



Ibuprofenin ileri oksidasyon prosesleri ile gideriminin yaşam döngüsü değerlendirmesi

Sevde Üstün Odabaşı¹

^{1*} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-3533-4089), sevde.ustun@omu.edu.tr

(1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2021, November 1-3, 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.1011436)

ATIF/REFERENCE: Üstün Odabaşı, S. (2021). Ibuprofenin ileri oksidasyon prosesleri ile gideriminin yaşam döngüsü değerlendirmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 795-801.

Öz

Steroid olmayan anti-inflamatuvar (NSAI) grubunda yer alan ibuprofen (IBU), atıksularda ve hatta içme sularında sıklıkla tespit edilmektedir. Klasik atıksu arıtma tesisleri bu ilaç kalıntılarının giderimi üzerine projelendirilmemiştir. Bu nedenle atıksu arıtma tesislerinde arıtılmayan bu mikrokirleticiler alıcı ortamlara deşaj edilmekte ve burada olumsuz etkilere neden olmaktadır. Son zamanlarda ileri oksidasyon prosesleri bu tarz mikrokirleticilerin gideriminde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada da ibuprofen gideriminin çevresel etkilerini belirlemek amacıyla iki farklı ileri oksidasyon prosesinin yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yapılmıştır. Çalışmada SimaPro 8.0.2 yazılımının CML 2 baseline metodu kullanılmıştır. Çalışma sonunda UV/H₂O₂ prosesinin çevresel etkisi daha yüksek bulunmuştur. Çevresel etkiye sebep olan en önemli parametre olarak ise elektrik enerjisi tüketimi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atıksu, İbuprofen, Fenton, UV/H₂O₂, YDD

Life cycle assessment of ibuprofen removal by advanced oxidation processes

Abstract

Ibuprofen (IBU), which is in the non-steroidal anti-inflammatory (NSAI) group, is frequently detected in wastewater and even drinking water. Conventional wastewater treatment plants were not designed for the removal of these drug residues. For this reason, these micropollutants, which cannot be treated in wastewater treatment plants, are discharged to the receiving environment and cause negative effects there. Recently, advanced oxidation processes have been frequently used for the removal of such micropollutants. In this study, life cycle assessment (LCA) of two different advanced oxidation processes was carried out to determine the environmental effects of ibuprofen removal. CML 2 baseline method of SimaPro 8.0.2 software was used in the study. At the end of the study, the environmental impact of the UV/H₂O₂ process was found to be higher. It has been determined that the most important parameter that causes environmental impact is electrical energy consumption.

Keywords: Wastewater, Ibuprofen, Fenton, UV/H₂O₂, LCA

1. Giriş

Artan dünya nüfusu ve gelişen teknolojiye paralel olarak farmasötikler ve kişisel bakım ürünlerinin (PPCP) kullanımının artması sonucu mikrokirleticiler olarak adlandırılan öncelikli kirletici türleri ortaya çıkmıştır. Bu kirleticilere sucul ortamlarda ng/L - $\mu g/L$ gibi düşük konsantrasyonlarda bulunmalarından dolayı mikrokirletici denmektedir (Rodríguez ve ark., 2016; Luo ve ark., 2014). Düşük konsantrasyonlarına rağmen sucul çevreye olan etkileri oldukça yüksektir. Bu etkilerden bazıları kısa ve uzun süreli toksisite, balıklarda dişileşme, sucul canlı popülasyonunun azalması, kanserojenik ve tetratojenik etkiler, mikroorganizmaların antibiyotiğe karşı direnç kazanması sayılabilir (Sönmez, 2015). Mikrokirletici grubuna giren İbuprofen (İBU), kimyasal adı [3-2 (metilpropil)fenil] propanoik asit, analjezik, antipiretik ve anti-inflamatuar etkilerinden dolayı grip ve ağrı kesici ilaçların içerisinde kullanılan ve reçetesizde temin edilebilmesi nedeniyle kullanımı oldukça yaygın olan bir steroid olmayan anti-inflamatuar (NSAID) ilaçtır. İBU, insan faaliyetleri sonucunda sıklıkla sucul çevreye salınmakta ve burada yüksek derişimlerde canlı yaşamı üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır (Maryam ve ark., 2020). Mathias ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada İBU'e maruz kalan balıkların böbrek ve solungaçları üzerinde anormal değişikliklerin meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Moynan ve Welsh'in (2012) yapmış oldukları bir diğer çalışmada ise İBU'nin Japon Medaka balık türlerinin yumurtlama sistemi üzerine etki ettiklerini tespit etmişlerdir. Kristensen ve ark. (2018) yapmış olduğu çalışmada ise uzun süreli İBU'e maruz kalan insanların böbrek, beyin, kardiyovasküler ve gastrointestinal sistemlerinin olumsuz etkilendiğini tespit etmişlerdir.

