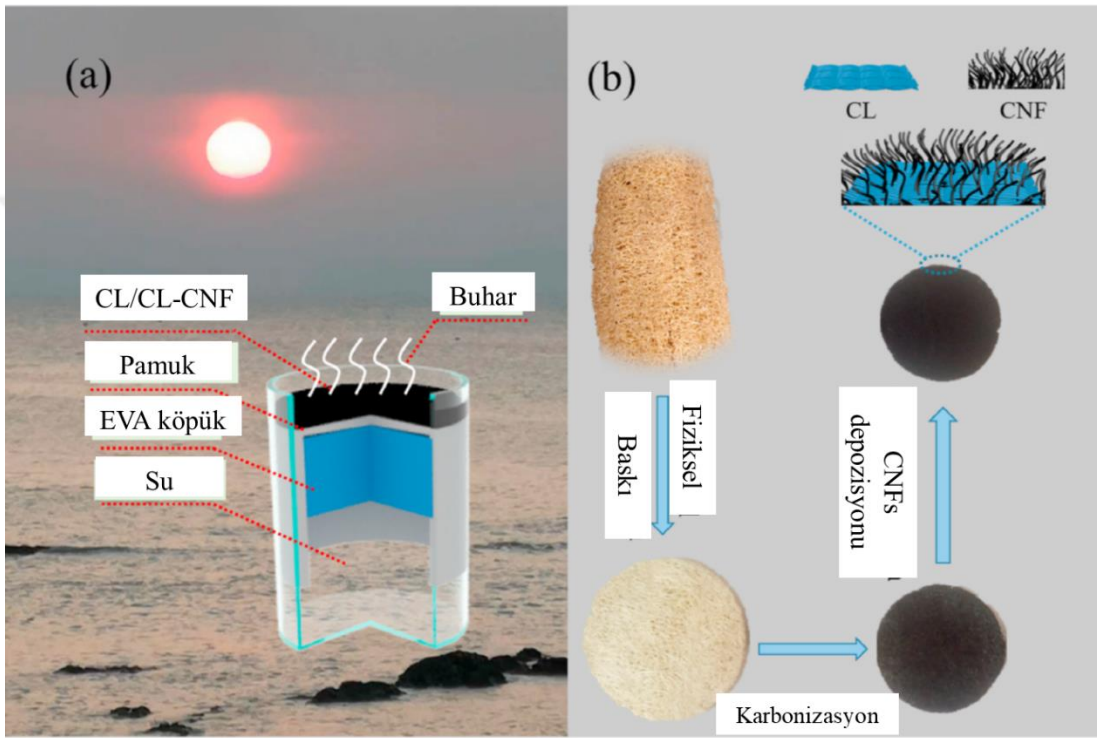
grafen monolit bileşenleri bir araya getirerek mekanik açıdan sağlam ve farklı yüzey özelliklerine sahip bir yapı ortaya koymaktadır (Şekil 10). Hidrofobik iç kanallar yağın kendi kendine sifon etkisiyle geri kazanımını gerçekleştirirken, hidrofilik dış yüzeyde su buharı üretimi pasif olarak sürdürülmektedir. Çalışma, bir güneş ışınımı altında $2,04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ buhar üretim hızına ve aynı anda $105.8 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ yağ geri kazanım oranına ulaşarak eşzamanlı iki çevresel soruna (susuzluk ve yağ kirlenmesi) çözüm sunmuştur. Bu yenilikçi yöntem, kozmetik veya petrol ürünleri içeren kirli su kaynaklarını enerjisiz ayrıştırarak hem temiz su eldesinde hem de değerli hidrokarbonların geri kazanımına imkân tanımaktadır.



Şekil 10. BGD'ler tarafından petrolle kirlenmiş deniz suyundan güneş enerjisiyle çalışan eş zamanlı buhar üretimi ve sürekli petrol geri kazanımının şematik gösterimi (Wu *et al.* 2023)

Basunya *et al.* (2023), tarafından yapılan araştırmada, polietilen glikol (PEG) ile biyokömürün birleşimi sonucu ekonomik ve dayanıklı bir kompozit fototermal emici geliştirilmiştir. Çalışmada, PEG'in biyokömür matrisi içerisinde dengeli dağılımı sağlanarak, güneş ışığını etkili biçimde emen ve ısıya karşı kararlı bir malzeme tasarlanmıştır. Bu kompozit, güneş enerjisinin doğrudan buharlaştırma sürecine dönüşümünü destekleyerek 24 saat kesintisiz buhar ve elektrik üretimi gerçekleştirmiştir. Kullanılan teknikler arasında malzemenin yapısal ve termal özelliklerinin ayrıntılı incelenmesi, fototermal verimliliğin değerlendirilmesi ve uzun süreli dayanıklılık testleri yer almaktadır. Kompozitin çalışma prensibi, güneş ışığından alınan enerjiyi ısıya dönüştürüp buhar üretiminde kullanması ve aynı

zamanda termal enerjiyi depolayarak gece dönemi için de enerji sağlaması ile sürdürülebilir ve düşük maliyetli enerji üretimi alanında önemli bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, biyokömür gibi yenilenebilir ve çevre dostu malzeme kullanımı sayesinde, temiz su elde edilmesi ve enerji üretiminde yenilikçi çözümler ortaya konmuştur. Sonuç olarak, geliştirilen PEG/biyokömür kompoziti, güneş enerjisini sürekli ve verimli şekilde kullanabilen, pratik uygulamalara uygun bir fototerma malzeme olarak dikkat çekmekte ve özellikle yenilenebilir enerji sistemleri, su arıtımı ve çevre teknolojileri gibi alanlarda sürdürülebilir enerji çözümleri geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

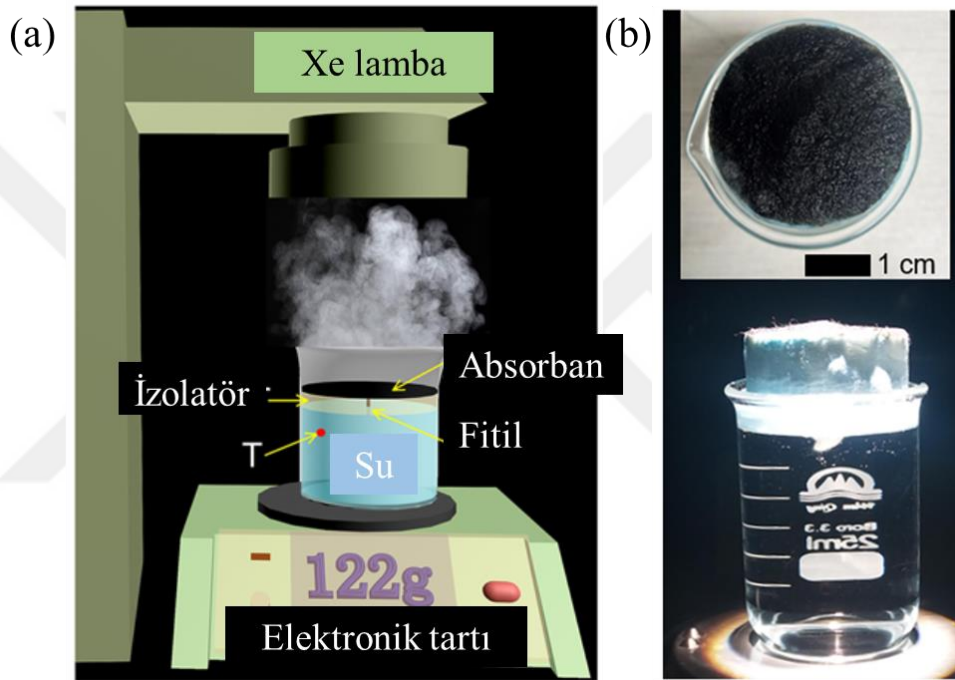


Şekil 11. Lufa kullanılarak güneş enerjili buhar üretim cihazının tasarımının şematik gösterimi (Zhang *et al.* 2021)

Zhang *et al.* (2021) tarafından yapılan çalışmada, lufa süngerinden elde edilen karbonize yapılar güneş enerjisiyle çalışan buhar üretimi amacıyla fototerma malzeme olarak kullanılmıştır. Karbon nanoliflerin bu yapıya entegre edilmesiyle ışık soğurma kapasitesi ve ısıya dönüşüm verimliliği artırılmış, sonuç olarak $1,72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 'lik buharlaşma hızı ve %92,5'lik fototerma verim elde edilmiştir (Şekil 11). Üç katmanlı buharlaştırma sistemi, ısı kaybını azaltan EVA köpük, su taşıyan pamuk ped ve yüzeyde bulunan CL-CNF malzemesinden oluşmuştur. Yapı hem deniz suyu arıtımında hem de ağır metal içeren atık suların temizlenmesinde etkin bir performans sergilemiştir.

Lin *et al.* (2019), deniz yosunu (kelp) gibi bol bulunan ve ucuz biyokütleden karbonize fototerma malzeme (CK) üretmiş ve bu karbonize yosun ile ~%93 güneş ışığı absorpsiyonu elde etmiştir. CK'nın gözenekli mikro yapısı sayesinde üstün kapiler su taşınımı ve yüzey alanı

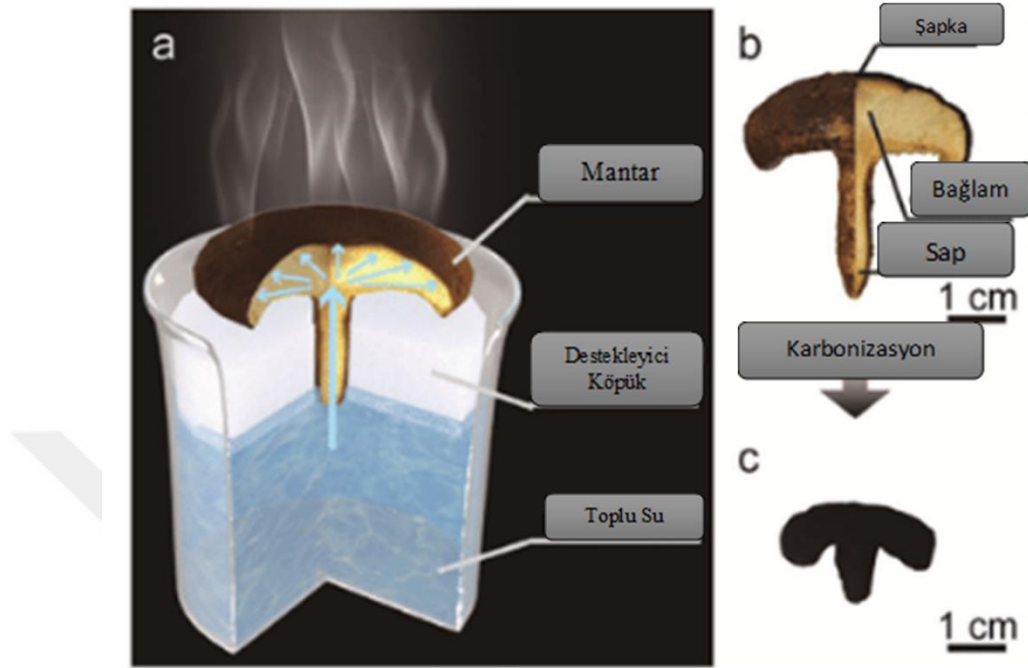
sunarak doğrudan güneş ışığını buhara dönüştürmek için yüksek verimli bir sistem oluşturulmuştur. GBÜ tasarımında CK, polistiren köpük termal yalıtıcı ve pamuk fitil aracılığıyla su sağlayan basit ara yüzeyiyle entegre edilmiş ve 1 güneş ışığı (1 kW/m^2) altında test edildiğinde yaklaşık $1.351 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ lık buharlaşma oranı ve %84.8'lik fototermal dönüşüm verimliliği tespit edilmiştir (Şekil 12). Bu çalışmanın sonuçları, deniz yosunu gibi biyolojik atık kaynaklarının doğrudan ve ekonomik işleme fototermal buhar jeneratörü olarak kullanılabileceğini desteklemekte ve tez çalışmasında önerilen biyokökenli karbon bazlı sistemlerin hem deneysel hem kuramsal temellerini sağlayacak güçlü bir örnek teşkil etmektedir.



Şekil 12. (a) Yosundan çıkılarak hazırlanan GBÜ cihazının şematik gösterimi. (b) Cihazın 1 güneş ışığı altında fotoğrafları (Lin *et al.* 2019)

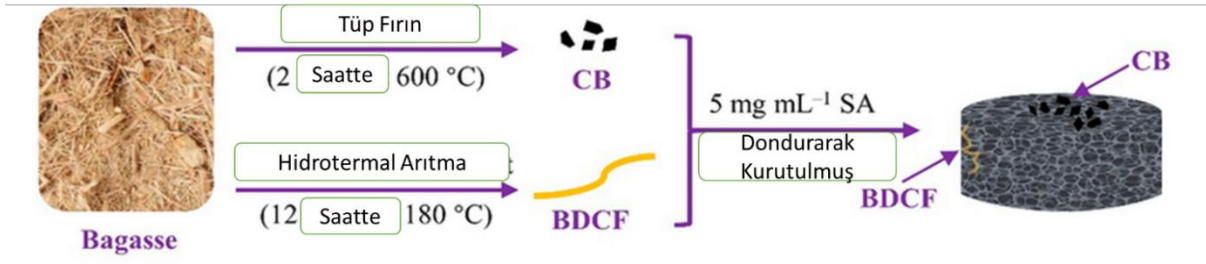
Cu *et al.* (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, biyomateryal yapıya sahip mantarın fototermal buhar üretimi amacıyla doğrudan kullanılabilirliği araştırılmış ve kimyasal veya yapısal modifikasyona gerek duyulmadan, mantarların kendi doğal mikro-gözenekli yapısının fototermal buhar üretimi uygulamaları için potansiyel sürdürülebilir bir biyomateryal olarak etkili olabileceği gösterilmiştir (Şekil 13). Çalışmanın amacı, mantarın sahip olduğu doğal dokunun yapısal özelliklerinden yararlanılarak güneş ışığını yüksek verimle emebilen ve buhar üretimine entegre edilebilen bir sistem tasarlamaktır. Mantarın kendine özgü gözenekli yapısı, hem ısı yalıtımı sağlamakta hem de su taşınımını desteklemektedir. Bu özellikleri sayesinde, suyun yüzeye taşınarak fototermal dönüşüm yoluyla buhara dönüştürülmesi süreci, geleneksel malzemelere kıyasla daha verimli şekilde gerçekleşmiştir. Elde edilen bulgular,

düşük maliyetli, çevre dostu ve enerji harcamayan bir sistemin mümkün olduğunu ortaya koyarken, buhar üretimi alanında biyolojik yapıli malzemelerin pratik uygulamalara entegre edilebileceğini de göstermiştir.



Şekil 13. Mantar esasli güneş enerjisiyle su buhar üretimi cihazının şematik gösterimi. b) Mantarın fiziksel resmi. c) Karbonizasyondan sonra mantarın fiziksel resmi (Cu *et al.* 2017)

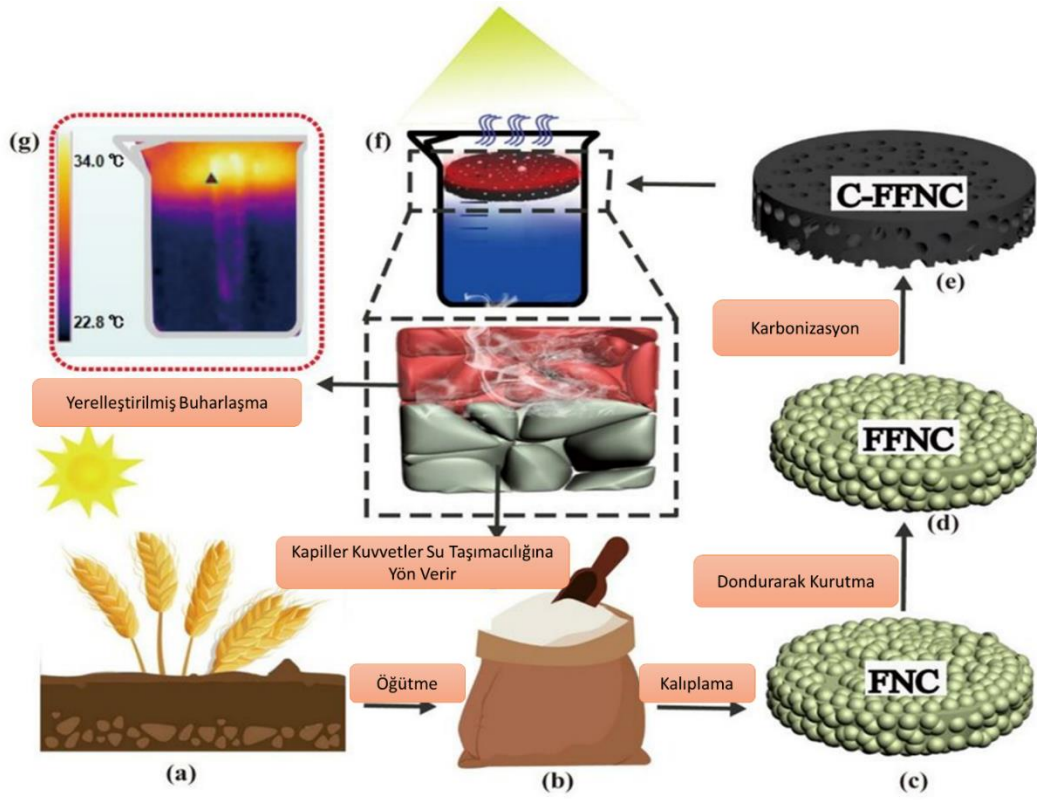
Xiong *et al.* (2022), gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, şeker kamışı posası (bagasse) gibi biyobozunur tarımsal atıklardan elde edilen karbonize malzeme (CB) ile bagasse'ten türetilmiş selüloz lifi (BDCF) kullanılarak oluşturulan üç boyutlu fototermal aerogel tasarlanmış, yüksek verimli güneş enerjili buhar üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 14). CB bileşeni %95'e yakın güneş ışığı emilimi sağlayarak etkili bir ışık-ısı dönüşümü sunarken; süper-hidrofilik BDCF yapısı, dengeli su taşınımı ve suyun tutulmasını mümkün kılmıştır. Hazırlanan aerogel birimi, su yüzeyinde konumlandırılarak 1 güneş ışığı (1 kW/m²) altında test edilmiş ve 1.36 kg m⁻² h⁻¹ buharlaşma oranına ulaşırken, fototermal dönüşüm verimliliği yaklaşık %77.34 olarak ölçülmüştür. Ayrıca materyalin deniz suyunun tuzdan arındırılması ve boyar madde içeren atık suyun güneş ışığı ile temizlenmesi gibi pratik uygulamalarda da etkili olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, biyokökenli atık malzemelerin düşük maliyetli, çevre dostu ve ölçeklendirilebilir fototermal sistemler olarak su arıtma ve buhar üretimi alanında da kullanılabilecek yol gösterici bir çalışma olduğunu göstermiştir.



Şekil 14. Baggase'den çıkılarak hazırlanan buharlaştırıcı cihazının şematik gösterimi (Xiong *et al.* 2022)

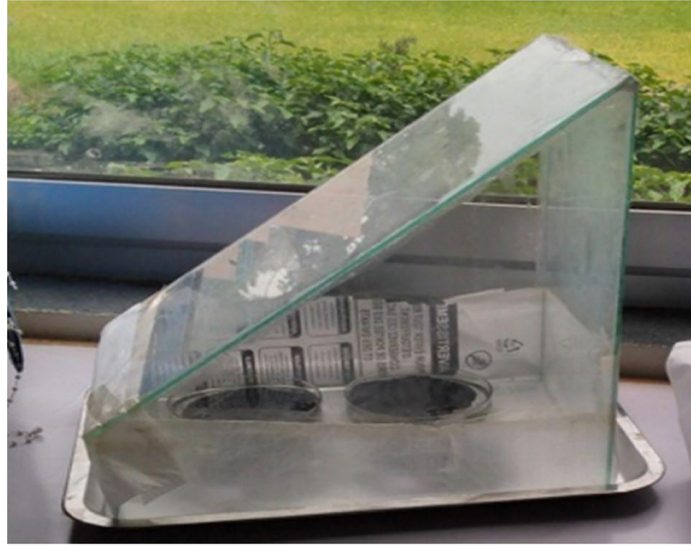
Li *et al.* (2024) yürüttüğü deniz suyundan tuzun arındırılması çalışmasında, sürdürülebilir enerji ve atık yönetimini birleştiren yenilikçi bir yaklaşımla, çay atığından üretilen doğal bir polifenolik bileşik olan theabrownin'in (TB), güneş enerjisiyle yardımıyla buhar üretim sistemlerinde fototermal materyal olarak kullanmışlardır. Çalışma, organik atıklardan elde edilen maliyeti düşük malzemelerin, temiz su üretimi uygulamalarında yüksek verimle kullanılabilirliğini göstermektedir. Çay atıklarından izole edilen TB ile fototermal performansı yüksek, ıslanabilirliği güçlü ve ışığı bünyesine alma kabiliyeti artırılmış kompozit bir yapı oluşturulmuş ve bu yapılar farklı destek malzemeleri üzerinde test edilerek buhar üretim değerleri ölçülmüştür. Geliştirilen GBÜ sistemi, 1 güneş ışıınımlı altında $1,59 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ buharlaşma hızı ve %90 verim gösterdiği belirlenmiş aynı zamanda yüksek ışık soğurma, hidrofilik yüzey özellikleri ve uzun süreli yapısal stabilite sergilemiştir. Özellikle TB'nin geniş spektrumlu ışık absorpsiyon kapasitesi, yapıya entegre edildiğinde sistemin yüzey sıcaklığını hızla artırarak etkin buharlaşma sağlamış ve malzemenin doğal hidrofilikliği, suyun sürekli taşınımını ve yüzeyde dengeli dağılımını kolaylaştırmıştır.

Li *et al.* (2019), buhar üretimi uygulamalarına yönelik olarak, un esaslı biyomalzemelerden türetilmiş ara yüzeyel güneş buhar jeneratörleri geliştirmiştir (Şekil 15). Geliştirilen entegre yapı, kapiler su taşıma kapasitesinin yüksekliği ve ışık-soğurma etkinliği sayesinde diğer formlara kıyasla üstün performans göstermiş ve 1 kW/m^2 ışıınımlı altında %71,9 buharlaşma verimi ile dikkat çekmiştir. Ayrıca bu yapı, düşük termal iletkenliği sayesinde ısı kayıplarını azaltarak yüzeyde ısıyı etkin biçimde tutmuş, böylece ara yüzeyde buharlaşma hızını artırmıştır. Örneğin hazırlanması açısından ulaşımının kolay olması, karbonize sıcaklık oranının düşük olması, karbonizasyon aşamasında herhangi bir gaz çıkışının olmayışından dolayı büyük miktarda üretim için daha uygun olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, biyokökenli fototermal sistemlerin şekilsel ve işlevsel optimizasyonuna katkı sağlamakta ve maliyeti düşük, sürdürülebilir üretim modellerine dayalı sistemlerin uygulanabilirliğini desteklemektedir.



