



## Hindi Kesimhanesi Atıksuyunda Fotokatalitik Arıtma ve Taguchi Metodu ile Optimizasyon

Gamze DOĞDU<sup>1\*</sup>, Nazmiye Ebru ŞEN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 14030, Bolu

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-0278-8503>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-1087-8939>

\*Sorumlu yazar: gamzedogdu@ibu.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 07.01.2022

Kabul tarihi: 06.06.2022

Online Yayınlanma: 10.03.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Atıksu arıtımı

Heterojen fotokataliz

Kanatlı endüstrisi atıksuyu

Yanıt yüzey metodolojisi (RSM)

### ÖZ

Heterojen fotokataliz, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), azot ve fosfor gibi yüksek seviyede organik kirleticiler içeren kanatlı endüstrisinden ham hindi kesimhanesi atık sularının arıtımında umut verici yeşil bir teknoloji olup arıtım potansiyeli şimdiye kadar yeterince incelenmemiştir. Bu çalışmada, hindi kesimhanesi atık suyunun fotokatalitik bozunması, Taguchi yöntemine dayalı bir yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) uygulanarak incelenmiştir. Bu amaçla, kritik çalışma parametreleri; fotokatalizör konsantrasyonu (0,5-3 g/L, A), pH (2-10, B), hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) konsantrasyonu (0-20 mmol/L, C), lamba türü (UVA, UVC, D) ve katalizör tipi (TiO<sub>2</sub>, ZnO, E) optimize edilmiştir. Bu deneysel faktörler karışık seviyelerde (4<sup>3</sup> 2<sup>2</sup>) ele alınmış ve L<sub>16</sub> testleri uygulanarak çalışma parametreleri optimize edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre katalizör ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu ile pH parametreleri atık sudan KOİ gideriminde en önemli etkiye sahiptir. Optimum koşullar şu şekilde elde edilmiştir: başlangıç katalizör dozu 0,5 g/L (Seviye 1), pH 2 (Seviye 1), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu 10 mmol/L (Seviye 3), lamba tipi UVA (Seviye 1) ve katalizör tipi ZnO (Seviye 2). Bu şartlar altında deneysel ve tahmini KOİ giderim verimleri sırasıyla %62 ve %63 olarak elde edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada, işletme maliyetini oluşturan en önemli faktör elektrik enerjisi tüketimi olurken kimyasal ve elektrik enerjisi maliyeti optimum koşullar altında 1.315 TL ve 32.325 TL olarak elde edilmiştir.

## Photocatalytic Treatment of Turkey Slaughterhouse Wastewater and Optimization by Taguchi Method

### Research Article

#### Article History:

Received: 07.01.2022

Accepted: 06.06.2022

Published online: 10.03.2023

#### Keywords:

Wastewater treatment

Heterogeneous photocatalysis

Poultry industry wastewater

Response surface methodology (RSM)

### ABSTRACT

Heterogeneous photocatalysis is a promising green technology in the treatment of raw turkey slaughterhouse wastewater from the poultry industry, which contains high levels of organic pollutants such as chemical oxygen demand (COD), nitrogen and phosphorus, and its treatment potential has not been adequately studied until now. In this work, the photocatalytic degradation of turkey slaughterhouse wastewater was studied by applying a response surface methodology (RSM) based on Taguchi method. For this purpose, critical operating parameters; photocatalyst concentration (0.5-3 g/L, A), pH (2-10, B), hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) concentration (0-20 mmol/L, C), lamp type (UVA, UVC, D), and catalyst type (TiO<sub>2</sub>, ZnO, E) were optimized. These experimental factors were handled in mixed levels (4<sup>3</sup> 2<sup>2</sup>), and operation parameters were optimized by the application of L<sub>16</sub> tests. According to ANOVA results, catalyst

and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration and pH parameters have the most important effects on COD removal from wastewater. Optimum conditions were obtained as: initial catalyst dosage of 0.5 g/L (Level 1), pH of 2 (Level 1), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration of 10 mmol/L (Level 3), lamp type as UVA (Level 1) and catalyst type as ZnO (Level 2). Under these conditions, experimental and estimated COD removal efficiencies were obtained as %62 and %63, respectively. In addition, in the study, electrical energy consumption is the most significant factor that creates the operating cost, while the chemical and electrical energy costs are 1.315 TL and 32.325 TL under optimum conditions.

---

**To Cite:** Doğdu G., Şen NE. Hindi Kesimhanesi Atıksuyunda Fotokatalitik Arıtma ve Taguchi Metodu ile Optimizasyon. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(1): 1-20.

## 1. Giriş

Günümüzde 295 milyondan fazla doğrulanmış vaka ile her kıtayı etkileyen COVID-19 salgını, yeterli miktarda sağlığa uygun ve temiz içme ve kullanma suyuna ulaşabilmenin insanlık için önemini göstermiştir (WHO, 2022). 21. yüzyılda küresel çapta en önemli problemlerden biri olan iklim değışikliği ve salgın hastalıkların yanı sıra, temiz içme suyu kaynaklarına ulaşım krizinin üstesinden gelebilmek ve günümüzde dünya genelinde %40'ın üzerinde insanı etkileyen su kıtlığı problemini çözebilmek amacıyla alternatif su kaynaklarının acilen keşfedilmesi veya mümkünse yenilikçi arıtım metotlarıyla arıtılan atık suların yeniden kullanılması gerekmektedir. (UN General Assembly, 2015). Diğer yandan, gıda endüstrisi ve tarım sektöründe oluşan son derece değışken miktar ve bileşimlerdeki atıksular, küresel ölçekte önemli bir çevre kirliliğini meydana getirmektedir (Hilares ve ark., 2021).

Küresel gıda talebindeki artışla birlikte tüketici için kırmızı ete göre daha ucuz ve yüksek güvenceye sahip olması yönleriyle kümes hayvanları için küresel talep artış göstermektedir (Baker ve ark., 2020; Bakar ve ark., 2019). FAO'ya göre 2017 yılında, yıllık 107 milyon ton beyaz et üretimi gerçekleşmişken 2023 yılında bu üretimin 10% artacağı öngörülmektedir (Weerasekara ve ark., 2016; FAO, 2017). Türkiye %1,9'luk pay ile dünya beyaz et üretiminde 10. sırada yer almış olup 2019 yılında 31 milyon ton beyaz et üretimi ve 440 bin ton beyaz et ihracatı gerçekleştirilmiştir (TÜİK, 2019; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2020). Bolu ili ise, 2019 yılında beyaz et üretiminin %11'ini sağlayan Türkiye'nin en önemli beş kentinden biridir (TÜİK, 2019; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2020). Tüm bu artan ucuz protein talebine karşılık, beyaz et üretimindeki artışa bağlı olarak her bir kanatlı işlemin için kullanılacak su miktarı (yaklaşık 26,5 L/kanatlı) ve kanatlı et kesimhane atığı üretimi artmaktadır (Njoya ve ark., 2019). Kanatlı atıksuları, kan, yağ, gres, protein, ağır metaller ve temizlik için deterjanlar gibi farklı kompleks organik ve inorganik maddeleri yanı sıra yüksek konsantrasyonlarda biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) ve KOİ, azot ve fosfor gibi besi maddeleri, toplam askıda katı madde (AKM) ve patojenler de içerir (Bustillo-Lecompte ve ark., 2016; Basitere ve ark., 2016). Ayrıca, arıtılmamış kanatlı atıksularının çevreye deşarjı hem ötrofikasyon ve kirlenmiş suları kullanan canlılarda enfeksiyona bağlı sağlık risklerine hem de atık su arıtma tesisleri

drenaj sistemlerinde tıkanıklık ve köpük oluşumu gibi problemlere neden olur (Emamjomeh ve Sivakumar, 2009; Azrina Yaakob ve ark.,2018; Abdelhay ve ark., 2020). Bu nedenlerle, Türkiye gibi kanatlı ürünlerine artan talebe bağlı finansal fayda sağlayan ve su kıtı olarak adlandırılan ülkelerde, bu ekonomik büyümenin sürdürülebilir olması için artan su kullanımı ve talebi sonucu oluşan büyük hacimdeki kanatlı atıksularının arıtılmasında yenilikçi arıtma teknolojilerinin aciliyeti kaçınılmazdır.