Mikrokirleticilerin kolay parçalanmamaları, kalıcı olmaları, biyoakümülyasyon ve toksik özelliklerinden dolayı sucul çevre olumsuz olarak etkilenmektedir. Mikrokirleticilerin sucul çevreye yayılmasında atıksu arıtma tesisleri birincil engel görevi görmektedir. Atıksu arıtma tesislerinden arıtılmış atıksuyun deşarjı, mikrokirleticilerin yüzeysel sulara girişi için önemli bir yoldur. Ancak, klasik atıksu arıtma tesisleri mikrokirletici giderimi için özel olarak tasarlanmayıp yetersiz kalmaktadır (Üstün Odabaşı ve ark., 2020). Bu nedenle, genellikle biyolojik işlemlerden sonra uygulanan ileri oksidasyon prosesleri, son zamanlarda mikrokirleticilerin atıksudan giderimi için etkili üçüncül basamak olarak ortaya çıkmıştır. İleri oksidasyon prosesleri (İOP) ile hidroksil radikallerinin yüksek reaktivitesini kullanarak organik bileşikler zararlı ürünlere aşamalı olarak oksitleyerek mikrokirleticileri arıtmaktadır (Klavarioti ve ark., 2009). En yaygın kullanılan İOP'ler arasında Fenton prosesi ve ultraviyole prosesler bulunmaktadır. Fenton prosesi uzun yıllardan bu yana kalıcı organik kirleticilerin arıtımında kullanılan bir prostestir. Fenton prosesi, pH ayarlama (nötralizasyon), oksidasyon reaksiyonu, koagülyasyon-flokülyasyon ve çöktürme olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır. Fenton prosesi, düşük maliyetli oluşu, reaktiflerinin toksisitesinin olmaması, ultraviyole ışığı girişimine ihtiyaç duymaması ve basit teknolojiye sahip olması nedeniyle sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Bello ve ark., 2019). Ancak genellikle asidik pH'larda çalışmasından dolayı reaksiyon sonunda nötralizasyon işlemine ihtiyaç duyması ve atık çamur oluşumu bu prosesi sınırlayan faktörlerdir. Su içerisinde düşük derişimde bulunan organik kirleticiler kısa dalga boylu UV ışığı etkisi ile mineralize olmaktadır. Genelde hidrojen peroksit gibi oksidanlar oluşturarak parçalanma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu parçalanma işlemleri esnasında

hidrojen peroksit konsantrasyonu önem taşımaktadır. Hidrojen peroksit konsantrasyonu yeterli olduğu durumda parçalanma hızlanırken fazla konsantrasyonda radikal parçalanmalarını engellemektedir (Rekhate ve Srivastava, 2020). UV işlemi ile arıtmanın en önemli dezavantajlarından birisi yüksek elektrik tüketim enerjisi nedeni ile işletme masraflarının fazla olmasıdır (Çatalkaya ve ark., 2004).

Herhangi bir atıksu teknolojisinin uygulanabilirliği, yalnızca bozunma ve mineralizasyon verimliliği ile değil, aynı zamanda çevresel etkileriyle de olmalıdır. Günümüzde çevresel sürdürülebilirlik kavramı her geçen gün önem kazanmaktadır. Eskiden kirleticilerin çevreden uzaklaştırılması önemliyken artık kirleticilerin arıtılmasında en çevreci yöntemin seçimi ve enerji sarfiyatı kavramları ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda çevresel sürdürülebilirliğin en iyi şekilde sağlanabilmesi ise yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yaklaşımı ile gerçekleştirilmektedir (Çolak Güneş, 2020). YDD, bir ürün ya da sistemin üretiminden bertarafına kadar tüm çevresel etkilerini inceleyen bir sistemdir. Söz konusu çevresel etkiler, asidifikasyon, ötrofikasyon, stratosferik ozon tabakasındaki inceltme, iklim değişikliği ve toksik emiyonlar gibi doğal kaynak tüketim bazlarında değerlendirilmektedir ve ark., 2019). YDD, TSE 14040 standartına göre amaç ve kapsam, envanter analizi, etki değerlendirme ve yorumlama olmak üzere dört başlıktan oluşmaktadır (Eren ve Öztürk, 2021). YDD, pek çok alanda karar vermeye yardımcı sistem olarak sıklıkla kullanılmaktadır. García-Montaño ve ark., (2006) ticari reaktif boyanın Foto-Fenton prosesi ile gideriminin YDD'sini yapmışlardır. Çalışma sonunda hidrojen peroksit tüketimi ve UV lambası için elektrik enerji gereksiniminin önemli çevresel etkilere neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, boya oksidasyonu sırasında hava ve su emisyonlarının etki kategorilerinden küresel ısınma ve ötrofikasyonu etkilediğini belirtmişlerdir. Rodríguez ve ark., (2016) homojen ve heterojen Fentonun çevresel etkilerini YDD yöntemi ile kıyaslamışlardır. Çalışma sonunda homojen Fentonun en büyük çevresel etkisinin metal iyonu içeren atık çamurun bertaraf edilmesi sorunu olduğunu belirtmişlerdir. Diğer taraftan oksidasyon için gereken yüksek sıcaklığında bir diğer çevresel etki faktörü olduğunu vurgulamışlardır. Heterojen Fenton sisteminde ise atık çamur oluşumunun daha az ve sıcaklığın daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Bu parametreler homojen sisteme göre avantaj sağlarken hidrojen peroksit kullanımı homojen sisteme göre dört kat fazla oluşu heterojen sisteminin dezavantajını oluşturmaktadır. Hidrojen peroksitin fazla kullanımı sürdürülebilirliği etkileyen önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Tüm parametreler kıyaslandığında ise yine de heterojen Fenton proselinin homojen Fenton prosesine göre daha sürdürülebilir bir sistem olduğuna karar vermişlerdir. Pesqueira ark., (2021) yaptıkları çalışmada güneş enerjisine dayalı 5 fotokataliz sisteminin (FotoFenton. TiO_2 , P25, H_2O_2 , TiO_2 -P25, solar / H_2O_2) YDD'sini karşılaştırmışlardır. En fazla çevresel yük sıralaması FotoFenton>P25> H_2O_2 > TiO_2 -P25>solar/ H_2O_2 şeklinde olduğunu belirlemişlerdir. Kimyasalların üretiminde enerji kullanımının çevresel etkiye sebep olan en önemli faktörlerden birisi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu nedenle İOP'lerinde harici enerji kullanımının en aza indirilmesinin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Bu çalışmanın amacı, İBU içeren sentetik suyun Fenton ve UV/ H_2O_2 prosesleri ile giderimlerinin YDD performansını karşılaştırmak ve çevreye en duyarlı proselin seçiminin yapılmasını sağlamaktır. Ayrıca, YDD çalışmalarında SimaPro 8.0.2 programının CML-2 baseline metodu kullanılarak en fazla

