

TiO₂ Esaslı Fotokatalitik Yüzeyler: Mekanizma ve Uygulama Alanları

Erhan ÖZKAN*¹ 

¹Dikkan Group Arge Merkezi, İzmir, 35730, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 23.05.2023, Kabul Tarihi: 07.07.2023

Özet

Fotokataliz terimi ışık radyasyonu ile aktive olan reaksiyonları tanımlamaktadır. Günümüz endüstri dünyasında çevre kirliliğinin önemli bir sorun teşkil etmesi sebebiyle fotokataliz üzerinde yapılan araştırmalar gittikçe önem kazanmaktadır. Fotokatalitik yüzeylerin önemi anlaşıldıkça bu konu üzerine yapılan araştırmalar da artmıştır ancak TiO₂ kaplamaların UV ışığına ihtiyaç duyması pratik açıdan bazı zorluklar doğurmuştur. Çeşitli elementlerin TiO₂ yapısına ilavesi ile kaplamaların görünür ışıkta aktive olabileceği kanıtlanmıştır. Bu çalışmanın amacı; görünür ışık bölgesinde aktif olabilecek fotokatalitik TiO₂ kaplamaları sol-jel yöntemi kullanılarak üretmektir. Bu amaçla farklı oranlardaki demir elementi TiO₂ bünyesine eklenmiştir. Kaplama fazlarının fotoaktivite açısından önemli olması nedeniyle X-ışını difraktometresi (XRD) ile faz analizi yapıp, kaplamaların morfolojileri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Kaplama öncesi özellikler DTA/TG cihazı ile tespit edilmiş ve yüzey kaliteleri atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kontrol edilmiştir. Kaplamaların mor ötesi ve görünür ışık fotokatalitik aktivitesine etkisi metilen mavisinin bozunması ile saptanmıştır. Bu gözlemlerden yola çıkarak ilave demir elementinin TiO₂ bünyesine eklenmesi ile elde edilen kaplamaların fotokatalitik ve morfolojik özelliklerinin geliştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotokataliz, Doplama, Sol-Jel, Titanyum Oksit.

TiO₂ Based Photocatalytic Surfaces: Mechanism and Application Areas

Abstract

The term photocatalysis describes reactions activated by light radiation. Research on photocatalysis is gaining more importance as environmental pollution poses a significant problem in today's industrial world. As the importance of photocatalytic surfaces has been understood, research on this subject has increased. Practically, the necessity of UV in order to create photocatalytic activity reveals difficulties. Related to these difficulties, addition some elements to the structure of TiO₂, of which photocatalytic activity under visible light has been proved with studies before, is preferred. The aim of this study is to produce photocatalytic TiO₂ coatings which can be activated under visible light by using sol-gel method. With this regard, Fe element was doped to TiO₂. Because coating phases are important owing to photoactivity, X-ray diffraction method is used to analyse phases and the morphologies of the coatings were analysed by scanning electron microscope (SEM). Pre-coated properties were investigated by using DTA/TG device and the surface qualities were observed by using atomic force microscope (AFM). The effect of the coatings on the ultraviolet and visible light photocatalytic activity was detected by the degradation of methylene blue. It was determined by evaluating these results that doped iron metal to the TiO₂ structure causing to improve of the photocatalytic and morphologic properties of the coatings.

Keywords: Photocatalysis, Doping, Sol-Gel, Titanium Oxide.

*Sorumlu yazar erhanozkan81@icloud.com

1. GİRİŞ

Doğal su kaynaklarının gittikçe azalması ve sınırlı sayıdaki kullanım suyunun endüstriyel ve çevresel atıklar sebebiyle kirlenmesi günümüzün ciddi sorunlarından bir tanesi haline gelmiştir (Bulut ve Birben, 2019). Su sterilizasyonunda kullanılan klor rahatsız edici bir koku yaymasının yanında uzaklaştırılmak istenilen maddelerle gerçekleştirdiği kimyasal reaksiyonun sonucu kansere yol açabilecek seviyede zararlı tri-halo-metan bileşiğinin oluşmasına neden olmaktadır (Özgür, 2021). Tri-halo-metan filtrasyon ve absorpsiyon yöntemleri ile uzaklaştırılmadığı için geri dönüşümü de oldukça güçtür (Özdoğan ve Özdemir, 2019).

Fotokatalizör, sistemde yer alan organik bileşiklerin parçalanması ile yukarıda bahsi geçen birçok sorunun çözümünde etkin bir yol olması ile gündeme gelmiştir (Akman ve arkadaşları, 2021). Fotokatalizörler, ultraviyole (UV) ışığın etkisi ile aktif hale gelen ve kuvvetli bir oksitleyici ortam oluşturan yarı iletken malzemelerdir (Altıntaş ve arkadaşları, 2019). Yüzeyle yapışmış halde bulunan bakteri ve organik bileşikler bu oksitleyici toz yardımıyla kolaylıkla ortamdaki uzaklaştırılabilmektedir (İzgi ve arkadaşları, 2020 ile Güner, 2023). Başka bir ifadeyle fotokatalizörler ışığın etkisi ile aktif hale gelen katalizörler olarak bilinmektedir. Işığın absorbe edilmesi ile daha yüksek bir enerji seviyesine gelerek enerjiyi reaktif malzemeye transfer ederler (Dalkılıç, 2022). Bu şekilde kimyasal bir tepkime başlar. Bir metal ve yarımetal alaşımı fotokatalizör olarak kullanılabilir. Başlarda Fe₂O₃ (Pamela, 2023) olmak üzere ZnO (Yaqoob, 2020), SrTiO₃ (Patil ve arkadaşları, 2020), GaAs (Zhang ve arkadaşları, 2022), GaP (Dewi, 2019), CdS (Liu ve arkadaşları, 2021) ve WO₃ (Dutta ve arkadaşları, 2021) yarıiletken fotokatalizörlere örnek olarak verilebilmektedir. Uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan fotokatalizör 3.2 eV enerji aralığındaki TiO₂'dir (Guo ve arkadaşları, 2019). Farklı uygulamalarda bu aralığın değiştirilebilmesi için Fe, Al, Cu, V, Pt, Cr, Ag ve nadir toprak elementleri katılmalarına dair uygulama örnekleriyle karşılaşılmıştır (Magdalane ve arkadaşları, 2021).

