

TiO₂ Nanoparçacık Kaplı Pamuklu Kumaşın Fotokatalitik ve Antibakteriyel Özelliklerinin İncelenmesi

Agah Oktay ÖZDEMİR^{1*}, Mehmet KUZUCU², Eda KELEŞ GÜNER³, Bilge DOĞAN⁴,
Bülent ÇAĞLAR⁵

Öz

Bu çalışmada, fotokatalitik ve antibakteriyel özelliklere sahip, TiCl₄'ün hidroliziyle sentezlenen farklı miktarlarda TiO₂ nanoparçacıklar ile yüzey modifiye edilmiş pamuklu kumaşlar hazırlandı. Hazırlanan bu TiO₂ nanoparçacıkları kaplı pamuklu kumaşların fotokatalitik aktiviteleri UVA ışınları altında Kristal Viyolet (KV) boyar maddesinin bozunmasında incelendi. KV'nin, TiO₂ nanoparçacıkları kaplı pamuklu kumaşlar üzerindeki fotokatalitik bozunması için en uygun şartlar 0,625 mgL⁻¹ başlangıç KV konsantrasyonu ve 57 mgL⁻¹ TiO₂ nanoparçacık yükleme miktarı olarak belirlendi. Bu en uygun şartlar altında, ilgili fotokatalizör varlığında 40 dakika içerisinde UVA ışınları altında KV'nin % 89,31'inin bozunmaya uğradığı tespit edildi ve bozunma reaksiyonunun birinci dereceden kinetiği takip ettiği belirlendi. Reaktif tür deneyleri, hidroksil radikallerinin diğer radikal türlere nispeten daha önemli bir rol oynadığını ortaya çıkardı ve elde edilen bu verilere göre olası bozunma mekanizması önerildi. Ayrıca TiO₂ kaplanmış pamuklu kumaşların antibakteriyel aktivitesinin incelenmesi için disk difüzyon metodu kullanıldı. Antibakteriyel aktivite tayininde Gram pozitif bakteri olarak *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538), Gram negatif bakteri olarak *Escherichia coli* (ATCC 25922) üzerinde denemeler gerçekleştirildi. Disk difüzyon deneyi sonuçlarına göre; 38 ve 57 mgL⁻¹ konsantrasyonlarında TiO₂ ile kaplanmış pamuklu kumaşlarda, antibiyotik referansların oluşturduğu inhibisyon zonu çapına kıyasla relatif olarak *E. coli*'ye karşı sırasıyla % 40,9 ve % 60,2 oranlarında antibakteriyel etki görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: TiO₂ nanoparçacık, Pamuklu kumaşlar, Fotokatalitik aktivite, Antibakteriyel

Investigation of Photocatalytic and Antibacterial Properties of TiO₂ Nanoparticles Coated Cotton Fabric

Abstract

In this study, surface modified cotton fabrics were prepared with different amounts of TiO₂ nanoparticles which has photocatalytic and antibacterial properties, synthesized by hydrolysis of TiCl₄. The photocatalytic activities of the prepared cotton fabrics with coated TiO₂ nanoparticles were investigated in the degradation of the Crystal Violet (KV) dyestuff under UV light irradiation. The TiO₂ coated cotton fabric showed good photocatalytic performance for the degradation of Crystal Violet (KV) under UV light irradiation. The optimum conditions for photocatalytic degradation of KV on TiO₂ nanoparticles coated cotton fabrics were determined as 0.625 mgL⁻¹ initial KV concentration and 57 mgL⁻¹ TiO₂ nanoparticle loading amount. Under these optimum conditions, it was determined that 89.31% of the KV was decomposed under UV light irradiation within 40 minutes in the presence of the relevant photocatalyst, and it was determined that the degradation reaction followed first-order kinetics. Reactive species experiments revealed that hydroxyl radicals play a more important role than other radical species, and according to the results, possible degradation mechanism was suggested. In addition, disc diffusion method was used to examine the antibacterial activity of TiO₂ coated cotton fabrics. Trials were performed on *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) as Gram-positive bacteria and *Escherichia coli* (ATCC 25922) as Gram-negative bacteria in the determination of antibacterial activity. According to the results of disk diffusion experiment; In cotton fabrics coated with TiO₂ at 38 and 57 mgL⁻¹ concentrations, approximately 40.9% and 60.2% antibacterial activity was observed against *E. coli*, respectively, compared to the diameter of the inhibition zone formed by the antibiotic references.

Keywords: TiO₂ nanoparticles, Cotton fabrics, Photocatalytic activity, Antibacterial

¹Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Erzincan, Türkiye, aoozdemir@erzincan.edu.tr

²Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Erzincan, Türkiye, mkuzucu@erzincan.edu.tr

³Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Üzümlü Meslek Yüksekokulu, Erzincan, Türkiye, eda.guner@erzincan.edu.tr

⁴Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Erzincan, Türkiye, bilgedgn89@gmail.com

⁵Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Erzincan, Türkiye, bcaglar@erzincan.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-4488-746X>

²<https://orcid.org/0000-0002-7786-7687>

³<https://orcid.org/0000-0002-4421-1315>

⁴<https://orcid.org/0000-0001-7552-3461>

⁵<https://orcid.org/0000-0002-6087-3685>

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 03.10.2022

Kabul/Accepted: 22.11.2022

1. Giriş

Tekstil sektörü, diğer sektörlerde olduğu gibi, kullanıcı beklentilerini karşılayan yeni ürünlerin üretilmesi ve çeşitli alanlardaki tekstil uygulamalarının zenginleşmesi sonucunda sistematik olarak gelişmektedir (Tobola ve ark., 2018). Tekstillerin standart estetik özelliklerinden ziyade teknik performansları ve spesifik fonksiyonel özellikleri nedeniyle modifiye edilerek üretilmeleri, esas olarak teknik tekstiller alanında tekstil ürünlerinin geliştirilmesi ile mümkün olmuştur (Rosace ve ark., 2017). Teknik tekstiller tıbbi, hijyen, spor, otomotiv, taşımacılık, konstrüksiyon, tarım ve benzeri birçok alanda kendilerine uygulama alanı bulmuştur (Horrocks ve Anand, 2003; Mecit ve ark., 2007a ve b).

Doğal bir lif olan pamuk, nem emiciliği ve nefes alabilirliği gibi fonksiyonları sayesinde kolay ve rahat kullanım özellikleri sağlamaktadır (Xu ve ark., 2018; Yu ve ark., 2019; İbrahim ve ark., 2019; Chen ve ark., 2018). Pamuklu ürünlerin rekabet avantajlarını artırmak için araştırmacılar pamuklu kumaşa ek işlevler kazandırmaya çalışmaktadır (Xu ve ark., 2018). Son zamanlarda, bu tür çalışmalar antibakteriyel aktivite (Rehman ve ark., 2018; Rana ve ark., 2016; Ran ve ark., 2018), hidrofobik özellikler (Riaz ve ark., 2019; Yang ve ark., 2018), UV koruması (Xu ve ark., 2018; Yang ve ark., 2019), fotokatalitik etki (Afzal ve ark., 2013; Sboui ve ark., 2022; Abid ve ark., 2017) ve alev geciktirme (Lin ve ark., 2019) üzerine odaklanmıştır.

Pamuklu kumaşlara bu tür özelliklerin kazandırılması için yüzey modifiye edici olarak, genellikle gümüş oksit (Xu ve ark., 2018), çinko oksit (Mai ve ark., 2018), bakır oksit (El-Nahhal ve ark., 2018), nikel oksit (Hwan ve ark., 2012), titanyum dioksit (Jiang ve ark., 2018) gibi nano parçacıklar kullanılmaktadır. Özellikle TiO_2 , yüksek oksitleme gücü ve benzersiz ışığa duyarlı yarı iletken davranışları sebebiyle fotokatalitik ve antibakteriyel uygulamalarda kumaş kaplama malzemesi olarak büyük ölçüde tercih edilmiştir (Pant ve ark., 2019; Mancuso ve ark., 2022; Li ve ark., 2018).