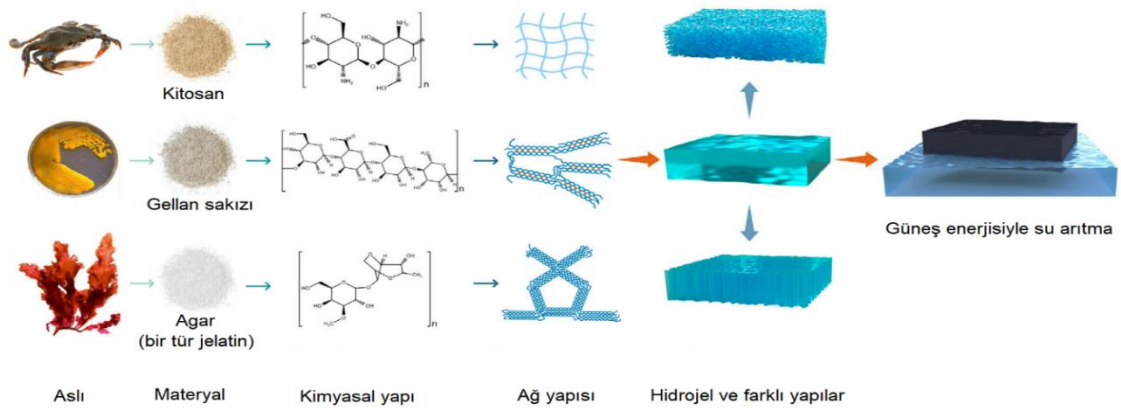
Şekil 15. Yakın silindirik (NC) güneş emici tabanlı un bloğunun hazırlama sürecinin şeması. a) Doğal buğday. b) Ticari olarak temin edilebilen un. c) Hamur figür teknolojisi kullanılarak yakın silindirik (FNC) yapıya sahip un bloğunun hazırlanması. d) Dondurarak kurutulmuş (FFNC) örnek. e) Dondurarak kurutulmuş (C-FFNC) örneğin karbondioksitleme süreci. f) GBÜ cihazının şematik resmi. g) 1 güneş ışınımı altında 1 dakikada GBÜ cihazının IR fotoğrafı (Li *et al.* 2019)

Kahve atıklarından elde edilen biyokömür, su buharlaştırma sürecinde kullanılan bir malzeme olarak, su arıtma uygulamalarında etkili bir alternatif sunmaktadır (Şekil 16). Gabisa *et al.* (2021) çalışmasında, atık kahve telvesi, çinko klorür ($ZnCl_2$) ile aktive edilerek fototermal özellikler kazandırılmış ve su arıtımında kullanılabilir bir malzeme haline getirilmiştir. Kahve biyokömürünün fototermal özellikleri sayesinde güneş enerjisi ile çalışan buharlaştırma sistemlerinde suyun arıtımında yüksek verim elde edildiği belirtilmiştir. Kahve biyokömürü, sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir su arıtma yöntemi olarak çevresel açıdan önem taşımaktadır. Elde edilen biyokömür tabanlı malzeme, güneş ışığını yüksek verimle ısıya dönüştürerek suyun buharlaştırılmasını sağlamıştır. $ZnCl_2$ ile yapılan modifikasyon, gözenekli yapıyı geliştirerek yüzey alanını artırmış ve bu sayede ısı tutma kapasitesini güçlendirmiştir. Deneysel bulgular, kahve atıklarının bu yöntemle geri dönüştürülmesinin hem sürdürülebilirlik açısından avantajlı olduğunu hem de temiz su temininde etkili bir yol sunduğunu ortaya koymuştur. Bu malzemenin, özellikle enerji gereksinimi düşük sistemlerde ve fototermal su arıtma uygulamalarında kullanılmak üzere çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirildiği rapor edilmiştir.



Şekil 16. Buhar üretimi ve toplanması için deneysel kurulum (Gabisa *et al.* 2021)

Liu *et al.* (2023), sürdürülebilir biyokütle kaynaklı malzemelerin güneş enerjisiyle çalışan ara yüzey buharlaştırma sistemlerinde kullanımını araştırmıştır (Şekil 17). Çalışmada, biyokütleden elde edilen karbon esaslı malzemelerin yüksek güneş ışınımı absorpsiyonu ve etkili ısı yönetimi sayesinde suyun yüzeyinde hızlı buharlaşma sağladığı gösterilmiştir. Mekanizma olarak, güneş enerjisinin malzeme yüzeyinde yoğunlaşarak su moleküllerinin hızla buharlaşmasına neden olması temel alınmıştır. Bu malzemeler, çevre dostu, yenilenebilir ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle atık su arıtımı, içme suyu üretimi ve enerji tasarrufu sağlama gibi uygulamalarda potansiyel taşımaktadır. Sonuçlar, biyokütle esaslı malzemelerin güneş enerjili buharlaştırma teknolojilerinde verimli ve sürdürülebilir çözümler sunduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 17. Biyokütleden türetilen malzemeler, su arıtma için fototermal buharlaştırıcılar olarak hizmet veren gözenekli hidrojellere dönüştürülebilir. Bazı çalışmalarda kullanılan biyopolimerler; kabukluların dış iskeletinden elde edilen kitosan, bakteriden elde edilen gellan sakızı ve kırmızı deniz yosunundan elde edilen agardır. Şekilde bu maddelerin kimyasal ve ağ yapıları verilmiştir (Liu *et al.* 2023)

İdeal bir tuzlu/kirli suyu arındırma çözümü için hem ham madde maliyeti hem de çevre üzerindeki etki dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, karbonize edilmiş (kömürleştirme) veya

fırınlanmış doğal veya kimyasal olarak işlenmiş gözenekli malzemeler, özellikle biyokütlesel atık malzemeler, yeniden kullanım imkânı sağladıkları için güneş enerjisiyle çalışan su arıtmada son derece önemlidir. Gübre, toprak, yaprak, ağaç, saman, mısır koçanı, lif kabağı süngeri, bambu, kabuklar gibi doğal olarak gözenekli ham maddeler, sahip oldukları mikrokanallar veya mikro gözenekli yapılarıyla hem su taşınmasını hem de güneş ışığını yakalamaya yönelik ışık emme kapasitesini destekler niteliktedir (Wang *et al.* 2023; Mehrkhah *et al.* 2022). Biyokömüre dönüştürüldükten sonra, gözenekli yapılar iyi bir şekilde korunmakta ve aynı zamanda ışık emme (absorpsiyon) yetenekleri büyük ölçüde artmaktadır (Liu *et al.* 2023). Bu özellikler ile biyokütle çıkışlı bu yapılar, güneş ile su buharlaştırma uygulamaları için ümit verici bir potansiyel sergilemektedir (Şekil 18).

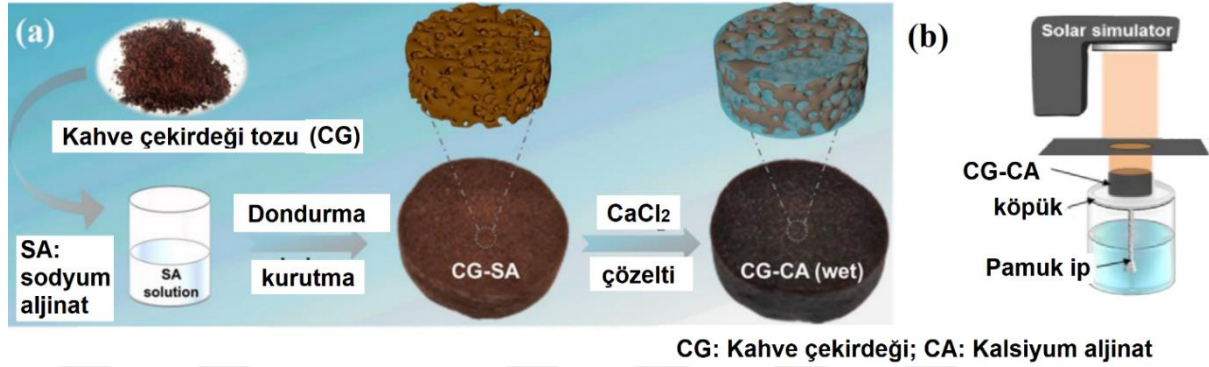


Şekil 18. Suyun arıtılması için fototermal buharlaştırıcı görevi gören gözenekli yapı için kömürleşmiş ve fırınlanmış doğal malzemeler uygulanabilir. Biyokütle malzemeleri, kurutulmuş gübre, toprak ve yaprak olabilir. Şekilde kömürleştirme/pişirme işleminden önceki ve sonraki gözenekli yapı görüntüleri verilmiştir (Wang *et al.* 2023)

Yukarıda bahsedilen biyokütle maddelerinin yanı sıra biyokömür yapılarının; sakaroz (Yang *et al.* 2019), doğal pamuk (Wang *et al.* 2015), sarımsak kabuğu (Selvamani *et al.* 2016), buğday unu (Lim *et al.* 2017), buğday sapı (Zhou *et al.* 2016), atık kahve ve atık çay tozları (Wang *et al.* 2020; Sankar *et al.* 2019; Choi *et al.* 2016) gibi çeşitli doğal kaynaklardan türetilebileceği ve sentezlenebileceği rapor edilmiştir. Bunlar arasında kahve atığı ucuz ve bol miktarda bulunan bir biyokütle kaynağıdır. Bununla beraber bu atığın biyokömür haline getirilmesi ile güneş enerjisiyle su buharı üretim materyali hazırlanmasına ait çalışmalar çok kısıtlıdır.

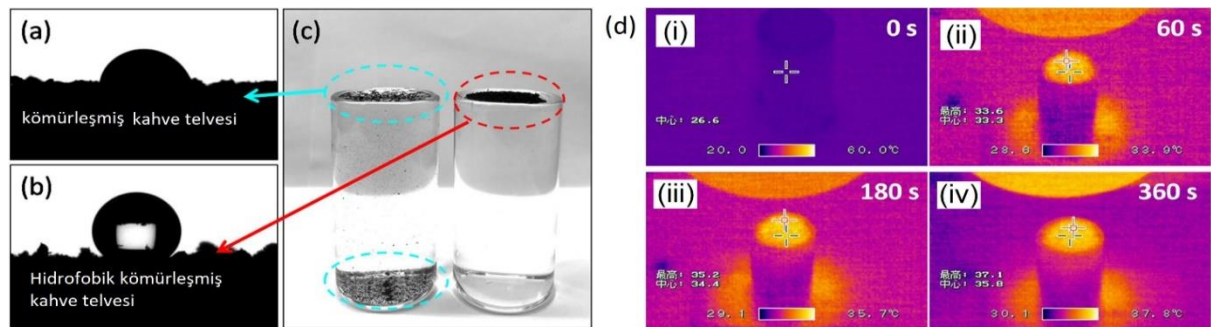
Kahve atığı biyokömürü ile güneş enerjisiyle su buharı üretim materyali üzerine yapılan bir çalışmada (Dong *et al.* 2022), kahve telvesi (CG) parçacıkları, dondurarak kurutma ve kalsiyum aljinat (CA) iskeletine iyonik çapraz bağlanma yoluyla CG-CA kompoziti hazırlanmıştır (Şekil 19.a). Şekil 19.b'deki su buharı üretimi için hazırlanan düzenekte; yığm

suya ısı transferini azaltmak için materyalin (CG-CA) altına genleşebilen dairesel bir polistiren köpük yerleştirilmiş ve suyun materyalin tabanına taşınmasını sağlamak için bir pamuklu şerit, materyal tabanına aynı boyutta bir dokunmamış kumaş parçası yerleştirilmiştir. Bu düzenekte CG-CA materyal ile $1.59 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 'lik su buharlaşma oranı elde edildiği rapor edilmiştir (Dong *et al.* 2022).



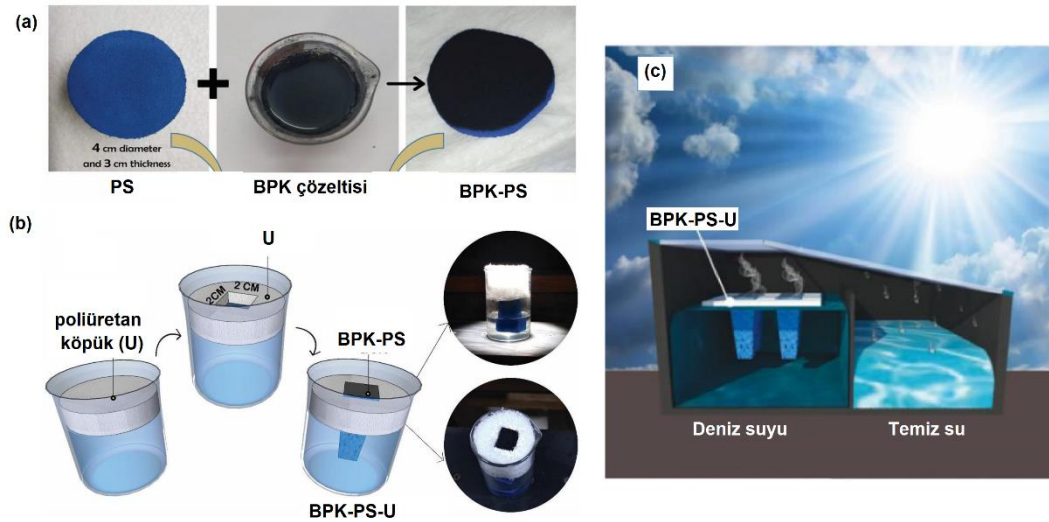
Şekil 19. (a) Sıvı fazda dondurarak kurutma ve Ca^{2+} -çapraz bağlanma yaklaşımıyla CG-CA hidroveli oluşturmaya yönelik temsili gösterim. (b) Buharlaşma test sisteminin temsili gösterimi (Dong *et al.* 2022)

Bir başka çalışmada; kahve taveleri 1000°C 'de kömürleştirilmiş ve kömürleşmiş kahve taveleri (KKT), hidrofobik silan ile modifiye edilerek suda yüzmeye özelliği geliştirilmiştir (Wang *et al.* 2020). Şekil 20.a ve b'de görüldüğü gibi KKT ve HKKT'nin suya karşı ıslanma davranışları su temas profili ile araştırılmıştır. Suda yüzdürme testinde KKT, suyla temas ettikten 30 dakika sonra battığı, HKKT'nin ise hidrofobik yapısı sayesinde suda yüzebildiği gösterilmiştir (Şekil 20.c). HKKT'nin fototermal özellikleri, bu materyalin 1 güneş ışığı altındaki sıcaklığını tespit etmek için bir IR kamera kullanılarak incelenmiştir. Şekil 20.d'de HKKT'nin başlangıçta $26,6^\circ\text{C}$ olan yüzey sıcaklığı, 360 saniye sonra 37°C olarak kaydedilmiştir. Yapılan bu çalışmanın, HKKT'nin güneş ışığını verimli bir şekilde emip ısı enerjisine dönüştüreceğini ve su-hava ara yüzündeki suyun sıcaklığını artıracak olduğunu gösterir nitelikte olduğu rapor edilmiştir (Wang *et al.* 2020).



Şekil 20. (a) Kömürleşmiş kahve telvesi (KKT) ve (b) hidrofobik kömürleşmiş kahve telvesinin (HKKT) su damlalarının profili. (c) Suda yüzdürme testinin görüntüsü. (d) (i) 0, (ii) 60, (iii) 180 ve (iv) 360 saniye boyunca 1 güneş ışığı altında HKKT ile kaplı su örneğinin kızılötesi termal görüntüleri (Wang *et al.* 2020)

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda güneş enerjisiyle su buharı üretimi için biyokömür kullanılarak tek katmanlı materyaller elde edilmiştir. Yine bu amaçla; polivinil alkol (PVA) (Wilson *et al.* 2020) ve poliüretan (PU) sünger (Zhang *et al.* 2019.a), nikel köpük (Wang *et al.* 2021) ve polistiren köpük (Lin *et al.* 2019) gibi malzemeler kullanılarak iki katmanlı materyaller de tasarlanmıştır. Wilson *et al.* (2020) tarafından yapılan çalışmada; atık limon kabukları toz haline getirilerek KOH ile aktive edilmiş ve kömürleştirilip biyokütle-çıkışlı porlu karbon (BPK) elde edilmiştir. BPK tozunun alkol ile 2,5 mg/mL çözeltisi hazırlanmış ve PVA sünger (PS) yüzeyine sürülmüştür (Şekil 21.a). Alttaki toplu suya ısı iletim kaybını en aza indirmek için BPK-PS sünger 2 cm² cm boyutlarında kesilerek bir poliüretan köpüğün aynı boyutlarda kesilmiş orta kısmına yerleştirilmiştir (Şekil 21.b). Elde edilen bu düzenek ile 1 güneş ışığı altında 1,38 kg m⁻² h⁻¹ buharlaşma verimine ulaşıldığı rapor edilmiştir.



Şekil 21. (a) PS ve BPK-PS'yi gösteren dijital fotoğraflar. (b) BPK-PS-U elde etmek için BPK-PS'nin modifikasyonu. (c) Deniz suyunun tuzdan arındırılması için iki tane BPK-PS-U yan yana dizilmesiyle oluşturulan güneş enerjili damıtıcının şematik ve dijital fotoğrafları (Wilson *et al.* 2020)

Atık malzemelerin yüksek katma değerli çevresel teknolojilere dönüştürülmesi, sürdürülebilir mühendislik yaklaşımlarının merkezinde yer almaktadır. Saad *et al.* (2022), odun talaşından elde edilen plasmonik özellikli biyokömür kullanarak güneş enerjisi destekli entegre bir deniz suyu arıtımı ve enerji üretim sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, biyokömürün yüzey plasmon rezonans özelliği sayesinde güneş ışığını yüksek verimle absorbe ettiği ve buharlaştırma süreçlerinde etkin ısı üretimi sağladığı ortaya konmuştur. Aynı zamanda sistemin, elde edilen ısı enerjisinin bir kısmını termoelektrik dönüşüm yoluyla elektrik üretiminde kullanması, entegre yapıyı çok işlevli hale getirmiştir. Bu yaklaşım hem su arıtımı hem de enerji üretimi gibi iki temel çevresel ihtiyacı karşılayarak atık esaslı malzemelerin ileri düzey mühendislik uygulamalarında değerlendirilmesine örnek teşkil etmektedir. Araştırma,

özellikle biyokömürün fonksiyonel yüzey mühendisliği ile performansının artırılabilirliğini ve bu tür sistemlerin döngüsel ekonomi ilkeleriyle doğrudan örtüştüğünü göstermektedir.



MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

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 tasarlanmıştır. Bu materyal bir doğal ticari selülozik süngerin üst yüzeyinin Türk kahve telvesinden elde edilen biyokömür ile kaplanmasıyla hazırlanmıştır.

Evde ve iş yerlerinde tüketilen Türk kahvesinin içimden sonra fincanların dibinde kalan atık taveler toplanmış, kurutulmuş ve piroliz yöntemiyle bu atık Türk kahvesi telvesinden biyokömür elde edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda elde edilen Türk kahvesi biyokömürünün (KB) çeşitli teknikler ile karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

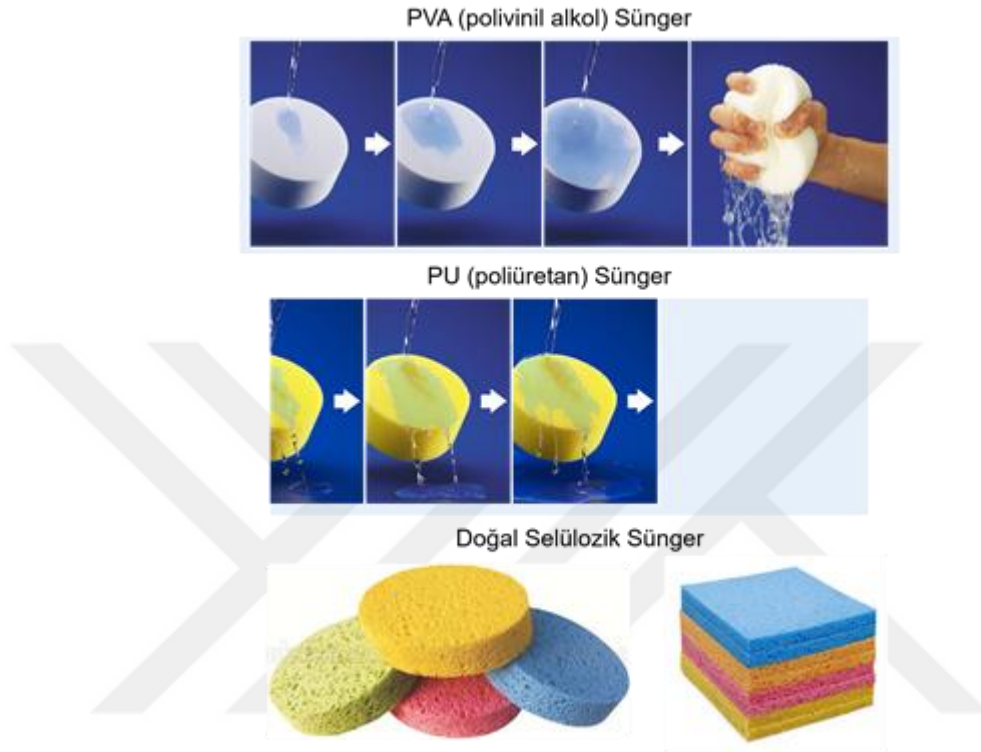
Güneş enerjisiyle buhar üretimi (GBÜ) uygulamasında kullanılan buharlaştırıcı malzeme, ticari bir süngerin yüzeyinin KB ile kaplanmasıyla tasarlanmıştır. Kullanılan sünger, ticari doğal selülozik Wee Baby marka banyo süngeridir. Bu süngerin seçiminde piyasadaki diğer süngerlerin ıslanma, suyu emme ve fiyat gibi özellikleri araştırılmış ve bu özellikleri en iyi karşılayan doğal selülozik sünger olduğu belirlenmiştir.

Şekil 22’de polivinil alkol (PVA), poliüretan (PU) ve doğal selülozik sünger görülmektedir. En uygun fiyatlı PU sünger (bulaşık süngeri) olmasına karşın, PU süngerin PVA süngere kıyasla; su emilimi, su tutma ve dolayısıyla hidrofilik özelliğinin düşük olduğu gözlenmektedir. PVA sünger ile doğal selülozik süngerin fiyatları birbirine yakın olmakla birlikte (~ 70 TL), doğal selülozik süngerin aşağıda belirtilen özellikleri, tez kapsamında hazırlanan materyal için bu süngerin tercih edilmesini sağlamıştır:

Selülozik Doğal Sünger:

- Temelde viskoz elyaf ahşap hamurundan yapılır.
- Doğal bir ürün olan sünger biyolojik olarak parçalanabilir.
- Doğal elyaf yapısı sayesinde kullanım sonrası hızla ve %100 kuruyarak bakteri ve mikrop üremesini önler, hijyeniktir.
- Selüloz sünger doğada tamamen yok olur, bu özelliği ile doğa dostudur.
- Suyu kolaylıkla absorbe eder.
- %95’i hava baloncuklarından oluşur.
- Hafif yapıya sahiptir.

- Hava baloncukları sayesinde kolay ve hızlı bir şekilde suyu emer.
- Hava baloncukların sıklığı her birinin suyu tutmasını sağlar, böylece ağırlığından 20-30 kat daha fazla su alır.
- Dermatolojik olarak test edilmiştir.
- Anti-alerjeniktir.



Şekil 22. PVA sünger, PU sünger ve doğal selülozik süngere ait resimler

KB hazırlandıktan sonra doğal selülozik süngerin yüzeyi KB ile kaplanarak GBÜ uygulaması için fototermal buharlaştırıcı materyal hazırlanmıştır (Şekil 23).



Şekil 23. GBÜ için fototermal buharlaştırıcının hazırlanmasına ait temsili gösterim

Yöntem

Solar simülatör

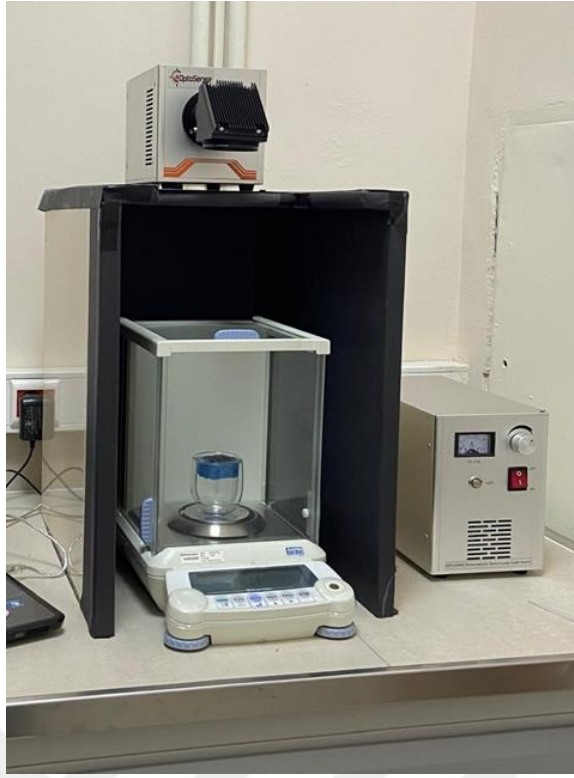
Solar simülatör, güneş ışığını yapay olarak taklit eden ve laboratuvar ortamında güneş enerjisiyle çalışan sistemlerin test edilmesini sağlayan bir cihazdır. Güneşin dalga boyu spektrumuna benzer şekilde ışık üreterek, çeşitli sistemlerin güneş ışığına maruz kaldıklarında nasıl davrandıklarını gözlemlemeye olanak tanır. Bu simülatörler genellikle zenon lambaları, halojen lambalar veya LED dizileri gibi yüksek güçlü ışık kaynakları içerir. Üretilen ışığın homojen dağılımı ve spektral özelliklerinin kontrolü için çeşitli optik elemanlar, lensler, filtreler ve aynalar kullanılır. Işık kaynağı yüksek sıcaklık ürettiğinden, sistemde genellikle hava veya sıvı bazlı soğutma mekanizmaları yer alır. Ayrıca ışık yoğunluğu, süresi ve dalga boyunun ayarlanmasını sağlayan kontrol birimleri de bulunur.