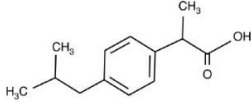
çevresel etkiye sahip etki kategorilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Kimyasallar

Çalışmada Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2) ve UV/ H_2O_2 ileri oksidasyon prosesleri ile sentetik atıksudan İBU'nin giderimi incelenmiştir. Deneysel sırasında kullanılan kimyasal maddeler hidrojen peroksit (%35, Merck), $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (%99,5, Sigma Aldrich), Sülfürik asit (%98, Merck), sodyum hidroksit (>%99, Merck) olup tüm analizler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. LCMS/MS cihazındaki ölçümlerde kullanılan İBU standardı ise ≥ 98 saflıkta Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Analizlerde kullanılan İBU'nin fizikokimyasal özellikleri ve kimyasal yapısı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. İbuprofenin fizikokimyasal özellikleri ve kimyasal yapısı

İlaç adı	İbuprofen	
Molekül formülü	$C_{13}H_{18}O_2$	
Kimyasal Yapısı		
Molekül (g/mol)	ağırlığı	206,3
pKa		4,9
Log K _{ow}		3,97

2.2. Sentetik Atıksuyun Hazırlanması

Sucul çevrede ve atıksu arıtma tesislerinde İBU, ng/L- μ g/L gibi küçük konsantrasyonlarda bulunduğu için çalışmada kullanılacak sentetik atıksuyun İBU konsantrasyonu 30 μ g/L olarak belirlendi. Hazırlanan atıksudaki İBU'nin tam karışımı için 48 saat boyunca çözelti manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Son olarak hazırlanan atıksuyun pH ve iletkenliği ölçülerek kontrol edilmiştir.

2.3. Deneğin Yapılışı

Hazırlanan atıksuya ilk olarak Fenton prosesi uygulanmıştır. Fenton prosesinde uygun pH, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ve H_2O_2 dozları, karıştırma hızı ve süresinin belirlenmesi daha önce yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir (Üstün Odabaşı ve Büyükgüngör, 2017; Üstün Odabaşı ve ark., 2018). Fenton prosesleri düşük pH'larda etkili olduğu için çözelti pH'ı 3 olarak seçilmiştir (De la Cruz ve ark., 2012; Mirzaei ve ark., 2017). Fenton prosesi için 1000 mg/L derişiminde H_2O_2 ve 250 mg/L derişiminde $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ içeren stok çözeltiler hazırlanmıştır. İlk aşamada H_2O_2 derişimi sabit tutularak 0,0175-0,280 mM aralığında Fe^{2+} derişimleri denenmiştir. Ardından optimum Fe^{2+} derişimi belirlenerek 0,0175-0,280 mM aralığında H_2O_2 derişimleri denemiş ve optimum derişime karar verilmiştir. Fenton prosesinde numune hacmi 250 ml seçilmiş olup 5 dk 200 rpm ve 25 dk 15 rpm yavaş karıştırma olacak şekilde 30 dk süre ile karışım sağlanmıştır. Karışım sonunda çözelti pH'ı 8-8,5'a ayarlanarak reaksiyonun durdurulması sağlanmıştır. 120 dk çökelme süresinden sonra numunenin üst kısmından örnekler alınarak LCMS/MS cihazında İBU konsantrasyon ölçümü yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise Tetra marka Purfect 01 model, 50 Hz, 254 nm dalga boyunda ışık yayan UV reaktörü kullanılmıştır. UV reaktörüne numuneler peristaltik pompa aracılığı ile verilmiştir. Tüm çalışmalarda numunelerin reaktöre giriş ve reaktörden çıkış pH'ları ölçülmüştür.