Fotokatalitik etki gösteren nanoparçacık modifiyeli kumaşlar, ışığa maruz kaldığında organik kirleticilerin karbondioksit, su ve mineral asitlere parçalanmasını sağlarlar ki buda “fotokataliz” işlemi olarak bilinir (Xu ve ark., 2015). Nano boyutlu TiO_2 parçacıkları, gerek yarıiletken özelliğe sahip olmaları gerekse birim kütle ve hacim başına büyük bir yüzey alanına sahip oldukları için uygun ışımalar altında yük taşıyıcıları oluşturarak yüksek fotokatalitik aktivite gösterirler (Yuranova ve ark., 2006).

Pamuklu ürünler gündelik hayatta diğer ürünlere nispeten daha fazla kullanıma sahip olmalarına rağmen, kullanılabilirliğinin kısıtlanmasını sağlayan bakterilerin büyümesine neden olması son derece kolay olup, bakteri bulaşmasına yol açarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yapmaktadır (Zhou ve ark., 2018; Kang ve ark., 2016; Xu ve ark., 2018). Bu durumun ortadan

kalkması için antibakteriyel aktiviteye sahip pamuklu kumaşların geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada $TiCl_4$ çözeltisinden hidroliz yöntemi ile farklı miktarlarda TiO_2 nanoparçacıkları elde edilip, pamuklu kumaşların yüzeylerine kaplandı. TiO_2 nanoparçacık kaplı pamuklu kumaşlarımız SEM-EDX (FEI QUANTA 450) ile analiz edildi. TiO_2 nanoparçacık kaplı kumaşlarımızın fotokatalitik performansları, UVA ışınması altında Kristal Violet (KV) boyar maddesinin bozunması ile araştırıldı. KV' nin TiO_2 kaplı kumaş üzerinde fotobozunmasına mekanizma önerebilmek için reaktif tür yakalama deneyleri yapıldı. Son olarak antibakteriyel aktivitenin tespiti için disk difüzyon metodu kullanılarak; 9,5, 19, 38, 57 mgL^{-1} konsantrasyonlarında TiO_2 ile kaplanmış pamuklu kumaşların, *S. aureus* (ATCC 6538) ve *E. coli*'ye (ATCC 25922) karşı etkinliği test edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada ön terbiye işlemleri tamamlanmış; atkı sıklığı 20 tel/cm, çözgü sıklığı 28 tel/cm, gramajı 397 g/m^2 , örgüsü bez ayağı, atkı ve çözgü iplik numaraları Ne 14/1 olan %100 pamuklu dokuma kumaş kullanılmıştır. Kullanımdan önce safsızlıkları gidermek için aseton ve çift damıtılmış deiyonize su ile temizlendi. Titanyum (IV) klorür ($TiCl_4$), Kristal Violet (KV), Sigma-Aldrich'ten (Almanya) elde edildi. *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) ve *Escherichia coli* (ATCC 25922), American Type Culture Collection'dan (ABD) liyofilize ticari olarak satın alınmıştır. Nonidet P40, 2-propanol, DMSO, 2,3,5 Trifeniltetrazolyum klorür, Agar, Tryptic Soy Broth ve Mueller Hinton Broth, Sigma-Aldrich'ten (Almanya) satın alınmıştır. Gentamisin ve Tetrasiklin antibiyotik diskleri Oxoid'den (İngiltere) satın alınmıştır.

2.2. TiO_2 Nanoparçacıklarla Kaplanmış Pamuklu Kumaşın Hazırlanması

İlk önce, TiO_2 stok çözeltisini hazırlamak için, buz banyosunda 1:8 hacim oranındaki distile suya yavaş yavaş 5,60 mL $TiCl_4$ damlatılırken sürekli karıştırılarak hidroliz reaksiyonunun gerçekleşmesi sağlandı. Reaksiyon esnasında açığa çıkan HCl dumanlarını uzaklaştırmak için elde edilen stok çözelti yaklaşık 8 saat karıştırıldı. Daha sonra elde edilen berrak stok çözelti deneysel çalışmalarda kullanıldı (Lee ve Yang, 2005; Addamo ve ark., 2005).

Daha sonra laboratuvar tipi çektirme yöntemine göre çalışan numune boyama cihazının (Termal HT, İstanbul, Türkiye) çelik tüplerine 50 mL distile su, 4 cm x 4 cm pamuklu kumaş ve 35 μL TiO_2

çözeltisi eklenerek (57 mgL^{-1} TiO_2 madde miktarı için) cihaza yerleştirildi. Cihaz içerisindeki tüpler $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat döndürülerek TiO_2 kaplı pamuklu kumaş elde edildi. Elde edilen TiO_2 kaplı pamuklu kumaş su ile yıkanmış ve ardından $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur ve elde edilen bu kumaşın karakterizasyonu detaylı olarak gerçekleştirildi (Özdemir ve ark., 2022). Fotokataliz ve antibakteriyel uygulamalarda, yukarıdaki stok çözültiden TiO_2 madde miktarları 9,5, 19, 38 ve 57 mgL^{-1} olacak şekilde TiO_2 kaplı kumaş numuneleri hazırlandı.

2.3. Fotokataliz Çalışması

Fotokatalitik verimlerin değerlendirilmesi için, pamuklu kumaş numuneleri ($4 \times 4 \text{ cm}^2$) UVA ışınması altında KV sulu çözeltisi içerisine Luzchem LZC-4X fotoreaktör cihazında çevre sıcaklığında daldırıldı. Işınlamadan önce, pamuklu kumaş ve KV, pamuklu kumaş katalizörü üzerinde KV moleküllerinin adsorpsiyon/desorpsiyon dengesini sağlamak için karanlıkta 60 dakika boyunca manyetik olarak karıştırıldı. Işınlama yapılmadan önce, adsorpsiyon/desorpsiyon dengesinden sonra, 1 mL çözelti alınarak ve UV-vis ile 590 nm 'de KV'nin başlangıç konsantrasyonunu (C_0) belirlemek için absorbansı ölçüldü. Daha sonra KV'nin fotobozunmasını incelemek için ışınlama başlatıldıktan sonra belirlenen zaman aralıklarında çözültiden 1 mL'lik kısımlar alınarak UV-görünür spektrofotometresinde absorbansları ölçüldü ve Lambert-Beer eşitliğiyle konsantrasyonları belirlendi (C_t). KV'nin fotobozunması, Eşitlik (1)'e göre değerlendirildi ve tüm fotobozunma çalışmaları aynı koşullar altında üç kez tekrarlandı.

$$\text{Bozunma (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

Burada C_0 ve C_t , sırasıyla başlangıç ve t anında KV'nin konsantrasyonlarıdır.