Güneş enerjisiyle buhar üretimi uygulamalarında solar simülatörler oldukça önemli bir rol oynar. Bu uygulamalar suyun güneş ışığı ile ısıtılarak buharlaştırılmasını temel alır ve simülatörler bu süreçlerin laboratuvar koşullarında kontrollü olarak gerçekleştirilmesini sağlar. Deneylerin tekrar edilebilir olması, farklı ışık koşullarında sistemlerin performanslarının karşılaştırılabilmesi açısından büyük avantaj sunar. Ayrıca güneş ışığına maruz kalan malzemelerin – özellikle fototermal özellikli malzemelerin ve nano yapılı yüzeylerin – etkinliğinin değerlendirilmesinde kullanılır. Solar simülatör sayesinde farklı ışık yoğunluklarında sistemin ne kadar buhar üretebildiği ölçülebilir ve verim hesaplamaları yapılabilir.

Gerçek güneş ışığına bağlı kalmadan deney yapma imkânı sunması, sabit ve kontrol edilebilir ışık koşulları sağlaması, gece veya kapalı havalarda dahi deneylerin sürdürülebilmesi gibi avantajları vardır. Ayrıca sabah, öğle ve akşam saatlerine özgü farklı spektral dağılımların taklit edilmesiyle geniş kapsamlı testler yapılabilir. Ancak bu cihazlar genellikle maliyetlidir ve hassas bakım gerektirir.

Solar simülatörler, fototermal nanoparçacıklarla su buharlaştırma deneylerinden, güneş kolektörlerinin test edilmesine kadar pek çok araştırma alanında kullanılır. Yeni nesil enerji dönüştürücü malzemelerin laboratuvar ortamında test edilmesi ve performans analizleri de bu cihazlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Solar simülatörler, güneş enerjisi araştırmalarında vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

GBÜ çalışmalarında 1 ila 10 güneş ışığı ($1-10 \text{ kW m}^{-2}$) arasında değişen güçte simüle edilmiş güneş ışıını, OptaSense (OPT-S500F) fotokatalitik ksenon ışık kaynağı kullanarak sağlayan Şekil 2'deki cihaz kullanılmıştır.



Şekil 24. GBÜ çalışmalarında kullanılan solar simülatörün fotoğrafı

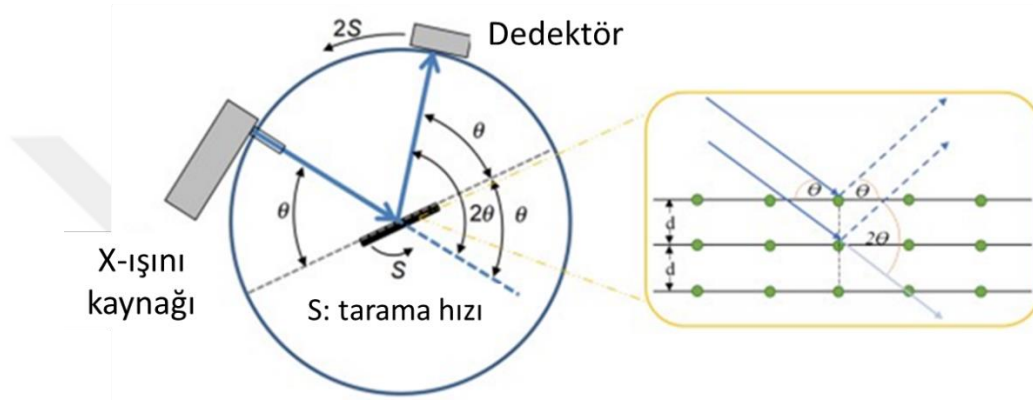
X ışınları difraksiyon spektroskopisi (XRD)

X ışınları difraksiyon spektroskopisi (XRD), kristal yapıların atomik düzeyde karakterizasyonu amacıyla yaygın olarak kullanılan bir analiz tekniğidir. Bu yöntem, yüksek enerjili ve kısa dalga boyuna sahip X- ışınlarının kristal malzeme üzerine gönderilmesiyle, kristal içerisindeki atomların düzenli dizilimlerinden kaynaklanan kırınım (difraksiyon) desenlerinin elde edilmesine dayanır.

Kristal yapılar, içerisindeki atomların belirli bir düzen içinde konumlanması sonucu, gelen X-ışınlarını belirli açılarda saçma eğilimindedir. Bu saçma olayı, Bragg yasası temel alınarak açıklanır. Bragg yasasına göre, X-ışınlarının belirli düzlemlerden yansıyarak girişim oluşturduğu açılar, kristal içyapısının özellikleri hakkında bilgi sunar. Kristal yapılar, düzenli aralıklarla sıralanmış özdeş ve birbirine paralel düzlemlerden (tabakalar) oluşur (Şekil 25). Tabakalar arası mesafe (d-aralığı) Bragg yasasına göre hesaplanabilir: $d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$. Bu eşitlikte n bir tam sayıdır ve bu sayı 1 olarak varsayılır; λ , gelen X ışınlarının dalga boyudur ve 2θ kırınım açısıdır.

Difraktometre adı verilen ölçüm cihazı ile bu kırınım desenlerinin açısal dağılımları ve şiddetleri kaydedilir. Elde edilen veriler, malzemenin kristal sistemine, kafes parametrelerine ve atomik yerleşimlerine dair nitel ve nicel analizlerin yapılmasına olanak tanır.

XRD analizi, başta kristalografi olmak üzere mineraloji, malzeme bilimi ve katı hal fiziği gibi birçok alanda temel bir inceleme yöntemidir. Malzemelerin faz kombinasyonlarının belirlenmesi, kristal kusurlarının tespiti, çok fazlı sistemlerin ayrımı ve kristal büyüme süreçlerinin takibi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yeni malzemelerin sentezinde yapısal doğrulama amacıyla da kritik bir yol oynamaktadır. Sonuç olarak, X-ışınları difraksiyon spektroskopisi; kristal yapılar üzerine detaylı bilgi sunan, atomik düzeyde yapısal analiz imkânı sağlayan güçlü bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, malzeme özelliklerinin anlaşılmasında ve ileri düzey teknolojik uygulamalara yönelik malzeme tasarımında vazgeçilmez bir araçtır.



Şekil 25. XRD tekniğinin ve X-ışınlarının kristal yapıda kırınımının temsili olarak gösterimi (Epp 2016)

Sentezlenen KB tozlarının kristal yapı analizi için Rigaku marka Mini Flex model XRD cihazı kullanılmıştır.

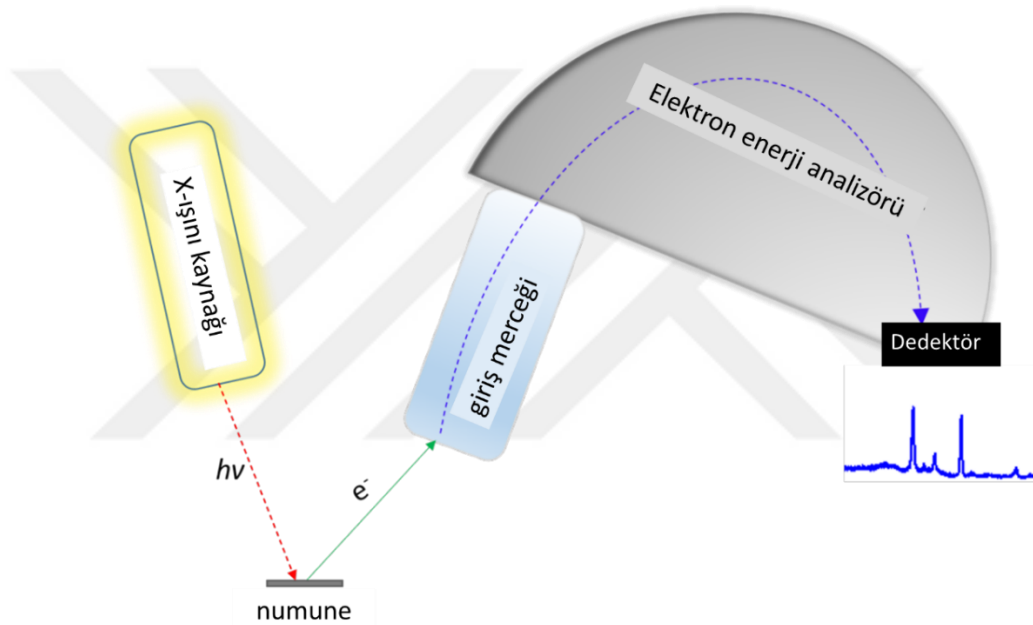
X ışınları fotoelektron spektroskopisi (XPS)

X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), katı yüzeylerin kimyasal bileşimini, bağ yapısını ve elektronik özelliklerini belirlemede kullanılan güçlü bir yüzey analiz tekniğidir. Bu yöntem temel olarak, bir malzemenin yüzeyine yüksek enerjili X-ışınlarının uygulanması sonucunda ortaya çıkan fotoelektronların kinetik enerjilerinin ölçülmesine dayanır. Söz konusu fotoelektronlar, malzemenin yüzey katmanlarından salınır ve içerdiği enerjiye göre analiz edilir (Şekil 26). Böylece yüzeydeki elementlerin kimyasal durumları, bağ enerjileri ve oksidasyon halleri hakkında ayrıntılı bilgi elde edilir.

XPS ile elde edilen spektrumlar, enerji analizörleri tarafından kaydedilir ve bu spektrumlar sayesinde yüzeyde bulunan atomların bağlandığı türler ile çevresel etkileşimleri belirlenebilir. Yöntemin özellikle yüzeye özgü olması, ince tabakalar ve nanometrik düzeyde yapılan analizlerde yüksek hassasiyet sağlar. Bu özellik, XPS'yi nanoteknoloji ve yüzey mühendisliği uygulamalarında vazgeçilmez kılar.

XPS yönteminin başlıca avantajları arasında kimyasal bileşim tespiti, yüksek yüzey hassasiyeti, bağ yapısı analizi, yüzey temizliğinin değerlendirilmesi ve tahribatsız analiz imkânı yer alır. Bu sayede yüzeydeki elementlerin ve kimyasal türlerin nitel ve nicel analizleri yapılabilir, atomlar arası bağ türleri belirlenebilir, yüzey işlemlerinin etkinliği doğrudan gözlemlenebilir ve numunenin yapısı bozulmadan ölçüm gerçekleştirilebilir.

XPS, yüzey mühendisliği, malzeme bilimi, katı hal kimyası ve yüzey modifikasyonlarının karakterizasyonu gibi birçok bilimsel ve teknolojik alanda geniş uygulama alanına sahiptir. Özellikle kaplamaların ve ince filmlerin yapısal ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi, ara yüz analizleri ve fonksiyonel yüzeylerin geliştirilmesi gibi araştırmalarda temel bir karakterizasyon aracı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 26. XPS cihazının çalışma prensibinin temsili gösterimi

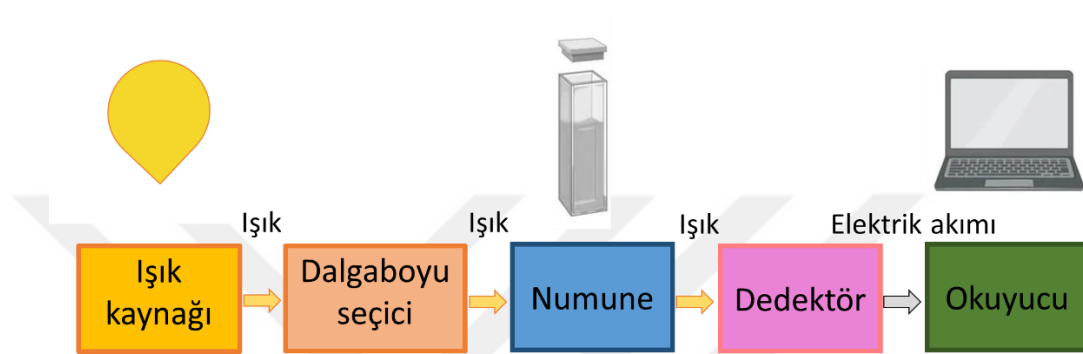
Sentezlenen KB tozlarının yapısal karakterizasyonu için SPECS EA 300 marka XPS cihazı kullanılmıştır.

UV görünür bölge spektroskopisi

Maddelerin yaklaşık 200-800 nm dalga boyu aralığında elektromanyetik ışınlamayı nasıl absorbe ettiğini veya yansıttığını inceleyen optik bir analiz yöntemidir. Bu teknik, özellikle moleküler yapı, kimyasal bağ türleri, elektronik geçiş mekanizmaları ve çözelti içi konsantrasyon geçişlerini değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

UV-görünür bölge spektroskopisinde, analiz edilmek istenen örnek sabit bir dalga boyu aralığında ışığa maruz bırakılır. Bu ışık, örneğin içinden geçirilerek ya da üzerine yansıtılarak ölçüm yapılır ve genellikle boş (referans) bir ortamla karşılaştırma yapılır. Örnek tarafından

absorbe edilen ışığın miktarı, spektrum üzerinde ‘‘ absorban’’ adı verilen değerlerle gösterilir. Bu spektrum, belirli dalga boylarında gözlemlenen absorpsiyon pikleri sayesinde, moleküler düzeydeki elektronik geçişleri ve geçişlerin enerjilerini ortaya koyar. Bu teknik, birçok bilimsel ve endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Özellikle, kimya, biyokimya, moleküler biyoloji, malzeme bilimi, gıda teknolojisi ve ilaç geliştirme süreçlerinde; bileşiklerin konsantrasyon tayini, reaksiyon kinetiğinin izlenmesi ve maddelerin optik özelliklerinin karakterizasyonu gibi çeşitli uygulamalarda temel analiz yöntemlerinden biridir. Ayrıca malzemelerin renkleri optik davranışları hakkında nitel ve nicel bilgi sağlar.



Şekil 27. UV-görünür bölge spektroskopi cihazını oluşturan kısımların temsili gösterimi

Tez kapsamında boyar madde giderimi çalışmaları ve KB'nin absorpsiyon özelliklerinin araştırılmasında Shimadzu Europe-UV-3101 PC cihazı kullanılmıştır.

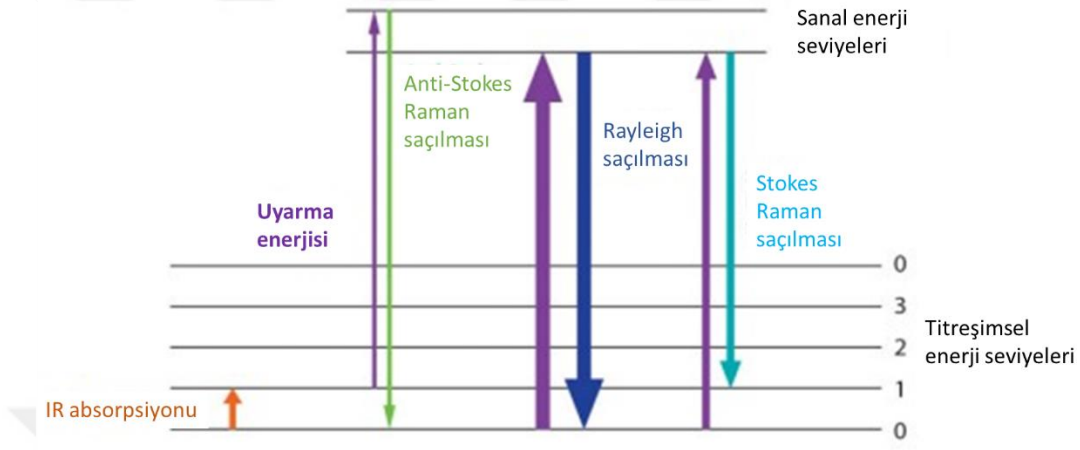
Raman spektroskopisi

Malzemelerin moleküler yapılarını, bağ titreşimlerini ve kimyasal bileşenlerini incelemek amacıyla kullanılan, foton saçılmasına dayalı ileri düzey bir karakterizasyon tekniğidir. Bu yöntem, malzemeye yönlendirilen monokromatik bir ışık kaynağının -genellikle lazerin- maddeyle etkileşimi sonucunda meydana gelen elastik olmayan saçılmaları (Raman saçılması) analiz ederek çalışır (Şekil 28).

Lazer ışığı örnek üzerinde fotonlarla etkileşime girer ve fotonlardan bazıları enerjilerinde küçük değişiklikler göstererek saçılır. Bu enerji farkı, moleküler arası titreşim, rotasyon ya da diğer düşük frekanslı hareketlerle ilişkilidir. Raman saçılması, bu enerji farklarının spektrum üzerinde gözlenebilmesini sağlar. Elde edilen spektral veri, saçılan ışığın dalga sayısındaki kaymalara karşılık gelen karakteristik bantları içerir ve bu bantlar moleküler yapının ‘‘parmak izi’’ olarak değerlendirilebilir.

Raman spektrumları, moleküller arasındaki kimyasal bağ türlerinin, bağ kuvvetlerinin ve kristal yapıların belirlenmesinde oldukça etkilidir. Ayrıca, faz değişimleri, çok fazlı sistemlerin ayrımı, polimorfik yapılar, reaksiyon süreçleri ve malzeme dönüşümleri hakkında

da detaylı bilgi sunar. Bu teknik, malzeme bilimi, kimya, biyomedikal mühendislik ve farmasötik araştırmalar gibi çeşitli disiplinlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle malzeme tanımlama, kalite kontrol, ürün saflığı ve yapısal doğrulama gibi süreçlerde Raman spektroskopisi, tahribatsız ve hızlı bir analiz yöntemi olarak öne çıkar.



Şekil 28. Rayleigh ve Raman saçılımının molekül enerji diyagramı temsili gösterimi

Sentezlenen KB tozlarının yapısal karakterizasyonunda Renishaw invia marka Raman cihazı kullanılmıştır.

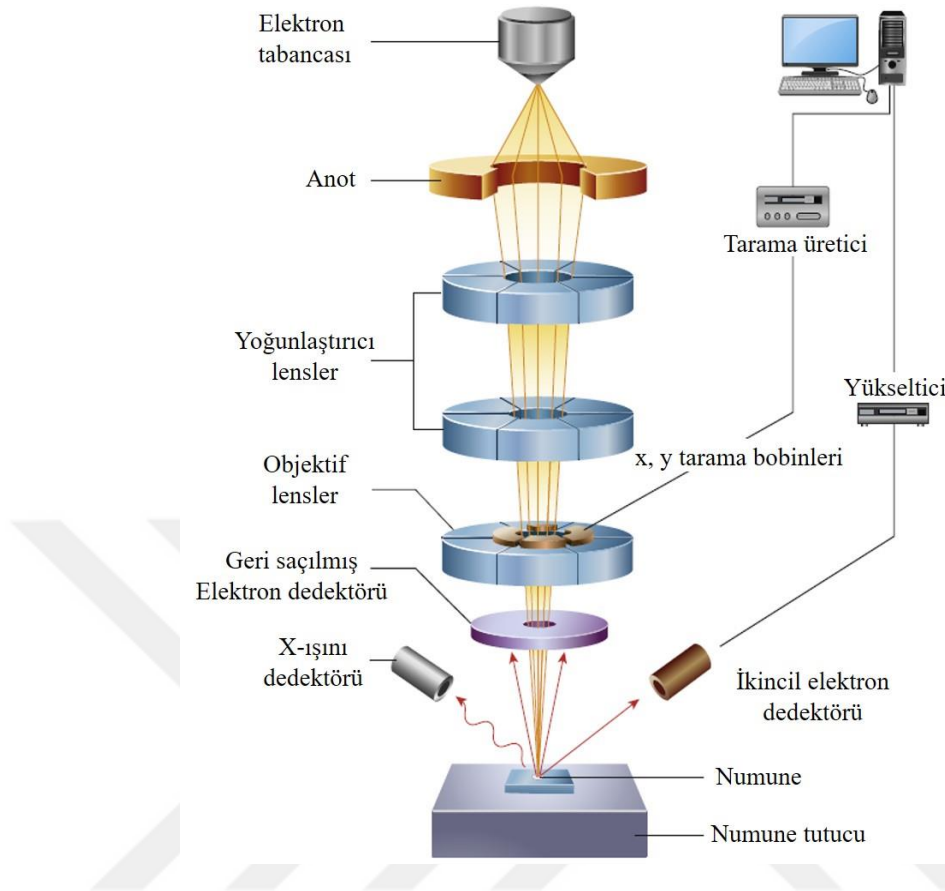
Taramalı elektron mikroskopisi (SEM)

Taramalı elektron mikroskopisi (SEM), numunenin yüzey morfolojisi, topoğrafyası ve mikroyapısal detaylarının yüksek çözünürlükle görselleştirilmesini sağlayan gelişmiş bir görüntüleme yöntemidir. Bu teknikte, odaklanmış bir elektron demeti numunenin yüzeyine yönlendirilir. Yüzeye etkileşime giren bu demet, çeşitli elektronların (sekonder ve geri saçılması elektronlar gibi) salınımına neden olur. Toplanan bu elektronlar, detektörler aracılığıyla sinyallere dönüştürülerek yüksek çözünürlüklü iki boyutlu görüntüler elde edilir (Şekil 29).

SEM'in mikroskoptan en önemli farkı, görüntüleme için görünür ışık yerine elektron kullanılmasıdır. Bu sayede daha kısa dalga boyları aracılığıyla nanometre düzeyinde detayların analizine olanak tanır. Ayrıca SEM'in geniş odak derinliği, yüzeyin farklı yükseklik düzeylerini aynı anda net bir şekilde görüntülemeye imkân tanır ve bu da üç boyutlu yapısal değerlendirmeleri mümkün kılar.

SEM, genellikle iletken olmayan numunelerin üzerlerine ince bir metal kaplama (örneğin altın veya karbon) uygulanarak çalıştırılır. Bu, elektron demetinin numune ile etkileşimini optimize ederek daha yüksek kontrastlı görüntüler elde edilmesini sağlar. Isıl işlem,

vakum ortamı, düşük voltaj seçenekleri gibi çeşitli örnek hazırlama ve analiz teknikleri ile SEM'in uygulama alanı genişletilmektedir.



Şekil 29. SEM cihazının temsili gösterimi (Inkson 2016)

Sentezlenen KB tozları ve KB kaplı sünger buharlaştırıcının yüzey görüntüleri FEI-Inspect S50 SEM cihazı ile elde edilmiştir.

Enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX)

SEM sistemlerine entegre olarak çalışan Enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX), yüzeyin kimyasal ve elementel bileşimini belirlemek için kullanılan tamamlayıcı bir analiz yöntemidir. Her elemente özgü olan bu x-ışını enerjileri, spektral analiz yoluyla ayrıştırılarak bir enerji dağılımı spektrumu oluşturulur. EDX spektrumları, numunede bulunan elementlerin varlığını ve göreceli oranlarını gösteren karakteristik pikler içerir. Bu veriler, kalitatif ve yarı-kantitatif kimyasal analizler gerçekleştirmek için kullanılabilir. EDX; malzeme bileşiminin doğrulanması, kontaminantların tespiti, faz ayrımı ve mikro yapısal heterojenliklerin belirlenmesinde kritik rol oynar.