Türkiye’de kanatlı atıksularının arıtılması için kullanılan geleneksel yöntemlerin başında aerobik ve anaerobik biyolojik arıtım, koagülasyon/flokülasyon veya çözülmüş hava flotasyonu gelmektedir. Fakat bu yöntemler, sadece düşük kuvvetli atıksular için uygulanabilir olup, yüksek hacimli çamur oluşturmaları, uzun hidrolik bekleme süreleri, büyük hacimli reaktör ihtiyacı, askıda katı madde ve yağların birikimi sonucu düşük arıtım verimleri, aşındırıcı pıhtılaştırıcı ajanların depolanmasındaki güçlük ve ileri arıtım ihtiyacı dezavantajlara sahip olduklarından alternatif ve çevreyle dost arıtım proseslerine ihtiyaç duyulmaktadır (USEPA, 2009; Bazrafshan ve ark., 2012; Hilares ve ark., 2021). İleri oksidasyon prosesleri (İOP), özellikle hidroksil radikalleri (HO<sup>•</sup>) gibi oldukça reaktif radikal türlerin üretilmesine dayalı olup yüksek organik yük ve dayanıklı karaktere sahip atıksuların arıtılmasında oldukça verimlidir (Ferreira ve ark., 2020). İOP’lar içerisinde heterojen fotokataliz oldukça umut vadeden, verimli, ekonomik ve yeşil bir ileri oksidasyon metodu olup, TiO<sub>2</sub>, ZnO gibi yarı iletken bir fotokatalizör ve ultraviyole (UV) veya güneş ışığı gibi bir foton kaynağına bağlı kirletici içermeyen ve tükenmeyen bir prosestir (Vela ve ark., 2019). TiO<sub>2</sub> (~3,2 eV) ve ZnO (~3,37 eV) yaygın olarak kullanılan fonksiyonel yarı iletkenler olup düşük maliyetleri, kimyasal kararlılıkları, toksik özellik göstermemeleri ve yüksek foto-duyarlılık özelliklerinden dolayı bu çalışmada tercih edilmiştir (Saikia ve ark., 2015; Yan ve ark., 2021). Heterojen fotokataliz yöntemi temel mekanizmaları, fotokatalizör özellikleri Doğdu Okçu ve ark. (2019) ile Özkal ve Pagano (2016)’nun çalışmalarında detaylı olarak ele alınmıştır.

Kanatlı sektörü atıksularının son yıllarda literatürde farklı ileri oksidasyon metotları kullanılarak arıtımı çalışılmıştır (Thirugnanasambandham ve ark., 2014; Raju ve ark., 2014; Eryuruk ve ark., 2018; Samsudin ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2020; Garcia ve ark., 2020; Abdelhay ve ark., 2020; Cui ve ark., 2021). Bu çalışmada ise, ilk defa gerçek endüstriyel hindi kesimhanesi atıksuyunun heterojen fotokataliz prosesine arıtım performansı üzerinde fotokatalizör konsantrasyonu ve tipi (TiO<sub>2</sub> ve ZnO), pH, lamba türü (UVA ve UVC) ve hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) konsantrasyonu gibi beş farklı bağımsız çalışma parametresinin Taguchi istatistiksel dizaynı ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada ham hindi kesimhane atık suyunun fotokatalitik arıtımının çalışma maliyeti kimyasal ve elektrik enerjisi tüketimi yönleriyle incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyaller

Çalışmada kullanılan nano tanecikli TiO<sub>2</sub> (AEROXIDE® P25 ≥ %99,5, anataz form, 21 nm, 35–65 m<sup>2</sup>/g BET yüzey alanı) ve ZnO (<5 µm partikül büyüklüğü, %99,9; <10-25 m<sup>2</sup>/g) fotokatalizörleri Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Bir oksitleyici ajan olarak kullanılan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (%30) de Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Deneylerde istenilen pH koşullarının sağlanabilmesi için sodyum hidroksit (NaOH, %99 saflık) ve sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, %97 saflık) kimyasalları Merck firmasından temin edilmiştir.

### 2.2. Hindi Kesimhane Atık Suyu

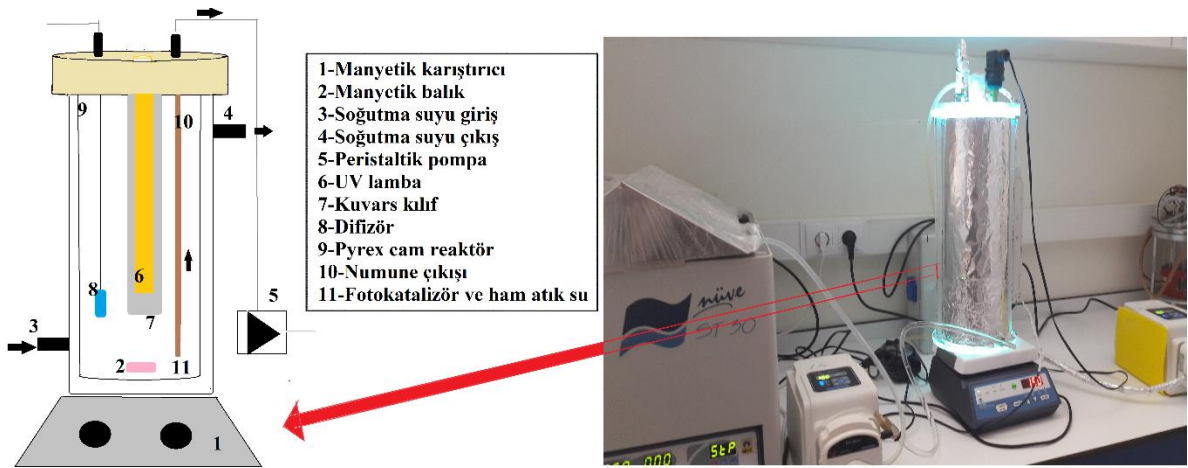
Hindi kesimhane atık suyu, günlük kapasitesi 7000 adet hindi olan ve ortalama 400 m<sup>3</sup> hindi atık suyu üreten Bolu (Türkiye) ilinde yer alan bir entegre tavukçuluk tesisinden temin edilmiştir. Tesisin hindi kesimhane ünitesi çıkış borusundan alınan numuneler ışık almayan, ağzı kapalı amber plastik numune şişelerinde +4°C'de buzdolabında saklanmıştır. Tablo 1'de ham hindi atık suyunun karakteristiği özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Ham hindi atık suyu karakterizasyonu. Veriler üç tekrarlı ortalama ± standart hatayı temsil eder

Parametre	Birim	Değer
pH	-	6,36 ± 0,01
Sıcaklık	°C	22,6 ± 0,06
Redoks Potansiyeli	mV	73,6 ± 0,71
Elektriksel İletkenlik	µS/cm	1622 ± 2,52
Bulanıklık	NTU	1546 ± 4,58
Renk	Pt/Co	4750 ± 50
AKM	mg/L	810 ± 127
KOİ	mg/L	2251 ± 15
NH <sub>4</sub> -N	mg/L	153 ± 15,3
NO <sub>2</sub> -N	mg/L	4,27 ± 0,21
NO <sub>3</sub> -N	mg/L	35 ± 1,00
PO <sub>4</sub> -P	mg/L	74 ± 3,00
Fiziksel görünüm	-	Kırmızı kahverengimsi
T-N	mg/L	605 ± 5,00
T-P	mg/L	21,6 ± 0,10