2.4. Antibakteriyel Çalışması

Antibakteriyel testlerde Gram pozitif bakteri olarak; *S. aureus* (ATCC 6538), Gram negatif bakteri olarak *E. coli* (ATCC 25922) kullanılmıştır. Her ikisi içinde besiyeri olarak triptik soy broth (TSB) ve agar (TSA) kullanılmıştır. TiO_2 kaplanmış kumaşların negatif ve pozitif kontrole göre etkinliği disk difüzyon metodu ile incelenmiştir (Ghosh ve ark., 2022)

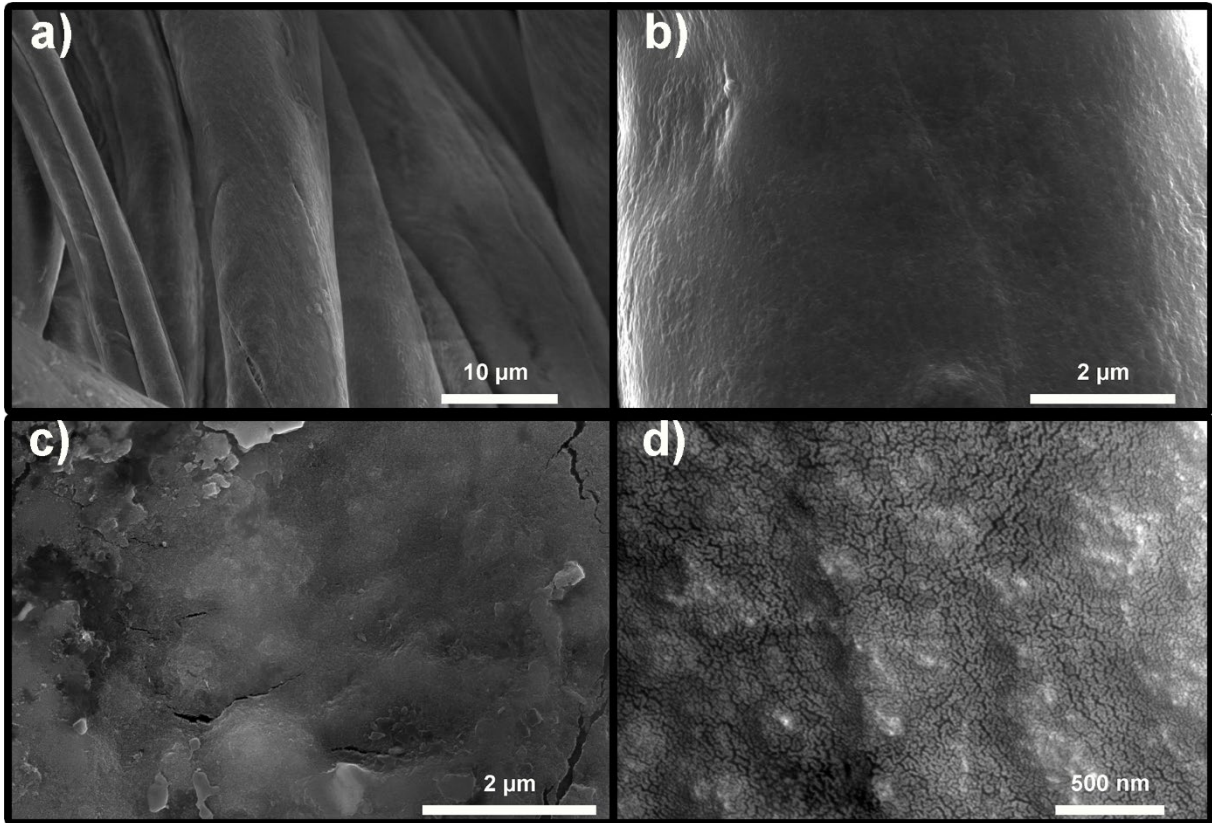
Stok kültüründen alınan bakteriler öncelikle 5'er ml TSB içinde inokülasyon kültürü (O/N) için inkübe edilmiştir. Ardından 100 ml'lik Mueller Hinton Broth besiyerine 1/100 oranında O/N kültürü ile inoküle edilerek 0,5 McFarland ($\sim 1,5 \times 10^8$ CFU/ml) bulanıklık düzeyine eriştiğinde 100'er μl ayrı ayrı TSA üzerine inoküle edilen bakteriler drigalski özesiyle dağıtılarak steril edilmiş 0,6 cm pamuklu

kumaşların ve antibiyotik disklerin aseptik koşullarda yerleştirilmesinin ardından 24 saat 37 °C’de inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrası oluşan zon çapları görüntüleme cihazında ölçülerek referans antibiyotik disklerle göre TiO₂ kaplanmış pamuklu kumaşların yüzdece etkinlikleri hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. SEM-EDX analizi

Saf pamuk ve TiO₂ kaplı pamuk kumaş yüzey morfolojileri, SEM görüntüleri ile karşılaştırmalı olarak araştırıldı (Şekil 1 a-d). Şekil 1a–b’de gösterildiği gibi, saf pamuk lifleri, temiz, pürüzsüz ve silindirik görünüm morfolojisine sahiptir (Jiang ve ark., 2022). Pamuklu kumaşın TiO₂ ile kaplanmasından sonra, pamuk lifi yüzeyleri, hafif çatlaklar ile homojen, düzgün ve pürüzsüz bir yüzey sergileyen çok sayıda dağılmış küçük TiO₂ nanoparçacıkları ile kompakt bir şekilde kaplanmıştır (Şekil 1c-d).



Şekil 1. SEM görüntüleri (a)-(b) Saf Pamuk, (c)-(d) TiO₂ kaplı kumaş

SEM görüntülerini doğrulamak ve numunelerin elementel bileşimlerini (% atomik) belirlemek için numunelerin EDX analizi yapılmıştır (Tablo 1). Saf pamuklu kumaş sadece karbon (%73,80) ve oksijen (%26,20) içerirken, TiO₂ kaplı pamuklu kumaş karbon (%66,47), oksijen (%30,73), altın (0,12) ve Ti (%2,68) içerir. Bu sonuçlar oksijen içeriğinin 26,20'den %30,73'e yükseldiğini ortaya

koydu. Ek olarak, TiO₂ kaplı pamuklu kumaşlarda Ti'nin (%2,68) bulunması, TiO₂ nanoparçacıklarının pamuklu kumaş yüzeyinde başarılı bir şekilde kaplandığını doğrulamaktadır.