SEM ve EDX teknikleri, birlikte kullanıldığında bir malzemenin hem yapısal hem de kimyasal düzeyde detaylı incelemesini mümkün kılar. Bu bütüncül analiz yaklaşımı; malzeme bilimi, nanoteknoloji, biyomühendislik, jeoloji, elektronik, kriminalistik ve arkeoloji gibi pek

çok disiplinde temel karakterizasyon araçları arasında yer almaktadır. Numunelerin morfolojik yapılarının, yüzey özelliklerinin, partikül boyutlarının ve kimyasal kompozisyonlarının belirlenmesi gibi araştırma ve kalite kontrol amaçlı uygulamalarda sıklıkla tercih edilir.

Sentezlenen KB tozları ve KB kaplı sünger buharlaştırıcının EDX analizi, FEI-Inspect S50 SEM'e bağlı EDX cihazı ile elde edilmiştir.

Endüktif eşleşmeli plazma kütle spektrometrisi (ICP-MS)

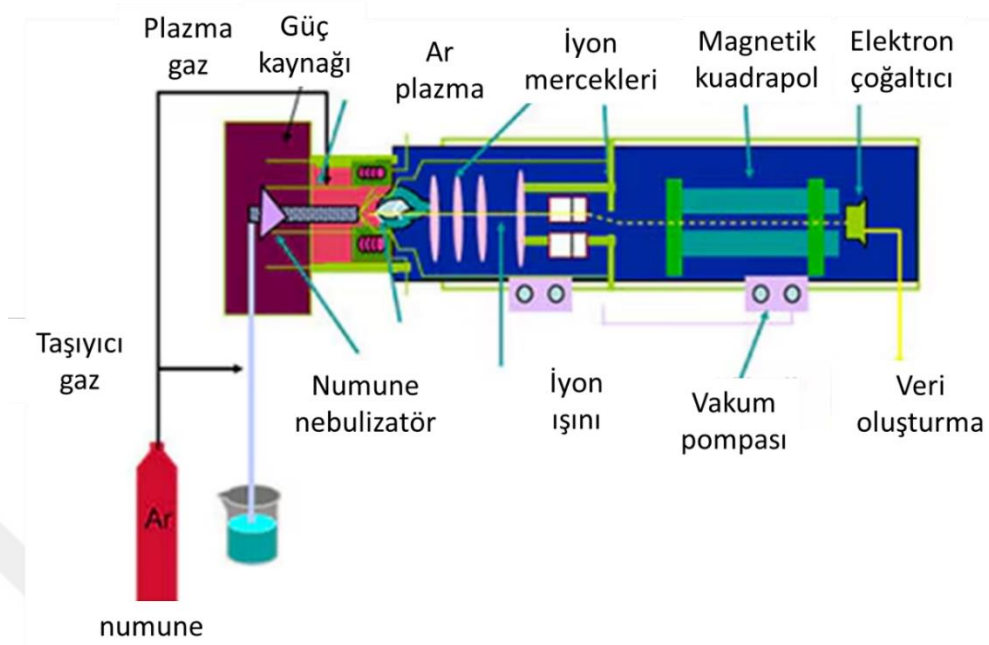
Endüktif Eşleşmeli Plazma Kütle Spektrometrisi (ICP-MS), iz elementlerin ultra düşük konsantrasyonlarda analiz edilmesine olanak tanıyan yüksek hassasiyetli bir analitik tekniktir. Bu yöntem, özellikle metal ve izotop tayinlerinde ppb (milyarda bir) ve hatta ppt (trilyonda bir) seviyelerine kadar inebilen tayin limitleri ile çevre, gıda, biyoloji, jeoloji, tıp ve malzeme bilimleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknik, sıvı haldeki numunenin aerosol haline getirilerek argon plazmasında iyonlaştırılmasına ve ardından oluşan iyonların kütle/yük oranlarına göre ayrılıp dedektör yardımıyla tespit edilmesine dayanır.

Cihazın temel bileşenleri arasında sıvı numuneyi ince damlacıklara ayıran nebulizatör ve sprej odası, yüksek sıcaklıkta plazma üreten meşale sistemi, iyonların vakumlu ortama geçişini sağlayan arayüz bölgesi, iyonları kütle/yük oranlarına göre ayıran kütle analizörü, iyonları tespit eden dedektör ve analiz sonuçlarını sayısal verilere dönüştüren veri işleme sistemi yer alır. Bu yapı sayesinde ICP-MS cihazı, numunelerde çok sayıda elementi aynı anda, hızlı ve yüksek doğrulukla analiz edebilir.

ICP-MS ile yapılan analizlerde başta ağır metaller olmak üzere birçok elementin konsantrasyonu belirlenebilir. Kurşun, arsenik, cıva, kadmiyum, çinko, bakır gibi elementlerin yanı sıra nadir toprak elementleri ve geçiş metalleri de analiz edilebilmektedir. Aynı zamanda iz element tayini, izotop oran analizleri, çevresel su, toprak ve hava kirliliği ölçümleri, gıdalarda toksik metal kalıntılarının belirlenmesi, biyolojik örneklerde metal analizleri ve ilaçlarda safsızlık kontrolleri gibi çok çeşitli uygulama alanları bulunur.

ICP-MS cihazı, çok düşük tayin limitlerine ulaşabilmesi, çok sayıda elementi aynı anda analiz edebilmesi, yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sunması gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca izotop oranlarını belirleme özelliği sayesinde jeolojik yaş tayinleri ve kaynak izleme gibi çalışmalarda da kullanılır. Ancak cihazın kullanımı bazı sınırlamalara da sahiptir. Numunedeki matris bileşenleri analiz sonuçlarını etkileyebilir, spektral girişimler oluşabilir ve cihazın kurulumu ile işletimi yüksek maliyet gerektirir. Ayrıca cihazın doğru ve güvenilir şekilde kullanılabilmesi için uzmanlık gereklidir. ICP-MS teknolojisi, modern analitik kimyada

çığır açan bir yöntem olup hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda önemli bir yere sahiptir.



Şekil 30. ICP-MS cihazının temsili gösterimi

Tasarlanan biyokömür kaplı sünger buharlaştırıcı ile tuz/ağır metal içeren çözeltilerin ve Kardeniz deniz suyu numunelerinin GBÜ uygulaması öncesi ve sonrasında içerdikleri iyon analizi, Agilent 7800 marka ICP-MS cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Kızıl ötesi (IR) termal kamera

Kızıl ötesi (IR) termal kamera, nesnelerin yüzeylerinden yayılan kızılötesi (infrared) radyasyonu algılayarak bu radyasyonu görsel bir forma dönüştüren cihazlardır (Şekil 31). İnsan gözü kızılötesi ışığı göremez, ancak her sıcak cisim çevresine ısı şeklinde elektromanyetik dalga yayar. Termal kameralar bu dalgaları algılayarak bir termal görüntü (ısı haritası) oluşturur. Bu cihazlar özellikle bir yüzeyin sıcaklık dağılımını temassız şekilde ölçmek ve analiz etmek için kullanılır. Isınan yüzeylerdeki farklı sıcaklık noktaları farklı renklerle temsil edilir. Genellikle sıcak bölgeler kırmızı, sarı veya beyaz, soğuk bölgeler ise mavi, mor veya siyah tonlarında gösterilir.

IR termal kameralar, dedektör adı verilen algılayıcılarla donatılmıştır. Bu dedektörler genellikle mikrobolometre adı verilen özel sensör tipleridir. Mikrobolometreler, kızılötesi ışığı emerek kendi sıcaklıklarını değiştirir ve bu değişim elektriksel sinyale çevrilerek görüntüye dönüştürülür. Modern termal kameralar, geniş sıcaklık aralıklarında hassas ölçüm yapabilir. Hassasiyetleri genellikle ± 0.5 °C veya daha iyi seviyelerdedir. Sıcaklık ölçüm aralıkları -20 °C'den başlayarak 1000 °C'ye veya daha fazlasına kadar çıkabilir.

Kameranın çözünürlüğü (örneğin 160×120, 320×240, 640×480 piksel gibi) ne kadar yüksekse, elde edilen termal görüntü o kadar detaylı olur. Bazı termal kameralar aynı zamanda görüntü füzyonu (fusion) özelliği ile hem termal hem de normal (optik) görüntüyü birleştirerek daha anlamlı analiz yapılmasına olanak sağlar.



Şekil 31. FLIR T620 IR termal kameranın fotoğrafı

Güneş enerjisiyle buhar üretimi gibi uygulamalarda termal kameralar; yüzeyin ne kadar ısındığını, sıcaklık dağılımının homojen olup olmadığını ve enerji verimliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Fototermal malzemelerin güneş ışığı altında ne kadar ısındığı ya da suyun buharlaşma sürecinde yüzey sıcaklığındaki değişimler gibi kritik veriler bu kameralarla elde edilir. Bu tür analizler sayesinde sistemin hangi bölgelerinin daha fazla enerji topladığı ya da ısı kaybının nerede gerçekleştiği tespit edilebilir. Ayrıca termal kameraların en büyük avantajlarından biri de temassız ölçüm yapmalarıdır. Bu sayede yüksek sıcaklıktaki yüzeylere veya ulaşılması zor alanlara müdahale etmeden ölçüm yapılabilir. Endüstride, tıpta, yangın tespiti, enerji verimliliği analizi ve Ar-Ge çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır.

IR termal kameralar, güneş enerjisiyle çalışan sistemlerin laboratuvar testlerinde oldukça değerli bir ölçüm ve analiz aracıdır. Doğru kullanıldığında, sistem performansının artırılmasına ve malzeme optimizasyonuna önemli katkı sağlar.

Tasarlanan biyokömür kaplı sünger buharlaştırıcı ile GBÜ sırasında, buharlaştırıcı yüzeyinin sıcaklık ölçümleri ve görüntüleri FLIR T620 marka IR kamera ile izlenmiştir.

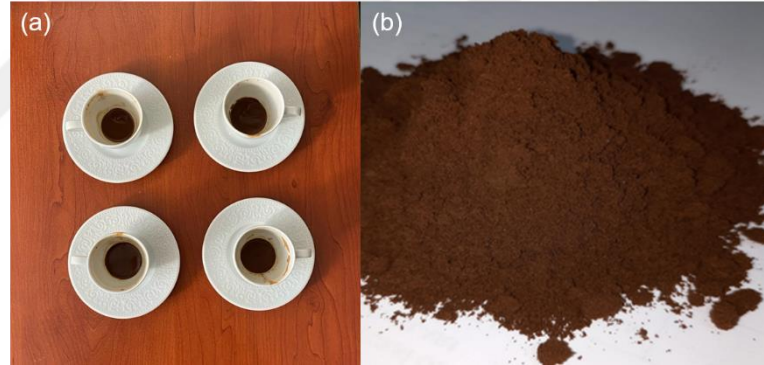
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

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 tasarlanmıştır. Bu materyal bir doğal ticari selülozik süngerin üst yüzeyinin Türk kahve telvesinden elde edilen biyokömür ile kaplanmasıyla hazırlanmıştır.

İlk olarak Türk kahvesi atıklarından biyokömür elde edilmiş ve çeşitli teknikler ile karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Türk Kahvesi Atıklarının Toplanması

İş yerlerinde ve evlerde günde bir ya da iki kez tüketilen Türk kahvelerinin telveleri toplanmış ve etüvde 60°C’de kurutulmuştur (Şekil 32). Böylece tez çalışması için gerekli ham madde, bol ve maliyetsiz bir şekilde elde edilmiştir.



Şekil 32. (a) Türk kahvesi içiminden sonra fincan dibinde kalan Türk kahvesi telveleri. (b) Kurutulmuş atık Türk kahvesi telvesi

Türk kahvesi atıklarından biyokömür elde edilmesi

Türk kahvesi atıklarının piroliz işlemi ile kömürleştirilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla Şekil 33’deki silindir fırında, Argon gaz atmosferi altında, 2 saat boyunca (Tu *et al.* 2019; Pimenta *et al.* 2007; Eom *et al.* 2021) piroliz işlemi gerçekleştirilmiş ve Türk kahvesi atıklarından kahve biyokömürü (KB) elde edilmiştir (Şekil 34).

Türk kahvesi atıkları farklı sıcaklıklarda piroliz edilmiş ve bu sıcaklıklarda elde edilen KB ürünleri Şekil 35’de sunulmuştur. Şekil 35’deki KB’lerin görüntüleri incelendiğinde, 200 °C piroliz sıcaklığında elde edilen KB’nin renk olarak daha çok atık kahveye benzediği gözlenmiştir. Bu nedenle optimizasyon çalışması için piroliz sıcaklıkları 300, 400, 500 ve 600 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 33. Biyokömür eldesinde kullanılan silindir fırın ve Ar gaz tüpünün fotoğrafı.



Atık kahve



Kahve biyokömürü (KB)

Şekil 34. Atık Türk kahvesinin ve kahve biyokömürünün (KB) fotoğrafı



Türk kahvesi telvesi



KB-200°C



KB-300°C



KB-400°C

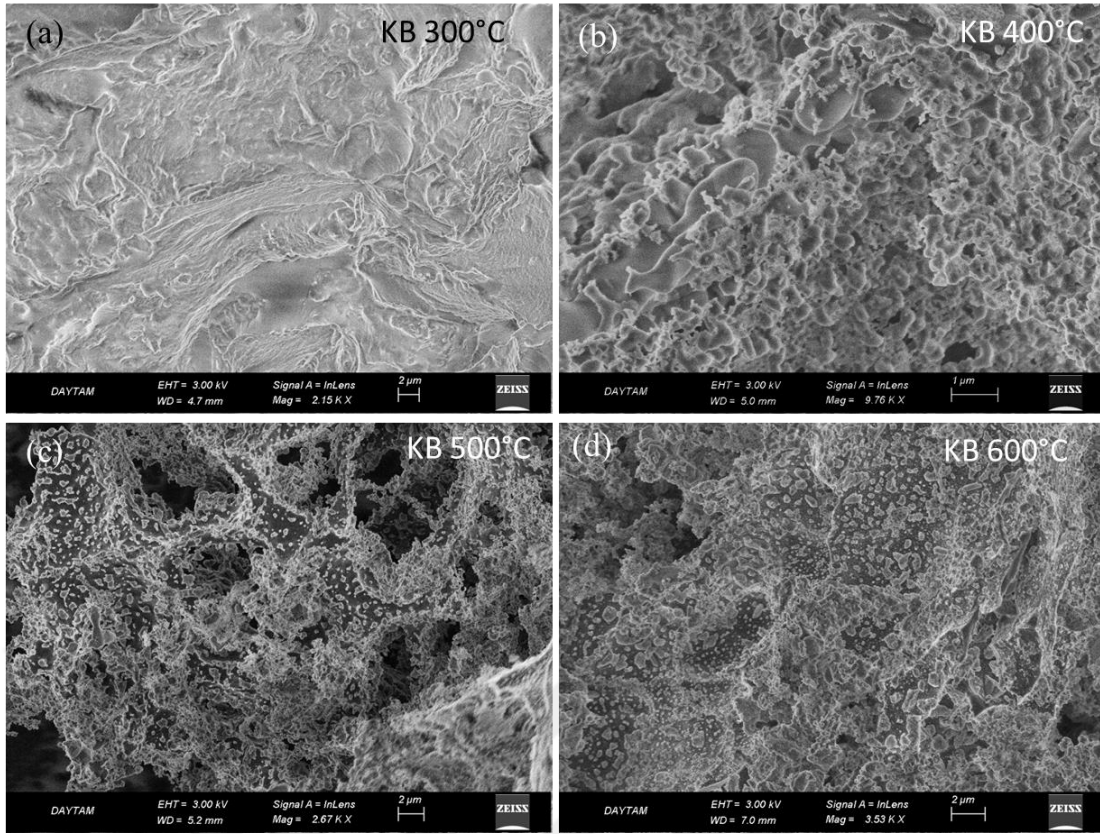


KB-500°C



KB-600°C

Şekil 35. Farklı sıcaklıklarda piroliz işlemi ile elde edilen KB'lerin fotoğrafı

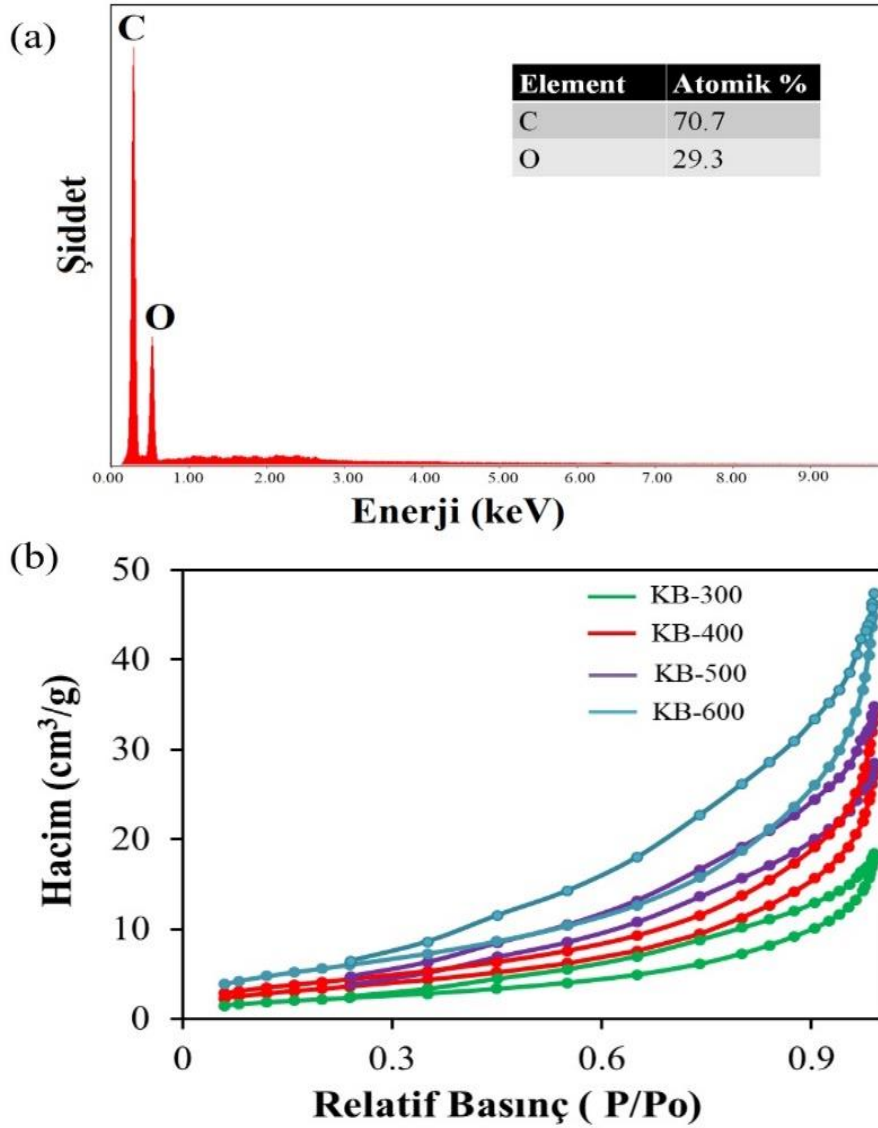


Şekil 36. (a) 300 °C’de, (b) 400 °C’de, (c) 500 °C’de ve (d) 600 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen KB’lerin FESEM görüntüleri

Şekil 36’daki farklı sıcaklıklarda piroliz işlemi sonrası elde edilen KB’lere ait FESEM görüntüleri incelendiğinde, daha fazla boşluklu yapı içeren ve daha fazla pürüzlülük dolayısıyla daha fazla yüzey alanına sahip yapının, 500 °C’de elde edilen KB’ye ait olduğu gözlenmiştir. Şekil 37. a, 500 °C’de piroliz sonucu elde edilen KB’ye ait EDS spektrumunu göstermektedir. KB’nin %70,7 oranında C ve %29,3 oranında O elementlerini içerdiği görülmektedir. Bu sonuçlar, KB’nin başarılı bir şekilde hazırlandığını doğrulamaktadır.

Şekil 37.b, 300, 400, 500 ve 600 °C’de hazırlanan KB’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 KB numuneleri için gözenek boyutlarının artan sıcaklıkla birlikte; 300 °C’de yaklaşık 2 nm, 400 °C ve 500 °C’de yaklaşık 2-22 nm ve 600 °C’de 2-50 nm aralığında değiştiği gözlenmiştir. Bu değişim, sıcaklık artışının organik yapıların ayrışmasıyla gaz salınımının arttığını ve dolayısıyla gözenek yapısının mikro gözenekli yapıdan mezo gözenekli yapıya geçişine yol açtığını göstermektedir. 300, 400, 500 ve 600 °C’de hazırlanan KB’lerin BET yüzey alanları sırasıyla 95,2, 110,8, 119,7 ve 127,2 m² g⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, GBÜ uygulamalarında fototermal malzeme olarak KB

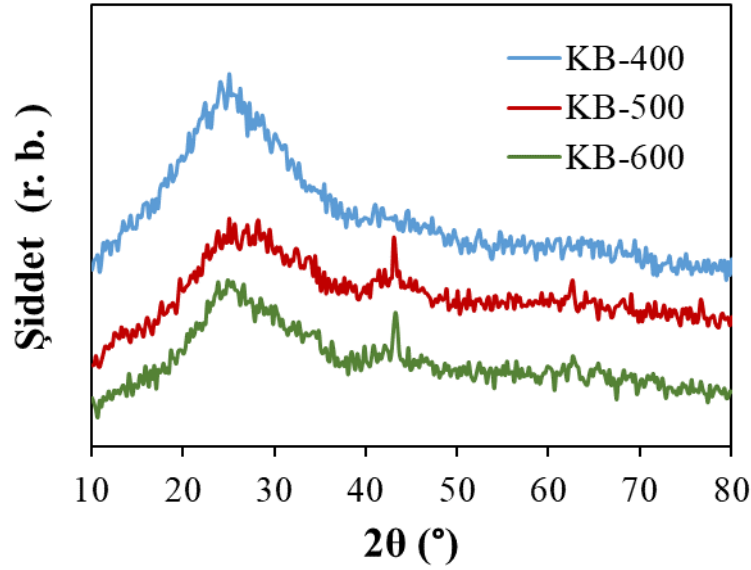
hazırlamak için piroliz sıcaklığı olarak 500 °C seçilmiştir, çünkü bu sıcaklık yüzey alanı ve gözenek yapısı arasında uygun bir denge sağlamaktadır.



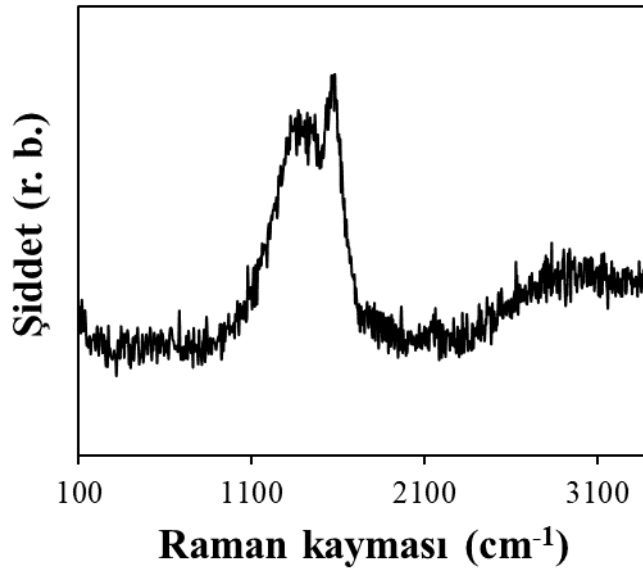
Şekil 37. (a) 500 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen KB’nin EDS spektrumu. İç şekil: Elementleri ve atomik yüzdeleri gösteren tablo. (b) 300, 400, 500 ve 600 °C’de hazırlanan KB’lerin 77 K’de elde edilen N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi. Ek: Numunelerin BJH gözenek boyutu dağılımları

Şekil 38, farklı sıcaklıklarda piroliz yöntemi ile elde edilen KB’lere ait XRD spektrumunu göstermektedir. 400 °C’de elde edilen KB’nin XRD spektrumunda, yaklaşık 23° 2 θ değerinde (002) grafitik karbon düzlemine ait bir pik ve yaklaşık 43° 2 θ değerinde sp² hibritleşmesi yapmış karbon petek yapılarının (100) düzlemine ait yayvan bir pik gözlenmiştir (Xue *et al.* 2017; Pimenta *et al.* 2007; Yang *et al.* 2018). Piroliz sıcaklığı, 400 °C’den 500 °C’ye çıktığında (002) grafitik karbon düzlemine ait pikin daha sağa kaydığı gözlenirken, karbon peteklerine ait olan pikin şiddetinin arttığı belirlenmiştir. Bragg Yasasına göre, 400, 500 ve 600 °C’de hazırlanan KB’lerin d₀₀₂ değeri sırasıyla 0.350, 0.332, 0.353 nm olarak hesaplanmıştır. 500 °C’deki KB’nin 400 ve 600 °C’deki KB’ye kıyasla, daha düşük d₀₀₂ değerine, dolayısıyla

daha kompakt bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir ki bu durumun ısı iletiminde avantaj olacağı söylenebilir. Bu nedenle KB hazırlamada sıcaklık olarak 500 °C'nin daha uygun olduğu tespit edilmiştir.