TiO₂ esaslı oksit filmler; kimyasal buhar biriktirme (Huang ve arkadaşları, 2021), fiziksel buhar biriktirme (Wang ve arkadaşları, 2020), moleküler ışın epitaksi (Vahl ve arkadaşları, 2019) gibi yüksek yatırım maliyetli ve ileri teknolojik ekipmanlar ile gerçekleştirilebilirken sol-jel tekniği ile daha düşük maliyetler ile de sentezlenebilmektedir. İnce film kaplamaların sentezlenmesinde sol-jel tekniğinin; kimyasal reaksiyonların kontrolünün mümkün olması, homojen bir yapı elde edilebilmesi, düşük sıcaklıklarda işlemlerin gerçekleştirilebilmesi, düşük enerji maliyetli olması ve üretildiği altlık ile reaksiyona girmemesi gibi avantajları bulunmaktadır ancak sol-jel yöntemi ile TiO₂ ince film üretmenin bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Pant ve arkadaşları, 2019). Titanyumalkoksitin çoğu alkol

içerisinde çözünmemesi, bu yöntemle üretilen ince filmlerin işçilik maliyetinin yüksek ve uzun zaman alması, sentezlenme esnasında yüksek büzülmenin gerçekleşmesi, mikro porozitelerin kaplamada yer alması, sağlığa zararlı organik çözücüler ile işlem yapılması bu dezavantajlardır (Mohammed, 2020).

Bu çalışmada, fotokatalitik bir yüzeyin elde edilmesi ve anti bakteriyel uygulamalarda kullanılması planlanan demir eklenmiş titanyumdioksit malzemenin cam yüzeylerde sol-jel yöntemi ile sentezlenmesi gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen kaplamaların mikro yapıları EDS ve XRD sonuçları baz alınarak fazlara göre gözlenmiş, termal ve yüzeye yapışma özellikleri araştırılmıştır. Titanyumalkoksit, isoproponal asetil aseton ile hazırlanan çözeltilerle cam altlık malzemeler üzerinde kaplamalar sentezlenmiştir. Bu kaplamaların faz analizleri XRD, termal analizleri DTA/TG, yüzey yapıları ise SEM ve AFM cihazlarından faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, sol-jel yöntemiyle fotokatalitik özelliğe sahip demir katkılı titanyumdioksit kaplamalar başarıyla sentezlenerek anti bakteriyel uygulamalara yönelik bir ürün elde edilmiştir.

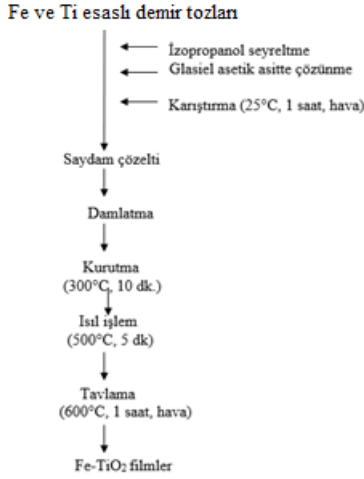
2. ANALİZ METODU

Fe katılmış TiO₂ filmleri hazırlamak için demir klorür (FeCl₃.6H₂O) ve Ti-isoprosit (Ti(C₁₂H₂₈O₄) kimyasalları ile işlem yapılmıştır. Toz haldeki FeCl₃.6H₂O'nin çözünmesi için propanol solventi kullanılmış olup, kompleksleşme reaksiyonları ve kimyasalların çözümünü sağlamak amacıyla glasiel asetik asit kullanılmıştır. Fe katılmış TiO₂ ince filmleri oluşturmak amacıyla kuvars camlar üzerinde sol-jel tekniğinden faydalanılmıştır.

Anti bakteriyel uygulamalarda kullanılmak üzere sol-jel tekniği ile kuvars camlar üzerine Fe-TiO ince filmleri oluşturulmuştur. Şekil 1 bu metodun akış şemasını göstermektedir. Bu prosesin ilk aşamasında Fe ve Ti bazlı saydam çözeltiler hazırlanmıştır. Toz haldeki 0,12 gram demir klorür ve 1,5 ml titanyumalkoksit isoproponal solvent içerisinde çözüldürülmüştür. Fe/TiO₂ karışımlarının sağlanması için belirlenen 0,07, 0,18 ve 0,73 M'lık stokiometrik oranlarda hassas terazide tartılmış ve sonrasında behere alınmıştır. İsooproponal ile gerçekleşen çözünme sonrasında 10 ml "chelating agent" olarak adlandırılan glasiel asetik asit katalizör ve kompleksleşme reaksiyonlarını oluşturmak amacıyla elde edilen çözeltilere eklenmiştir. Elde edilen karışım 60 dakika karıştırılarak saydam çözeltiler elde edilmiştir. Bu amaca ulaşabilmek için isoproponal ve asetik asitin miktarları sabit tutulup;