Tablo1. Saf pamuklu ve TiO₂ kaplı kumaşların EDX sonuçları

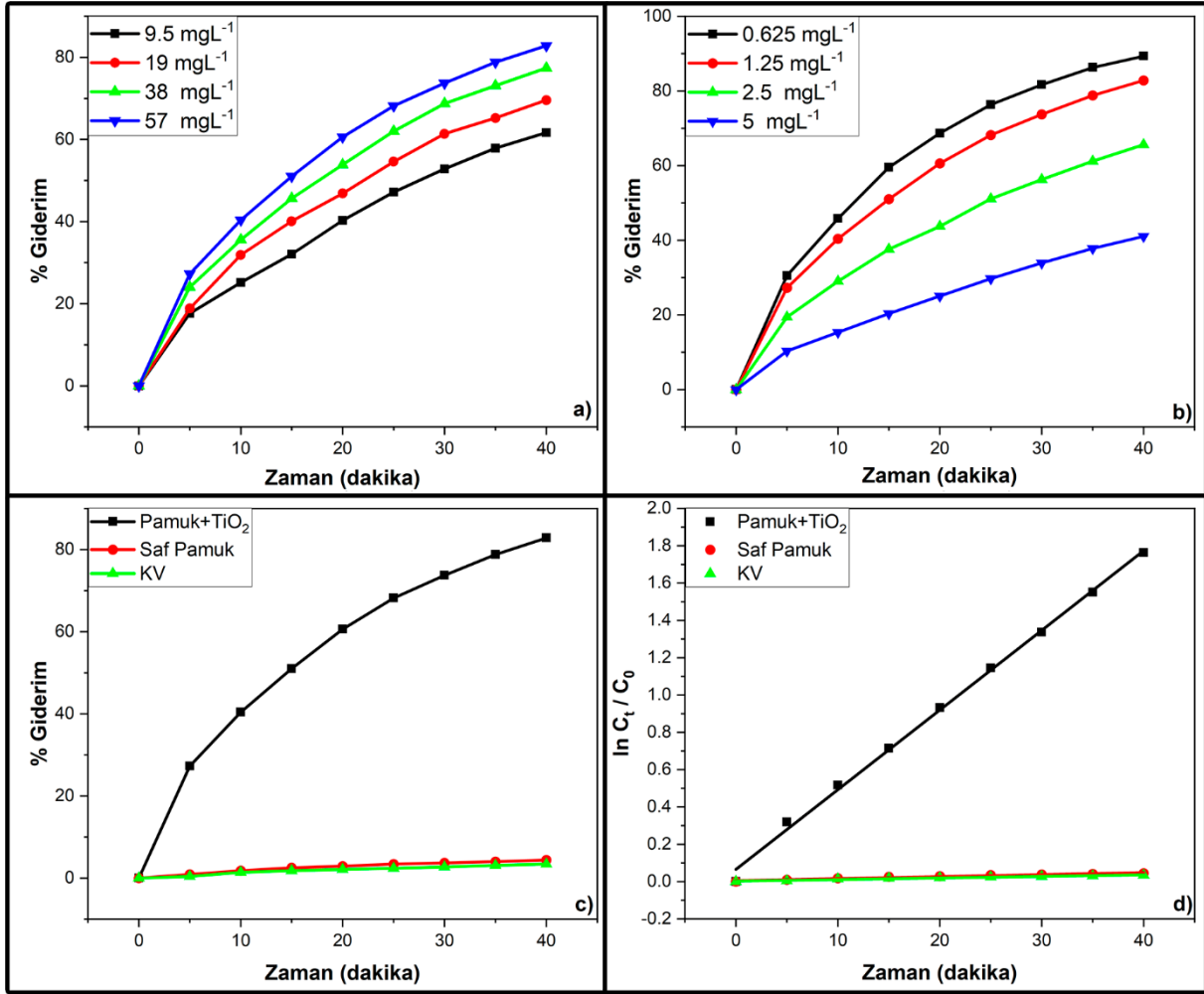
Numune	Element	% Ağırlık	% Atomik
Saf Pamuklu Kumaş	C	67,8	73,80
	O	32,2	26,20
TiO ₂ Kaplı Pamuklu Kumaş	C	55,35	66,47
	O	34,09	30,73
	Au*	1,66	0,12
	Ti	8,9	2,68

*SEM analizleri esnasında numunelerin altın ile kaplama yapılarak ölçümü alınmıştır.

3.2. Fotokataliz ve Mekanizma Çalışmaları

TiO₂ nanoparçacık kaplı pamuklu kumaşın fotokatalitik aktivitesi, karanlıkta adsorpsiyon-desorpsiyon dengesi (60 dakika) sonrasında, doğal pH'sında, UVA ışınması altında zamanın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir (Şekil 2-a-d). En uygun TiO₂ nanoparçacık kaplama miktarını belirlemek için 9,5, 19, 38 ve 57 mgL⁻¹ olmak üzere dört farklı miktarda TiO₂ nanoparçacıklar kaplı kumaşların KV'nin fotobozunmasına ait fotokatalitik aktiviteleri değerlendirilerek tespit edilmiştir. (Şekil 2-a).

Şekil 2-a'da, UVA ışınması altında TiO₂ nanoparçacıklar kaplı kumaşlar üzerindeki KV'nin fotobozunma oranlarının, TiO₂ nanoparçacık miktarının 9,5'den 57 mgL⁻¹'e artırılmasıyla % 61,64'den %82,83'e yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum artan TiO₂ nanoparçacık miktarı ile kumaşlardaki aktif merkezlerin sayısının artmasıyla daha çok miktarda KV boyar maddesinin yüzeye tutunmasına imkân sağlaması ve daha fazla reaktif türlerin oluşmasıyla ilişkilidir (Çağlar ve ark., 2018).



Şekil 2. UVA ışınım altında KV'nin TiO₂ nanoparçacık kaplı pamuk kumaşlar üzerinde fotokatalizi

a) TiO₂ nanoparçacık kaplama miktarı etkisi b) Başlangıç KV miktarı etkisi c) 1,25 mgL⁻¹ başlangıç KV konsantrasyonu ile fotobozunma d) Yalancı birinci derece kinetik

Başlangıç boya konsantrasyonunun fotobozunma üzerindeki etkisini belirlemek için, UVA ışınım altında 57 mgL⁻¹ TiO₂ nanoparçacık kaplı pamuklu kumaş varlığında, 0,625 mgL⁻¹ ile 5 mgL⁻¹ arasında farklı başlangıç boya konsantrasyonlarına sahip KV çözeltileriyle bir dizi fotobozunma deneyi gerçekleştirilmiştir. 0,625 mgL⁻¹'den 5 mgL⁻¹'e kadar artan başlangıç boya konsantrasyonu ile, boya molekülleri tarafından katalizör yüzeyinde daha fazla fotokatalitik aktif merkezlerin işgali sebebiyle KV'nin fotobozunma verimlerinin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir. Buna ilaveten fotokatalitik çalışmalarda artan boya konsantrasyonu ile boya çözeltilisinin şeffaflığının azalması ışınımın katalizör yüzeyine nüfusunu azalttığı da bilinen bir durumdur (Khani ve ark., 2013). Artan KV molekülleri daha fazla ışınımı soğurarak, daha az fotonun fotokatalizör yüzeyine ulaşmasına ve dolayısıyla daha düşük bir fotobozunma verimine sebep olur. UVA ışınım altında KV'nin başlangıç konsantrasyonu 0,625 mgL⁻¹ olduğunda, bozunma verimleri 40 dakikada % 89,31'e ulaşmıştır (Şekil 2-b). Kinetik çalışmaların daha kolay incelenmesi için seçilen 1,25 mgL⁻¹ başlangıç KV konsantrasyonu ile elde edilen veriler Şekil 2-c gösterilmiştir.

KV'nin fotobozunması, herhangi bir katalizör olmaksızın UVA ışınları altında % 3,4 olduğu görülmektedir. Bu durum, gelen fotonların KV'nin uyarılarak bozunmasında önemli bir rolünün olmadığını göstermektedir (Güner ve ark., 2021). Beklendiği gibi, saf pamuklu kumaş varlığında da KV fotobozunması gözlemlenmedi ve 40 dakika sonunda KV fotolizine yakın bozunma verimlerinde kaldı (%4,4). Fakat KV moleküllerinin TiO₂ nanoparçacık kaplı pamuklu kumaş üzerinde fotobozunmasına ait fotokatalitik verimleri UVA altında 40 dakika sonunda %82,83 olarak elde edilmiştir.

KV boyar maddesinin TiO₂ kaplı pamuklu kumaş üzerinde, fotobozunma kinetiğini tanımlamak için Langmuir-Hinshelwood kinetik modelinden türetilen yalancı-birinci dereceden reaksiyon kinetik modeli (Eşitlik 2) kullanılmış ve deneysel veriler bu kinetik modele göre değerlendirilmiştir (Şekil 2-d) (Çağlar ve ark., 2021; Özdemir ve ark., 2022).

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k \cdot t \quad (2)$$

Burada; C₀ adsorpsiyon/desorpsiyon dengesinden hemen sonra ve ışınlamadan hemen önce KV'nin ilk konsantrasyonudur, C_t, ilgili ışınlama zamanında KV konsantrasyonunu, k, gözlenen yalancı birinci dereceden hız sabitidir (min⁻¹) ve t ışınlama süresidir (dak).