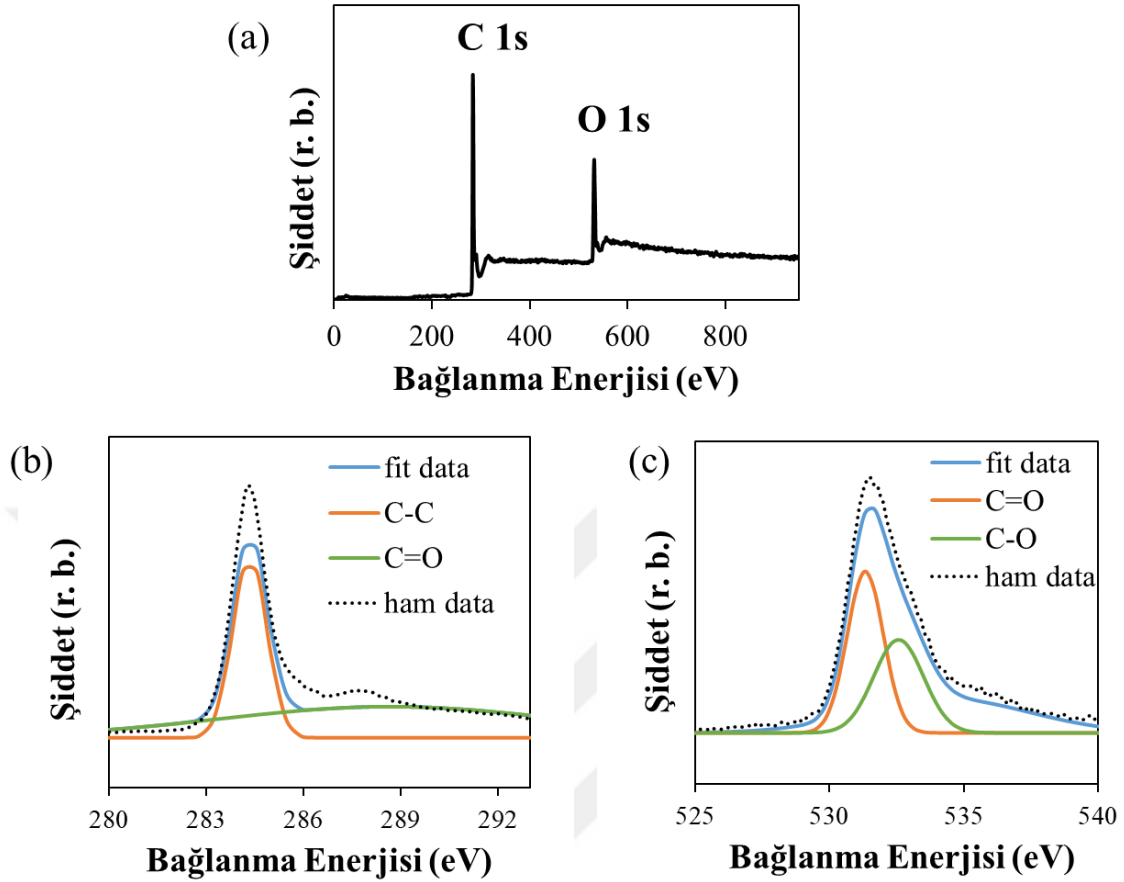
Şekil 38. 400, 500 ve 600 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen KB’lerin XRD spektrumu



Şekil 39. 500 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen KB’nin Raman spektrumu

Şekil 39’da 500 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen KB’nin Raman spektrumu verilmiştir. Raman spektrumunda, yaklaşık 1395 cm^{-1} ve 1563 cm^{-1} ’de sırasıyla D ve G bandına karşılık gelen iki pik tespit edilmiştir. D bandı, düzensiz grafitin sp^3 karbon atomlarının titreşimlerine karşılık gelirken; G bandı, 2D hegzagonal $\text{C}=\text{C}$ sp^2 atomlarının E_{2g} fononunu temsil etmektedir (Caňado *et al.* 2011). Bu bantların yoğunluk oranı (I_D/I_G) grafitleşme derecesine bağlıdır ve KB için 0,88 olarak hesaplanmıştır ki karbonize yapıdaki yapısal

kusurları gösterir. Yaklaşık 2900 cm^{-1} 'deki geniş tepe noktası, bir D+G kombinasyon moduyla ilişkilidir ve düzensizlikten kaynaklanır (Pimenta *et al.* 2007).

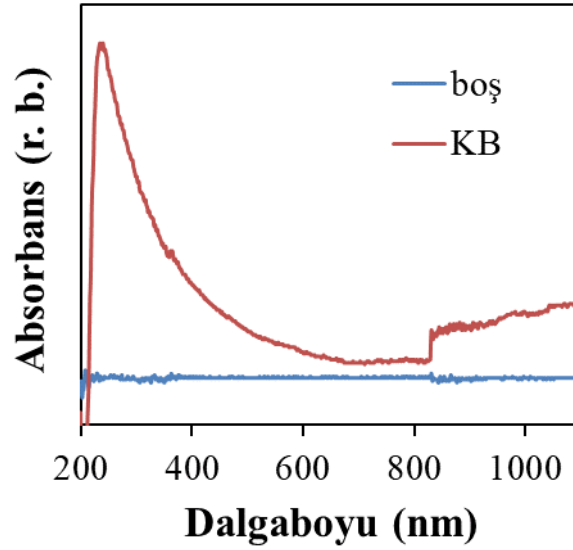


Şekil 40. 500 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen KB’nin (a) genel ve ayrıntılı (b) C 1s ve (c) O 1s spektrumları

Şekil 40’deki 500 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen KB’nin XPS spektrumu incelendiğinde, %68 C ve %32 O elementlerinin varlığına rastlanmıştır. KB’nin XPS spektrumunda 286,7 eV’deki C 1s piki fit edildiğinde C=O ve C-C (Şekil 40.b); 533,1 eV’deki O 1s fit edildiğinde ise C=O ve C-O (Şekil 40.c) kimyasal bağ yapıları tespit edilmiştir (Eom *et al.* 2021). Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, KB hazırlamak için piroliz sıcaklığı 500 °C olarak optimize edilmiş ve GBÜ çalışmalarında bu sıcaklıkta üretilen KB ile buharlaştırıcı materyal hazırlanmıştır.

Şekil 41, KB’nin UV-Vis-NIR absorpsiyon spektrumunu göstermektedir. 233 nm’deki absorpsiyon piki, C-C bağlarının $\pi-\pi^*$ geçişinden kaynaklanmaktadır (Eom *et al.* 2021). KB’nin, UV bölgesine ek olarak, görünür bölgede ve özellikle yakın IR bölgesinde (840-1100 nm) absorpsiyon özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, KB’nin fototermal bir malzeme olarak geniş bir dalga boyu aralığında güneş ışığı absorpsiyonuna sahip olduğunu göstermiştir.

Buharlaştırıcı malzemenin hızlı ve etkili su emilimi sağlaması, GBÜ performansını etkileyen ana parametrelerden biridir. Doğal selülozik süngerin su emilimini test etmek için, 4 cm çapında ve 1,5 cm yüksekliğinde olan sünger (S) 1 dakika boyunca suda tutulmuş ve ardından S'nin kütlesi başlangıç ağırlığıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 42). S'nin kuru ve ıslak ağırlığı sırasıyla 1,5625 ve 20,9030 g olarak tespit edilmiştir. Kuru ve ıslak S arasında yaklaşık 13 kat fark olmakla birlikte, materyal tasarımında kullanılan doğal süngerin kendi ağırlığının yaklaşık 12 katı kadar su emdiği belirlenmiştir.



Şekil 41. KB'nin UV-VIS-NIR absorpsiyon spektrumu



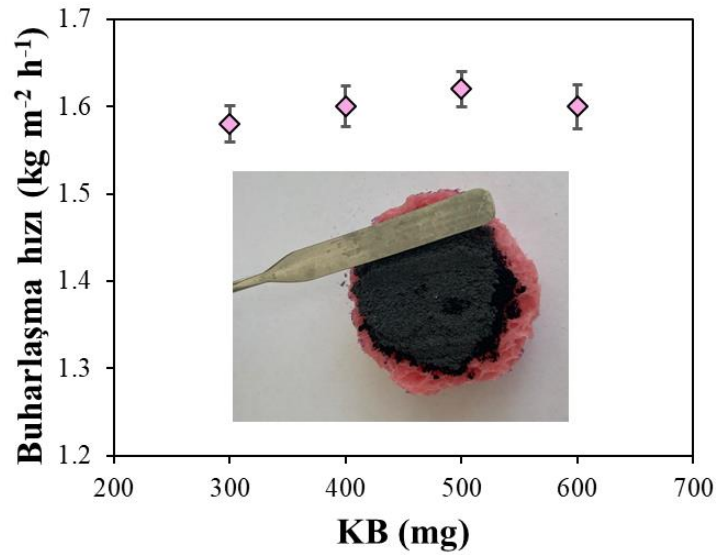
Şekil 42. Kuru ve ıslak haldeki süngerin su emme kapasitesi

Fototermal materyali hazırlamak için, öncelikle ticari doğal selülozik sünger yaklaşık 4 cm çapında bir silindir şeklinde kesilmiş ve süngerin dairesel yüzeyi hazırlanan polivinil alkol (PVA) çözeltisine batırılmıştır (Şekil 43). Daha sonra bu yüzey farklı miktarlardaki KB ile kaplanmış ve yüzeydeki KB miktarının optimizasyon çalışması yapılmıştır (Şekil 13). Yüzeyde, PVA çözeltisi ve KB karışımı, KB'nin yüzeyde sabit durmasını sağlamıştır. 300, 400,

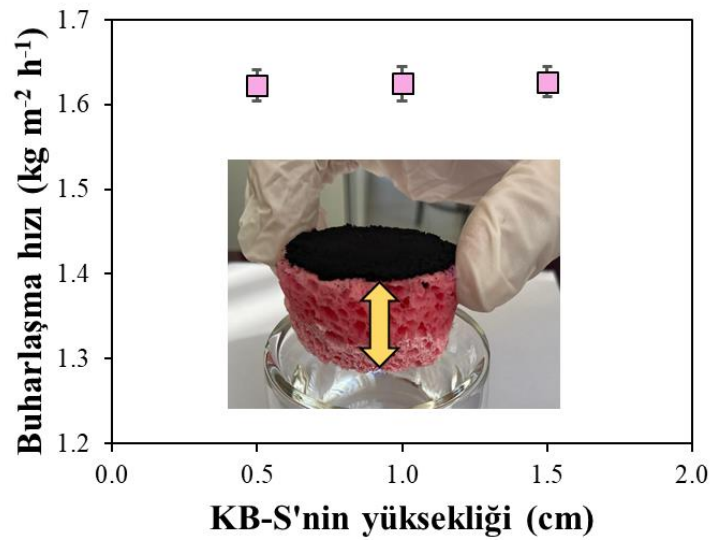
500 ve 600 mg KB ile kaplanmış KB-S'lerin buharlaşma hızı Şekil 44'da gösterilmiştir. Yüzeydeki KB miktarı arttıkça buharlaşma hızının arttığı, ancak, 600 mg KB ile hazırlanan materyalin 500 mg KB ile hazırlanan materyale kıyasla buharlaşma hızında hafif bir azalma olduğu gözlenmiştir.



Şekil 43. Fototermal materyalin (KB-S) hazırlanmasına ait gösterim



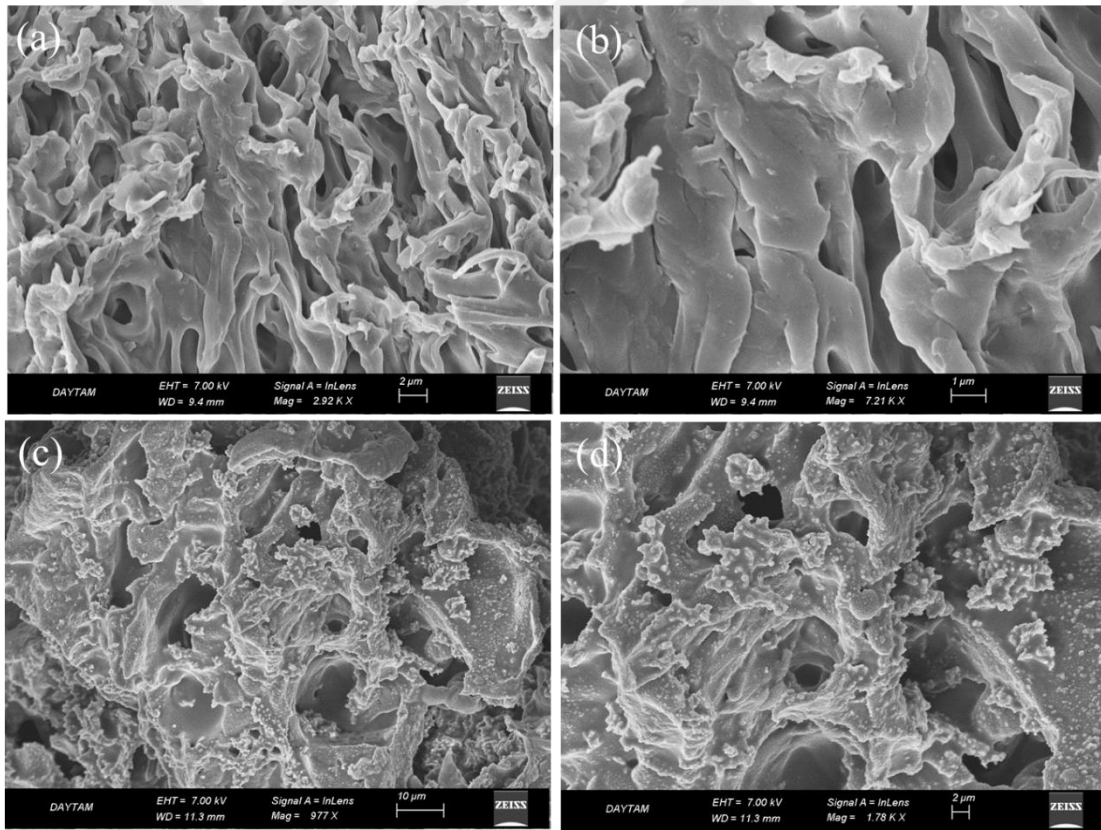
Şekil 44. Farklı KB miktarlarıyla hazırlanan KB-S'nin buharlaşma hızı



Şekil 45. Farklı S yükseklikleriyle hazırlanan KB-S'nin buharlaşma hızı

Yüzeyde fazlaca bulunan KB, sünger tarafından transfer edilen su ile yeterince ıslanmaması ve yeterli ısı-buhar transferi sağlayamaması sonucu düşük bir buharlaşma hızı gözlenmiştir. Sünger yüksekliğinin KB-S'nin buharlaşma hızına etkisi incelenmiş ve yüzeyi 500 mg KB ile kaplanmış farklı yüksekliklere (0,5, 1,0 ve 1,5 cm) sahip sünger materyallerin buharlaşma hızları karşılaştırılmıştır (Şekil 45). Şekil 45'deki sonuçlar süngerin yüksekliğinin fototermal malzemenin buharlaşma hızı üzerinde neredeyse hiç etkisi olmadığını göstermiştir. Bu nedenle buharlaştırıcı KB-S'nin kolay hazırlanması için sünger satın alındığı ilk haliyle (yükseklik: 1,5 cm) kullanılmıştır.

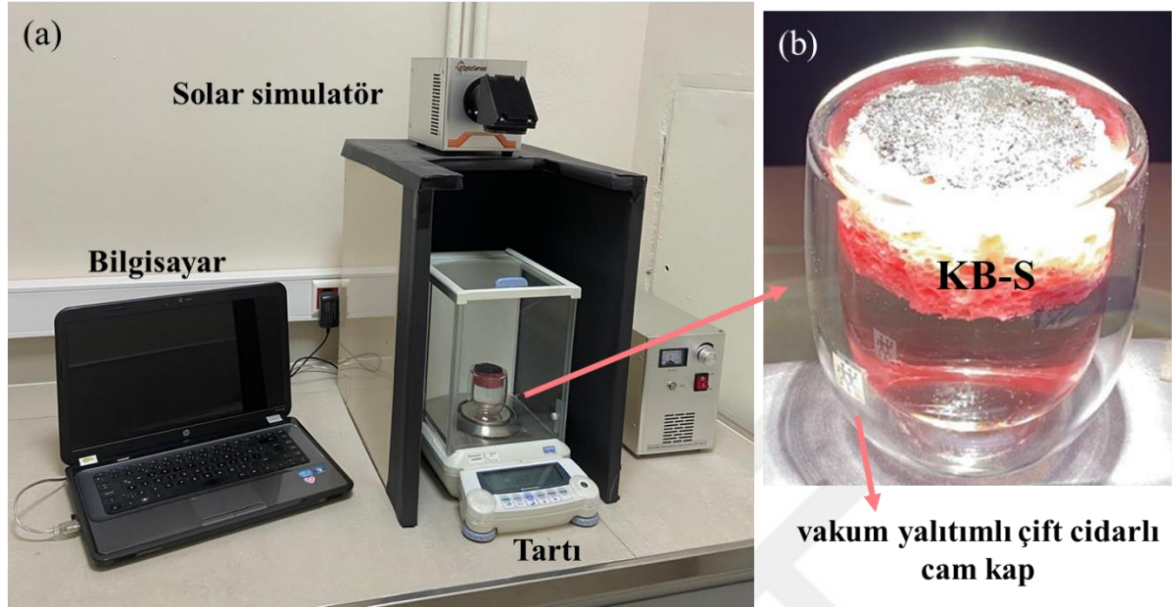
Sade S ve KB-S'nin yüzey morfolojisi FESEM ile karakterize edilmiştir. Şekil 46.a ve b, süngerin farklı boyutlarda gözeneklerden oluşan pürüzlü katmanlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu düzensiz gözenekler su emilimi ve buharlaşma için avantaj sağlamaktadır. KB, Şekil 46.b'deki süngerin gözenekleri içine homojen bir şekilde kaplanmış ve yüzeyin pürüzlülüğü artırmıştır (Şekil 46 c-d). Bu durumun, materyalin suyu buharlaştırması için daha yüksek bir güneş emilimi sağlamasına katkıda bulunacağı öngörülmüştür.



Şekil 46. Farklı büyütmelerde S (a-b) ve KB-S'nin (c-d) FESEM görüntüleri

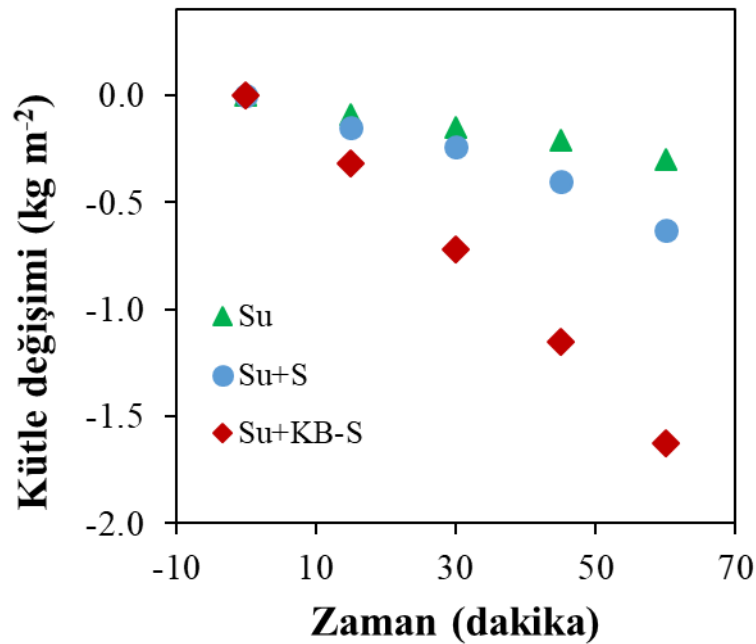
Belirlenen optimum şartlarda hazırlanan buharlaştırıcı materyal KB-S'nin GBÜ uygulamasında kullanımı için Şekil 47.a'daki sistem kullanılmıştır. Bu sistem bir güneş simülatörü, su buharlaşması yoluyla kütle değişimini ölçmek için bir elektronik analitik terazi ve zamana bağlı buharlaşma oranını belirlemek için bir bilgisayardan oluşmaktadır. GBÜ

deneyleri, çevresel ısı iletimini önlemek için yalıtımlı çift cidarlı bir kaptaki su üzerinde yüzen KB-S ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 47.b). Sıcaklık değişimleri termal kamera ile izlenmiş ve su buharlaşma miktarı Apps Acpa programı (<http://apps.acpa.org/applibrary/EvaporationRate/>) kullanılarak hesaplanmıştır.



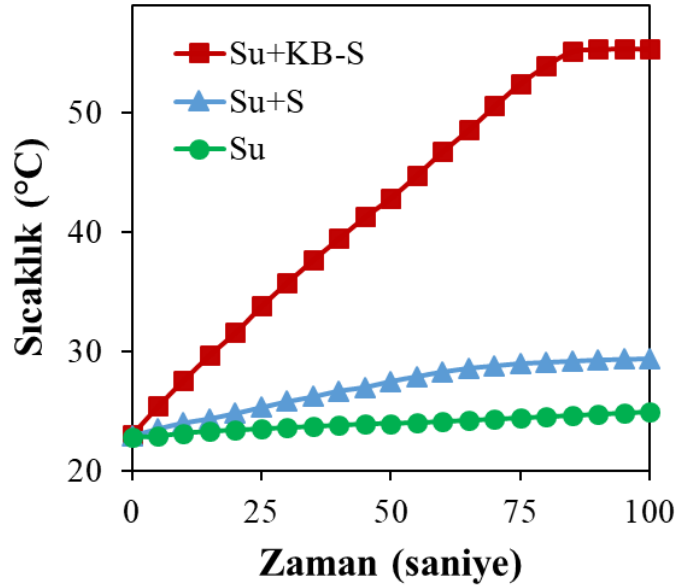
Şekil 47. GBÜ cihazının (a) ve vakum yalıtımlı çift cidarlı cam kaptaki KB-S'nin (b) fotoğrafı

Şekil 48'da KB-S, sade S ve saf suyun buharlaşma performansını incelemek için 60 dakika boyunca 1 güneş ışınlı altında suyun kütle değişimi incelenmiştir. KB-S, sade S ve saf su için zaman içindeki buharlaşma hızı sırasıyla 1,63, 0,65 ve 0,31 $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.