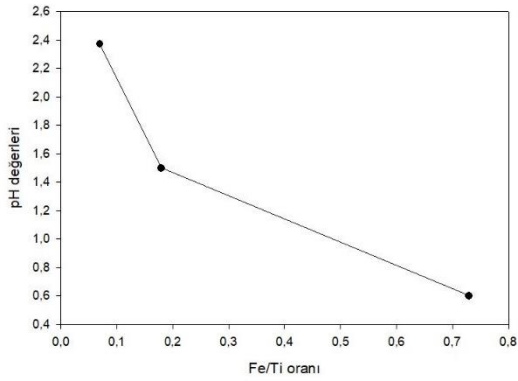
$$\frac{Fe}{Ti} = 0,07, \frac{Fe}{Ti} = 0,18,$$

$\frac{Fe}{Ti} = 0,73$ değerleri olacak şekilde çözeltiler hazırlanmıştır.



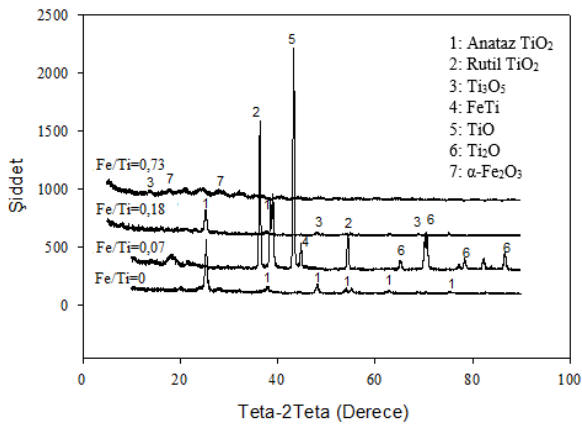
Şekil 1. Fe-TiO₂ Sol-Jel Film Sentezi Akış Şeması

Şekil 2'deki grafikte Mettler Toledo elektrod aracılığıyla ölçülmüş değişik Fe/Ti oranlarına sahip çözeltilerin pH değerleri verilmektedir.



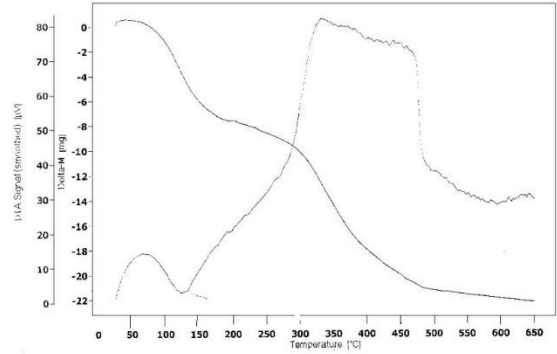
Şekil 2. Fe/Ti Oranlarına Bağlı Olarak Değişen Çözeltilerin pH Değerleri

Şekil 3, cam altlıklar üzerine üretilmiş Fe-TiO₂ ince filmlerin Philips Expert Pro marka cihazıyla gerçekleştirilen CuK_α ışınımı ($\lambda=0.15418$ nm) ile yapılan X ışınları difraksiyon paternlerini göstermektedir.



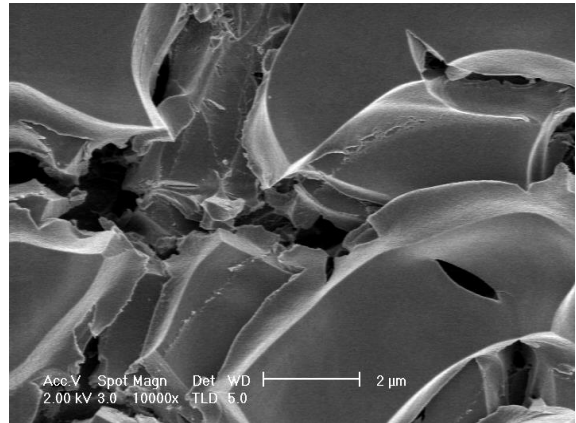
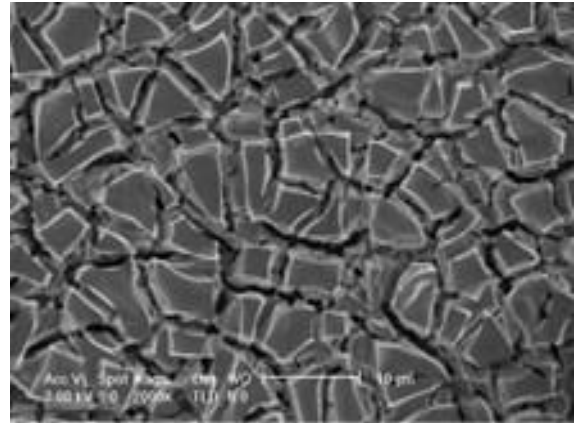
Şekil 3. Cam Altlıklar Üzerine Üretilmiş Fe-TiO₂ İnce Filmlerin X Işınları Difraksiyon Paternleri

Fe-Ti esaslı tozların Perkin Elmer DTA/TG cihazı ile 100 ml/debi argon atmosferi altında gerçekleştirilen termal özellikleri Şekil 4'te gösterilmektedir.