2.4. Analitik Yöntemler

İBU tayini için sıvı kromatografisi sıralı kütle spektrometresi (LCMS/MS; Liquid chromatography–tandem mass spectrometry, Shimadzu LCMS 8040) kullanılmıştır. MS/MS sisteminin özellikleri; kuru gaz olarak 350°C sıcaklıkta, 2,5 L/dk akışında akışta ve 660 bar basınçta argon (Ar) gazı ve nebulizer gazı olarak 250°C sıcaklıkta, 10 L/dk akışta azot (N_2) gazı kullanılmıştır. Kapiler voltaj 4500 volt'dur. Kolon olarak Raptor Biphenyl LC kolon (Raptor Biphenyl LC Column, Restek, 50mm x 30mm x 2.7 μ m, Bellefonte, PA, USA) kullanılmıştır. Fırın sıcaklığı 50 °C, enjeksiyon hacmi 20 μ L'dir. Yöntemin LOD değeri 2,500 μ g/L ve LOQ μ g/L değeri 8,33 olarak hesaplanmıştır. Tablo 2'de taşıyıcı fazların kolondan zamana bağlı geçişleri verilmiştir.

Tablo 2. Gradient program

Mobil Fazlar	Zaman (dk)	Mobil Faz A (%)	Mobil Faz B (%)
(%A Distilled water+2 μ m)	T=0	95	5
HCO_2NH_4 +500 μ L)	T=3	5	95
CH_2O_2 , % B	T=5	5	95
CH_3OH)	T=5,01	95	5

2.4. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)

2.4.1. Hedef ve Kapsam

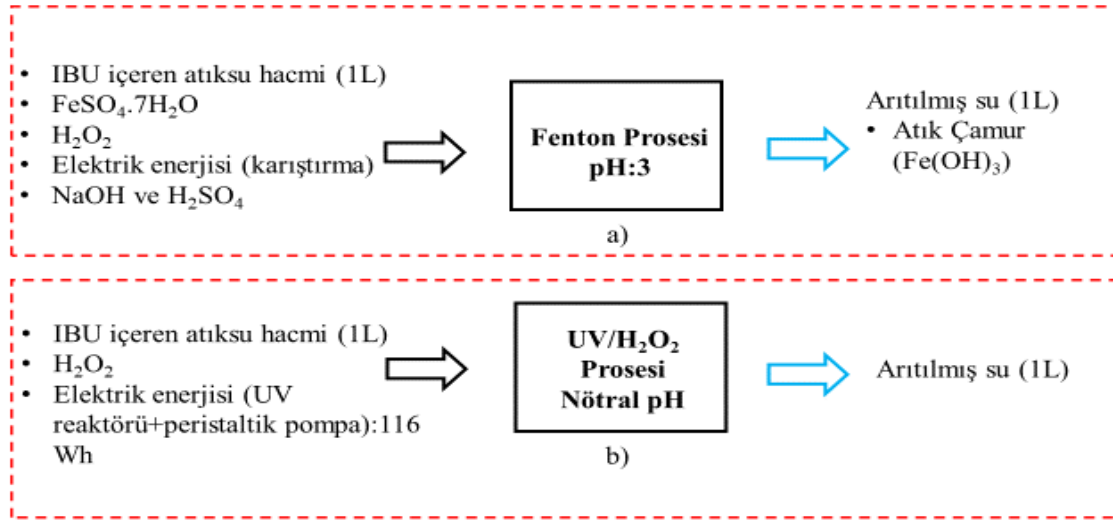
YDD çalışmasının amacı, İBU mikrokirleticisinin Fenton ve UV/ H_2O_2 prosesleri ile atıksudan gideriminin çevresel etkilerini kıyaslayarak çevreye en duyarlı prosesin seçimini sağlamaktır. Bu çalışmanın hedef kitlesini, atık su arıtma alanındaki bilim camiasını ve karar vericileri oluşturmaktadır. Sistemin işlevi İBU mikrokirleticisini atıksudan gidermektir. Fonksiyonel birim olarak 30 μ g/L İBU içeriği olan 1L atıksuyun arıtılması olarak belirlenmiştir. Sistem sınırları belirlenirken İBU'nin tamamen giderildiği koşullar optimum olarak belirlenmiş ve YDD bu koşullar üzerine kurulmuştur. Sistem sınırları Şekil 1'de verilmiştir.

2.4.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDEA)

Sistemde veri analizi yapılırken deneysel veriler, literatür ve programın veri tabanı kullanılmıştır. Her iki proses için gerçekleştirilen deneysel veriler sisteme eklenmiş ayrıca Ecoinvent (v 2.2) veri tabanından arka plan verileri alınmıştır. YDD hesaplanması için proses parametreleri ve kullanılan veriler Tablo 3'te verilmiştir. H_2SO_4 ve NaOH çözeltilerinin kullanımları çok az olduğu için YDD envanterine katılmayıp ihmal edilmiştir. Farklı proseslerin yaşam döngüsü değerlendirilmesi için çalışmada YDD metodolojisi olarak CML 2 baseline metodu kullanılmıştır. Farmasötik ürünün üretiminden kaynaklı atıksu emisyonlarının değerlendirilmesi yapıldığında ağırlıklı olarak "sucul ekosistem"

üzerinde toksik etkiye neden olabileceği tespit edilmiştir (Aydın, 2016). Bu nedenle atıksuların yaşam döngüsü değerlendirmesinde

sıklıkla kullanılan metot olan CML 2 baseline metodu tercih edilmiştir.