### 2.3. Reaktör Düzenegi ve Deneysel Metot

Fotokataliz deney düzenegi Şekil 1’de gösterilmiştir. Tüm fotokatalitik deneyler 140mm çaplı ve 300mm yüksekliğindeki çift cidarlı, silindirik Pyrex camdan üretilen kesikli bir reaktör içerisinde gerçekleştirilmiş olup çalışma hacmi 250 mL’dir. Reaktör fotokataliz süresince sabit  $25\pm 1^{\circ}\text{C}$  sıcaklığın sağlanabilmesi amacıyla reaktör sürekli su sirkülasyonunun sağlandığı ceket sisteminden oluşmuştur. Çalışmada kullanılan fotokataliz reaktörü hakkında detaylı bilgi Doğdu Okçu ve ark. (2019) çalışmasında verilmiştir. Reaktör içerisine yer alan bir kuvars kılıf içerisinde PL-L UVA lamba (Philips) (36W; 315-380 nm;  $110 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) ve UVC lamba (Philips) (36 W; 254 nm) yerleştirilmiştir. Çalışma boyunca bir difüzör yardımıyla ortama 3,5L/dk kapasitesinde hava verilmiştir. Reaktör içeriği katalizörün tüm reaktör boyunca eşit dağılım gösterebilmesi amacıyla deneyler boyunca 150 rpm’de bir manyetik karıştırıcıyla (Rocker HP 220) karıştırılmıştır. Reaktör, UV ışınlarının nüfuz etmesini önlemek için alüminyum folyo ile sarılmıştır. Adsorpsiyon durumunda sistemin dengeye ulaşmasını sağlamak için karanlıkta en az 30 dakika katalizör ilavesinin ardından reaktör içeriği karıştırılmıştır. Proses verimliliğini karşılaştırabilmek için fotokatalizörün sisteme eklenmeden fotoliz deneyleri de yapılmıştır. Ham hindi atık suyu numuneleri içeriğindeki tüy, kemik ve et parçacıklarını uzaklaştırmak için kaba filtreden geçirilmiş olup her bir deney öncesi ve sonunda numune alınarak 5000 rpm’de 15 dk santrifüjledikten sonra  $0,45 \mu\text{m}$ ’lik filtrelerden geçirilerek katalizörün uzaklaştırılması sağlanmıştır. KOİ giriş ve çıkış suyu örneklerinde Standart Metotlar (2005) tarafından Merck Pharo 100 spektrofotometresi ve Merck test kitleri (1,14541, 25–1500 mg/L) kullanılarak ölçülmüştür. PH ve iletkenlik, Termo Orion 5 Star cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Her bir deney 2 tekerrürlü olarak çalışılmıştır. KOİ ölçümlerinde  $\text{H}_2\text{O}_2$  ile girişimi önlemek için pH 10’un üzerine çıkarılarak çıkış suyu numunelerinde ölçüm yapılmıştır (Talinli ve Anderson, 1992).



Şekil 1. Fotokataliz sistemi için deneysel kurulum

#### 2.4. Taguchi Deney Tasarımı

Fotokataliz performansını etkileyen tüm parametreler Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Taguchi ortogonal metodunun bu çalışmada kullanılmasının nedeni, en az deneyle zaman ve maliyetten tasarruf sağlayarak kalite farklılığını azaltıp tasarım parametrelerinin en iyi kombinasyonunu bulmayı amaçlamasıdır (Raj ve Quen, 2005; Adar, 2021). Tablo 2, çalışmada kullanılan  $L_{16}$  ( $4^3 2^2$ ) ortogonal dizilimini göstermekte olup, 4 seviyeli 3 bağımsız ve 2 seviyeli iki bağımsız olmak üzere toplamda 16 deney setiyle 5 bağımsız faktörü (A:katalizör konsantrasyonu, B:pH, C:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu, D:Lamba türü, E:Katalizör türü) ifade etmektedir. KOİ giderim verimi yanıt parametresi olarak fotokataliz proses performansını değerlendirmek için seçilmiştir.

Sinyal/gürültü oranı (S/N) arıtım performansının istatistiksel bir ölçütü olup Taguchi metodu tarafından deneysel sonuçları (KOİ giderim verimi, %) analiz etmek için kullanılır. Sinyal faktörü, sistemden alınan gerçek değeri tanımlarken gürültü faktörü, deney tasarımına katılamayan ancak deneyin sonucunu etkileyen faktörleri ifade eder. 3 temel S/N oranı vardır: en yüksek en iyi, en düşük en iyi ve nominal en iyi. Maksimum KOİ giderim performansı elde etmek için, “en büyük en iyi” (Denklem 1) S/N oranı seçilmiştir (Ross, 1996):

$$\frac{S}{N} [\text{dB}] = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (1)$$

Burada n, deneysel tekrarların sayısı ve  $Y_i$ , i. deneyin performans değeri olarak tanımlanır.

Taguchi metodu ile optimizasyon ve istatistiksel analizler, Minitab 17.0 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2.** Deneysel faktörler ve seviyeleri

<b>Faktörler</b>	<b>Sembol</b>	<b>Seviye 1</b>	<b>Seviye 2</b>	<b>Seviye 3</b>	<b>Seviye 4</b>
A: Katalizör konsantrasyonu (g/L)	A	0,5	1	2	3
B: pH	B	2	5	7	10
C: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> konsantrasyonu (mmol/L)	C	0	5	10	20
D: Lamba türü	D	UVA	UVC	-	-
E: Katalizör çeşidi	E	TiO <sub>2</sub>	ZnO	-	-

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Optimum Çalışma Şartlarının Belirlenmesi

Taguchi L<sub>16</sub> dizaynı ve deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. KOİ giderim verimi %10 ile %62 arasında değişiklik gösterirken en yüksek KOİ giderim verimi deney 3'de elde edilmiştir. Optimum KOİ giderim verimi seviyesi için, katalizör konsantrasyonu, pH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu, lamba türü ve katalizör çeşidi arasındaki en etkili proses parametresini belirlemek için Taguchi yanıt tablosu kullanılmıştır. Tablo 4'te Denklem 1 kullanılarak hesaplanan S/N oranları verilmiştir. Her bir parametre seviyesi için ortalama S/N oranları da Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** L<sub>16</sub> deney dizaynının deneysel ve tahmini sonuçlar

Deney no	Faktör A	Faktör B	Faktör C	Faktör D	Faktör E	KOİ Giderim Verimi (%)			
						S/N (dB)	Ortalama değer	Tahmini S/N (dB)	Tahmini Ortalama Değer
1	1	1	1	1	1	32,75	43,41	32,11	42,28
2	1	2	2	1	1	30,88	34,98	31,52	36,10
3	1	3	3	2	2	35,86	62,08	36,68	62,78
4	1	4	4	2	2	34,32	52,02	33,50	51,33
5	2	1	2	2	2	30,15	32,16	29,64	30,70
6	2	2	1	2	2	21,67	12,12	22,18	13,57
7	2	3	4	1	1	26,19	20,39	26,37	20,53
8	2	4	3	1	1	29,83	31,02	29,65	30,88
9	3	1	3	1	2	31,61	38,05	31,86	39,06
10	3	2	4	1	2	24,87	17,51	24,61	16,50
11	3	3	1	2	1	20,59	10,70	20,16	10,12
12	3	4	2	2	1	23,21	14,47	23,64	15,05
13	4	1	4	2	1	25,88	19,68	26,77	21,24
14	4	2	3	2	1	26,87	22,05	25,97	20,48
15	4	3	2	1	2	24,14	16,11	23,57	15,85
16	4	4	1	1	2	19,63	9,58	20,20	9,83

Optimum koşullar A1, B1, C3 D1 ve E2'dir. S/N oranına göre, KOİ giderim verimi için optimum parametreler (koşullar), A (katalizör konsantrasyonu) seviye 1'de (0,5 g/L), B (pH) seviye 1'de (2), C (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu) seviye 3'de (10 mM), D (lamba türü) seviye 1'de (UVA) ve E (katalizör çeşidi) seviye 2'de (ZnO)'dir. Optimum koşullara göre, %62 KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