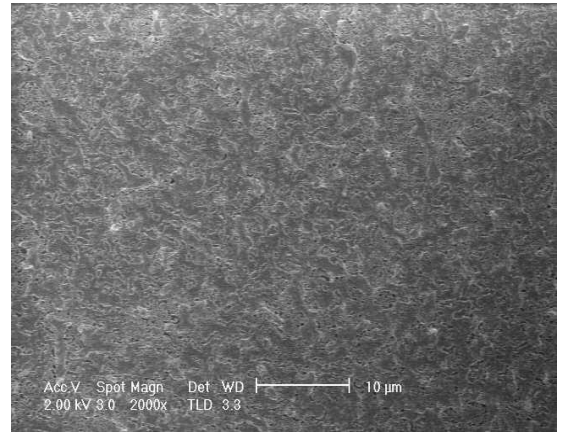
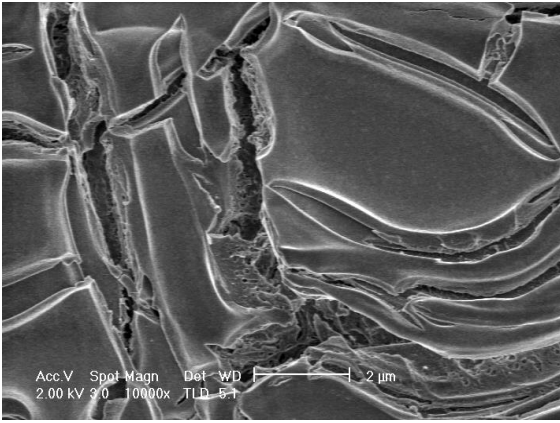
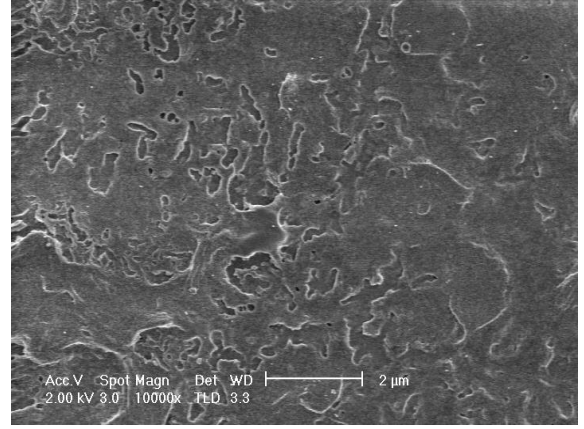
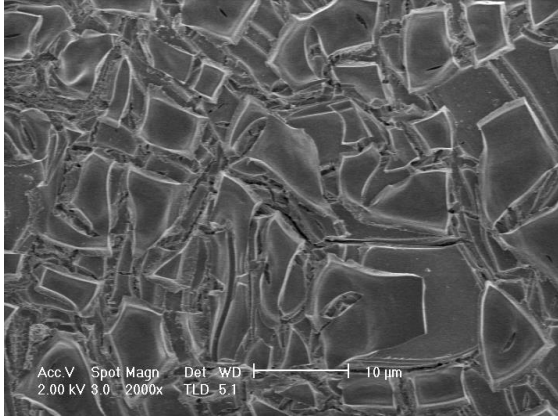


Şekil 4. Fe/Ti Esaslı Tozların DTA/TG Eğrisi

Kaplamaların mikroyapı özelliklerinin tespiti Philips Excell 30 S FEG marka SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te Fe katkısı olmayan kaplamaya ait SEM fotoğrafı yer almaktadır. Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de farklı Fe/Ti oranları içeren kaplamaların SEM fotoğrafları verilmiştir.

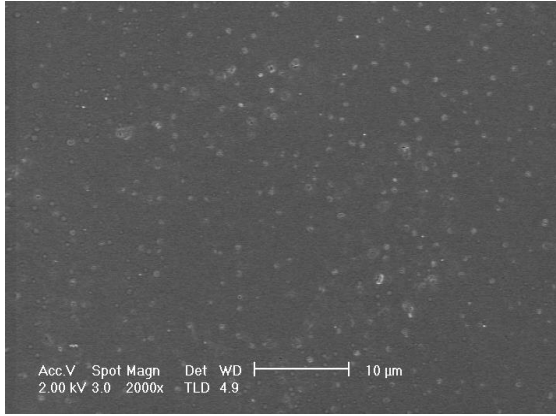
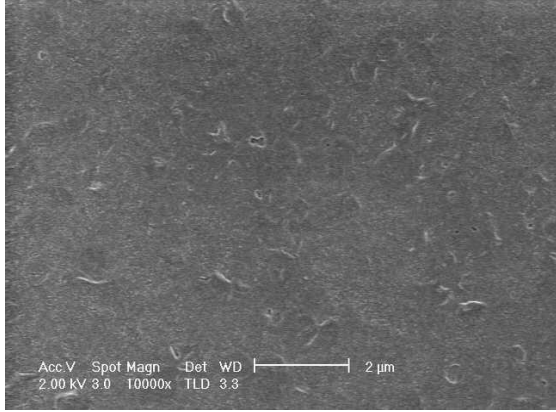


Şekil 5. Fe/Ti=0 Oranında Hazırlanan Fe-TiO₂ Kaplamaların Farklı Büyütmelerde SEM Mikroyapısı. (Katman Sayısı=6)