Şekil 1. Sistem sınırları

CML 2 baseline metodu değerlendirme karakterizasyon ve normalizasyon bölümlerinden oluşmaktadır. Ancak daha çok karakterizasyon üzerinde durulmaktadır. CML 2 baseline metodu abiyotik tükenme, asidifikasyon, ötrofikasyon, küresel ısınma potansiyeli, ozon tabakasının incelmeye, insan toksisitesi, tatlı su ekotoksitesitesi, deniz suyu ekotoksitesitesi, karasal ekotoksitesite ve fotokimyasal oksidasyon etki kategorilerinden oluşmaktadır. Abiyotik tükenme, doğal kaynakların tükenmesini ifade etmektedir. İklim değişikliği etki kategorisi ise havaya salınan sera gazları ile ilgilidir. Stratosferik ozon tabakasındaki inceleme UV-B ışınları ile ilgilidir. Bu ışınlar yeryüzüne çok çabuk ulaşır ve ozon tabakasının incelmeye ile daha fazla ışın yeryüzeyine ulaşarak buradaki canlı yaşantısının olumsuz etkilemesini incelemektedir.

Tablo 3. YDD hesaplamalarında kullanılan proses verileri

	Fenton	UV/H ₂ O ₂
Girdiler, Kimyasallar (mg)		
H ₂ O ₂	3,57	3,57
FeSO ₄	58,39	-
H ₂ SO ₄	İhmal edildi	-
NaOH	İhmal edildi	-
Enerji girdileri		
Elektrik enerjisi (Wh) (karıştırma)	19	
Elektrik enerjisi (Wh) (UV lambası)	-	16
Elektrik enerjisi (Wh) (pompa)	-	100
Çıktılar, suya emisyon (mg)		
Fe(OH) ₃	22,47	-

Tatlı su ekotoksitesitesi ise hava, su ve topraktaki toksik maddelerin emisyonlarının bir sonucu olarak, tatlı su ekosistemleri üzerindeki etkisini ifade etmektedir. Deniz ekotoksitesitesi deniz ekosistemleri üzerindeki toksik maddelerin etkilerini ifade etmektedir. Karasal ekotoksitesite ise karasal ekosistemler üzerindeki toksik maddelerin etkilerine

değirmektedir. Fotokimyasal oksidasyon ise tarımsal ürünlere, insan sağlığına ve ekosisteme zarar veren reaktif maddelerin oluşumunu açıklayan etki kategorisini ifade etmektedir. Asidifikasyon, asitleştirici maddelerin toprak, yeraltı suyu, yüzeysel sular, organizmalar, ekosistemler ve maddeler üzerinde yarattığı toksik etkiyi temsil etmektedir. Ötrofikasyon ise havaya, suya ve toprağa besi maddelerinin aşırı salınımı nedeniyle oluşan makro besi maddelerinin artışının sebep olduğu etkileri ifade eden bir etki kategorisidir (Aydın, 2016).

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Proses Performansları

Çalışmada IBU'in sentetik atık sudan giderilmesi amacıyla Fenton ve UV/H₂O₂ prosesleri olmak üzere iki farklı yöntem ile giderim verimleri kıyaslanmıştır. 30 dakikalık Fenton prosesi sonunda 0,21 mM Fe⁺² ve 0,105 mM H₂O₂ değerlerinde optimum giderim verimi elde edilmiş olup IBU'nin yaklaşık %100'ü giderilmiştir. UV prosesi için ise yine 0,105 mM H₂O₂ ilavesi ve 25 dakikalık UV lambası çalıştırılması ile yaklaşık %100 IBU giderimi sağlanmıştır. Her iki proses ile de çıkış suyunda İBU'e rastlanmamış ve tamamen giderilmiştir.

