KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ULTRASES DESTEKLİ İLERİ OKSİDASYON PROSESİ İLE SUCUL ORTAMDAN KARBAMAZEPİN GİDERİMİ

EBRU EREN

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ULTRASES DESTEKLİ İLERİ OKSİDASYON PROSESİ İLE SUCUL ORTAMDAN KARBAMAZEPİN GİDERİMİ

EBRU EREN

Prof. Dr. Ayla ARSLAN
Danışman, Kocaeli Üni. .....

Prof. Dr. Sevil VELİ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üni. .....

Doç. Dr. Nazire Pınar TANATTI
Jüri Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimleri Üni. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.01.2025

ETIK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

(X) Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

( ) Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Ebru EREN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır. Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.
Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

( )Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
( ) Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
(X) Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

Ebru EREN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tıbbi ilaçlar insan ve hayvan sağlığı için gerekli olup kullanımı her geçen gün artmaktadır. Uzun süre saklanabilmeleri ve kolayca tüketilebilmeleri için oldukça stabil üretilirler. Kullanılan bu ilaçlar düşük biyolojik bozunabilirlikleri nedeni ile klasik atıksu arıtma tesislerinden geçip kolayca deşarj noktasına ulaşabilmektedirler. Doğada kendiliğinden bozunmadığından zamanla birikime ve su kirliliğine yol açarlar. Ultrases destekli ileri oksidasyon prosesi ile sucul ortamdan ilaç arıtımı tezimin amacı yenilikçi, modern ve sürdürülebilir bir teknoloji olan Ultrases ışınımı (US) kullanılarak, sucul ortamdan karbamazepin ilaç ham maddesini gidermektir. Proses giderim verimini arttırmak için oksidant ve katalizör ilavesi gerçekleştirilmiştir. Fitotoksisite deneyleri yapılarak, ham atıksu ve arıtlımış atıksu toksisitesi belirlenmiştir.

Tez çalışmalarımda deneyimini ve bilgilerini benimle paylaşan, her daim desteklerini hissettiğim değerli hocalarım Prof. Dr. Ayla ARSLAN ve Arş. Gör. Dr. Eylem TOPKAYA'ya teşekkür ediyorum.

Karbamazepin ilaç hammaddesini projem için bana sağlayan Terra İlaç ve Kimya Sanayi Ticaret A.Ş ve Selim EMANET'e teşekkür ediyorum.

Bu süreçte beni yalnız bırakmayıp her zaman yanımda oldukları için pek sevgili arkadaşlarım Seda Nur KOZ ve Merve ŞAHİN'e çok teşekkür ediyorum.