### 3.2. Ön Çalışmalar

Yapılan ön çalışmalar, fotokatalizör olmadan fotoliz prosesiyle UVA ve UVC ışık altında 45 dakika sonunda sırasıyla %13 ve %11 KOİ giderim performansı elde edilebildiğini ortaya koymuştur. Yani, atık suyun fotolizi ihmal edilebilir düzeyde olup, fotokatalizörün ( $\text{TiO}_2$  veya  $\text{ZnO}$ ) varlığında gözlenen bozunmanın fotokatalizör aktivitesinden kaynaklandığı görülmektedir. Ayrıca, UV ışık olmadan, 45 dakika çalışma süresi sonunda 0,5 g/L  $\text{TiO}_2$  kullanarak %5 KOİ giderimi elde edilmişken 0,5 g/L  $\text{ZnO}$  katalizörü ile %13 KOİ giderim verimi gözlenmiş olup katalizörler üzerinde kirleticilerin adsorpsiyonunun ihmal edilebilir olduğu söylenebilir. Verma ve ark. (2014), KOİ değerindeki azalmanın sebebinin katalizör yüzeyinde kirletici tek tabakanın oluşmasına bağlamaktadır. Yani ışınlanmış atıksuya fotokatalizörler eklenir eklenmez atık sudaki kirleticiler fotokatalizör yüzeyine adsorbe olarak tutunacak; bu da hiçbir serbest aktif bölgesi kalmayan tek kirletici tabakanın oluşmasına olanak sağlayacaktır. Optimum koşullar altında ise UVA ve 0,5 g/L  $\text{ZnO}$  varlığında KOİ giderim verimi %62'ye yükselmiş olup bu durum adsorpsiyon-desorpsiyon veya ara ürün oluşumunun elektron-boşluk oluşumuna göre oldukça yavaş olduğunu göstermiştir (Verma ve ark., 2014).

Bunun yanında, çalışmada UV lambanın açılmasından 45 dakika sonra KOİ giderim verimi maksimum olarak gözlemlenmiş olup bu dakikadan sonra çalışma süresinin artmasına rağmen oksidasyon sonucu muhtemel oluşan ara ürünlerden dolayı (Doğdu Okçu ve ark., 2019) KOİ giderim performansı hızla düşüş göstermiştir. Benzer olarak, Çancı ve Kılıç (2020) gül işleme atık sularının güneş ışığı ve  $\text{TiO}_2$  kullanarak fotokataliz prosesiyle arıttıkları çalışmada, 30 dakika fotokataliz sonunda KOİ giderimini %11 olarak bulmuş olup, 30 dakikadan sonra reaksiyon hızının artan reaksiyon süresine karşın azaldığını gözlemlenmişlerdir. Bu durumu, oluşan renkli ara ürünlerin, ana moleküllerle rekabeti sonucu reaksiyon hızının ve dolayısıyla KOİ giderim performansının azalmasıyla açıklamışlardır (Ghaly ve ark., 2011). Bu nedenle bu çalışmanın süresi 45 dakika olarak belirlenmiştir.

**Tablo 4.** KOİ giderimi (%) için S/N yanıt tablosu

	KOİ Giderim Verimi (%)				
	Katalizör konsantrasyonu (g/L)	pH	$\text{H}_2\text{O}_2$ konsantrasyonu (mM)	Lamba türü	Katalizör çeşidi
Seviye	A	B	C	D	E
1	<b>33,45</b>	<b>30,1</b>	23,66	<b>27,49</b>	27,02
2	26,96	26,07	27,09	27,32	<b>27,78</b>
3	25,07	26,69	<b>31,04</b>	-	-
4	24,13	26,75	27,81	-	-
Delta	9,32	4,03	7,38	0,17	0,76
Sıra	1	3	2	5	4



### 3.3. İstatistiksel Analiz

Tek yönlü varyans analizi (ANOVA) beş bağımsız değişkenin ve bu değişkenlerin kendi aralarındaki etkileşimin önemini ortaya koymuş olup, sonuçta gözlemlenen toplan varyasyona göre her bir bağımsız faktörün ne kadar varyasyona neden olduğunu sonuçlardan çıkarmayı hedeflemektedir (Daneshvar ve ark., 2007). Tablo 5 fotodegradasyon prosesiye KOİ giderim veriminin ANOVA sonuçlarını göstermektedir. Parametrelerin istatistiksel önemi Fisher F-testi ile kontrol edilmiş olup, büyük F değeri, karşılık gelen terimin çok fazla anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Analiz %95 güven düzeyi,  $\alpha=0,05$  anlamlılık düzeyi için değerlendirilmiştir. 0,05’den küçük p değerleri parametrelerin önemini temsil ederken 0,1’den daha büyük değerleri model terimlerinin anlamsız olduğunu göstermektedir. Bu durum, gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir p değerinin oluşma ihtimalinin sadece %5 olduğuna işaret etmektedir.

**Tablo 5.** Fotokataliz prosesi tarafından ANOVA sonuçları

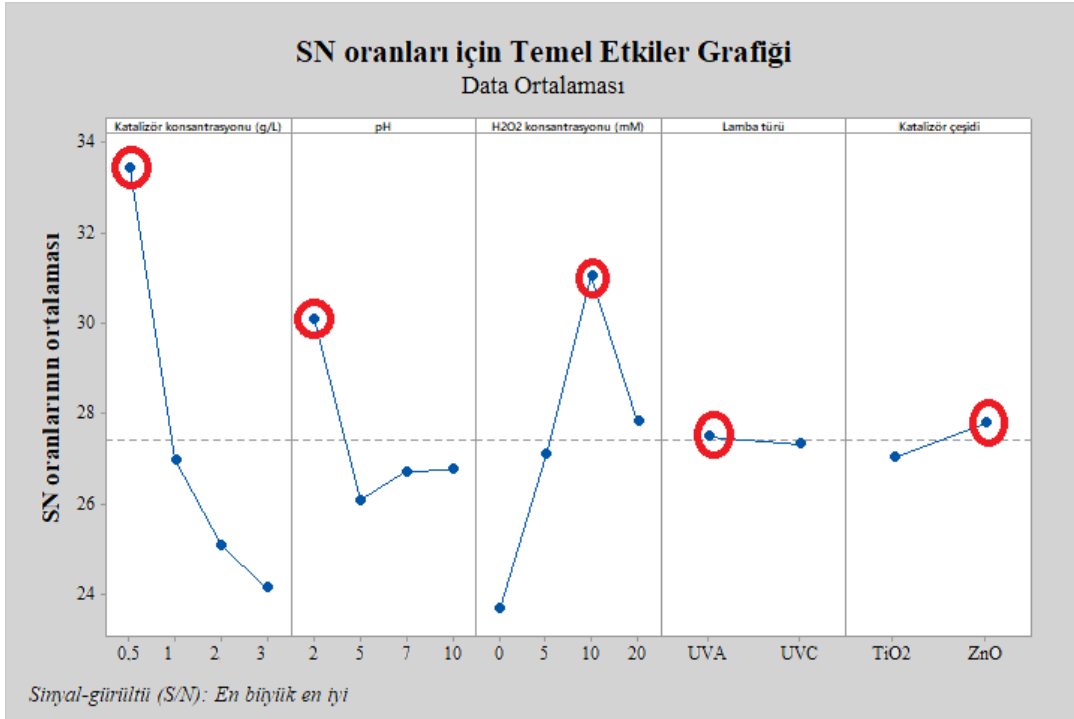
Kaynak	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler		F Oranı	P-değeri	% Katkı
		Toplamı (SS)	Ortalaması (MS)			
KOİ Giderimi						
A	3	2419,01	806,336	208,58	0,000	<b>%66,61</b>
B	3	273,3	91,1	23,57	0,005	%7,53
C	3	795,940	265,312	68,63	0,001	<b>%21,92</b>
D	1	12,65	12,653	3,27	0,145	%0,35
E	1	115,26	115,26	29,82	0,005	%3,17
Hata	4	15,46	3,866			%0,43
Toplam	15	3931,62				%100,00