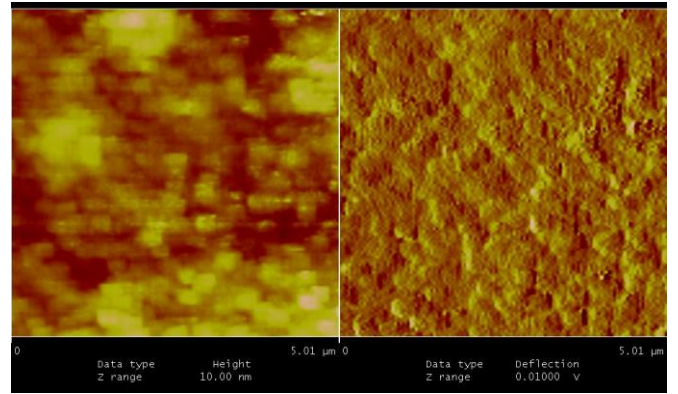
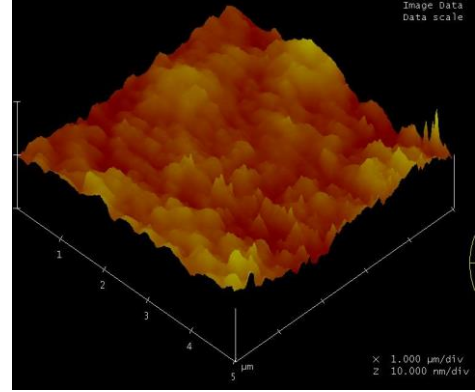


Şekil 6. Fe/Ti=0,07 Oranında Hazırlanan Fe-TiO₂ Kaplamaların Farklı Büyütmelerde SEM Mikroyapısı. (Katman Sayısı=6)

Şekil 7. Fe/Ti=0,18 Oranında Hazırlanan Fe-TiO₂ Kaplamaların Farklı Büyütmelerde SEM Mikroyapısı. (Katman Sayısı=6)



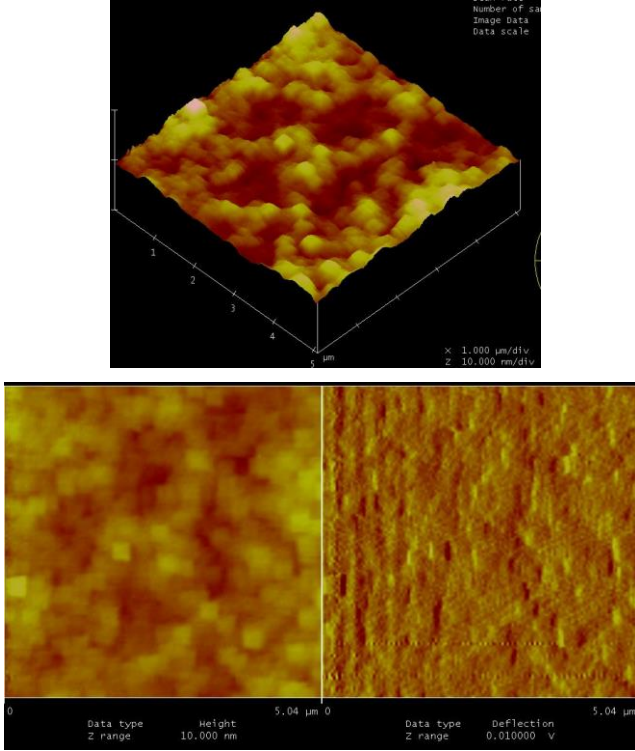
Şekil 8. Fe/Ti=0,73 Oranında Hazırlanan Fe-TiO₂ Kaplamaların Farklı Büyütmelerde SEM Mikroyapısı. (Katman Sayısı=6)



Şekil 9. Fe/Ti=0,07 Oranında Hazırlanan Fe-TiO₂ Kaplamaların (Üst) Üç ve (Alt) İki Boyutlu AFM Fotoğrafi

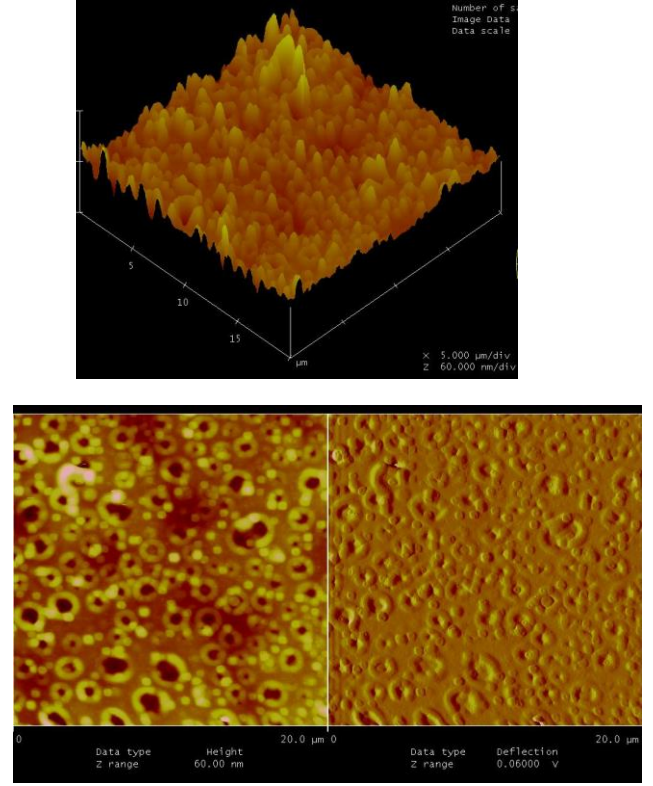
Cam altlıklar üzerinde oluşturulmuş farklı bileşimdeki kaplamaların resimleri Digital Enstrument AFM cihazı ile alınmıştır. Şekil 9'da Fe-TiO₂ filmlerinin Fe/Ti oranı 0,07 olan sentezlenmiş kaplamannın iki ve üç boyutlu AFM fotoğrafları verilmiştir.