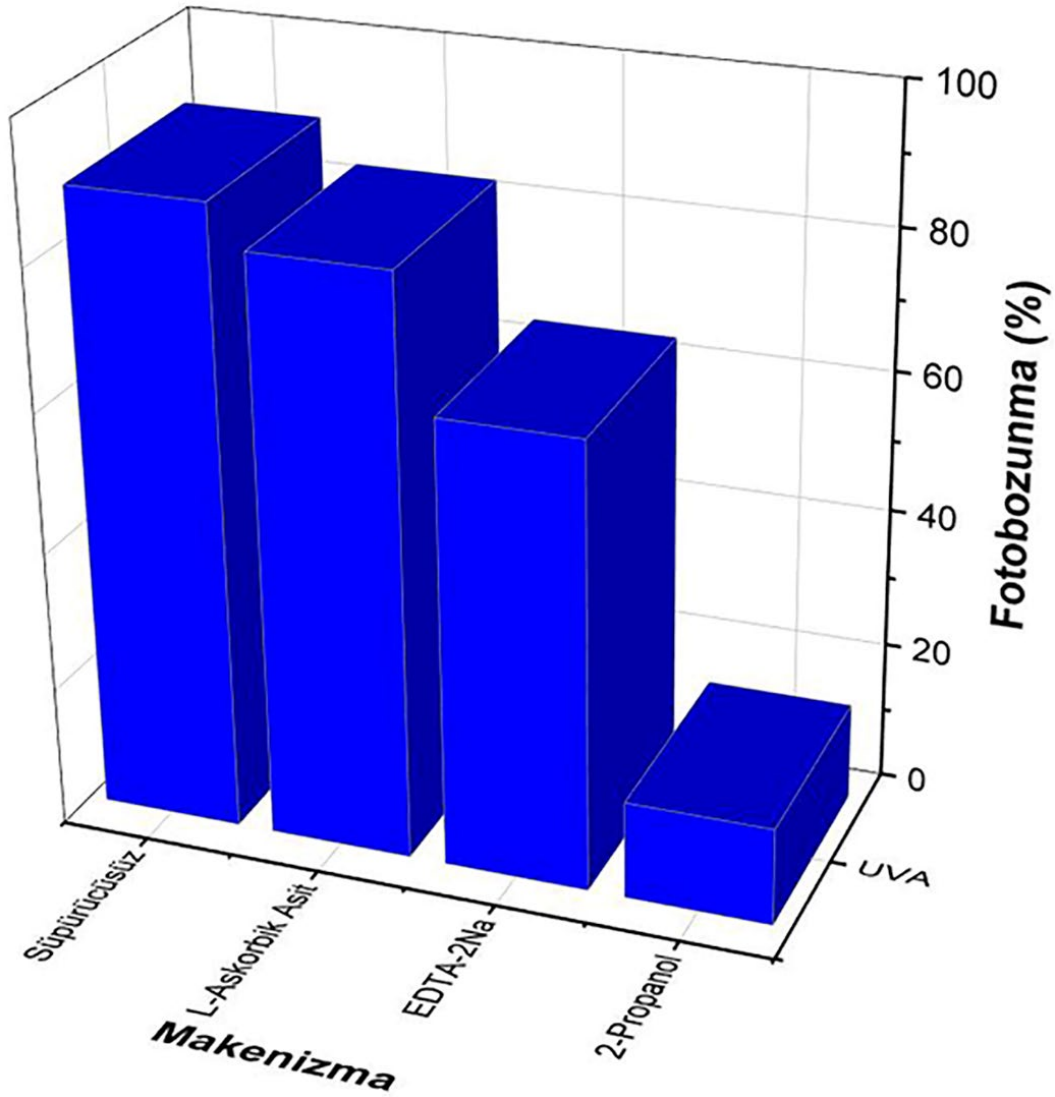
k sabiti, yukarıdaki denkleme göre; ln (C₀/C_t)'e karşı zaman (dakika) grafiğinden (Şekil 2-d) elde edilen doğrunun eğimden hesaplanmıştır. UVA ışınları altında saf pamuklu kumaş ve TiO₂ kaplı pamuklu kumaş varlığında KV fotobozunmasına ait yalancı birinci derece hız sabitleri sırasıyla 0,00108 ve 0,04272 dk⁻¹olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi, UVA ışınları altında TiO₂ kaplı pamuklu kumaş için hesaplanan k sabiti saf kumaşa göre yaklaşık 40 kat daha büyüktür. Tablo 2'de gözlenen yalancı birinci dereceden hız sabitleri, karşılık gelen başlangıç fotokatalitik bozunma hızları (r₀) ve korelasyon katsayıları verilmiştir.

Tablo 2. Yalancı-birinci dereceden kinetik için KV'nin fotobozunma hız sabitleri ve korelasyon katsayıları

Numune	k (dak ⁻¹)	r ₀ (µM.dak ⁻¹)	R ²
Pamuk+TiO ₂	0,04272	0,0000534	0,9974
Saf Pamuk	0,00108	0,0000014	0,9581
KV	0,00084	0,0000011	0,9621

Tablo 2'de görüldüğü gibi, TiO₂ kaplı pamuklu kumaşın gözlenen hız sabiti, başlangıç bozunma hızı ve korelasyon katsayısı, UVA ışınları altında diğer numunelerden daha büyüktür. Bu durum, TiO₂ kaplı pamuklu kumaşın en yüksek fotokatalitik performansa sahip olduğunu ve fotobozunmanın yalancı birinci kinetik izlediğini göstermektedir.

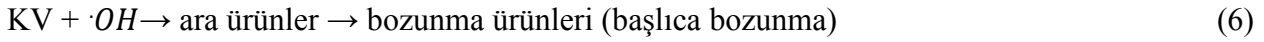
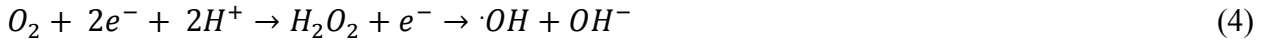
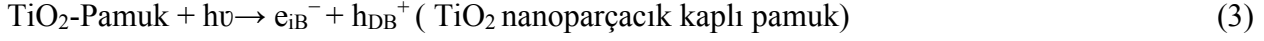
Hidroksil radikallerinin ($\cdot\text{OH}$), süperoksit radikallerinin ($\cdot\text{O}_2^-$) ve fotojenere boşlukların (h^+) öncelikle fotokatalitik süreçten sorumlu ana reaktif türler olarak kabul edildiği bilinmektedir (Çağlar, 2021; Jiang, 2015; Vinoth, 2016). Bu sebeple, reaktif türlerin KV'nin TiO_2 kaplı pamuk üzerinde fotokatalitik bozunması üzerindeki katkılarını belirlemek ve olası mekanizmayı aydınlatmak için bir dizi reaktif tür yakalama deneyi yapıldı. 2-propanol (2-p), L-askorbik asit (LA) ve etilendiamintetraasetik asit disodyum tuzu (EDTA-2Na), sırasıyla hidroksil radikallerinin ($\cdot\text{OH}$), süperoksit radikallerinin ($\cdot\text{O}_2^-$) ve boşlukların (h^+) rolünü değerlendirmek için süpürücüler olarak kullanıldı.