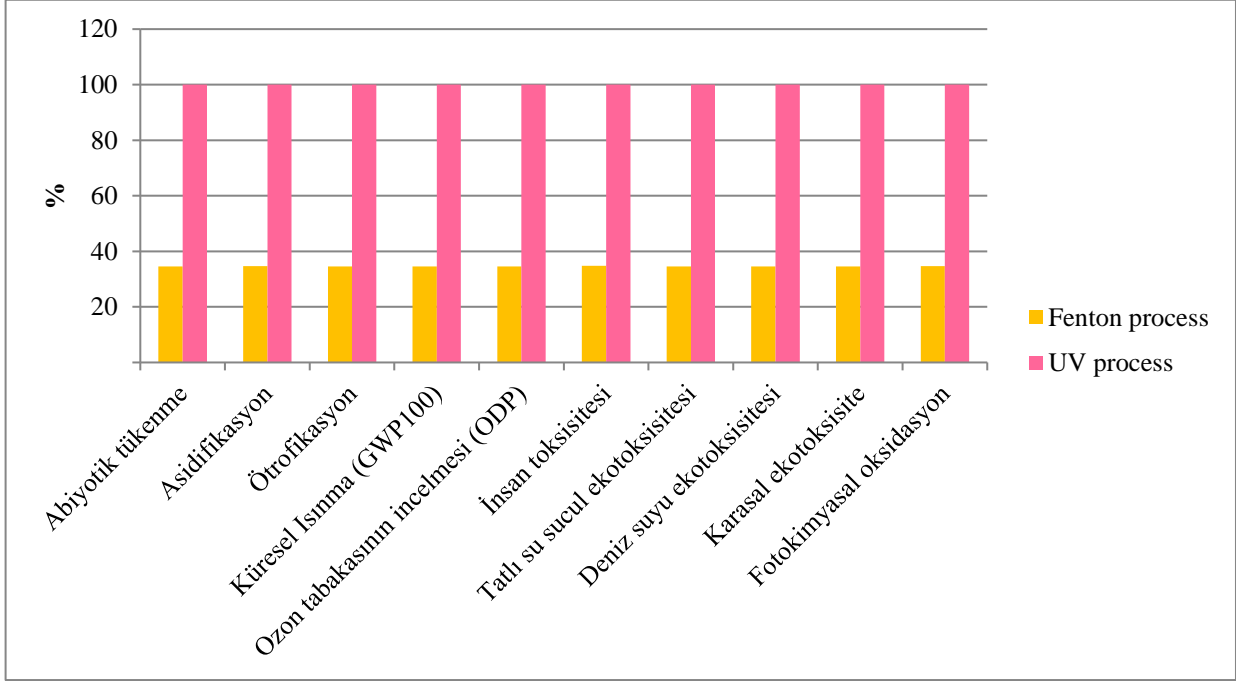
3.2. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED)

Çalışmada program verileri sisteme girildikten sonra Fenton ve UV/H₂O₂ proseslerinin karşılaştırılması için CML 2 baseline programı ile çevresel etkileri incelenmiştir. Test edilen iki prosesden UV/H₂O₂ prosesinin en fazla çevresel etkiye sahip olan proses olduğu belirlenmiştir. Bu kategoriler için sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir.

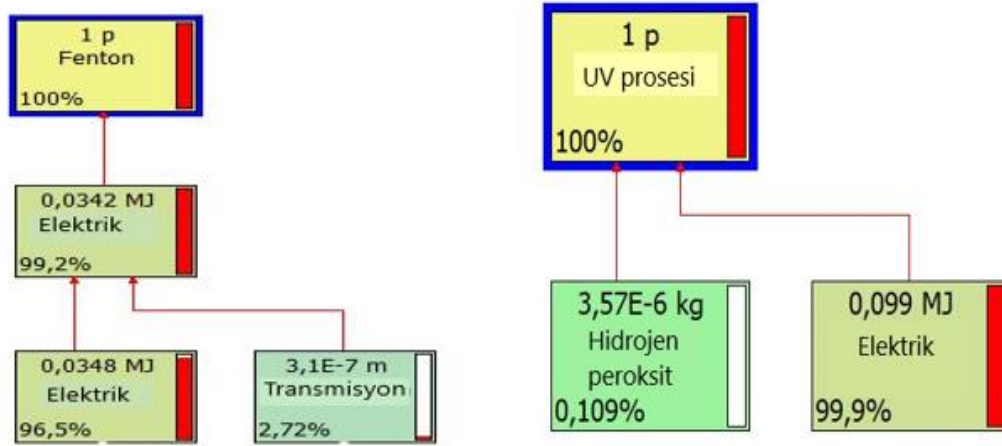
Sonuçlar incelendiğinde UV/H₂O₂ prosesinin çevresel etkilerinin tüm etki kategorilerinde daha yüksek çıkmasının nedeni kullanılan elektrik enerjisinin Fenton prosesine göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Fenton prosesinde atık çamur oluşmasına rağmen UV/H₂O₂ prosesinde UV sistemi ve bu sisteme numune girişini sağlayan peristaltik pompanın elektrik enerjisini fazla kullanması çevresel etkiyi artırmıştır. Fenton prosesi ve UV/H₂O₂ prosesleri incelendiğinde her iki proseste de en fazla çevresel etki elektrik enerjisi tüketiminden

kaynaklanmaktadır. Fenton ve UV/H₂O₂ proseslerinde elektrik enerjisinin kullanımı etki kategorilerinden en fazla insan toksisitesini etkilemiştir. Şekil 3'te Fenton ve UV/H₂O₂ proseslerinin insan toksisitesinin ağ sistemi verilmektedir. YDD ile tüm mekanizmanın çevresel boyutu ele alınmaktadır. Fenton prosesinin fazla kimyasal madde tüketmesi ve sonuçta çamur problemi oluşturması gibi sorunlardan dolayı çevresel etkisi

yüksekmiş gibi görünse de UV/H₂O₂ prosesinin çok fazla elektrik enerjisi tüketmesinden dolayı Fenton prosesinin olumsuz etkileri elimine edilmiştir. UV lambasının ömrünün sınırlı olması da UV/H₂O₂ sisteminin dezavantajlarını oluşturmaktadır.