Şekil 10'da Fe/Ti oranı 0,18 ve Şekil 11'de Fe/Ti oranı 0,73 olan kaplamaların AFM görselleri yer almaktadır.



Şekil 10. Fe/Ti=0,18 Oranında Hazırlanan Fe-TiO₂ Kaplamaların (Üst) Üç ve (Alt) İki Boyutlu AFM Görseli

Şekil 11'de ise Fe/Ti oranı 0,73 olan kaplamalara ait AFM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 11. Fe/Ti=0,73 Oranında Hazırlanan Fe-TiO₂ Kaplamaların (Üst) Üç ve (Alt) İki Boyutlu AFM Görseli

Fotoaktivite deneyleri Optimum-One UV-VIS Spectrophotometer cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deney için 1 lt saf suya 2 ppm metilen mavisi (C₁₆H₁₈ClN₃S) ilave edilerek sıvı çözelti hazırlanmıştır. Her bir numune, ayrı ayrı 10 ml alınan çözeltilerin içerisinde bırakılıp açık havada 3 saat güneş ışığına maruz bırakılmıştır. Numunelerin metilen mavisi çözeltisini görünür ışıkta parçalaması incelenmiştir. Tablo 1'de Fe/Ti oranlarına bağlı olarak değişen 3 saat metilen mavisinde güneş ışığına maruz bırakılan numunelerin parçalanma yüzdeleri verilmiştir.

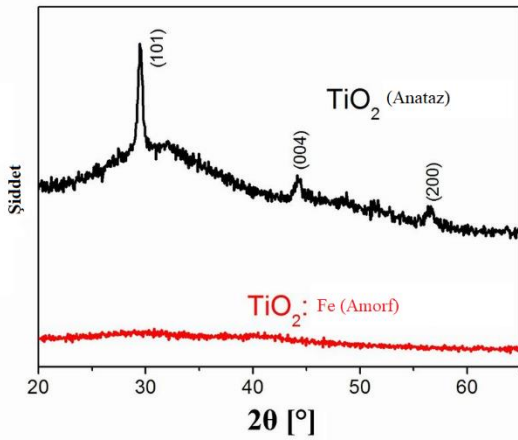
Tablo 1. Fe/Ti Oranına Göre Parçalanma Oranları

Fe/Ti Oranları	%Parçalanma
0	0
0,07	0,09
0,18	0,51
0,73	0,68

3. ANALİZ

Çözeltilerin pH analiz sonuçlarına göre Fe/Ti oranı düştükçe çözeltinin asitliği artmaktadır. pH ağ örtüsünün oluşumuna etki eden önemli bir faktördür. Daha düşük pH değerine sahip koşullar altında dağınık olarak dallanmış bir yapı oluşurken artan pH değerlerinde birbirinden ayrı halde salkımlar görünümünü kazanmıştır.

XRD analizleri sonucunda kaplamaların kristalleşme davranışlarına ait bilgiler elde edilmiştir. Jeller 300-600° C arasında ısıl işleminden geçirilmiştir. Bu jel yapısı 350°C yer kadar amorf yapıdadır. 350-600°C arasında da anataz yapıdadır. Şekil 12’de amorf ve anataz yapılarına ait XRD paternleri yer almaktadır.



Şekil 12. 350 C'nin Altında Meydana Gelen Amorf Yapı ve Üzerinde Oluşan Anataz Yapının XRD Paterni

Yapılan çalışmada 600 °C’de tavllanmış Fe-Ti oranlarına göre kaplanmış ince filmler için sonuçlar verilmiştir. Demir miktarının içeriğine göre pik değerleri değişim göstermiştir. En düşük demir içeriğine sahip olan numune anataz veya anataz rutil karışık fazına yönelir. Fe/Ti oranı 0.73 olan numunenin gösterdiği pik değerleri en zayıf olandır. Kaplamalarda anataz TiO₂, rutil TiO₂, Ti₃O₅, FeTi, TiO, Ti₂O ve α-Fe₂O₃ fazları bulunmuştur.

TG grafiği incelendiğinde %26 toplam ağırlık kaybı meydana geldiği ve ağırlık kaybının 650°C’ ye kadar devam ettiği görülmektedir. 500° C’ye kadar toplam ağırlığın %24’ü kaybedilirken 500-650 arasında ise %2 si kaybedilmiştir. DTA eğrisi de göz önünde bulundurarak 80 ile 330°C kütle kaybı endotermik reaksiyon sonucunda gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu da jelde bulunan alkollerin fiziksel suyun ve alkoksitlerden gelen organik grupların sistemden uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. 330° C’nin üzerinde meydana gelen ağırlık kaybının nedeni ise Fe-Ti esaslı tozda bulunan karbon türü malzemenin yanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, TiO₂’nin 330° C’nin üzerinde amorf fazdan anataz faza geçmesindedir (Mohammed, 2020). DTA sonuçlarına göre 800 °C mertebelerinde yer alan düşük şiddetli endotermik pikin ise anataz rutil faz dönüşüm reaksiyonuna ait olduğunun

tespit edilmiştir. Bu sebeple 800 °C’den sonra rutil fazın oluşması ile görünür ışıkta fotokatalitik özelliklerin ortadan kalkması ve bu özelliklerin kazanılması için UV ışığa ihtiyaç duyulacaktır (Pant ve arkadaşları, 2019).