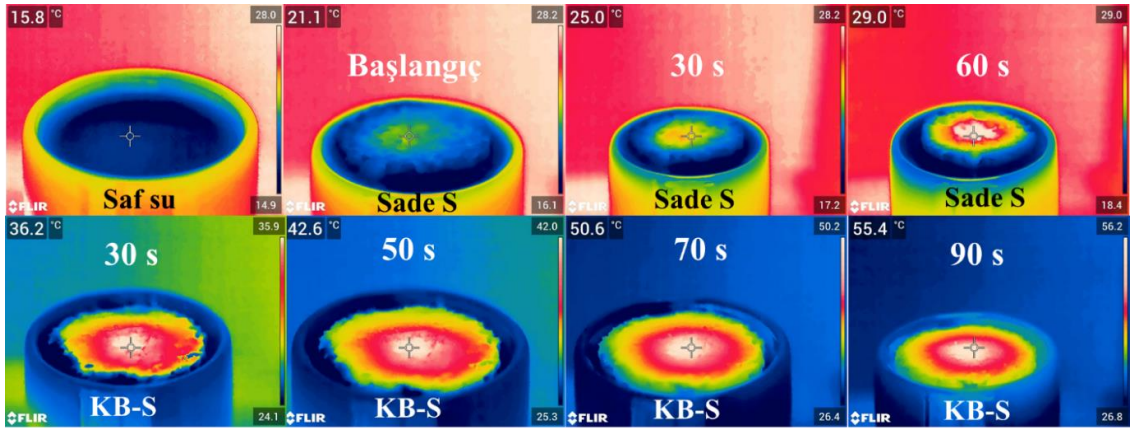
Şekil 48. 1 güneş ışınlı altında KB-S, sade S ve saf su ortamında suyun zamana bağlı kütle değişimi

KB-S'nin buharlaşma hızı, saf suyun yaklaşık 5,2 katı ve sade S'nin yaklaşık 2,5 katıdır. Şekil 49'de, numunelerin (saf su, sade S ve KB-S) 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, KB-S'nin yüzey sıcaklığı ilk 85 saniye boyunca hızla artmış ve 55,2 °C'de sabitlenmiştir. KB-S'nin maksimum yüzey sıcaklığının sade S'ye kıyasla daha yüksek olması karbonize yapının (KB) güçlü fototermal dönüşüm etkisini göstermektedir.

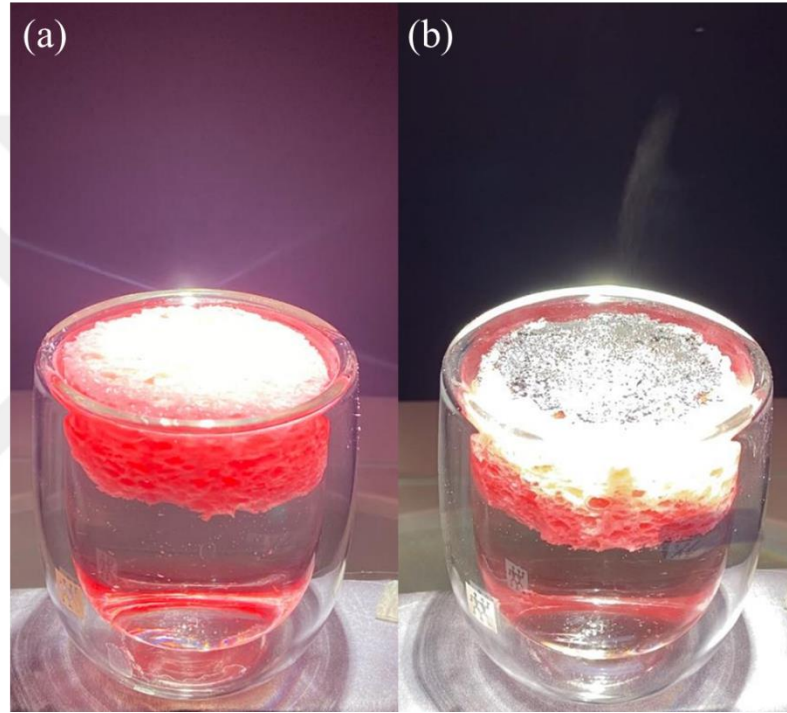


Şekil 49. 1 güneş ışınlamı altında KB-S, sade S ve saf suyun zamana bağlı yüzey sıcaklık değişimi

Saf su, sade S ve KB-S'nin yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi 1 güneş ışınlamı altında kızılötesi kamera ile izlenmiş ve Şekil 50'da sunulmuştur. Saf suyun başlangıç sıcaklığı 15,8 °C'dir. KB-S'nin yüzey sıcaklığı ilk 30 saniyede keskin bir şekilde artmış ve 30, 50, 70 ve 90 saniye sonra sırasıyla 36,2, 42,6, 50,6, 47,0 ve 55,4 °C olarak kaydedilmiştir. Buna karşılık, sade S'nin yüzey sıcaklığı, 30 ve 60 saniye sonra sırasıyla 25,0 °C ve 29,0 °C'dir. KB-S ve sade S'nin buharlaştırıcı olarak fotoğrafları Şekil 51'de gösterilmiştir. 60. saniyedeki güneş ışınlamı altında KB-S'nin yüzeyinde gözlenen mikro su damlacıklarından oluşan bulutumsu görüntü, KB yapısının hızlı buharlaşmayı desteklediğini kanıtlar niteliktedir.

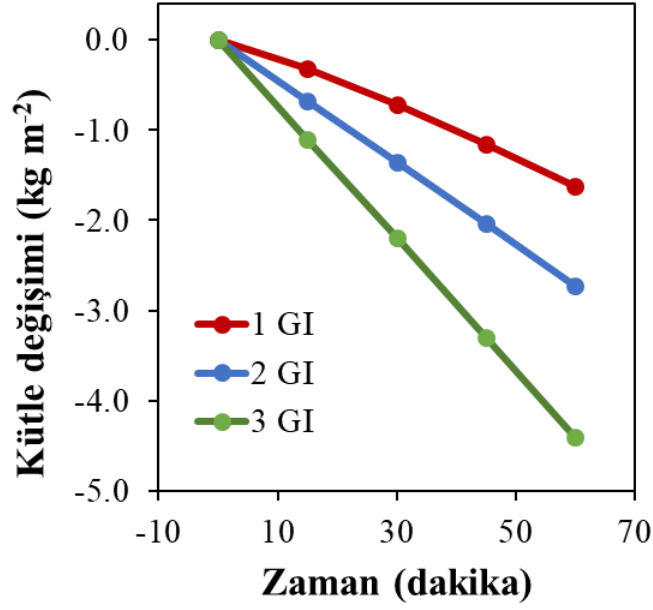


Şekil 50. Saf su, sade S ve KB-S'nin farklı zamanlardaki kızılötesi görüntüleri



Şekil 51. 60. saniyedeki güneş ışınımı altında (a) sade S ve (b) KB-S'nin fotoğrafları

Işık yoğunluğu 2 ve 3 güneş ışığına (GI) çıkarıldığında, KB-S fototerml malzemenin buharlaşma hızı sırasıyla 2,72 ve 4,40 kg m⁻² h⁻¹'e yükselmiştir (Şekil 52). Bu durum, fototerml malzemenin güneş ışığının miktarına duyarlı olarak iyi bir ışık emilimi gösterdiğini doğrulamıştır.



Şekil 52. Farklı güneş ışınları altında KB-S ile zamana bağlı suyun kütle değişimi

KB-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 (Zhang *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, KB-S ve sade S yüzeyindeki suyun buharlaşma entalpisinin, suyunkinden daha düşük olacağı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle porlu yüzeylerdeki su buharlaşma entalpileri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

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

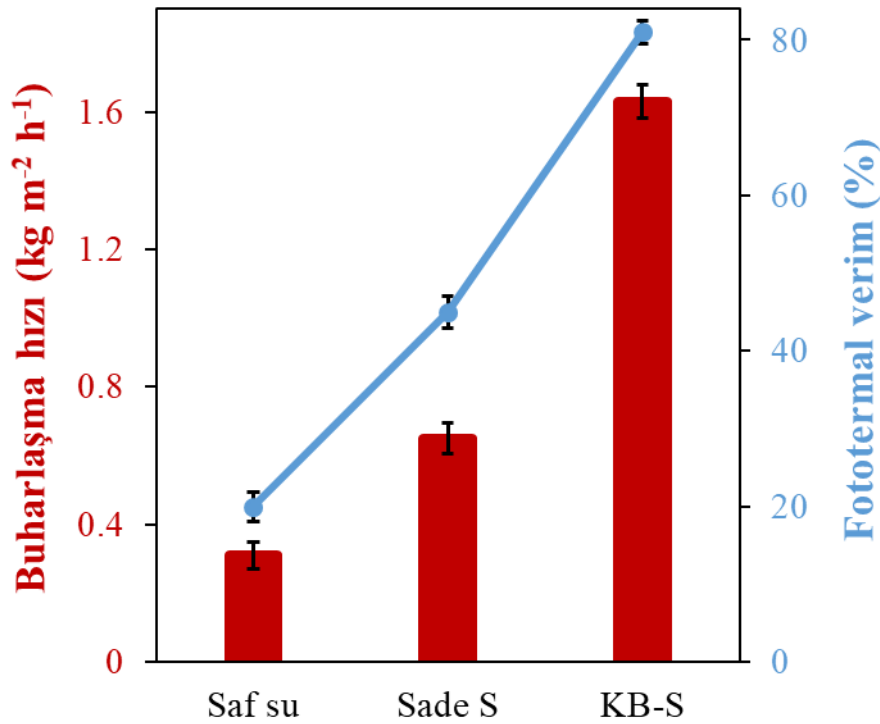
Burada m_{su} ve m_m sırası ile üzerinde herhangi bir materyal bulunmayan suyun ve porlu materyal yüzeyinde bulunan suyun buharlaşma hızlarına ve h_{su} ve h_m ise sırası ile suyun ve porlu materyal yüzeyinde bulunan suyun entalpilerine karşılık gelmektedir (Zhang *et al.* 2021). Eşitlik 2 kullanılarak sade S ve KB-S için buharlaşma entalpileri hesaplanmış ve Tablo 1’de sunulmuştur. KB-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.

Tablo 1. S ve KB-S'nin Buharlaşma Entalpileri

Materyal	Buharlaşma entalpisi (h, J g ⁻¹)
Sade S	1926±16
KB-S	1521±15

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.

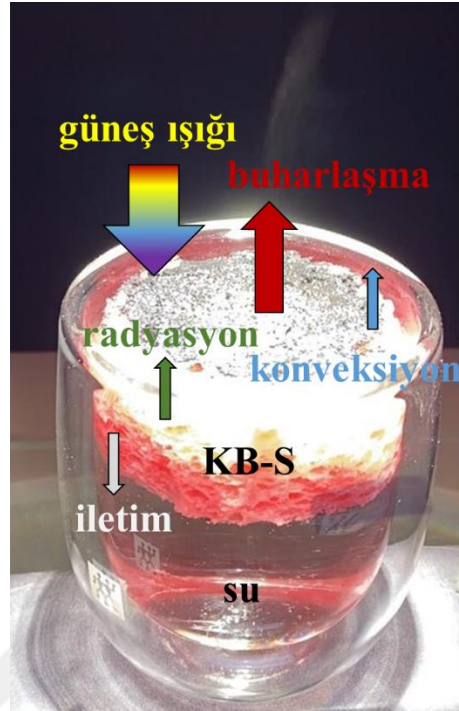


Şekil 53. Saf su, sade S ve KB-S'nin 1 güneş ışınlımı altında buharlaşma hızı ve fototermal verimi

Saf su, sade S ve KB-S için buharlaşma entalpileri hesaplandıktan sonra, Eşitlik 1 kullanılarak bu materyallerin fototermal verimi hesaplanmış ve elde edilmiş sonuçlar Şekil 53'de sunulmuştur. Saf su, sade S ve KB-S için fototermal verim sırasıyla %20, %45 ve %81 olarak belirlenmiştir. KB-S'nin fototermal veriminin, diğerlerine göre oldukça yüksek olması, karbonize yapının yüksek oranda güneş ışığını absorplama ve termal enerjiye dönüştürme özelliğine atfedilmiştir. Ayrıca KB'nin sünger yüzeyine serilmesiyle yüzeydeki ısı kayıplarını engelleyerek fototermal verimi artırdığı söylenebilir.

GBÜ sisteminde elde edilen ısı üç farklı yolla kaybedilmektedir. Bunlar radyasyon, konveksiyon ve iletimdir. Hazırlanan sistem üzerinde oluşması muhtemel ısı kayıpları Şekil

54'de temsili olarak gösterilmiş ve materyal üzerine gönderilen güneş ışığı tarafından gelen enerjinin dağılımı özetlenmiştir.



Şekil 54. KB-S fototerml malzeme için enerji dengesi ve ısı transferi diyagramı

Şekil 54'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

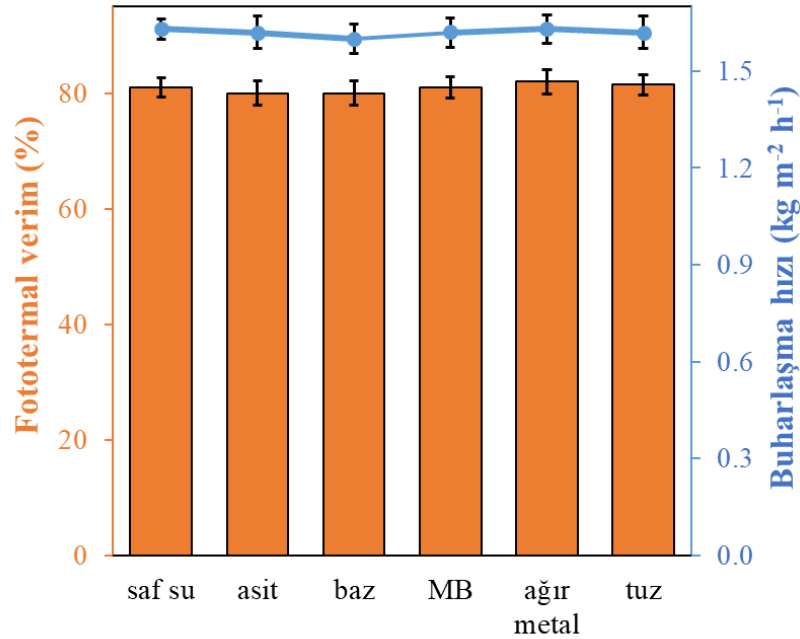
İletim kaybı temel iletim yasası dikkate alınarak hesaplanmıştır (Yang *et al.* 2018).

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

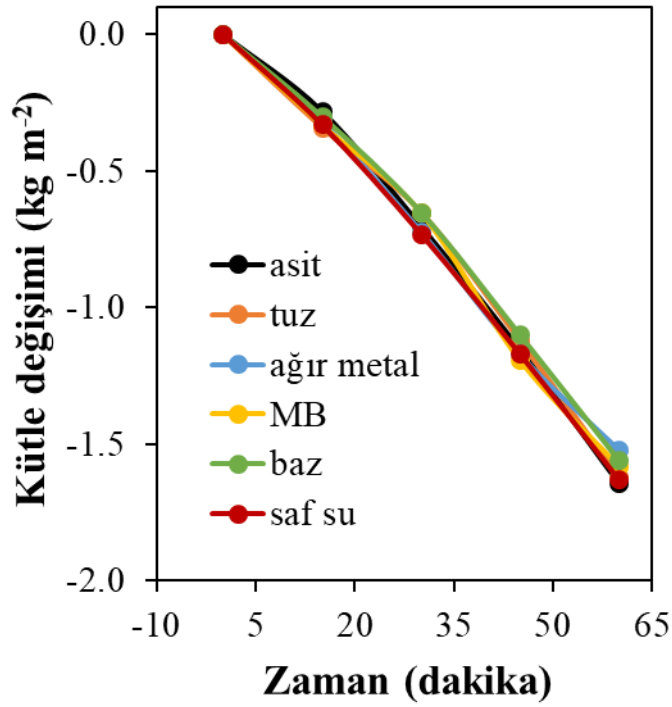
Burada Q ısıyı, C suyun özgül ısı kapasitesini ($4.2 \text{ J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), m su kütlesini ($\sim 30 \text{ g}$) ve ΔT ise 3600 saniyede suyun ısısının ne kadar yükseldiğini gösterir.

Eşitlik 3, 4 ve 5 kullanılarak KB-S için radyasyon, konveksiyon ve iletim kayıpları sırasıyla %7,9, %4,8 ve %6,3 olarak hesaplanmıştır (Yang *et al.* 2018). Bu kadar düşük termal kayıplar, S yüzeyindeki KB'nin ısı izolasyonunu kolaylaştırdığını göstermiştir.

KB-S'nin buharlaştırma performansı; ağır metal (200 mg/L), asit (pH 2), alkali (pH 12) ve boyar madde (metilen mavisi-MB-1,0 g/L), tuz (NaCl-3,5 ağırlık %) içeren farklı çözeltiler için araştırılmıştır. Şekil 55, farklı çözeltilerdeki KB-S'nin fototermal verimliliğini ve buharlaşma hızını göstermektedir. Şekil 56'de ise farklı çözeltilerde KB-S ile zamana bağlı olarak suyun kütle değişimi sunulmuştur. KB-S'nin farklı çözeltiler için gösterdiği fototermal verim, buharlaşma hızı ve suyun kütle değişiminin, saf suyun KB-S ile buharlaştırılması için elde edilen sonuçlara yakın olduğu belirlenmiştir. Bu durum hazırladığımız buharlaştırıcının çeşitli çözeltilerde dahi iyi bir GBÜ performansına sahip olduğunu göstermiştir.

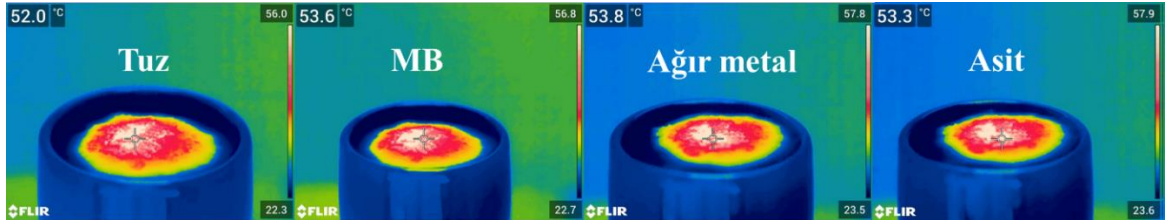


Şekil 55. Asit, baz, tuz, ağır metal ve MB içeren çözeltiler ve saf su, için 1 güneş ışınımı altında KB-S'nin fototermal verimi ve buharlaşma hızı



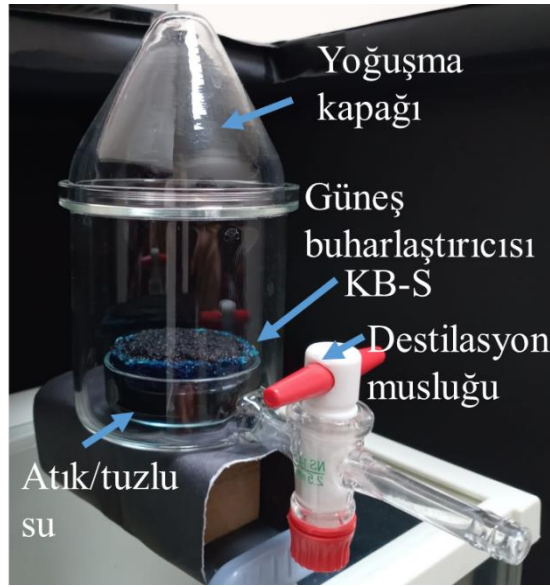
Şekil 56. Farklı çözelti ve saf su ortamında KB-S ile zamana bağlı suyun kütle değişimi

Farklı çözelti ortamındaki (tuz, MB, ağır metal ve asit içerikli) KB-S'nin yüzey sıcaklığı kütle değişimiyle tutarlı olarak ~52-54 °C aralığında değişim göstermiştir (Şekil 57). Tüm bu bulgular, KB-S'nin tuzdan arındırma ve su arıtma uygulamalarında potansiyel bir güneş enerjisiyle su buharlaştırıcısı olduğunu ortaya koymuştur.



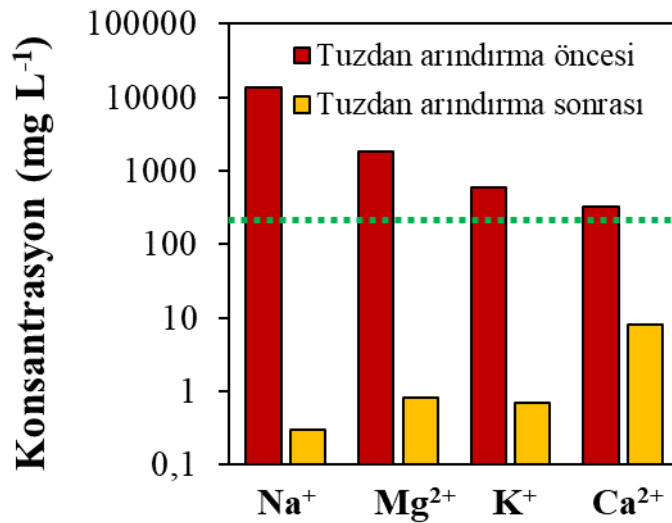
Şekil 57. Ağır metal, tuz, asit ve MB içeren çözeltilerde yüzen KB-S'nin kızılötesi görüntüleri

KB-S'nin tuzdan arındırma ve kirli suyun arıtılmasındaki performansını araştırmak için, Şekil 58'deki 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 58. KB-S ile güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve arıtma için deney düzeneği

KB-S ile tuzdan arındırmadan önce ve sonra tuzlu çözeltinin iyon içerikleri ICP-MS kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 59 ve Tablo 2'de sunulan verilere göre, buharlaştırıcımızın yüksek bir tuzdan arındırma performansı sergilediği belirlenmiştir. KB-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.



Şekil 59. KB-S ile tuzdan arındırma öncesi ve sonrası Na⁺, K⁺, Mg²⁺ ve Ca²⁺ konsantrasyonunun karşılaştırılması

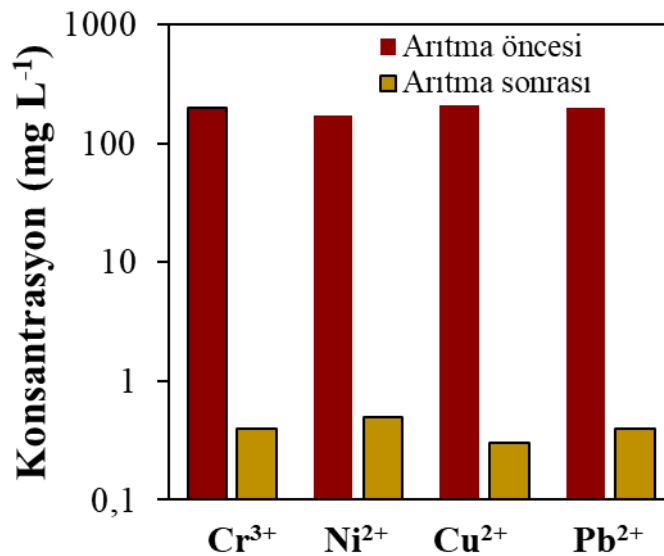
Tablo 2. Simüle Edilmiş Deniz Suyunun KB-S ile Güneş Enerjisiyle Tuzdan Arındırılmasından Sonra İyon İçerikleri

Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ⁺² (ppm)	Ca ⁺² (ppm)
0.3	0.7	0.8	8.0
Başlangıç çözeltinin, 13800 ppm Na ⁺ , 600 ppm K ⁺ , 1845 ppm Mg ⁺² ve 320 ppm Ca ⁺² içerdiği belirlenmiştir.			