Tablo 5’te verilen ANOVA sonuçlarına göre, KOİ giderimine katkıda bulunan istatistiksel olarak en önemli faktör katalizör konsantrasyonu (A) olup bunu sırasıyla H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu (C), pH ve katalizör çeşidi (E) takip etmektedir. Fakat KOİ giderimine %0,35 ile en düşük katkıyı sunan lamba türünün fotokataliz prosesine katkısı istatistiksel olarak anlamlı değildir (F=3,27, p=0,145, p< $\alpha$ ). Tablo 5’e göre, hata %0,43 olup (<%50) sınır değerden oldukça küçüktür. Buna göre deneylerin hata payının istatistiksel olarak anlamlı değildir. R<sup>2</sup> ve düzeltilmiş R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 0,9957 ve 0,9840 olarak elde edilmiş olup her durumda, bu değerlerin tahmin edilen ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir korelasyon olduğunu doğrulamaktadır. Model korelasyon katsayısı değeri 0,80’den yüksek olduğundan prosesin regresyon modelleriyle açıklanabilir olduğunu göstermekte olup (Yazıcı Güvenç ve Varank, 2019) bir veya çoklu proses değişkenleriyle yanıtın (% KOİ giderimi) arasındaki matematiksel ilişkinin analizi böylelikle belirtilebilir.

Gerçek hindi atık suyu çıkış suyundaki KOİ giderim verimi üzerinde proses parametrelerinin temel etki grafiği Şekil2’de açıkça gösterilmiştir. KOİ giderimi üzerinde en büyük katkı (%67) gösteren fotokatalizör konsantrasyonu parametresi fotokatalitik parçalanma prosesinde oldukça büyük bir öneme sahiptir. 0,5-3 g/L arasında 4 farklı dozlarda fotokatalizör konsantrasyonları çalışmada test edilmiştir. Buna göre fotokatalizör konsantrasyonu 0,5 g/L’den 3,0 g/L’ye yükseldiğinde, S/N oranı hızla düşmüştür. Bu nedenle optimum fotokatalizör dozu 0,5 g/L olarak belirlenmiştir. Proses veriminin azalmasındaki en önemli sebepler şu şekilde sıralanabilir: 1. fotokatalizörün çözeltide yüksek miktarda varlığının bir sonucu olarak çözeltide bulanıklığın artması, UV ışınlarını bloke edecek veya yansıtacak böylece ışık nüfuzunu azaltarak kirlenmelerin parçalanma hızını düşürecektir; 2. fotokatalizör partiküllerinin birikmesi veya kütlenin topaklanmasıyla katalizörün aktif bölgelerine daha az ulaşılabilirlik sağlanacaktır(Naresh Yadav ve ark., 2021; Tien ve ark., 2021; Thind ve ark., 2018; Chong ve ark., 2010).

İkinci olarak, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> güçlü bir oksitleyici ajan olup foto-oksidasyon hızını arttırdığından dolayı Tablo 5’de belirtildiği gibi KOİ giderim verimi üzerinde en yüksek ikinci etkiye (%22) sahiptir. Şekil 2’de görüldüğü gibi, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu 0 mmol/L’den 10 mmol/L’ye arttırıldığında, S/N oranı hızla artmıştır.

Bu çalışmadaki sonuçlara benzer olarak, Konstantinou ve Albanis (2004) çalışmasında TiO<sub>2</sub>/UV ile birlikte H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>’nin kullanılmasının hidroksil radikallerinin oluşumunu arttırdığını bildirmişlerdir. Fakat H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu 10 mmol/L’den 20 mmol/L’ye çıkarıldığında S/N oranı azalmıştır. Pouloupoulos ve ark., (2021) bu durumu H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>’nin hidroksil radikalleri ile reaksiyona girebildiği için fotodegradasyon sürecini engelleyebilmesi ve böylece <sup>•</sup>OH tutucu olarak hareket etmesiyle açıklamıştır.



Şekil 2. KOİ giderim verimi (%) için S/N yanıt tablosu

Fotokatalitik oksidasyon prosesinde reaksiyon karışımının pH'ı fotokatalizörün yüzey yükünü etkilediğinden ve iyonlaşma derecesini belirlediğinden dolayı proseste kritik bir öneme sahiptir (Bukhari ve ark., 2019). Şekil 2'de görüldüğü gibi en yüksek S/N oranı asidik koşullarda pH 2'de elde edilmiş olup pH 2'den 5'e yükseldikçe, KOİ gideriminde marjinal bir düşüş sağlanmış ve son olarak pH hafifçe 10'a yükselme eğilimi göstermiştir. Bu eğilim hindi atık suyundaki başlangıçtaki organik bileşiklerin ara ürünlere ayrılarak sonuçta karbon dioksit'e ayrılan organik asitleri oluşturmasıyla açıklanabilmektedir (Poulopoulos ve ark., 2021). Yüksek pH değerlerinde, hidroksil radikallerinin oksidasyon potansiyeli ve oluşum hızı azalacağından dolayı KOİ giderimi düşmektedir (Ayare ve Gogate, 2020). Literatürde birçok farklı fotokatalitik oksidasyon çalışmasında kirleticilerin düşük pH koşullarında daha verimli bir şekilde fotokatalizörler tarafından parçalandığı görülmüştür (Ferreira ve ark., 2020; Bhatia ve ark., 2021; Domingues ve ark., 2021). TiO<sub>2</sub> ve ZnO fotokatalizörleri için yükün sıfır noktası (pH<sub>zpc</sub>) sırasıyla yaklaşık 6,50 ve 9,0 olduğundan fotokatalizör yüzeyi asidik pH'de H<sup>+</sup> iyonunu absorplayarak pozitif yüklenirken hindi atık suyundaki kirletici moleküller negatif yüklenerek hızla parçalanabilecektir (Prieto ve ark., 2005; Soltani ve ark., 2016).

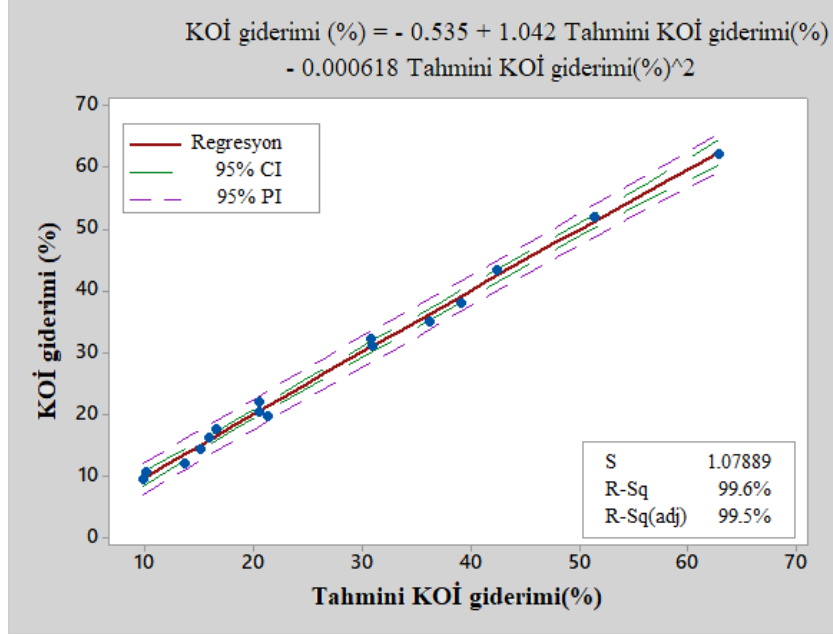
Ham hindi atık suyunun fotokatalitik oksidasyon prosesiyle arıtımında ultraviyole ışımaya türü istatistiksel olarak KOİ gideriminde anlamlı bulunmamıştır (F=3,27, p=0,125, p>α). Diğer yandan, Şekil 2'de gösterildiği gibi, ZnO fotokatalizörünün fotokatalitik performansı ham hindi atık suyundan KOİ gideriminde TiO<sub>2</sub> fotokatalizörüne göre daha yüksek olduğu ortaya koyulmuştur. Bunun nedeni, ZnO'nin TiO<sub>2</sub> ile benzer bant genişliği enerjisine (3,37 eV) sahip olmasına rağmen, boya vb. kirletici moleküllerin asidik ve alkali ortamlarda katalitik parçalanmasında daha yüksek bir performans sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Talebian ve ark., 2013; Bozkurt Çırak ve ark., 2019).