Hayatım boyunca maddi manevi desteklerini hep hissettiğim sevgili ailem; annem Semiha EREN, babam Osman EREN, babannem Hünkar EREN, kardeşlerim M.Emre ve Yusuf EREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak - 2025 Ebru EREN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
1. GİRİŞ 1
1.1.Çalışmanın Amaç ve Kapsamı 2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
2.1. Karbamazepin (CBZ) ve Çevresel Etkileri 3
2.2. Karbamazepin Arıtım Metodları 5
2.3. Ses ve Ultrases 6
2.4. Ultrases Dalgalarının Elde Edilmesi 7
2.5. Ultrases Prosesi ve Kavitasyon 8
2.6. Kavitasyon Çeşidi 13
2.7. Kavitasyon Teorileri 14
2.8. Ultrasesin Etkileri 15
2.9. Ultrases Uygulama Yöntemleri 16
2.10. Çeşitli Ultrases Prosesleri 17
2.11. Ultrases Probunun Yapısı 17
2.12. Ultrases Destekli Prosesler 18
2.12.1 US/oksidant 18
2.12.2. US/ katalizör 19
2.13. Fitotoksisite Testi 19
3. DENEYSEL ÇALIŞMA 21
3.1. Metaryal ve Metot 21
3.1.1. Kullanılan Kimyasallar 21
3.1.2. Kullanılan Cihazlar 21
3.1.3. Karbamazepin Sentetik Çözeltisi 21
3.1.3.1. Karbamazepin Kalibrasyon Grafiği 24
3.1.4. Ultrases Sistemi 25
3.1.5. Deneysel Yöntem 26
3.1.6. Fitotoksisite Testi 27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 30
4.1. US Prosesi 30
4.1.1. Başlangıç Konsantrasyonunun Etkisi 30
4.1.2. Reaksiyon Süresinin Etkisi 31
4.1.3. pH'ın Etkisi 32
4.2.US/ Oksidant 34
4.3. US/ Katalizör 36
4.4.US/ Oksidant/ Katalizör 37
4.5. Fitotoksisite Testi 40
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 47
KAYNAKLAR 48
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 55
ÖZGEÇMİŞ 56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Ultrasesin frekans aralığı....7
Şekil 2.2. Kavitasyon kabarcıklarının oluşumu....9
Şekil 2.3. Kavitasyon kabarcığı....10
Şekil 2.4. Bir akustik kavitasyon kabarcığının yaşam döngüsü....10
Şekil 2.5. (A) Kabarcık çökmeden önce sıvı-gaz sınırı ve (B) kabarcık çöktükten sonra bütirik asit sonolizi....12
Şekil 2.6. Kavitasyon kabarcığı bölgeleri....14
Şekil 2.7. Ultrason uygulama yöntemi....16
Şekil 2.8. Çeşitli ultrases prosesleri: (a,b) Ultrasonik küvetler (c)Ultrasonik prob (d) Çok problu ultrasonik reaktör....17
Şekil 3.1. Karbamazepinin yapısal formülü....22
Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan Karbamazepin (CBZ)....22
Şekil 3.3. Farklı konsantrasyonlarda CBZ'nin Dalgaboyu taraması....24
Şekil 3.4. CBZ yüksek konsantrasyon kalibrasyon eğrisi....24
Şekil 3.5. CBZ düşük konsantrasyon kalibrasyon eğrisi....25
Şekil 3.6. US sistemi....26
Şekil 3.7. Deneysel yöntem aşamaları....27
Şekil 3.8. Fitotoksisite deneyi....28
Şekil 3.9. Fitotoksisite deneyi kalibrasyon....28
Şekil 3.10. Lepidium sativum tohumunun gövde ölçümü....29
Şekil 4.1. Başlangıç konsantrasyonunun absorbans giderimi üzerine etkisi....30
Şekil 4.2. Reaksiyon süresinin arıtıma etkisi....32
Şekil 4.3. pH'nın arıtıma etkisi....33
Şekil 4.4. Farklı oksidantların absorbans giderim verimi üzerine etkileri....34
Şekil 4.5. $K_2S_2O_8$ oksidant miktarının absorbans giderimi üzerine etkisi....35
Şekil 4.6. n-ZnO katalizör miktarının absorbans giderimi üzerine etkisi....37
Şekil 4.7. PS/n-ZnO kontrol deneyi....38
Şekil 4.8. Farklı proseslerin CBZ giderimi üzerine etkisi....39
Şekil 4.9. İnkübe edilmiş kontrol deneyleri....41
Şekil 4.10. İnkübe edilmiş kontrol deneyi....41
Şekil 4.11. İnkübe edilmiş US/PS deneyleri....42
Şekil 4.12. İnkübe edilmiş 4 mg/L CBZ deneyleri....42
Şekil 4.13. CBZ' nin farklı konsantrasyonlarının kök % inhibisyon değerleri....44
Şekil 4.14. CBZ'nin farklı konsantrasyonlarının gövde % inhibisyon değerleri....44

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. İlaç ham maddesi karbamazepin (CBZ) teknik bilgileri 23
Tablo 4.1. Yalnız US ve US destekli proseslerle ilaç arıtımı 39
Tablo 4.2. CBZ'nin Lepidium Sativum fitotoksisite testi sonuçları 45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Am	: Genlik
Atm	: Atmosferik basınç
C_0	: Başlangıç konsantrasyonu (mg/L)
$C_{15}H_{12}N_2O$	: Karbamazepin
cm	: Santimetre
cm^2	: Santimetre kare
Ct	: Proses sonucundaki konsantrasyon (mg/L)
Dk	: Dakika
H_2O_2	: Hidrojen peroksit
K	: Kelvin
$K_2S_2O_8$	: Potasyum persülfat
KHz	: Kilohertz
L	: Litre
max	: Maksimum
mg	: Miligram
MHz	: Megahertz
mm	: Milimetre
mM	: Milimolar
MPa	: Atmosfer basıncı
NaOH	: Sodyum hidroksit
ng	: Nanogram
NP	: Nano partikül
n- ZnO	: Nano çinko oksit
R	: Kritik moleküler mesafe
sn	: Saniye
V	: Hacim
ZnO	: Çinko oksit
^oC	: Santigrat derece
W	: Watt
λ	: Dalga boyu
µg	: Mikrogram