Şekil 3. KV'nin fotobozunmasında reaktif türlerin etkisi

Şekil 3, süpürücülerin eklenmesiyle ve bunlar olmadan UVA altında KV'nin TiO_2 nanoparçacık kaplı pamuk üzerinde fotokatalitik bozunmasında ki fotokatalitik verimliliklerini göstermektedir. LA ilavesinin KV'nin fotobozunma verimliliği üzerinde belirgin bir etkisi yoktur (% 83), bu da süperoksit radikallerinin ($\cdot\text{O}_2^-$) KV'nin fotobozunması üzerinde belirgin etkiye sahip

olmadığını göstermektedir. EDTA-2Na ilavesinin KV'nin fotobozunma verimliliği üzerinde etkisi (% 64) çok azdır, bu da boşlukların (h^+) fotokatalitik süreçte doğrudan aktif tür olmadığını gösterir. Bu bulgular, 2-propanol ilavesinin KV'nin fotokatalitik bozunmasında hidroksil radikallerinin ($\cdot OH$), ana reaktif türler olduğu (%14) ve en etken rolü oynadığı görülmektedir. Elde edilen reaktif türlerin deney sonuçlarından aşağıdaki mekanizma önerilmektedir:



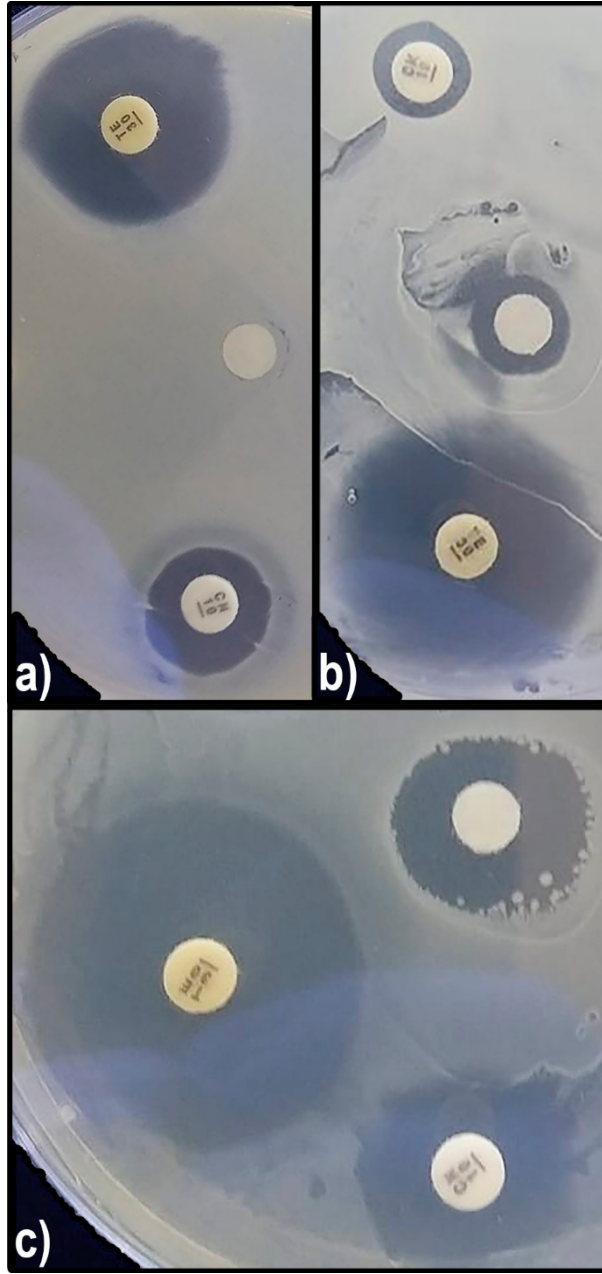
3.3. Antibakteriyel Çalışması

Disk difüzyon metodu ile gerçekleştirilen denemeler sonucunda 0,6 cm çaplı; negatif kontrol olarak herhangi bir işlem yapılmayan pamuklu kumaş, 9,5, 19, 38, 57 mgL^{-1} konsantrasyonlarında TiO_2 ile kaplanmış pamuklu kumaş, pozitif kontrol olarak kullanılmış gentamisin ve tetrasiklin antibiyotik diskler bakteriler üzerindeki etkileri oluşturdukları zon çaplarının görüntüleme cihazıyla belirlenerek hesaplanmıştır. Örneklerin antibakteriyel etki yüzdesi elde edilen zon çaplarının her petri için o petrideki referans antibiyotiklerin oluşturduğu zon çapının %100 olarak kabul edilmesiyle hesaplanmıştır. Çalışmada pozitif kontrole göre relatif değerlendirilen TiO_2 kaplanmış kumaşlar içinde en yüksek yüzdeye relatif etki *E. coli*'ye karşı 38 ve 57 mgL^{-1} konsantrasyonlarında sırasıyla %40,9 ve %60,2 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4).

S. aureus üzerinde 38 mgL^{-1} ve 57 mgL^{-1} TiO_2 ile kaplanmış pamuklu kumaşların antibakteriyel etkisi *E. coli*'ye karşı gösterdiği etkiye göre daha az olmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. TiO_2 kaplanmış pamuklu kumaşların *E. coli*'ye ve *S. aureus*'a karşı referans antibiyotiklere göre relatif antibakteriyel yüzdeleri

Numune	<i>E. coli</i> (%)	<i>S. aureus</i> (%)
Tetrasiklin (30 μg)	100	100
9,5 mgL^{-1} TiO_2 Kaplı Pamuklu Kumaş	16,4	10,1
19 mgL^{-1} TiO_2 Kaplı Pamuklu Kumaş	22,7	14,7
38 mgL^{-1} TiO_2 Kaplı Pamuklu Kumaş	40,9	23,3
57 mgL^{-1} TiO_2 Kaplı Pamuklu Kumaş	60,2	31,5



Şekil 4. Disk difüzyon metoduyla TiO₂ kaplanmış ve kaplanmamış pamuklu kumaşların *E. coli*'ye karşı antibakteriyel aktivitesi sonucu ortaya çıkan zonlar. Saf pamuklu kumaş (a), 38 mgL⁻¹ TiO₂ ile kaplı pamuklu kumaş (b), 57 mgL⁻¹ TiO₂ ile kaplı pamuklu kumaş (c).

4. Sonuçlar ve Öneriler

TiCl₄'ün hidrolizi yoluyla başarılı bir şekilde sentezlenen TiO₂ nanoparçacıkları ile kaplı pamuklu kumaş, UVA ışınları altında KV'nin bozunması için iyi bir fotokatalitik performans gösterdi. KV'nin fotokatalitik bozunması için optimum şartlar 0,625 mgL⁻¹ başlangıç KV konsantrasyonu ve 57 mgL⁻¹ katalizör miktarı olarak belirlendi. Bu optimum şartlar altında, ilgili fotokatalizör varlığında 40 dakika içerisinde UVA ışınması altında KV'nin % 89,31' inin bozunmaya uğradığı tespit edilmiştir. Bozunma reaksiyonunun birinci dereceden kinetiği takip ettiği belirlenmiştir. UVA ışınması altında

KV boyasının fotobozunması için bir mekanizma önerdik. KV'nin fotokatalitik bozunmasında hidroksil radikallerinin (.OH) ana unsur olduğu (%14) ve en etken rolü oynadığı görülmüştür.

TiO₂ kaplı kumaşların antibakteriyel aktivitesi incelendiğinde gram negatif bir bakteri olan *E. coli*'nin daha fazla zon çapına sahip olduğu görülmüştür. Zon çapının daha fazla olması *E. coli*'nin TiO₂ kaplı kumaşa yaşayamadığını göstermektedir. Bu, *S. aureus*'un gram pozitif olması ve dolayısıyla hücre duvarının daha kalın bir peptidoglikan tabakası içermesi ile açıklanabilir (Erjaee ve ark., 2017).