Mikroyapı görüntülerinde çözelti içerisine katılan Fe oranı arttıkça düzenli bir morfoloji oluşmaktadır. Kaplamalar genelde mozaik yapıda olup, kaplama adacıkları oluşmuştur. Bu adacıklar arasında kanallar oluşmuştur. Bu adacıkların boyutu 0.5 ile 2 µm arasında değişmektedir. Fe/Ti oranı arttıkça homojen ve gözenekli kaplamanın meydana geldiği görülmektedir. Kaplamaların katman sayısının artmasına göre pul pul dökülmemesi yapılaşma özelliklerinin iyi olduğunu göstermektedir. Bu durum kaplama ömrünün uzun olması anlamına gelmektedir. Ayrıca, artan katman sayısına göre katmanların düzenli bir şekilde büyüdüğü görülmektedir. Katman sayısı arttıkça taneler homojen bir şekilde büyüme göstermektedir ve tane dağılımında da homojenlik görülmektedir.

Fe/Ti=0 olan kaplamalarda TiO₂’nin daha iyi kalsine olabilmeleri için yüksek sıcaklıklarda çalışılmalıdır fakat Fe oranı artırılarak daha düzenli tane yapıları ufalan bir görüntü elde edilebilmiştir. Bunu da en iyi Şekil 6’da görebilmekteyiz. Şekil 7’de mikroyapı içerisinde gözenekli yapılar görülmektedir. Şekil 8’de ise kaplama kalınlığının sebep olduğu yetersiz yayılmadan oluşan hatalar görülmektedir. Kısaca artan Fe/Ti oranına göre daha homojen ve fazla gözenekli kaplamanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen termal işlemler neticesinde kaplamalarda herhangi bir dökülme gözlenmemiş olup bölgesel bazı çatlama yapıları olduğu gözlenmiştir.

AFM araştırmaları SEM analizleri ile birebir örtüşen sonuçlar vermiştir. Fe/Ti oranı arttıkça kaplamaların yüzeyleri eş aksenli ve homojene yakın bir dağılım göstermiştir. Bu durum kaplamanın daha iyi bir yapılaşma yüzeyine sahip olması bakımından kritik bir öneme sahiptir. Fe/Ti 0,73 oranında hazırlanan kaplamaların sırasıyla 0,07 ve 0,18 oranında hazırlanan kaplamalara kıyasla asperite oranlarının daha iyi olduğu ve daha iyi fotokatalitik özellikler göstereceğinin de bir kanıtıdır.

Fotokatalitik etkiye sahip malzemelerin zamanla içinde bulunduğu organik çözeltiyi parçaladığı ve böylece çözelti konsantrasyonunda düşme olduğu gözlemlenmiştir. Çözelti konsantrasyonu düştükçe çözelti rengi açıldığı gibi çözeltinin absorpsiyon değeri de düşmüştür. Absorpsiyon değerindeki düşüşün yüzdesel oranı aynı zamanda organik çözeltide parçalanma oranıyla paralellik gösterir. Dolayısıyla çözeltinin konsantrasyonu düştükçe absorpsiyon değeri azalır. 6 katlı kaplamaların sırasıyla Fe/Ti=0, 0.18, 0.73 ve 0.007 oranları için azalarak maksimum dalga boylarında elde edilen absorpsiyon değişimlerini göstermektedir. Buna göre Fe/Ti=0,73 kaplamaları için en yüksek parçalanma değeri göstermiş ve Fe miktarı arttıkça parçalanma yüzdesinde artış gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Sol-jel yöntemiyle kuvars camlar üzerinde anti bakteriyel uygulamalar için Fe ilave edilmiş TiO₂ kaplamalar başarıyla sentezlenmiştir. Fe/Ti oranı düştükçe çözelti içerisindeki klor miktarının artması sebebiyle çözeltinin asitliği artmaktadır. XRD analizleri cam altlıklar üzerine Fe-TiO₂ kaplamaların başarılı bir şekilde üretildiğini göstermektedir. Piklerin şiddetleri Fe/Ti oranlarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Jeller 300-600° C arasında ısı işleminden geçirilmiştir. Bu jel kaplama; 350°C' ye kadar amorf, 350-600°C arasında da anataz yapıdadır. İçerdiği demir miktarına göre piklerin değerleri değişmektedir. Şiddeti yüksek olan pikler ince filmlere aittir. DTA/TG sonuçlarına göre %26 toplam ağırlık kaybı meydana geldiği ve ağırlık kaybının 650°C' ye kadar devam ettiği görülmektedir. 500° C'ye kadar toplam ağırlığın %24'ü kaybedilirken 500-650 arasında ise %2'si kaybedilmiştir. Fe/Ti oranının artması ile homojen ve oldukça yüksek gözenekli kaplamanın elde edildiği bu sebeple de daha pürüzlü yüzeylerin oluştuğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak farklı Fe/Ti oranlarında gerçekleştirilen kaplamalarda Fe oranı arttıkça anataz fazının daha belirgin hale gelmesi sebebiyle fotokatalitik özelliklerin arttığı gözlenmiş ve veriler fotokatalitik testler ile doğrulanmıştır. Yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebiyle kaplamaların diğer yüzeylere yapışma direncinin daha yüksek olması ile en iyi kaplama ve fotokatalitik özellikler 0,73 oranındaki Fe/Ti alaşımlarında elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Akman, Beyza, et al. (2021). "Gıda ve Sağlık Uygulamaları İçin UV-A Işıma Altında Alternatif Bir Fotokatalizör Olarak: Doğal Melanin Nanoparçacıkları." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 32: 940-946.