Şekil 2. CML 2 baseline metoduna göre Fenton ve UV/H₂O₂ proseslerinin orta noktalara göre karşılaştırılması



Şekil 3. CML 2 baseline metodu insan toksisitesi ağ görüntüsü a) UV/H₂O₂ prosesi b)Fenton prosesi

3.3. Maliyet Analizi

Çalışmada çevresel açıdan değerlendirmenin yanı sıra maliyet açısından da değerlendirme yapılması gerektiği düşünülmüştür. Çünkü bir sisteme karar vermede pek çok değişken etkilidir. Bu nedenle her iki sistemde kullanılan tüm girdilerin maliyeti hesaplanarak en uygun prosesin seçilmesi amaçlanmıştır. Maliyet analizi yapılırken kullanılan kimyasalların fiyatı, FeSO₄·7H₂O'unun 1kg ambalaj fiyatı 210 TL ve H₂O₂'nin 1 L'lik ambalaj fiyatı 290 TL'dir (Merck, 2021). Elektrik birim fiyatı ise 1 kWh 'i 47,43 kuruştur. Tablo 4'te maliyet hesabı verilmiştir (TEIAS, 2021).

Tablo 4. Fenton ve UV/H₂O₂ proseslerinin maliyet hesabı

Proses	Fe ⁺²	H ₂ O ₂	Elektrik Enerjisi	Toplam (krş)	1m ³ (TL)
Fenton	0,986	0,261	0,450	1,697	16,97
UV/H ₂ O ₂		0,261	2,294	2,555	25,55

Maliyet analizi sonuçlarına göre de UV/H₂O₂ prosesi en maliyetli proses olarak bulunmuştur. Bunun sebebi ise elektrik enerjisi tüketiminin kimyasal tüketimlerine göre fazla olmasıdır. Fenton prosesinde kullanılan H₂SO₄ ve NaOH çözeltilerinin miktarı çok az olduğu için maliyet hesabında ihmal edilmiştir.

4. Sonuç

Fenton ve UV/H₂O₂ prosesleri ile İBU gideriminin çevresel etkisi değerlendirilmiştir. YDD çalışması sonucunda en fazla çevresel etkiye sahip olan proses olarak UV/H₂O₂ prosesi bulunmuştur. Bunun nedeni olarak ise sistemin çalışma prensibinden kaynaklanan elektrik tüketimi olduğu tespit edilmiştir. CML 2 baseline metodunun etki kategorilerinden en fazla etkiyi insan toksisitesinin oluşturduğu tespit edilmiştir. İnsan toksisitesine etki eden her iki prosesin parametreleri incelendiğinde bu etkinin proseslerde kullanılan elektrik enerjisinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca bu sistemlerin maliyet hesabı yapılarak maliyeti en fazla olan sistem belirlenmiştir. Maliyet hesabı sonunda UV/H₂O₂ prosesinin

kullanılan elektrik enerjisinden dolayı maliyetinin daha yüksek çıktığı sonucuna varılmıştır. Hem maliyet hem de çevresel açıdan düşünüldüğünde Fenton prosesinin tercih edilmesinin daha doğru olacağı düşünülmektedir. Ayrıca şu an hali hazırda SimaPro programının içerisinde farmasötiklerin çevresel etkilerine yönelik herhangi bir veri tabanı bulunmamaktadır. Bu amaçla USEtox adı verilen bir model kullanılmaktadır. USEtox, kimyasalların insan ve ekotoksikolojik etkilerini karakterize etmek için UNEP/SETAC Yaşam Döngüsü Girişimi tarafından onaylanan bilimsel bir fikir birliği modelidir. Bu model kullanılarak USEtox veri tabanında bulunan karakterizasyon faktörleri ile ekotoksisite hesaplarının yapılarak çalışmanın geliştirilmesi mümkündür.

715–724. <https://doi.org/10.1073/pnas.1715035115>

Kaynakça

Bello, M. M., Abdul Raman, A. A., & Asghar, A. (2019). A review on approaches for addressing the limitations of Fenton oxidation for recalcitrant wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 126, 119–140. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.028>

Çatalakaya, E., Bali, U., & Şengül, F. (2004). Fenol'ün fotokimyasal yöntemlerle parçalanması ve mineralizasyonu. *SKKD*, 14(3), 31–41.