Kısaltmalar

CBZ	: Karbamazepin
Çİ	: Çimlenme indisi
EC_{50}	: Etkili konsantrasyon
İOP	: İleri oksidasyon prosesleri
PPCP	: İlaç ve kişisel bakım ürünleri
PRC	: Parasetamol
TB	: Toksik birim
US	: Ultrases

ULTRASES DESTEKLİ İLERİ OKSİDASYON PROSESİ İLE SUCUL ORTAMDAN KARBAMAZEPİN GİDERİMİ

ÖZET

Karbamazepin (CBZ), İlaç ve Kişisel Bakım Ürünleri (PPCP'ler) grubunun bir parçası olan antiepileptik bir ilaçtır. Epilepsi, nöropatik ağrı sendromları ve bipolar depresyon için kullanılan, stabil yapıda bir ilaçtır. İnsanlar ve hayvanlar tarafından yaygın olarak kullanılan CBZ, az miktarda hiç bozulmadan vücuttan dışarı atılmaktadır. CBZ, düşük biyolojik parçalanabilirliği nedeniyle geleneksel atıksu arıtma tesislerinde genellikle bozunmamakta, yüzey suları ve yeraltı suların da kirliliğe yol açmaktadır. Marmara denizi su sütununda max 1,84 µg/L ve kanalizasyon sularında ise 0,1-5 µg/L arasında değişen seviyelerde CBZ ölçülmüştür. Bu nedenle CBZ'nin atıksulardan giderimi üzerine alternatif arıtım yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden Ultrases (US) arıtımı ile sonikasyon prosesi son yıllarda dikkat çekici proseslerden biridir. Bu çalışmada ilaç ham maddesi olan Karbamazepinin, İleri Oksidasyon Proseslerinden olan US prosesi, US/oksidant ve US / katalizör prosesleriyle giderimi araştırılmıştır. Bandalin Sonopuls marka prob tipi ultrasonik homojenizatör kullanılarak yapılan deneylerle US prosesi için optimum arıtım şartları belirlenmiştir. Çalışmalar sentetik olarak hazırlanan CBZ çözeltileri ile yapılmıştır. Proses değişkenleri olarak pH, reaksiyon süresi, başlangıç konsantrasyonunun CBZ giderim verimi üzerine etkileri incelenmiştir. Buna göre proses şartları; pH 5, reaksiyon süresi 180 dk ve başlangıç CBZ konsantrasyonu 5 mg/L olarak belirlenmiştir. Arıtma verimini arttırmak için US prosesine oksidant ilavesi yapılmıştır. Oksidant olarak hidrojen peroksit (H_2O_2) ve potasyum persülfat ($K_2S_2O_8$) kullanılmıştır. US çalışmalarında belirlenen optimum şartlarda oksidant eklenerek optimum oksidant ve oksidant dozu belirlenmiştir. Buna göre optimum oksidant potasyum persülfat ve oksidant miktarı 3,125 mM $K_2S_2O_8$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca arıtma verimini arttırmak için US prosesine katalizör ilavesi yapılmıştır. Katalizör olarak nano çinko oksit (n-ZnO) kullanılmıştır. Optimum katalizör miktarı 0,1g n-ZnO olarak belirlenmiştir. US prosesine aynı anda hem oksidant hem de katalizör ilave edilerek arıtıma etkisi incelenmiştir. Optimum oksidant ile katalizörün aynı anda uygulanmayışla sinerjik bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda sucul ortamdan US prosesi ile %42,2; US / oksidant prosesi ile % 53 ve US/ katalizör prosesi ile %47 CBZ giderim verimi elde edilmiştir. CBZ'nin toksik etkisini belirlemek için Fitotoksisite testi yapılmıştır. Bunun için ham atıksu, US, US/ oksidant, US / katalizör, US /oksidant / katalizör prosesleriyle arıtılmış atıksu örnekleriyle Lepidium sativum (bahçe teresi bitkisi) ekimi yapılmış ve oda sıcaklığında 144 saat inkübe edilmiştir. Lepidium sativumdaki büyümeler ölçülerek (%) inhibisyon değerleri, (%) çimlenme indeksleri (Çİ), etkili konsantrasyon (EC_{50}) ve toksik birim (TB) değerleri belirlenmiştir. Buna göre kök bölgesindeki uzama; ham atıksu için 5,98, US/ oksidant prosesiyle arıtılmış atıksuda 3,89 hesaplanmıştır. Toksik birim değeri azalsa da hala toksik sınıfı içerisindedir. Toksisiteyi azaltmak için mutlaka arıtım gereklidir. Proses UV-Ozon gibi proseslerle birleştirilerek arıtımın artması hedeflenebilir.