Benzer bir çalışma için, ağır metal çözeltisinin KB-S ile güneş enerjisiyle arıtılması için yapılmış ve sonuçlar Şekil 60 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, KB-S ile buharlaştırıldıktan sonra 0,4, 0,3, 0,4 ve 0,5 ppm'ye düşmüştür (Tablo 4). Buharlaştırıcımızın yüksek güneş enerjisiyle arıtma performansı, iyonların KB'ye elektrostatik olarak adsorpsiyonuna atfedilebilir. Öte yandan, asidik ve alkali çözeltilerin KB-S ile buharlaştırılması sonrası elde edilen damıtılmış suyun pH değerinin 7'ye yakın olduğu belirlenmiştir (Şekil 61). Tüm bu sonuçlar, KB-S fototermal malzemesinin mükemmel güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve arıtma performansına sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Tablo 3. Karadeniz Deniz Suyunun KB-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

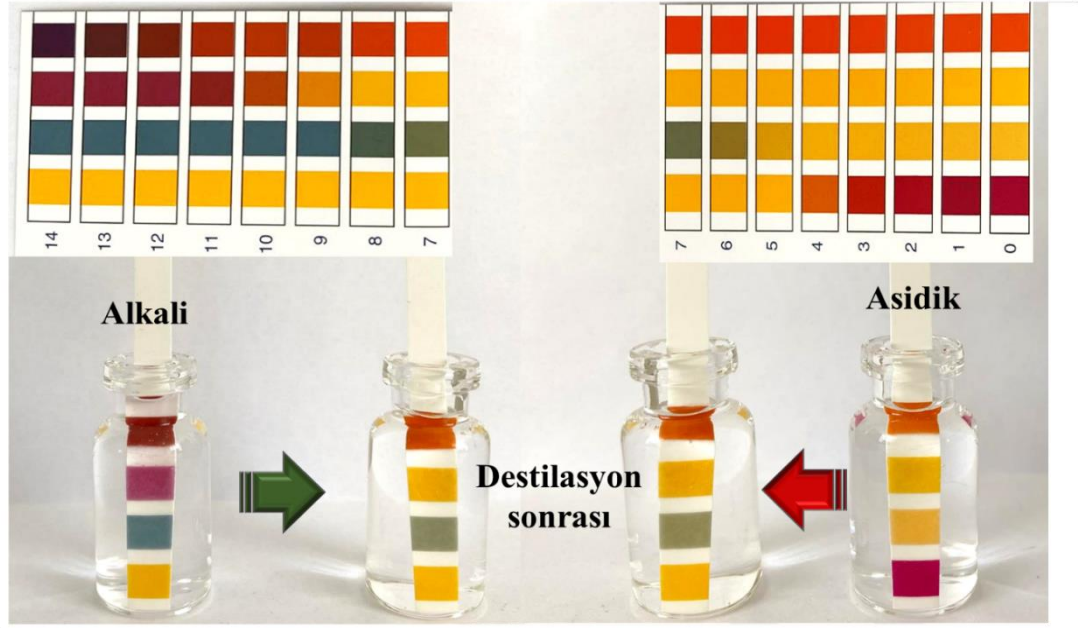
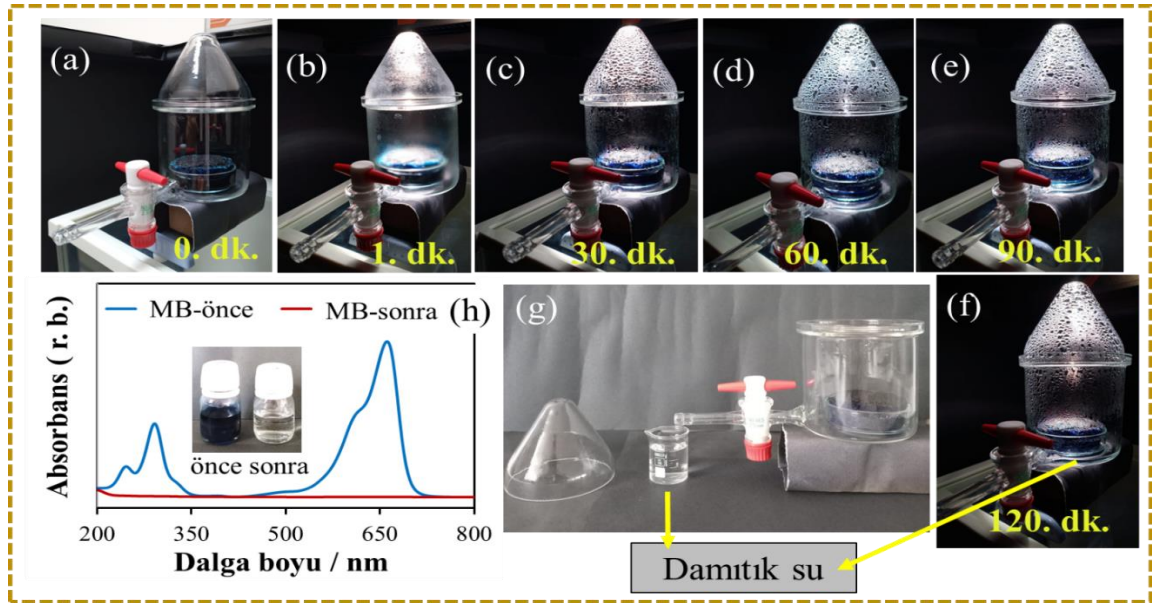


Şekil 60. KB-S ile 200 ppm Pb⁺², 180 ppm Ni⁺², 175 ppm Cu⁺² ve 210 ppm Cr⁺³ içeren ağır metal çözeltisinin güneş enerjisiyle arıtma öncesi ve sonrası Pb⁺², Ni⁺², Cu⁺² ve Cr⁺³ konsantrasyonunun karşılaştırılması

Tablo 4. Ağır Metal Çözeltisinin KB-S ile Güneş Enerjisiyle Arıtma Sonrası İyon İçerikleri

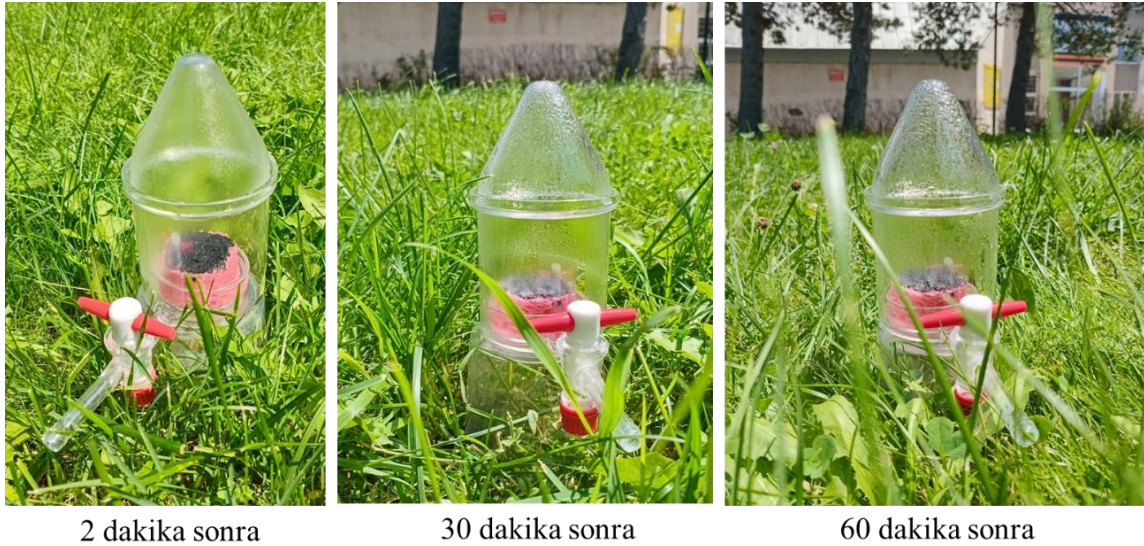
Ağır metal iyonları			
Pb ⁺² (ppm)	Cu ⁺² (ppm)	Ni ⁺² (ppm)	Cr ⁺³ (ppm)
0.4	0.3	0.5	0.4

Başlangıç çözeltinin, 200 ppm Pb⁺², 180 ppm Ni⁺², 175 ppm Cu⁺² ve 210 ppm Cr⁺³ içerdiği belirlenmiştir.

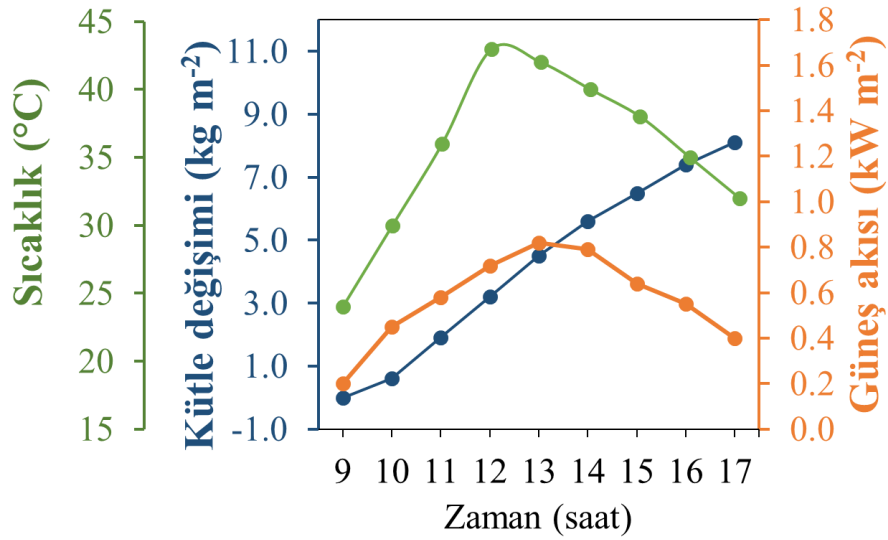
**Şekil 61.** Asidik (pH 2) ve alkali (pH 12) çözeltilerin KB-S ile güneş enerjisiyle arıtma öncesi ve sonrası pH değerlerinin fotoğrafları**Şekil 62.** Farklı zamanlarda (0., 1., 30., 60., 90. ve 120. dakikalarda) KB-S ile yapılan güneş enerjisiyle MB boyar madde içerikli çözeltinin arıtılmasının (a-f) ve arıtma sonrası damıtılmış suyun (g) fotoğrafları. (h) KB-S ile MB boyar madde içerikli çözeltinin güneş enerjisiyle arıtmadan önce ve sonra UV-görünür bölge absorpsiyon spektrumu. İç Şekil: Arıtmadan önce ve sonra MB çözeltisinin fotoğrafı

Boyar madde içeren çözeltinin KB-S ile güneş enerjisiyle arıtılmasını test etmek için, 1,0 g L⁻¹ konsantrasyona sahip MB çözeltisi hazırlanan GBÜ düzeneğine yerleştirilmiş ve damıtma işlemi uygulanmıştır. 2 saat ışılandıktan sonra, damıtılmış su UV-görünür bölge absorpsiyon spektroskopisi ile incelenmiştir. Başlangıçtan 1, 30, 60, 90 ve 120 dakikaya kadar güneş enerjisiyle arıtmaya ait fotoğraflar Şekil 62.a-f'de gösterilmiştir. KB-S ile yapılan güneş enerjisiyle MB boyar madde içerikli çözeltinin arıtılmasından sonra, düzeneğin musluğundan toplanan damıtık suyun (Şekil 62.g) şeffaf olduğu belirlenmiştir (Şekil 62.h İç Şekil). MB çözeltisinin arıtma öncesi ve sonrasına ait UV-görünür bölge absorpsiyon spektrumunda, arıtma öncesindeki MB absorpsiyon piklerinin arıtma sonrasında kaybolduğu gözlenmiştir. Bu durum, KB-S'nin güneş enerjisiyle arıtmadaki başarısını göstermiştir.

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 63). Şekil 63'de 2, 30 ve 60 dakika sonrası koni şeklindeki cam kapak içerisinde yoğunlaşan su net bir şekilde gözlenmiştir. Güneş akısındaki, KB-S'nin yüzey sıcaklığındaki ve suyun buharlaşması sonucu su kütlesindeki gün içerisindeki zamana göre değışimler Şekil 64'de sunulmuştur. Şekil 64 incelendiğinde, KB-S ile yapılan açık hava deneyleri sonuçlarının laboratuvarıda 1 güneş ışığı altında elde edilenler sonuçlara oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, KB-S güneş buharlaştırıcımızın doğal güneş ışığı altında GBÜ için kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.

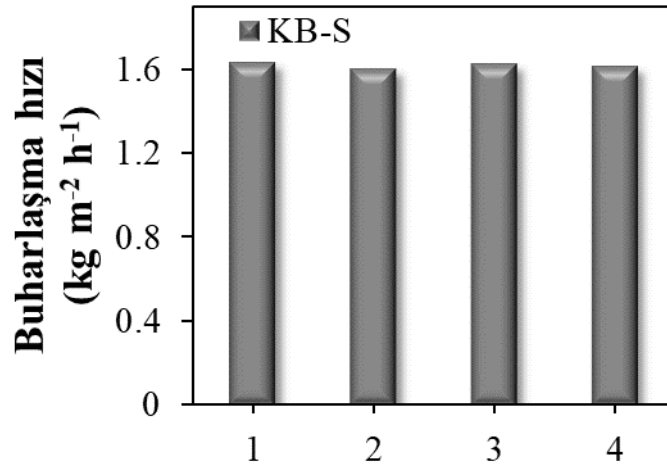


Şekil 63. 2, 30 ve 60 dakika sonrasında KB-S ile hazırlanan GBÜ sisteminin açık havada gerçek güneş ışığı altındaki fotoğrafları



Şekil 64. GBÜ için açık havada gerçek güneş ışığı altında KB-S ile yapılan deneyde, günlük saat dilimlerine göre güneş akısındaki, KB-S'nin yüzeyindeki sıcaklığın ve suyun buharlaşması sonucu su kütlesindeki değişim

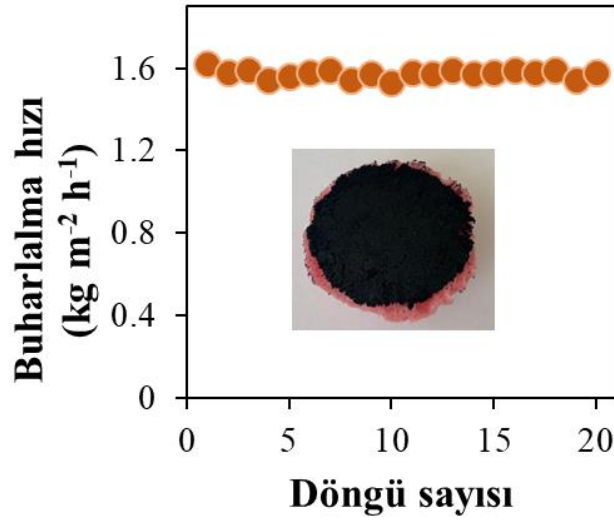
Hazırlanan fototermal buharlaştırıcı malzemenin tekrar üretilebilirliğini test etmek için, aynı yöntem kullanılarak dört KB-S hazırlanmış ve GBÜ sisteminde buharlaşma hızı ölçülmüştür (Şekil 65). Her bir KB-S'nin buharlaşma hızının birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiş ve böylece önerilen hazırlama prosedürü kullanılarak aynı yapısal ve kimyasal özelliklere sahip KB-S malzemelerin elde edilebileceğini gösterilmiştir.



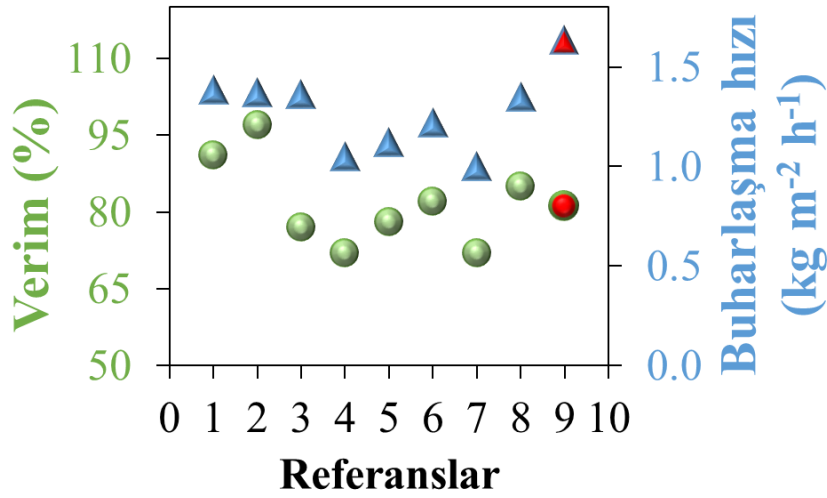
Şekil 65. Aynı yöntem ile hazırlanan 4 KB-S'nin buharlaşma hızı

KB-S'nin uzun vadeli GBÜ performans kararlılığını değerlendirmek için, %3,5'lik bir NaCl çözeltisi, bir güneş ışınlamı altında 20 ardışık döngü boyunca tuzdan arındırmada kullanılmıştır (Şekil 66). Şekil 66 incelendiğinde, KB-S'nin suyun buharlaşma hızı ile (1,63 kg m⁻² h⁻¹) hemen hemen aynı olan 1,57 kg m⁻² h⁻¹'lik ortalama bir buharlaşma hızı göstermiştir. Ayrıca, Şekil 66 iç şekilde, 20 döngüden sonra KB-S'de belirgin bir deformasyon olmadığı

gözlenmiştir. Bu sonuçlar, KB-S'nin mükemmel döngü kararlılığına sahip olduğunu ve birçok kez yeniden kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.



Şekil 66. KB-S'nin uzun vadeli GBÜ performansı. İç Şekil: 20 döngüden sonra KB-S'nin fotoğrafı



Şekil 67. KB-S ile diğer biyokütle kaynaklı GBÜ malzemelerinin fototermal verim ve buharlaşma oranı açısından karşılaştırılması

KB-S'nin (Şekil 67'deki 9. referans) performansı, literatürde bildirilen biyokütle çıkışlı GBÜ malzemeleriyle (Wilson *et al.* 2020; Lin *et al.* 2019) (1-8 numaralı referanslar) karşılaştırılmıştır. KB-S'nin, bu malzemelere kıyasla daha üstün buhar üretim hızı ve nispeten yüksek fototermal verimlilik sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, KB-S fototermal buharlaştırıcı, güneş enerjisiyle tuzdan arındırma ve atık su arıtımında basit bir hazırlama sürecine sahip düşük maliyetli bir materyal olarak karşımıza çıkmaktadır. Böylece, 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 gerçekleştirildi.



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 kahvesinden 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.

Farklı sıcaklıklarda piroliz işlemi sonrası elde edilen KB'lere ait FESEM görüntüleri incelendiğinde, daha fazla boşluklu yapı içeren ve daha fazla pürüzlülük dolayısıyla daha fazla yüzey alanına sahip yapının, 500 °C'de elde edilen KB'ye ait olduğu gözlenmiştir.

500 °C'de piroliz sonucu elde edilen KB'ye ait EDS spektrumunda KB'nin %70.7 oranında C ve % 29.3 oranında O elementlerini içerdiği belirlenmiştir.

Farklı sıcaklıklarda piroliz yöntemi ile elde edilen KB'lere ait XRD spektrumunda, 400 °C'de elde edilen KB'nin yaklaşık 23° 2 θ değerinde (002) grafitik karbon düzlemine ait bir pik ve yaklaşık 43° 2 θ değerinde sp² hibritleşmesi yapmış karbon petek yapılarının (100) düzlemine ait yayvan bir pik gözlenmiştir. Piroliz sıcaklığı, 400 °C'den 500 °C'ye çıktığında (002) grafitik karbon düzlemine ait pikin daha sağa kaydığı gözlenirken, karbon peteklerine ait olan pikin şiddetinin arttığı belirlenmiştir.

Bragg Yasasına göre, 400, 500 ve 600 °C'de hazırlanan KB'lerin d₀₀₂ değeri sırasıyla 0.350, 0.332, 0.353 nm olarak hesaplanmıştır. 500 °C'deki KB'nin 400 ve 600 °C'deki KB'ye kıyasla, daha düşük d₀₀₂ değerine, dolayısıyla daha kompakt bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir ki bu durumun ısı iletiminde avantaj olacağı söylenebilir. Bu nedenle KB hazırlamada sıcaklık olarak 500 °C'nin daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

500 °C'de piroliz işlemi ile elde edilen KB'nin Raman spektrumunda, yaklaşık 1395 cm⁻¹ ve 1563 cm⁻¹'de sırasıyla D ve G bandına karşılık gelen iki pik tespit edilmiştir. Bu bantların yoğunluk oranı (I_D/I_G) grafitleşme derecesine bağlıdır ve KB için 0,88 olarak hesaplanmıştır ki karbonize yapıdaki yapısal kusurları gösterir. Yaklaşık 2900 cm⁻¹'deki geniş tepe noktası, bir D+G kombinasyon moduyla ilişkilidir ve düzensizlikten kaynaklanır.

500 °C’de piroliz işlemi ile elde edilen KB’nin XPS spektrumu incelendiğinde, %68 C ve %32 O elementlerinin varlığına rastlanmıştır. KB’nin XPS spektrumunda 286,7 eV’deki C 1s piki fit edildiğinde C=O ve C-C; 533,1 eV’deki O 1s fit edildiğinde ise C=O ve C-O kimyasal bağ yapıları tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, KB hazırlamak için piroliz sıcaklığı 500 °C olarak optimize edilmiş ve GBÜ çalışmalarında bu sıcaklıkta üretilen KB ile buharlaştırıcı materyal hazırlanmıştır.

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

S'nin kuru ve ıslak ağırlığı sırasıyla 1,5625 ve 20,9030 g olarak tespit edilmiştir. Kuru ve ıslak S arasında yaklaşık 13 kat fark olmakla birlikte, materyal tasarımında kullanılan doğal süngerin kendi ağırlığının yaklaşık 12 katı kadar su emdiği belirlenmiştir.

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

Sünger yüksekliğinin KB-S’nin buharlaşma hızına etkisi incelenmiş ve yüzeyi 500 mg KB 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 KB-S’nin kolay hazırlanması için sünger satın alındığı ilk haliyle (yükseklik: 1,5 cm) kullanılmıştır.

Sade S ve KB-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. KB-S’nin FESEM görüntüsü incelendiğinde, KB’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.

KB-S, sade S ve saf suyun buharlaşma performansını incelemek için 60 dakika boyunca 1 güneş ışınlamı altında suyun kütle değişimi incelenmiştir. KB-S, sade S ve saf su için zaman içindeki buharlaşma hızı sırasıyla 1,63, 0,65 ve 0,31 kg m⁻² h⁻¹ olarak hesaplanmıştır. KB-S'nin buharlaşma hızı, saf suyun yaklaşık 5,2 katı ve sade S'nin yaklaşık 2,5 katıdır.

Saf su, sade S ve KB-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, KB-S'nin yüzey sıcaklığı ilk 85 saniye boyunca hızla artmış ve 55,2 °C'de sabitlenmiştir. KB-S'nin maksimum yüzey sıcaklığının sade S'ye kıyasla daha yüksek olması karbonize yapının (KB) güçlü fototermal dönüşüm etkisini göstermiştir.

Saf su, sade S ve KB-S'nin yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi 1 güneş ışınlamı altında kızılötesi kamera ile izlenmiştir. Saf suyun başlangıç sıcaklığı 15,8 °C'dir. KB-S'nin yüzey sıcaklığı ilk 30 saniyede keskin bir şekilde artmış ve 30, 50, 70 ve 90 saniye sonra sırasıyla 36,2, 42,6, 50,6, 47,0 ve 55,4 °C olarak kaydedilmiştir. Buna karşılık, sade S'nin yüzey sıcaklığı, 30 ve 60 saniye sonra sırasıyla 25,0 °C ve 29,0 °C'dir.

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

Işık yoğunluğu 2 ve 3 güneş ışığına (GI) çıkarıldığında, KB-S fototermal malzemenin buharlaşma hızı sırasıyla 2,72 ve 4,40 kg m⁻² h⁻¹'e yükselmiştir. Bu durum, fototermal malzemenin güneş ışığının miktarına duyarlı olarak iyi bir ışık emilimi gösterdiğini doğrulamıştır.

KB-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 KB-S için fototermal verim sırasıyla %20, %45 ve %81 olarak belirlenmiştir. KB-S'nin fototermal veriminin, diğerlerine göre oldukça yüksek olması, karbonize yapının yüksek oranda güneş ışığını absorplama ve termal enerjiye dönüştürme özelliğine atfedilmiştir.

KB-S için radyasyon, konveksiyon ve iletim kayıpları sırasıyla %7,9, %4,8 ve %6,3 olarak hesaplanmıştır. Bu kadar düşük termal kayıplar, S yüzeyindeki KB'nin ısı izolasyonunu kolaylaştırdığını göstermiştir.

KB-S'nin buharlaştırma performansı; ağır metal (200 mg/L), asit (pH 2), alkali (pH 12) ve boyar madde (metilen mavisi-MB-1,0 g/L), tuz (NaCl-3,5 ağırlık %) içeren farklı çözeltiler için araştırılmıştır. Farklı çözeltilerde KB-S ile zamana bağlı olarak suyun kütle değişimi incelendiğinde, KB-S'nin farklı çözeltiler için gösterdiği fototermal verim, buharlaşma hızı ve

suyun k t le değişiminin, saf suyun KB-S ile buharlaştırılması için elde edilen sonuçlara yakın olduğu belirlenmiştir. Bu durum hazırladığımız buharlaştırıcının çeşitli çözeltelerde dahi iyi bir GB  performansına sahip olduğunu göstermiştir.