Çolak Güneş, N. (2020). Yaşam Döngüsü Analizi ile Konsantre Şeftali Püresinin Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. *Akademik Gıda*, 18(3), 247–255. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.818098>

De la Cruz, N., Giménez, J., Esplugas, S., Grandjean, D., De Alencastro, L. F., & Pulgarín, C. (2012). Degradation of 32 emergent contaminants by UV and neutral photo-fenton in domestic wastewater effluent previously treated by activated sludge. *Water Research*, 46(6), 1947–1957. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.014>

Eren, Ö., & Öztürk, H. (2021). Tatlı Sorgum (*Sorghum Bicolor* (L.) Biyokütlesinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile Çevresel Etkilerinin Belirlenmesi. *European Journal of Science and Technology*, (22), 195–203. <https://doi.org/10.31590/ejosat.852286>

García-Montaña, J., Ruiz, N., Muñoz, I., Domènech, X., García-Hortal, J. A., Torrades, F., & Peral, J. (2006). Environmental assessment of different photo-Fenton approaches for commercial reactive dye removal. *Journal of Hazardous Materials*, 138(2), 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.061>

Klavarioti, M., Mantzavinos, D., & Kassinos, D. (2009). Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *Environment International*, 35(2) Huang, C P, Dong, Chengdi, and Tang, Zhonghung. Advanced chemical oxidation: Its present role and potential future in hazardous waste treatment. United States: N. p., 1993. Web. doi:10.1016/0956-053X(93)90070-D., 402–417. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2008.07.009>

Kristensen, D. M., Desdoits-Lethimonier, C., Mackey, A. L., Dalgaard, M. D., De Masi, F., Munkbøl, C. H., ... Jégou, B. (2018). Ibuprofen alters human testicular physiology to produce a state of compensated hypogonadism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(4),

Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., ... Wang, X. C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 473–474, 619–641. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.12.065>

Maryam, B., Buscio, V., Odabasi, S. U., & Buyukgungor, H. (2020). A study on behavior, interaction and rejection of Paracetamol, Diclofenac and Ibuprofen (PhACs) from wastewater by nanofiltration membranes. *Environmental Technology and Innovation*, 18, 100641. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100641>

Mathias, F. T., Fockink, D. H., Disner, G. R., Prodocimo, V., Ribas, J. L. C., Ramos, L. P., ... Silva de Assis, H. C. (2018). Effects of low concentrations of ibuprofen on freshwater fish *Rhamdia quelen*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 59, 105–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.03.008>

Merck. (2021). <https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/erişim:13.10.2021>

Mirzaei, A., Chen, Z., Haghghat, F., & Yerushalmi, L. (2017). Removal of pharmaceuticals from water by homo/heterogeneous Fenton-type processes – A review. *Chemosphere*, 174, 665–688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.019>

Moynan, A. B., & Welsh, C. A. (2012). The Photodegradation of Ibuprofen and Dissolved Organic Matter in Lake Superior and St. Louis River Water. *Zebrafish*, 9(4), 179–184. <https://doi.org/10.1089/zeb.2012.0754>

Pesqueira, J. F. J. R., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. T. (2021b). A life cycle assessment of solar-based treatments (H₂O₂, TiO₂ photocatalysis, circumneutral photo-Fenton) for the removal of organic micropollutants. *Science of The Total Environment*, 761, 143258. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143258>

Rekhate, C. V., & Srivastava, J. K. (2020). Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater- A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3(June), 100031. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100031>

Rodríguez, R., Espada, J. J., Pariente, M. I., Melero, J. A., Martínez, F., & Molina, R. (2016b). Comparative life cycle assessment (LCA) study of heterogeneous and homogenous Fenton processes for the treatment of pharmaceutical

- wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 124, 21–29.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.064>
- Salihoğlu, G., Poroy, Z., & Salihoğlu, N. K. (2019). Life Cycle Assessment for Municipal Waste Management: Analysis for Bursa. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(6), 692–699.
<https://doi.org/10.5505/pajes.2018.33603>
- Schwaiger, J., Ferling, H., Mallow, U., Wintermayr, H., & Negele, R. D. (2004). Toxic effects of the non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac: Part I: histopathological alterations and bioaccumulation in rainbow trout. *Aquatic Toxicology*, 68(2), 141–150.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.03.014>
- Aydın, S. (2016). *Pamuklu Ev Tekstil Ürünlerinin Üretim Süreçleri ve Nihai Ürünlerin Yaşam Döngüsünün Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Sönmez, G. (2015). *İleri Oksidasyon Prosesleri ile Bazı İlaç Kalıntılarının Giderimi*. Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- TEIAS. (2021). https://www.tedas.gov.tr/#!tedas_tarifeler erişim: 13.10.2021
- Üstün-Odabaşı, S., Maryam, B., Özdemir, N., & Büyükgüngör, H. (2020). Occurrence and seasonal variations of pharmaceuticals and personal care products in drinking water and wastewater treatment plants in Samsun, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 79(12).
<https://doi.org/10.1007/s12665-020-09047-7>
- Üstün Odabaşı, S., & Büyükgüngör, H. (2017). Investigation and Evaluation of Degradability of Ibuprofen from Wastewater by Using Fenton Process Publication Info Investigation and Evaluation of Degradability of Ibuprofen from Wastewater by Using Fenton Process. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(1), 114–119.
- Üstün Odabaşı, S., Maryam, B., & Büyükgüngör, H. (2018). Fenton Oxidation of Carbamazepine in Wastewater with Fewer Reagents. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(1), 289–298.