Altıntaş Yıldırım, Ö., Gökçe, İ., Yıldırım, M. C., Ünalın, H. E., Sönmezoğlu, S., & Öztürk, T. (2019). Yeni nesil Zn₂SnO₄-GO-M (M: Mn, Co) foto katalizör kompozit yapıların sentezi, karakterizasyonu ve antibakteriyel özelliklerinin incelenmesi: 101-123.

Bulut, M., and Birben, Ü. (2019). "AB Su Çerçeve Direktifinin Türkiye'de su kaynakları yönetimine etkisi." *Turkish Journal of Forestry* 20.3: 221-233.

Dalkılıç, Feride. (2022). Gözenekli cam üzerine immobilize edilmiş nadir toprak iyonu katkılı TiO₂ ile sulardan boyar madde giderimi. *MS thesis. Konya Teknik Üniversitesi: (17-35)*

Dewi, Yolanda. (2019). Sintia. Sintesis dan karakterisasi fotokatalis TiO₂ mesopori terdoping galium (III) dengan variasi konsentrasi dopan Ga³⁺ menggunakan metode

sonikasi. *Diss. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim*, 103-120.

Dutta, Vishal, et al. (2021). "An overview on WO₃ based photocatalyst for environmental remediation." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9.1: 105018.

Guo, Qing, et al. (2019). "Fundamentals of TiO₂ photocatalysis: concepts, mechanisms, and challenges." *Advanced Materials* 31.50: 1901997.

Güner, Eda KELEŞ. (2023). "Kobalt Ferrit Nanoparçacıkların Sentezi, Karakterizasyonu ve Fotokataliz Uygulamaları: Farklı Çöktürücü Maddelerin ve Yöntemlerin Etkisi." *Journal of the Institute of Science and Technology* 13.1: 432-447.

Huang, Zhuquan, et al. (2021). "Insight into the real efficacy of graphene for enhancing photocatalytic efficiency: a case study on CVD graphene-TiO₂ composites." *ACS Applied Energy Materials* 4.9: 8755-8764.

İzgi, Mehmet Sait, et al. (2020). "Etkili Aktif Karbon Destekli Cds Fotokatalizörlerin Fotokatalitik Uygulamaları." *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 9.2: 662-670.

Liu, Xiangyu, et al. (2021). "Hollow CdS-based photocatalysts." *Journal of Materiomics* 7.3: 419-439.

Magdalane, C. Maria, et al. (2021). "Synthesis and characterization of TiO₂ doped cobalt ferrite nanoparticles via microwave method: Investigation of photocatalytic performance of congo red degradation dye." *Surfaces and Interfaces* 25: 101296.

Mohammed, Mustafa KA. (2020). "Sol-gel synthesis of Au-doped TiO₂ supported SWCNT nanohybrid with visible-light-driven photocatalytic for high degradation performance toward methylene blue dye." *Optik* 223: 165607.

Özdoğan, Nizamettin, and Kadir Özdemir. (2019). "İçme suyu kaynaklarındaki trihalometan oluşumunun incelenmesi." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 17: 776-785.

Özgür, Cihan. (2021). "Dezenfeksiyon ünitesi risk analizi: içme suyu arıtma tesisi." *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 10.1: 16-22.

Pamela Luberty Sinaga, Sisi. Studi Pengaruh Rasio Dopan. (2021). Fe₂O₃ dan Temperatur Kalsinasi

Terhadap Karakteristik Komposit TiO₂/Fe₂O₃ sebagai *Material Fotokatalis*. Diss. Universitas Brawijaya.

Pant, Bishweshwar, Mira Park, and Soo-Jin Park. (2019). "Recent advances in TiO₂ films prepared by sol-gel methods for photocatalytic degradation of organic pollutants and antibacterial activities." *Coatings* 9.10: 613.

Patial, Shilpa, et al. (2020). "Tunable photocatalytic activity of SrTiO₃ for water splitting: strategies and future scenario." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8.3: 103791.

Vahl, Alexander, et al. (2019). "Pathways to tailor photocatalytic performance of TiO₂ thin films deposited by reactive magnetron sputtering." *Materials* 12.17: 2840.

Wang, Yu-Hsiang, et al. (2020). "A review on the pathways of the improved structural characteristics and photocatalytic performance of titanium dioxide (TiO₂) thin films fabricated by the magnetron-sputtering technique." *Catalysts* 10.6: 598.

Yaqoob, Asim Ali, et al. (2020). "Advances and challenges in developing efficient graphene oxide-based ZnO photocatalysts for dye photo-oxidation." *Nanomaterials* 10.5: 932.

Zhang, Xuqiang, et al. (2022). "Boron substitution enhanced activity of B_xGa_{1-x}As/GaAs photocatalyst for water splitting." *Applied Catalysis B: Environmental* 300: 120690.