TiO₂ nanoparçacıklarının, özellikle aerobik solunum bakterilerinin hücre zarında mezozom yapılarında bulunan ATP üretiminden sorumlu elektron taşıma sistemindeki elektronların yakalanmasına neden olduğu, bu sebeple de tüm biyokimyasal reaksiyonları için gerekli enerjinin elde edilemediği şeklinde yorumlanabilir. Özet olarak gram pozitif bakterilerin mezozom yapılarının hücre duvarının dış yüzeyinden uzaklığının TiO₂ nanoparçacıklarının bakterisidal aktivitesini sınırladığı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın kendi kendini temizleyen ve antibakteriyel pamuklu kumaş üretiminde yüzey modifiyeli pamuklu malzemelerin kolay hazırlanması için rehberlik etmesi beklenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından FBA-2020-699 kodlu proje ile desteklenmiştir. Finansal desteklerinden dolayı Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne teşekkür ederim.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abid, M., Bouattour, S., Ferraria, A. M., Conceição, D. S., Carapeto, A. P., Vieira Ferreira, L. F., Botelho do Rego, A. M., Rei Vilar, M., Boufi, S., (2017). Functionalization of cotton fabrics with plasmonic photoactive nanostructured Au-TiO₂ layer. *Carbohydrate Polymers*, 176, 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.090>
- Addamo, M., Augugliaro, V., Di Paola, A., Garcia-Lopez, E., Loddo, V., Marci, G., Palmisano, L., (2005). Preparation and photoactivity of nanostructured TiO₂ particles obtained by hydrolysis of TiCl₄. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 265, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.11.048>
- Afzal, S., Daoud, W. A., Langford, S. J., (2013). Visible-light self-cleaning cotton by metalloporphyrin-sensitized photocatalysis. *Applied Surface Science*, 275, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.141>
- Chen, D., Mai, Z., Liu, X., Ye, D., Zhang, H., Yin, X., Zhou, Y., Liu, M., Xu, W., (2018). UV-blocking, superhydrophobic and robust cotton fabrics fabricated using polyvinylsilsesquioxane and nano-TiO₂. *Cellulose*, 25 (6), 3635–3647. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1790-7>
- Çağlar B., Keleş Güner E., Keleş K., Özdokur K.V., Çubuk O., Çoldur F., Çağlar S., Topçu C., Tabak A., (2018). Fe₃O₄ nanoparticles decorated smectite nanocomposite: Characterization, photocatalytic and electrocatalytic activities. *Solid State Sciences*, 83, 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2018.07.013>
- Çağlar. B., Guner, E.K., Özdokur, K.V., Özdemir, A.O., İçer, F., Çağlar, S., Doğan, B., Beşer, B.M., Çırak, Ç., Tabak, A., Ersoy, S., (2021). Application of BiFeO₃ and Au/BiFeO₃ decorated kaolinite nanocomposites as efficient photocatalyst for degradation of dye and electrocatalyst for oxygen reduction reaction. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, 418, 113400. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113400>
- El-Nahhal, I. M., Elmanama, A. A., Amara, N., Qodih, F. S., Selmane, M., Chehimi, M. M., (2018). The efficacy of surfactants in stabilizing coating of nano-structured CuO particles onto the surface of cotton fibers and their antimicrobial activity. *Materials Chemistry and Physics*, 215, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.05.012>
- Erjaee, H., Rajaian, H., Nazifi, S., (2017). Synthesis and characterization of novel silver nanoparticles using Chamaemelum nobile extract for antibacterial application. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 8, 025004. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/aa690b>
- Ghosh, T., Chattopadhyay, A., Pramanik, S., Mukherjee, S., Das, S., Mandal, A. C., Kuir, P. K., (2022). Biosynthesis of ZnO nanoparticles and their in-situ coating on cotton fabric using Azadirachta Indica leaf extract for enhanced antibacterial activity. *Materials Technology*, 37(11), 1755–1765. <https://doi.org/10.1080/10667857.2021.1978755>
- Güner, E. K., İçer, F., Özdemir, A. O., Çağlar, B., (2021). Farklı ışık kaynakları altında kristal viyole boyar maddesinin kaolin-BiFeO₃ nanokompozit üzerinde fotobozunması. *GÜFBED/GUSTIJ*, 11(3), 815–827. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.877702>
- Horrocks A. R., Anand, S. C., (2003). *Teknik Tekstiller El Kitabı (Technical Textiles Handbook)*. İstanbul: Türk Tekstil Vakfı (The Textile Institute).
- Hwan Ko, Y., Kim, S., Su Yu, J., (2012). Electrochemical synthesis of hierarchical β-Ni(OH)₂ nanostructures on conductive textiles. *Materials Letters*, 84, 132–135. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.06.075>
- İbrahim, M. M., Mezni, A., El-Sheshtawy, H. S., Abu Zaid, A. A., Alsawat, M., El-Shafı, N., Ahmed S.I., Shaltout, A. A., Amin, M. A., Kumaria, T., Altalhi, T., (2019). Direct Z-scheme of Cu₂O/TiO₂ enhanced self-cleaning, antibacterial activity, and UV protection of cotton fiber under sunlight. *Applied Surface Science*, 479, 953 – 962. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.169>
- Jiang, C., Liu, W., Yang, M., Liu, C., He, S., Xie, Y., Wang, Z., (2018) Facile fabrication of robust fluorine-free self-cleaning cotton textiles with superhydrophobicity, photocatalytic activity, and UV durability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 559, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.09.048>
- Jiang, H. Y., Ouyang, Z. Y., Hu, R., Wan, J., Zhu, J. J., (2022) Self-cleaning Finishing of Cotton Fabric with TiO₂/Ag₂S/rGO Composite”, *Fibers and Polymers*, 23(1), 254–262. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0119-6>
- Jiang Y.R., Lin H.P., Chung W.H., Dai Y.M., Lin W.Y., Chen C.C., (2015). Controlled hydrothermal synthesis of BiOxCl_y/BiO_mIn composites exhibiting visible- light photocatalytic degradation of crystal violet, *Journal of Hazardous Materials* 283: 787–805. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.10.025>