Regresyon analizi, bir veya birden fazla proses değişkeni ile yanıt (KOİ giderim verimi) arasındaki matematiksel bir ilişkinin modellenmesini veya analizini ifade etmektedir. Bu çalışmada, KOİ giderim verimlerinin tahmin edilmesinde kullanılacak denklemleri hesaplamak için regresyon analizi kullanılmıştır. Lineer modeller, TiO<sub>2</sub> katalizörü için Denklem 2 ve ZnO katalizörü için Denklem 3'de gösterildiği gibi denklem tahminleriyle formüle edilmiş olup lineer regresyon modeli denklemleriyle elde edilen R<sup>2</sup> değeri KOİ giderimi için %48 olarak elde edilmiştir.

$$\text{TiO}_2 \text{ katalizörü için; } \text{KOİ giderimi (\%)} = 41,2 - 10,40 \text{ Katalizör konsantrasyonu (g/L)} - 0,60 \text{ pH} + 0,451 \text{ H}_2\text{O}_2 \text{ konsantrasyonu (mM)} \quad (2)$$

$$\text{ZnO katalizörü için; KOİ giderimi (\%)} = 46,5 - 10,40 \text{ Katalizör konsantrasyonu (g/L)} - 0,60 \text{ pH} + 0,451 \text{ H}_2\text{O}_2 \text{ konsantrasyonu (mM)} \quad (3)$$

Şekil 3'te gösterildiği gibi, tahmini KOİ giderim verimi değerleri deneysel sonuçlarla iyi bir korelasyon sergilemiş olup KOİ giderimi için  $R^2$  değeri %99,6 olarak hesaplanmıştır. İkinci dereceden regresyon modeli, lineer regresyon modelinden daha kapsamlı tahmin değerleri üretmiş olup daha iyi bir performans sergilemiştir.



Şekil 3. % KOİ giderimi için deneysel sonuçlarla karşılaştırılan ikinci derece regresyon modeli

#### 3.4. Ekonomik Analiz

Endüstriyel işletmelerde kullanılan teknolojinin ekonomik etkisi, bu teknolojinin gerçek bir senaryoda uygulanabilirliğini belirlemede önemli bir faktördür. İdeal bir teknoloji endüstriyel tesiste işletim maliyetini azaltmak amacıyla verimli, maliyeti düşük ve uygulaması kolay olmalıdır (Fernandes ve ark., 2020). Ham hindi kesimhanesi atık sularının fotokataliz prosesiyle arıtımının endüstriyel bir tesise uygulanabilirliğini test etmek amacıyla prosesin ekonomik analizi mineralizasyon prosesinin analiziyle (ham atık sudan KOİ degradesyonu) yapılmıştır. Yapılan ekonomik analizde Deney 3'deki optimum koşullar altında elde edilen maksimum KOİ giderim koşulu dışında %30 ve üstü KOİ'nin giderildiği denemelerdeki (Deney 1,2,4,5,8,9, Tablo 3) toplam maliyet (enerji ve kimyasal) Tablo 7'de gösterilmiştir. İşletme maliyeti, kimyasal ve enerji maliyetlerinin toplamına eşittir. Toplam harcanan güç (kWh) ve toplam elektrik tüketimi maliyeti her g KOİ giderimi için (TL/g) Denklem 4 ve Denklem 5'e göre hesaplanmıştır (Asha ve ark., 2015):

$$\text{Toplam harcanan güç (kWh)} = \frac{\text{Harcanan güç (W)} \times \text{Reaksiyon süresi (dk)}}{(1000 \times 60)} \quad (4)$$

$$\text{Toplam elektrik tüketimi maliyeti (TL/kg)} = \frac{\text{Toplam harcanan güç (kWh)} \times \text{Gücün birim maliyeti} \left( \frac{\text{TL}}{\text{kWh}} \right)}{\left( C_{\text{başlangıç,KOI}} - C_{\text{çıkış,KOI}} \right) \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \text{Çalışma hacmi (L)}} \times 10^3 \left( \frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) \quad (5)$$

Reaktif ve katalizör gibi kimyasal fiyatları ile kullanılan farklı cihazların elektrik tüketimi maliyetlerin hesaplanmasında kullanılmış olup Tablo 6’da maksimum KOİ giderimine karşın tüketilen kimyasal miktarları verilmiştir.

**Tablo 6.** Kimyasal, elektrik maliyetive elektrik gücü

<b>ELEKTRİK GÜCÜ</b>	
Peristaltik pompa *2	0,06 kW
Hava pompası	0,003 kW
UV lamba	0,036 kW
<b>ENERJİ MALİYETİ (sanayi) (TEDAŞ, 2021)</b>	
64.8683kr/kWh	
<b>KİMYASAL MALİYETİ*</b>	
Hidrojen peroksit	25,2 €/L
TiO <sub>2</sub> katalizörü	2,02 €/g
ZnO katalizörü	0,136 €/g
Arıtılan atık suyun hacmi	0,25 L

\*1 € ≈ 15 TL olarak alınmıştır.

Tablo 7’de çalışmadaki KOİ gideriminin %30 ve üstü olan deneylere ait toplam kimyasal ve elektrik enerjisi tüketimi özetlenmiştir. Kimyasal maliyeti, deneylerde kullanılan katalizör ve hidrojen peroksitin toplamına eşittir. Toplam elektrik gücü UV lamba, hava pompası ve peristaltik pompaların toplamına eşittir.

Tablo 7’ye göre maksimum KOİ gideriminin gerçekleştiği (%62) Deney 3’te toplam elektrik tüketimi %96 (32 TL/g KOİ) iken toplam çalışma maliyetinin sadece %4’ünü (1TL) kimyasal maliyeti oluşturmaktadır. Ayrıca H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanım miktarı arttıkça, toplam elektrik maliyeti azalmaktadır. Çalışmada ZnO katalizörü hem daha ekonomik hem de yüksek arıtım performans sergilediğinden çalışma maliyeti azalmıştır.

**Tablo 7. 1 g KOİ giderimi için toplam kimyasal ve elektrik tüketim maliyetleri**

Deney No	TiO <sub>2</sub> miktarı (g)	ZnO miktarı (g)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> miktarı (L)	TiO <sub>2</sub> maliyeti (TL)	ZnO maliyeti (TL)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> maliyeti (TL)	Toplam kimyasal maliyeti (TL)	Toplam elektrik tüketim maliyeti (TL/g)
1	0,5	-	-	15,15	-	-	15,150	48,774
2	0,5	-	0,00039	15,15	-	0,147	15,297	54,270
3	-	0,5	0,00078	-	1,02	0,295	<b>1,315</b>	<b>32,325</b>
4	-	0,5	0,00156	-	1,02	0,590	1,610	74,965
5	-	1	0,00039	-	2,04	0,147	2,187	105,857
8	1	-	0,00078	30,3	-	0,295	30,595	37,409
9	-	2	0,00078	-	4,08	0,295	4,375	44,804

#### 4. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada ilk kez ham hindi kesimhanesi atık suyu ileri oksidasyon proseslerinden biri olan fotokataliz metoduyla arıtılmıştır. Bu çalışmaya ait aşağıdaki önemli sonuçlar elde edilmiştir:

1. Fotokataliz prosesiyle 45 dakika çalışma periyodu sonucunda maksimum KOİ giderim veriminin gerçekleştiği optimum arıtım koşulları, 0,5 g/L ZnO fotokatalizörü, 10 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UVA ışınması altında ve pH 2’de gerçekleşmiştir.