Farklı   zelti ortamındaki (tuz, MB, ağrı metal ve asit içerikli) KB-S'nin yüzey sıcaklığı k t le değişimiyle tutarlı olarak ~52-54  C aralığında değişim göstermiştir. Bu bulgular, KB-S'nin tuzdan arındırma ve su arıtma uygulamalarında potansiyel bir güneş enerjisiyle su buharlaştırıcısı olduğunu ortaya koymuştur.

KB-S'nin tuzdan arındırma ve kirli suyun arıtılmasındaki performansı araştırılmıştır. İlk olarak yaklaşık 20 mL simüle edilmiş deniz suyundan (tuzlu su çözeltisi, k t lece %3,5'lik) 10 mL damıtılmış su elde edilene kadar buharlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. KB-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.

KB-S'nin tuzdan arındırmadaki güvenilirliğini doğrulamak için GB  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  rg t  (WHO) tarafından içilebilir su için kabul edilen sınırlar içinde olması, malzememizin deniz suyunu tuzdan arındırmada geniş bir uygulamaya sahip olduğunu doğrulamıştır.

Ağır metal   zeltisinin KB-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, KB-S ile buharlaştırıldıktan sonra 0,4, 0,3, 0,4 ve 0,5 ppm'ye düşmüştür. Buharlaştırıcımızın yüksek güneş enerjisiyle arıtma performansı, iyonların KB'ye elektrostatik olarak adsorpsiyonuna atfedilebilir.

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

Boyar madde içeren çözeltinin KB-S ile güneş enerjisiyle arıtılmasını test etmek için, 1,0 g L⁻¹ konsantrasyona sahip MB   zeltisi hazırlanan GB  düzeneğine yerleştirilmiş ve damıtma işlemi uygulanmıştır. 2 saat ışınladıktan sonra, damıtılmış su UV-görünür bölge absorpsiyon spektroskopisi ile incelenmiştir. KB-S ile yapılan güneş enerjisiyle MB boyar madde içerikli çözeltinin arıtılmasından sonra, düzeneğin musluğundan toplanan damıtık suyun şeffaf olduğu belirlenmiştir. MB   zeltisinin arıtma öncesi ve sonrasına ait UV-görünür bölge

absorpsiyon spektrumunda, arıtma öncesindeki MB absorpsiyon piklerinin arıtma sonrasında kaybolduğu gözlenmiştir. Bu durum, KB-S'nin güneş enerjisiyle arıtmadaki başarısını göstermiştir.

Açık hava GBÜ çalışmaları, Temmuz ayında Erzurum koşullarında (ortalama sıcaklık: 25°C; nem: %58; gündeğumu: 04:50; günbatımı: 19:20) Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü bahçesinde gerçekleştirilmiştir. Güneş akısındaki, KB-S'nin yüzey sıcaklığındaki ve suyun buharlaşması sonucu su kütlesindeki gün içerisindeki zamana göre değişimler incelendiğinde, KB-S ile yapılan açık hava deneyleri sonuçlarının laboratuvarda 1 güneş ışığı altında elde edilenler sonuçlara oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, KB-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 KB-S hazırlanmış ve GBÜ sisteminde buharlaşma hızı ölçülmüştür. Her bir KB-S'nin buharlaşma hızının birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiş ve böylece önerilen hazırlama prosedürü kullanılarak aynı yapısal ve kimyasal özelliklere sahip KB-S malzemelerin elde edilebileceğini gösterilmiştir.

KB-S'nin uzun vadeli GBÜ performans kararlılığını değerlendirmek için, %3,5'lik bir NaCl çözeltisi, bir güneş ışınımı altında 20 ardışık döngü boyunca tuzdan arıdırmada kullanılmıştır. 20 döngü sonrası, KB-S'nin suyun buharlaşma hızı ile ($1,63 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) hemen hemen aynı olan $1,57 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 'lik ortalama bir buharlaşma hızı göstermiştir. Ayrıca, 20 döngüden sonra KB-S'de belirgin bir deformasyon olmadığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar, KB-S'nin mükemmel döngü kararlılığına sahip olduğunu ve birçok kez yeniden kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

KB-S'nin performansı, literatürde bildirilen biyokütle çıkışlı GBÜ karşılaştırılmıştır. KB-S'nin, bu malzemelere kıyasla daha üstün buhar üretim hızı ve nispeten yüksek fototermal verimlilik sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, KB-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 sistemleri için sürdürülebilir ve ekonomik bir buharlaştırıcının hazırlandığını ve güneş enerjisi ile su buharı üretimi uygulamasının başarıyla gerçekleştirildiğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Asghar MS, Arshad N, Tao J, Irshad MS, Li J, Wang X. Recent Advances in Multifunctional Photothermal Materials for Solar-Driven Steam and Energy Generation. *Energy Technol* 2023;11:2300500. <https://doi.org/10.1002/ente.202300500>.
- Basunya, B. N., Kospa, D. A., Ibrahim, A. A., & Gebreil, A. (2023). Stable polyethylene glycol/biochar composite as a cost-effective photothermal absorber for 24 hours of steam and electricity cogeneration. *RSC Advances*, 13, 31077–31091.
- Bhoyate S, Ranaweera CK, Zhang C, Morey T, Hyatt M, Kahol PK, *et al.* Eco-Friendly and High Performance Supercapacitors for Elevated Temperature Applications Using Recycled Tea Leaves. *Glob Challenges* 2017;1:1–12. <https://doi.org/10.1002/gch2.201700063>.
- Cançado LG, Jorio A, Ferreira EHM, Stavale F, Achete CA, Capaz RB, *et al.* Quantifying defects in graphene via Raman spectroscopy at different excitation energies. *Nano Lett* 2011;11:3190–6. <https://doi.org/10.1021/nl201432g>.
- Chen, Q., Yu, H., & Zhu, L. (2022). Enhanced solar steam generation via photothermal materials with hierarchical porous structures. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 237, 111538.
- Chen, S., Zhu, Q., & Zhu, Z. (2020). Biochar-mediated reduction of nitrate in water: Mechanisms and efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103537.
- Cheng, G., Wang, X., Liu, X., He, Y., & Balakin, B. V. (2019). Enhanced interfacial solar steam generation with composite reduced graphene oxide membrane. *Solar Energy*, 194, 415–430.
- Choi C, Seo SD, Kim BK, Kim DW. Enhanced Lithium Storage in Hierarchically Porous Carbon Derived from Waste Tea Leaves. *Sci Rep* 2016;6:1–10. <https://doi.org/10.1038/srep39099>.
- Dao, V.-D., & Nguyen, H. T. K. (2024). Nature-inspired design for high-efficiency solar-driven water evaporation. *Journal of Power Sources*, 609, Article 234676.
- Ding, T., Zhou, Y., Ong, W. L., & Ho, G. W. (2021). Hybrid solar-driven interfacial evaporation systems: Beyond water production towards high solar energy utilization. *Materials Today*, 42, 178–191.
- Dong W, Zhou F, Song X, Xue N, Cui H, Peng H, *et al.* Coffee grounds-based hydrogel as a high-performance and durable evaporator for solar-driven freshwater generation. *Mater Today Energy* 2022;30:101187. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2022.101187>.
- Elimelech M, Phillip WA. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science* (80-) 2011;333:712–7. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>.
- Eom H, Kim J, Nam I, Bae S. Recycling black tea waste biomass as activated porous carbon for long life cycle supercapacitor electrodes. *Materials (Basel)* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/ma14216592>.
- Erçarıkcı E, Demirci Gültekin D, Topçu E, Kudaş Z, Alanyalıoğlu M, Dağcı Kıranşan K. Supramolecular Modification of Graphene Sponge with a Porphyrin Derivative

- Enhances the Photothermal Conversion Efficiency of a Solar Steam Generator. *ACS Appl Mater Interfaces* 2024. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c11299>.
- Erçarıkçı E, Topçu E, Kudaş Z, Aksu Z, Alanyalıoğlu M, Dağcı Kıranşan K. An effective material for solar steam generation applications: Gradient graphene sponge. *Mater Today Sustain* 2024;26:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100701>.
- Erçarıkçı E, Topçu E, Kudaş Z, Aksu Z, Alanyalıoğlu M, Dağcı Kıranşan K. An effective material for solar steam generation applications: Gradient graphene sponge. *Mater Today Sustain* 2024;26:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100701>.
- Gheraout D, Irki S, Elboughdiri N, Gheraout B. Solar-Driven Water Treatment: New Technologies, Challenges, and Futures. *Green Sustain Chem* 2023;13:110–52. <https://doi.org/10.4236/gsc.2023.132007>.
- Goharshadi K, Sajjadi SA, Goharshadi EK, Mehrkhah R. Highly efficient plasmonic wood/Ag/Pd photoabsorber in interfacial solar steam generation. *Mater Res Bull* 2022;154:111916. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.111916>.
- Gong F (Frank), Li H, Wang W, Huang J, Xia D (David), Liao J, *et al*. Scalable, eco-friendly and ultrafast solar steam generators based on one-step melamine-derived carbon sponges toward water purification. *Nano Energy* 2019;58:322–30. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.044>.
- Hailemariam RH, Woo YC, Damtie MM, Kim BC, Park K-D, Choi J-S. Reverse osmosis membrane fabrication and modification technologies and future trends: A review. *Adv Colloid Interface Sci* 2020;276:102100. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102100>.
- <https://www.linkedin.com/pulse/x-ray-photoelectron-spectroscopy-xps-invaluable-research-sonkie>
- <https://www.merckmillipore.com>.
- Ibrahim I, Bhoopal V, Seo DH, Afsari M, Shon HK, Tijing LD. Biomass-based photothermal materials for interfacial solar steam generation: a review. *Mater Today Energy* 2021;21:100716. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100716>.
- Jing, X., Liu, F., Abdiryim, T., & Liu, X. (2024). Hydrogels as promising platforms for solar-driven water evaporators. *Chemical Engineering Journal*, 479, 147519.
- Kant Bhatia S, Palai AK, Kumar A, Kant Bhatia R, Kumar Patel A, Kumar Thakur V, *et al*. Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. *Bioresour Technol* 2021;340:125644. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125644>.
- Kim C, Shin D, Baitha MN, Ryu Y, Urbas AM, Park W, *et al*. High-Efficiency Solar Vapor Generation Boosted by a Solar-Induced Updraft with Biomimetic 3D Structures. *ACS Appl Mater Interfaces* 2021;13:29602–11. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c05883>.
- Kumar, A., & Singh, P. (2023). Review on solar-driven interfacial evaporation for water purification: Materials, mechanisms and performance. *Chemical Engineering Journal*, 450, 138325.
- Lee, S., Park, J., & Kim, Y. (2024). Photothermal conversion materials for solar steam generation: A comprehensive review. *Progress in Materials Science*, 125, 100896.
- Li J, Wang X, Lin Z, Xu N, Li X, Liang J, *et al*. Over 10 kg m⁻² h⁻¹ Evaporation Rate Enabled by a 3D Interconnected Porous Carbon Foam. *Joule* 2020;4:928–37. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.02.014>.

- Li M, Bai W, Yang Y, Zhang X, Wu H, Li Y, *et al.* Waste Tea-Derived Theabrownins for Solar-Driven Steam Generation. *ACS Appl Mater Interfaces* 2024;16:10158–69. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c18438>.
- Li Z, Wang C, Li Z, Deng L, Su J, Shi J, *et al.* Efficient Interfacial Solar Steam Generator with Controlled Macromorphology Derived from Flour via “Dough Figurine” Technology. *Energy Technol* 2019;7:1–9. <https://doi.org/10.1002/ente.201900406>.
- Li, C., Goswami, Y., & Stefanakos, E. (2013). Solar assisted sea water desalination: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 136–163.
- Li, M., Bai, W., Yang, Y., Zhang, X., Wu, H., Li, Y., & Xu, Y. (2024). Waste tea-derived theabrownins for solar-driven steam generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(8), 10158–10169. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c18438>.
- Li, M., Bai, W., Yang, Y., Zhang, X., Wu, H., Li, Y., & Xu, Y. (2024). Waste tea-derived theabrownins for solar-driven steam generation. *Journal of Materials Chemistry A*.
- Li, M., Bai, W., Yang, Y., Zhang, X., Wu, H., Li, Y., & Xu, Y. (2024). Waste tea-derived theabrownins for solar-driven steam generation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c07049>.
- 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.
- Lin Y, Zhou W, Di Y, Zhang X, Yang L, Gan Z. Low-cost carbonized kelp for highly efficient solar steam generation. *AIP Adv* 2019;9. <https://doi.org/10.1063/1.5096295>.
- 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), Article 055110.
- Liu N, Hao L, Zhang B, Niu R, Gong J, Tang T. Rational Design of High-Performance Bilayer Solar Evaporator by Using Waste Polyester-Derived Porous Carbon-Coated Wood. *Energy Environ Mater* 2022;5:617–26. <https://doi.org/10.1002/eem2.12199>.
- Liu X, Tian Y, Caratenuto A, Chen F, Zheng Y. Biomass-Based Materials for Sustainably Sourced Solar-Driven Interfacial Steam Generation. *Adv Eng Mater* 2023;25. <https://doi.org/10.1002/adem.202300778>.
- Liu, X., Tian, Y., Caratenuto, A., Chen, F., & Zheng, Y. (2023). Biomass-based materials for sustainably sourced solar-driven interfacial steam generation. *Advanced Engineering Materials*.
- Liu, X., Tian, Y., Caratenuto, A., Chen, F., & Zheng, Y. (2023). Biomass-Based Materials for Sustainably Sourced Solar-Driven Interfacial Steam Generation. *Advanced Functional Materials*, 33(12), 2210512.
- Ma, W., Fan, J., Cui, X., Wang, Y., Yan, Y., Meng, Z., Gao, H., Lu, R., & Wenfeng. (2023). Pyrolyzing spent coffee ground to biochar treated with H₃PO₄ for the efficient removal of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide: Adsorptive behaviors and mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109165.
- Miao, Y., Wang, H., Hou, X., Yu, K., Yang, X. & Bian, Z. (2025). Solar interfacial evaporation: From evaporation material design, condensing unit application to practical applications. *Chemical Engineering Journal*, 513, 162792.
- Nartey, O. D., & Zhao, B. (2014). Biochar Preparation, Characterization, and Adsorptive Capacity and Its Effect on Bioavailability of Contaminants: An Overview. *BioMed Research International*, 2014, 957652.

- Nidheesh P V., Gopinath A, Ranjith N, Praveen Akre A, Sreedharan V, Suresh Kumar M. Potential role of biochar in advanced oxidation processes: A sustainable approach. *Chem Eng J* 2021;405:126582. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126582>.
- Pelaez M, Nolan NT, Pillai SC, Seery MK, Falaras P, Kontos AG, *et al.* A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Appl Catal B Environ* 2012;125:331–49. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.05.036>.
- Pimenta MA, Dresselhaus G, Dresselhaus MS, Cançado LG, Jorio A, Saito R. Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy. *Phys Chem Chem Phys* 2007;9:1276–91. <https://doi.org/10.1039/b613962k>.
- Rahimi-Ahar, Z., Mastani Joybari, M., Ghareghashi, A., Moradi, S., & Babapoor, A. (2025). Solar-assisted desalination based on photothermal conversion effect: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 115731.
- Rawat S, Wang CT, Lay CH, Hotha S, Bhaskar T. Sustainable biochar for advanced electrochemical/energy storage applications. *J Energy Storage* 2023;63:107115. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107115>.
- Tang, B., Zhang, R., & Yu, G. (2022). Efficient solar steam generation using carbon-based nanomaterials: A review. *Carbon*, 192, 153-170.
- Toyoda M, Inagaki M. Carbon materials for solar steam-generation. *Carbon N Y* 2023;214:118373. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118373>.
- Tripathi M, Sahu JN, Ganesan P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;55:467–81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>.
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481.
- Tu C, Cai W, Chen X, Ouyang X, Zhang H, Zhang Z. A 3D-Structured Sustainable Solar-Driven Steam Generator Using Super-Black Nylon Flocking Materials. *Small* 2019;15:1902070. <https://doi.org/10.1002/sml.201902070>.
- Wang CF, Wu CL, Kuo SW, Hung WS, Lee KJ, Tsai HC, *et al.* Preparation of efficient photothermal materials from waste coffee grounds for solar evaporation and water purification. *Sci Rep* 2020;10:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69778-2>.
- Wang F, Wei D, Li Y, Chen T, Mu P, Sun H, *et al.* Chitosan/reduced graphene oxide-modified spacer fabric as a salt-resistant solar absorber for efficient solar steam generation. *J Mater Chem A* 2019;7:18311–7. <https://doi.org/10.1039/C9TA05859A>.
- Wen, C., Li, X., Yan, S., Wen, J., Zheng, R., Wang, X., Zhao, H., Zhou, J., Sa, B. & Sun, Z. (2025). Progress in MXene-based photothermal materials for solar-driven water evaporation and desalination. *Chemical Engineering Journal*, 510, 161873.
- Wilson HM, Ahirrao DJ, Raheman Ar S, Jha N. Biomass-derived porous carbon for excellent low intensity solar steam generation and seawater desalination. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2020;215:110604. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110604>.
- Wu, S., Jian, R., Tian, S., Zhou, L., Luo, T., & Xiong, G. (2023). Simultaneous solar-driven seawater desalination and continuous oil recovery. *Nano Energy*, 107, 108160.
- Xiao C, Wang S, Guo Y, Zhang Y, Hasi QM, Tian Q, *et al.* Coffee Grounds-Doped Alginate Porous Materials for Efficient Solar Steam Generation. *Langmuir* 2022;38:1888–96. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c03102>.

- Xiong J, Zhang Z, Liu Y, Yi J, Wang Y, Li B, *et al.* Full bagasse bio-waste derived 3D photothermal aerogels for high efficient solar steam generation. *Cellulose* 2022;29:927–39. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04323-6>.
- Xiong, J., Zhang, Z., Lou, Y., Yao, J., Wang, Y., Li, B., Wang, W., Peng, S., Min, D., Gui, Y., Li, M., & Peng, J. (2022). Full bagasse bio-waste derived 3D photothermal aerogels for high efficient solar steam generation. *Cellulose*, 29(8), 4503–4516.
- Xu N, Hu X, Xu W, Li X, Zhou L, Zhu S, *et al.* Mushrooms as Efficient Solar Steam-Generation Devices. *Adv Mater* 2017;29:1–5. <https://doi.org/10.1002/adma.201606762>.
- Xu W, Xing Y, Liu J, Wu H, Cui Y, Li D, *et al.* Efficient Water Transport and Solar Steam Generation via Radially, Hierarchically Structured Aerogels. *ACS Nano* 2019;13:7930–8. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b02331>.
- 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), Article 1606762.
- Xue G, Liu K, Chen Q, Yang P, Li J, Ding T, *et al.* Robust and Low-Cost Flame-Treated Wood for High-Performance Solar Steam Generation. *ACS Appl Mater Interfaces* 2017;9:15052–7. <https://doi.org/10.1021/acsaami.7b01992>.
- Xue R, Huang R, Wu B, Li N, Chang Q, Xue C, *et al.* Efficient interfacial solar driven water evaporation and photocatalytic pollutant degradation by partially oxidized TiH_{1.924}/TiO₂ nanosheet. *Ceram Int* 2023;49:13501–9. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.12.225>.
- Yan J, Su Q, Xiao W, Wu Z, Chen L, Tang L, *et al.* A review of nanofiber membranes for solar interface evaporation. *Desalination* 2022;531:115686. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115686>.
- Yang Y, Zhao R, Zhang T, Zhao K, Xiao P, Ma Y, *et al.* Graphene-Based Standalone Solar Energy Converter for Water Desalination and Purification. *ACS Nano* 2018;12:829–35. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b08196>.
- Yang Y, Zhao R, Zhang T, Zhao K, Xiao P, Ma Y, *et al.* Graphene-Based Standalone Solar Energy Converter for Water Desalination and Purification. *ACS Nano* 2018;12:829–35. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b08196>.
- Yao H, Zhang P, Yang C, Liao Q, Hao X, Huang Y, *et al.* Janus-interface engineering boosting solar steam towards high-efficiency water collection. *Energy Environ Sci* 2021;14:5330–8. <https://doi.org/10.1039/D1EE01381E>.
- Yin Z, Wang H, Jian M, Li Y, Xia K, Zhang M, Wang C, Wang Q, Ma M, Zheng Q S. ve diğerleri. Güneş buharı üretimi için son derece siyah dikey hizalanmış karbon nanotüp dizileri. *ACS Uygulamalı Malzemeler ve Arayüzler*, 2017, 9(34): 28596–28603.
- Zafar MS, Zych A, Athanassiou A, Fragouli D. Carbonized coffee-based 3D polymeric xerogels for freshwater recovery by solar steam generation. *J Environ Chem Eng* 2024;12:113919. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113919>.
- Zeng Y, Yao J, Horri BA, Wang K, Wu Y, Li D, *et al.* Solar evaporation enhancement using floating light-absorbing magnetic particles. *Energy Environ Sci* 2011;4:4074–8. <https://doi.org/10.1039/c1ee01532j>.
- Zhang C, Shi Y, Shi L, Li H, Li R, Hong S, *et al.* Designing a next generation solar crystallizer for real seawater brine treatment with zero liquid discharge. *Nat Commun* 2021;12:998. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21124-4>.

- Zhang Z, Mu P, He J, Zhu Z, Sun H, Wei H, *et al.* Facile and Scalable Fabrication of Surface-Modified Sponge for Efficient Solar Steam Generation. *ChemSusChem* 2019;12:426–33. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cssc.201802406](https://doi.org/10.1002/cssc.201802406).
- Zhang, C., Yuan, B., Liang, Y., Yang, L., Bai, L., Yang, H., Wei, D., Wang, F., Wang, Q., Wang, W., & Chen, H. (2021). Carbon nanofibers enhanced solar steam generation device based on loofah biomass for water purification. *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123998. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123998>.
- Zhang, H., Liu, Q., & Wang, C. (2023). Advances in solar-driven water purification technologies: Principles, materials, and challenges. *Advanced Materials*, 35(12), 2205678.
- 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.
- Zhao F fei, Wang S chun, Zhu Z lin, Wang S guang, Liu F fei, Liu G zhou. Effects of oxidation degree on photo-transformation and the resulting toxicity of graphene oxide in aqueous environment. *Environ Pollut* 2019;249:1106–14. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.114>.
- Zhao F, Zhou X, Shi Y, Qian X, Alexander M, Zhao X, *et al.* Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels. *Nat Nanotechnol* 2018;13:489–95. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0097-z>.
- Zhao S, Liao Z, Fane A, Li J, Tang C, Zheng C, *et al.* Engineering antifouling reverse osmosis membranes: A review. *Desalination* 2021;499:114857. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114857>.
- Zhou J, Xing R, Wu Y, Shen M, Wang W, Li M, *et al.* Full tea waste-based photothermal aerogel with vertical water transport channels for steady solar desalination. *Ind Crops Prod* 2024;212:118363. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118363>.
- Zhou Z, Gong J, Zhang C, Tang W, Wei B, Wang J, *et al.* Hierarchically porous carbonized *Pleurotus eryngii* based solar steam generator for efficient wastewater purification. *Renew Energy* 2023;216. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118987>.
- Zhou, Z., Gong, J., Zhang, C., Tang, W., Wei, B., Wang, J., Fu, Z., Li, L., Li, W., & Xia, L. (2023). Hierarchically porous carbonized *Pleurotus eryngii* based solar steam generator for efficient wastewater purification. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135849.
- Zhu L, Gao M, Peh CKN, Ho GW. Solar-driven photothermal nanostructured materials designs and prerequisites for evaporation and catalysis applications. *Mater Horizons* 2018;5:323–43. <https://doi.org/10.1039/c7mh01064h>.
- Zhu, X., Liu, S., Zhou, J., & Chen, B. (2019). Surface chemistry and porosity of biochar derived from different feedstocks. *Bioresource Technology*, 282, 442–449.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Şeyda SEFA
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Rıfkı Salim Burçak A.K.M.L ve K.M.L
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Nanobilim ve Nanomühendislik Kimya Bölümü
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	A2
Korece :	A1
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	