- Kang, C. K., Kim, S. S., Kim, S., Lee, J., Lee, J.-H., Roh, C., Lee, J., (2016). Antibacterial cotton fibers treated with silver nanoparticles and quaternary ammonium salts. *Carbohydrate Polymers*, 151, 1012–1018. <https://doi:10.1016/j.carbpol.2016.06.043>
- Khani A., Sohrabi M.R., Khosravi M., Davallo M., (2013). Enhancing purification of an azo dye solution in nanosized zero-valent iron-ZnO photocatalyst system using subsequent semibatch packed-bed reactor, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 37, 91-99. <https://doi:10.3906/muh-1201-6>.
- Lee, J. H., Yang, Y. S., (2005). Effect of hydrolysis conditions on morphology and phase content in the crystalline TiO₂ nanoparticles synthesized from aqueous TiCl₄ solution by precipitation, *Mater. Chem. Phys.*, 93, 237–242. <https://doi:10.1016/j.matchemphys.2005.03.020>
- Li, X., Shi, J. L., Hao H., Lang, X., (2018). Visible light-induced selective oxidation of alcohols with air by dye-sensitized TiO₂ photocatalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 232, 260-267, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.03.043>
- Lin, D., Zeng, X., Li, H., Lai, X., Wu, T., (2019). One-pot fabrication of superhydrophobic and flame-retardant coatings on cotton fabrics via sol-gel reaction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 533, 198–206. <https://doi:10.1016/j.jcis.2018.08.060>
- Mai, Z., Xiong, Z., Shu, X., Liu, X., Zhang, H., Yin, X., Zhou, Y., Liu, M., Zhang, M., Xu, W., Chen, D., (2018). Multifunctionalization of cotton fabrics with polyvinylsilsesquioxane/ZnO composite coatings. *Carbohydrate Polymers*, 199, 516–525. <https://doi:10.1016/j.carbpol.2018.07.052>
- Mancuso, A., Morante, N., De Carluccio, M., Sacco, O., Rizzo, L., Fontana, M., Esposito, S., Vaiano, V., Sannino, D., (2022). Solar driven photocatalysis using iron and chromium doped TiO₂ coupled to moving bed biofilm process for olive mill wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 450(2), 138107, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138107>
- Mecit D., Ilgaz S., Duran D., Başal G., Gülümser T., Tarakçıoğlu I., (2007). Teknik Tekstiller Ve Kullanım Alanları (Bölüm 1), *Tekstil ve Konfeksiyon*, 17(2), 79-82.
- Mecit D., Ilgaz S., Duran D., Başal G., Gülümser T., Tarakçıoğlu I., (2007). Teknik Tekstiller Ve Kullanım Alanları (Bölüm 2), *Tekstil ve Konfeksiyon*, 17(3), 154-161.
- Özdemir, A. O., Caglar, B., Çubuk, O., Coldur, F., Kuzucu, M., Keles Guner, E., Doğan, B., Caglar, S., Özdemir, K. V., (2022). Facile synthesis of TiO₂-coated cotton fabric and its versatile applications in photocatalysis, pH sensor and antibacterial activities”, *Materials Chemistry and Physics*, 287. <https://doi:10.1016/j.matchemphys.2022.126342>
- Pant, B., Park, M., Park, S.J., (2019). Recent Advances in TiO₂ Films Prepared by Sol-Gel Methods for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants and Antibacterial Activities. *Coatings*, 9, 613. <https://doi:10.3390/coatings9100613>
- Ran, J., He, M., Li, W., Cheng, D., & Wang, X., (2018). Growing ZnO Nanoparticles on Polydopamine-Templated Cotton Fabrics for Durable Antimicrobial Activity and UV Protection. *Polymers*, 10(5), 495. <https://doi:10.3390/polym10050495>
- Rana, M., Hao, B., Mu, L., Chen, L., & Ma, P.-C., (2016). Development of multi-functional cotton fabrics with Ag/AgBr–TiO₂ nanocomposite coating. *Composites Science and Technology*, 122, 104–112. <https://doi:10.1016/j.compscitech.2015.11.016>
- Rehman, A., Rehman, A., Khalid, W., Safdar, F., Basit, A., Maqsood, H. S., Iqbal, K., Ashraf, M., (2018). Simultaneous dyeing and anti-bacterial finishing on 100% cotton fabric: process establishment and characterization. *Cellulose*, 25(9), 5405–5414. <https://doi:10.1007/s10570-018-1934-9>
- Riaz, S., Ashraf, M., Hussain, T., & Hussain, M. T., (2019). Modification of silica nanoparticles to develop highly durable superhydrophobic and antibacterial cotton fabrics. *Cellulose*, 26, 5159–5175. <https://doi:10.1007/s10570-019-02440-x>
- Rosace G., Guido E., Colleoni C., Brucale M., Piperopoulos E., Milone C., Plutino M. R., (2017). Halochromic resorufin-GPTMS hybrid sol-gel: Chemical-physical properties and use as pH sensor fabric coating. *Sensors and Actuators B*, 241, 85–95.
- Sboui, M., Lachheb, H., Swaminathan, M., Pan, J.H., (2022). Low-temperature deposition and crystallization of RuO₂/TiO₂ on cotton fabric for efficient solar photocatalytic degradation of o-toluidine. *Cellulose*, 29, 1189–1204. <https://doi:10.1007/s10570-021-04308-5>
- Tobola M. F., Ciesielska M., Maliszewska I., Rumijowska O. R., Wozniak P. S., Teterycz H., Bryjak M., (2018). Deposition of Zinc Oxide on Different Polymer Textiles and Their Antibacterial Properties. *Materials*, 11, 707. <https://doi:10.3390/ma11050707>
- Xu, B., Ding, J., Feng, L., Ding, Y., Ge, F., & Cai, Z., (2015). Self-cleaning cotton fabrics via combination of photocatalytic TiO₂ and superhydrophobic SiO₂. *Surface and Coatings Technology*, 262, 70–76. <https://doi:10.1016/j.surfcoat.2014.12.017>

- Xu, L., Shen, Y., Ding, Y., & Wang, L., (2018). Superhydrophobic and Ultraviolet-Blocking Cotton Fabrics Based on TiO₂/SiO₂ Composite Nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(10), 6879–6886. <https://doi:10.1166/jnn.2018.15463>
- Xu, Q., Duan, P., Zhang, Y., Fu, F., & Liu, X., (2018). Double Protect Copper Nanoparticles Loaded on L-cysteine Modified Cotton Fabric with Durable Antibacterial Properties. *Fibers and Polymers*, 19(11), 2324–2334. <https://doi:10.1007/s12221-018-8621-1>
- Xu, Q., Ke, X., Cai, D., Zhang, Y., Fu, F., Endo, T., Liu, X., (2018). Silver-based, single-sided antibacterial cotton fabrics with improved durability via an l-cysteine binding effect. *Cellulose*, 25(3), 2129–2141. <https://doi:10.1007/s10570-018-1689-3>
- Xu, Q., Ke, X., Ge, N., Shen, L., Zhang, Y., Fu, F., Liu, X., (2018). Preparation of Copper Nanoparticles Coated Cotton Fabrics with Durable Antibacterial Properties. *Fibers and Polymers*, 19(5), 1004–1013. <https://doi:10.1007/s12221-018-8067-5>
- Vinoth, R., Karthik, P., Muthamizchelvan, C., Neppolian B., Ashokkumar M., (2016). Carrier separation and charge transport characteristics of reduced graphene oxide supported visible-light active photocatalysts, *Physical Chemistry Chemical Physics* 18, 5179-5191. <https://doi:10.1039/C5CP08041J>
- Yang, M., Liu, W., Jiang, C., He, S., Xie, Y., Wang, Z., (2018). Fabrication of superhydrophobic cotton fabric with fluorinated TiO₂ sol by a green and one-step sol-gel process. *Carbohydrate Polymers*, 197, 75–82. <https://doi:10.1016/j.carbpol.2018.05.075>
- Yang, M., Liu, W., Jiang, C., Xie, Y., Shi, H., Zhang, F., Wang, Z., (2019). Facile construction of robust superhydrophobic cotton textiles for effective UV protection, self-cleaning and oil-water separation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 570, 172 – 181. <https://doi:10.1016/j.colsurfa.2019.03.024>
- Yu, J., Pang, Z., Zheng, C., Zhou, T., Zhang, J., Zhou, H., Wei, Q., (2019). Cotton fabric finished by PANI/TiO₂ with multifunctions of conductivity, anti-ultraviolet and photocatalysis activity. *Applied Surface Science*, 470, 84–90. <https://doi:10.1016/j.apsusc.2018.11.112>
- Yuranova, T., Mosteo, R., Bandara, J., Laub, D., Kiwi, J., (2006). Self-cleaning cotton textiles surfaces modified by photoactive SiO₂/TiO₂ coating. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 244(1-2), 160-167. <https://doi:10.1016/j.molcata.2005.08.059>
- Zhou, L., Wang, H., Du, J., Fu, J., Wang, W., (2018). Eco-friendly and Durable Antibacterial Cotton Fabrics Prepared with Polysulfopropylbetaine. *Fibers and Polymers*, 19(6), 1228–1236. <https://doi:10.1007/s12221-018-8053-y>