2. Ham hindi kesimhanesi atık sularının arıtılması için fotokataliz prosesi ilk etapta kirletici giderimini %50’den daha yüksek miktarda arıtım performansı gösterdiğinden dolayı kanalizasyon sistemine direkt deşarjda oluşabilecek organik kirletici yükünü azaltacaktır. Ayrıca heterojen fotokataliz prosesinin, endüstriyel tesisin gerçek zamanlı atık sularının hızlı, ekonomik olarak arıtılmasında ön arıtım ve/veya üçüncül arıtım teknolojisi olarak kullanılabilirliği bu çalışmayla kanatlı endüstrisi yöneticilerine yol gösterebilmektedir.

3. Fotokataliz prosesinde çalışma maliyetinin en büyük bölümünü elektrik enerjisi maliyeti oluşturup bunun azaltılması için güneş ışınmasının kullanılması pilot ölçekli bir sonraki çalışma için planlanmaktadır.

#### Teşekkür

“Hibrit ultrases ve ileri oksidasyon prosesleri kullanılarak kanatlı endüstrisi atıksularının arıtılması” isimli “2021.09.02.1498” numaralı proje Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

## **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

İlk yazar “başlıca yazar” olarak çalışmanın tasarım ve konsepti, verilerin elde edilmesi, analizi, yorumlanması ve makalenin hazırlanmasında katkıda bulunurken, ikinci yazar çalışmada numunelerin alınması, deneylerin yapılması, verilerin elde edilmesi ve analizinde katkı sağlamıştır.

## **Kaynakça**

- Abdelhay A., Othman AA., Absoul A. Treatment of slaughterhouse wastewater using high-frequency ultrasound: optimization of operating conditions by RSM. *Environmental Technology* 2020; 42(26): 4170-4178.
- Adar E. The removal of Astrazon Black MBL with an innovative adsorbent: Optimization of operating parameters with Taguchi method. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 2021; 27(6): 729-736.
- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association (APHA), Washington, DC, USA, 2005.
- Asha RC., Vishnuganth MA., Remya N., Selvaraju N., Kumar M. Livestock wastewater treatment in batch and continuous photocatalytic systems: performance and economic analyses. *Water, Air, & Soil Pollution* 2015; 226: 132.
- Ayare SD., Gogate PR. Sonophotocatalytic oxidation based treatment of phthalocyanine pigment containing industrial wastewater intensified using oxidising agents. *Separation and Purification Technology* 2020; 233: 115979.
- Azrina Yaakob M., Maya Saphira Radin Mohamed R., Al-Gheethi A., Tun Hussein Onn Malaysia U., Shiun Lim J., Shin Ho W., Kleme's JJ., Ali Saeed Al- Gheethi A., Hashim Mohd Kassim A. Characteristics of chicken slaughterhouse wastewater. *Chemical Engineering Transactions* 2018; 63: 637-642.
- Bakar JA., Mohamed RMSR., Baker MBR., Al-Gheethi AAS., Fitriani N. Small-scale chicken slaughterhouse industries: Production and its effluent quality characteristics. *Pollution Research* 2019; 38: S43-S48.
- Baker BR., Mohamed R., Al-Gheethi A., Aziz HA. Advanced technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A systematic review. *Journal of Dispersion Science and Technology* 2020; 42(6): 880-899.

- Başbuğ Çancı M., Kılıç M. Treatment of Rose Processing Wastewater by Sunlight/TiO<sub>2</sub> Photocatalysis Process. *Bilge International Journal of Science and Technology Research* 2020; 4(1): 1-6.
- Basitere M., Williams Y., Sheldon S., Ntwampe, SKO., De Jage D., Dlangamandla, C. Performance of an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor coupled with anoxic and aerobic bioreactors for treating poultry slaughterhouse wastewater. *Water Practice and Technology* 2016; 11(1): 86-92.
- Bazrafshan E., Mostafapour FK., Soori MM., Mahvi AH. Application of combined chemical coagulation and electrocoagulation process to carwash wastewater treatment. *Fresenius Environmental Bulletin* 2012; 21(9a): 2694–2701.
- Bhatia V., Dhir A., Ray AK. Photocatalytic degradation of atenolol with graphene oxide/zinc oxide composite: Optimization of process parameters using statistical method. *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry* 2021;409: 113136.
- Bozkurt Çırak B., Çağlar B., Kılınç T., Morkoç Karadeniz S., Erdoğan Y., Kılıç S., Kahveci E., Ekinci AE., Çırak Ç. Synthesis and characterization of ZnO nanorice decorated TiO<sub>2</sub> nanotubes for enhanced photocatalytic activity. *Materials Research Bulletin* 2019; 109:160–167
- Bukhari K., Ahmad N., Sheikh IA., Akram TM. Effects of different parameters on photocatalytic oxidation of slaughterhouse wastewater using TiO<sub>2</sub> and Silver-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Polish Journal of Environmental Studies* 2019; 28(3): 1591-1600.
- Bustillo-Lecompte CF., Ghafoori S., Mehrvar M. Photochemical degradation of an actual slaughterhouse wastewater by continuous UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> photoreactor with recycle. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2016; 4:719–732.
- Chong MN., Jin B., Chow CWK., Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Water Research*, 2010; 44:2997-3027.
- Cui H., Yu J., Zhu X., Cui Y., Ji C., Zhang C., Xue J., Jia X., Qin S., Li R. Advanced treatment of chicken farm flushing wastewater by integrating Fenton oxidation and algal cultivation process for algal growth and nutrients removal. *Journal of Environmental Management* 2021; 298: 113543.
- Daneshvar N., Khataee AR., Rasoulifard MH., Pourhassan M. Biodegradation of dye solution containing Malachite Green: Optimization of effective parameters using Taguchi method. *Journal of Hazardous Materials* 2007; 143(1-2): 214-219.
- Doğdu Okçu G., Ökten H.E., Yalçuk A. Fotobiyokataliz yöntemi kullanılarak pestisit giderimi-derleme çalışması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2019; 8(2): 675-688.
- Doğdu Okçu G., Ökten HA., Yalcuk A. Heterogeneous photocatalytic degradation and mineralization of 2,4-dichlorophenoxy acetic acid (2,4-D): its performance, kinetics, and economic analysis. *Desalination and Water Treatment* 2019; 137: 312-327.



- Doğdu Okçu G., Tunacan T., Dikmen E. Photocatalytic degradation of yellow 2G dye using titanium dioxide/ultraviolet A light through a Box–Behnken experimental design: Optimization and kinetic study. *Journal of Environmental Science and Health A* 2019; 54: 136-145.
- Domingues FS., Geraldino HCL., de Souza Freitas TKF., de Almeida CA., de Figueiredo FF., Garcia, JC. Photocatalytic degradation of real textile wastewater using carbon black-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> composite catalyst under UV/Vis irradiation. *Environmental Technology* 2021; 42(15): 2335–2349.
- Emamjomeh MM., Sivakumar M. Review of pollutants removed by electro- coagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management* 2009; 90: 1663–1679.
- Eryuruk K., Tezcan Un U., Bakır Oğutveren U. Electrochemical treatment of wastewaters from poultry slaughtering and processing by using iron electrodes. *Journal of Cleaner Production* 2018; 172: 1089–1095.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Water for Sustainable Food and Agriculture A report produced for the G20 Presidency of Germany, 2017. Erişim adresi: <http://www.fao.org/3/a-i7959e.pdf>, (Erişim tarihi: 14 Kasım 2020).
- Fernandes A., Makoş P., Wang Z., Boczka G. Synergistic effect of TiO<sub>2</sub> photocatalytic advanced oxidation processes in the treatment of refinery effluents. *Chemical Engineering Journal* 2020; 391: 123488.
- Ferreira LC., Fernandes JR., Rodríguez-Chueca J., Peres JA., Lucas MS., Tavares PB. Photocatalytic degradation of an agro-industrial wastewater model compound using a UV LEDs system: kinetic study. *Journal of Environmental Management* 2020; 269: 110740,
- Garcia BB., Lourinho G., Romano P., Brito PSD. Photocatalytic degradation of swine wastewater on aqueous TiO<sub>2</sub> suspensions: optimization and modeling via Box-Behnken design. *Heliyon* 2020; 6: 03293.
- Ghaly MY., Jamil TS., El-Seesy IE., Souaya ER., Nasr RA. Treatment of highly polluted paper mill wastewater by solar photocatalytic oxidation with synthesized nano TiO<sub>2</sub>. *Chemical Engineering Journal* 2011; 168:446–454.
- Hilares RT., Atoche-Garay, DF., Pagaza, DAP., Ahmed MA., Andrade, GJC., Santos JC. Promising physicochemical technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2021; 9: 105174.
- Konstantinou IK., Albanis TA. TiO<sub>2</sub>-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: kinetic and mechanistic investigations a review. *Applied Catalysis B: Environmental* 2004; 49(1): 1–14.

- Naresh Yadav D., Anand Kishore K., Saroj D. A Study on removal of Methylene Blue dye by photocatalysis integrated with nanofiltration using statistical and experimental approaches. *Environmental Technology* 2021; 42(19): 2968-2981.
- Njoya M., Basitere M., Ntwampe SKO. Analysis of the characteristics of poultry slaughterhouse wastewater (PSW) and its treatability. *Water Practice & Technology* 2019; 14(4): 959-970.
- Özkal CB., Pagano SM. Antibiyotik ve antibiyotiklere dirençli bakterilerin fotokataliz prosesi ile gideriminin değerlendirilmesi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2016; 5(1): 1-18.
- Poulopoulos SG., Ulykbanova G., Philippopoulos CJ. Photochemical mineralization of amoxicillin medicinal product by means of UV, hydrogen peroxide, titanium dioxide and iron. *Environmental Technology* 2021; 42:2941-2949.
- Prieto O., Feroso J., Nuñez y., del Valle JL., Irusta R. Decolouration of textile dyes in wastewaters by photocatalysis with TiO<sub>2</sub>. *Solar Energy* 2005; 79(4): 376-383.
- Raj CB., Quen CHL. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: optimization of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process through a statistical technique. *Chemical Engineering Science* 2005; 60(19): 5305–5311.
- Raju AC., Chandra BS., Shukla A., Reja VK., Anish K., Neelancherry, R. Photocatalytic Treatment of Poultry Wastewater by Hectorite- TiO<sub>2</sub> aqueous suspensions. Conference: International Conference on Chemical and Environmental Research (ICCER), JMC College Trichy, Tamilnadu India, 2014.
- Ross PJ. Taguchi Techniques for Quality Engineering. McGraw-Hill, New York, NY; 1988.
- Saikia L., Bhuyan D., Saikia M., Malakar B., Dutta DK., Sengupta P. Photocatalytic performance of ZnO nanomaterials for self sensitized degradation of malachite green dye under solar light. *Applied Catalysis A: General* 2015; 490:42–49.
- Samsudin MFR., Jayabalan PJ., Ong WJ., Ng YH., Sufian S. Photocatalytic degradation of real industrial poultry wastewater via platinum decorated BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalyst under solar light irradiation. *Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry* 2019; 378: 46–56.
- Soltani DC., Jorfi R., Safari S., Rajaei M., Sadegh M. Enhanced sonocatalysis of textile wastewater using bentonite- supported ZnO nanoparticles: Response surface methodological approach. *Journal of Environmental Management* 2016; 179:47-57.
- Talebian N., Nilforoushan MR., Mogaddas FJ. Comparative study on the sonophotocatalytic degradation of hazardous waste. *Ceramics International* 2013; 39: 4913–4921.
- Talinli I., Anderson GK. Interference of hydrogen peroxide on the standard cod test. *Water Research* 1992; 26: 107–110.
- Tarım ve Orman Bakanlığı, 2020. Tarım Ürünleri Piyasaları. Tavuk Eti. (Erişim tarihi: <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Menu/27/Tarim-Urunleri-Piyasalari>), (Erişim Tarihi: 20 Şubat 2020).

- TEDAŞ. Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. <https://birimfiyat.tedas.gov.tr/2021>.
- Thind P., Kumari D., John S. TiO<sub>2</sub> /H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mediated UV photocatalysis of chlorpyrifos: optimization of process parameters using response surface methodology. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2018; 6(3): 3602-3609.
- Thirugnanasambandham K., Sivakumar V., Maran JP. Efficiency of electrocoagulation method to treat chicken processing industry wastewater—modeling and optimization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 2014; 45: 2427–2435.
- Tien, NTC., Huyen TTB., Hien LPT., Huy NN. A study on the optimization of photocatalytic removal of enrofloxacin using TiO<sub>2</sub> material. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2021; 652:012010.
- TÜİK, 2019. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). [www.tuik.gov.tr](http://www.tuik.gov.tr)
- UN General Assembly, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, 21 October 2015, A/RES/70/1, (Erişim adresi: <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html>), (Erişim tarihi: 5 Ocak 2022).
- USEPA (Environmental Protection Agency). Nutrient control design manual: state of technology review report. 2009. EPA/600/R-09/012. Water Supply and Water Resources Division, Cincinnati, 2009; Ohio. January.
- Vela N., Calín M., Yáñez-Gascón MJ., el Aatik A., Garrido I., Pérez-Lucas G., Fenoll J., Navarro S. Removal of pesticides with endocrine disruptor activity in wastewater effluent by solar heterogeneous photocatalysis using ZnO/Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. *Water, Air, & Soil Pollution* 2019; 230: 134.
- Verma A., Chhikara I., Dixit D. Photocatalytic treatment of pharmaceutical industry wastewater over TiO<sub>2</sub> using immersion well reactor: synergistic effect coupling with ultrasound. *Desalination and Water Treatment* 2014; 52: 6591–6597.
- Weerasekara AW., Jenkins S., Abbott LK., Waite I., McGrath JW., Larma I., Eroglu E., O'Donnell A., Whiteley AS. Microbial phylogenetic and functional responses within acidified wastewater communities exhibiting enhanced phosphate uptake. *Bioresource Technology* 2016; 220: 55–61.
- WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard, 2022, (Erişim adresi: <https://covid19.who.int/>), (Erişim tarihi: 7 Ocak 2022).
- Yan Z., Huang W., Jiang X., Gao J., Hu Y., Zhang H., Shi Q. Hollow structured black TiO<sub>2</sub> with thickness-controllable microporous shells for enhanced visible-light-driven photocatalysis. *Microporous and Mesoporous Materials* 2021; 323: 111228.
- Yazıcı Güvenç S., Varank G. Kozmetik sanayi atıksularının elektro-fenton yöntemi ile arıtımında cevap yüzey metodu kullanılarak proses optimizasyonu. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture* 2019; 34(1): 57-66.

Zhang S., Pang X., Yue Z., Zhou Y., Duan H., Shen W., Li J., Liu Y., Cheng Q. Sulfonamides removed from simulated livestock and poultry breeding wastewater using an in-situ electro-Fenton process powered by photovoltaic energy. *Chemical Engineering Journal* 2020; 397: 125466.