Anahtar Kelimeler: Karbamazepin, Kavitasyon, Sonikasyon, Ultrases, US/PS.

CARBAMAZEPİNE REMOVAL FROM AQUATİC ENVİRONMENTS BY ULTRASOUND-ASSİSTED ADVANCED OXİDATİON PROCESS

ABSTRACT

Carbamazepine (CBZ) is an antiepileptic drug that is part of the Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) group. It is a stable drug used for epilepsy, neuropathic pain syndromes and bipolar depression. CBZ, which is widely used by humans and animals, is excreted from the body in small amounts without decomposition. Due to its low biodegradability, CBZ is generally not decomposed in conventional wastewater treatment plants and causes pollution in surface waters and groundwater. CBZ has been measured at levels ranging from 1.84 µg/L in the Marmara Sea water column and 0.1-5 µg/L in sewage waters. Therefore, alternative treatment methods have been developed for the removal of CBZ from wastewater. Among these methods, ultrasound (US) treatment and sonication processes are among the most remarkable processes in recent years. In this study, the removal of the pharmaceutical raw material Carbamazepine by the US process, US/oxidant and US/catalyst processes, which are Advanced Oxidation Processes, was investigated. Optimum treatment conditions for the US process were determined by experiments using Bandalin Sonopuls brand probe type ultrasonic homogenizer. The studies were carried out with synthetically prepared CBZ solutions. The effects of pH, reaction time and initial concentration on CBZ removal efficiency were investigated as process variables. Accordingly, process conditions were determined as pH 5, reaction time as 180 min and initial CBZ concentration as 5 mg/L. Oxidant was added to the US process to increase the treatment efficiency. Hydrogen peroxide (H_2O_2) and potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) were used as oxidants. The optimum oxidant and oxidant dose were determined by adding oxidant under the optimum conditions determined in US studies. Accordingly, the optimum oxidant potassium persulfate and oxidant amount were determined as 3.125 mM $K_2S_2O_8$. In addition, a catalyst was added to the US process to increase the treatment efficiency. Nano zinc oxide (n-ZnO) was used as the catalyst. The optimum catalyst amount was determined as 0.1 g n-ZnO. The treatment effect was investigated by adding both oxidant and catalyst to the US process at the same time. It was determined that there was no synergistic effect when the optimum oxidant and catalyst were not applied at the same time. In the studies, 42.2% CBZ removal efficiency was obtained from the aquatic environment with the US process, 53% with the US/oxidant process and 47% with the US/catalyst process. Phytotoxicity test was performed to determine the toxic effect of CBZ. For this purpose, Lepidium sativum (garden cress plant) was planted with raw wastewater, US, US/oxidant, US/catalyst, US/oxidant/catalyst process treated wastewater samples and incubated for 144 hours at room temperature. Growth in Lepidium sativum was measured and (%) inhibition values, (%) germination indexes (CI), effective concentration (EC_{50}) and toxic unit (TB) values were determined. Accordingly, elongation in the root zone was calculated as 5.98 for raw wastewater and 3.89 for wastewater treated with US/oxidant process. Although the toxic unit value decreases, it is still in the toxic class. Treatment is absolutely necessary to reduce toxicity. The process can be combined with processes such as UV-Ozone to increase treatment.

Keywords: Carbamazepine, Cavitation, Sonication, Ultrasound, US/PS.

1. GİRİŞ

Tıbbi ilaç endüstrisi dünyada ve ülkemizde sağlık ve çevre açısından önemli yere sahiptir. Gerek insanlar gerekse hayvanlar tarafından kullanımı elzem olan ilaçların kullanımı gittikçe artmaktadır. İlaçlar, uzun süre saklanabilmeleri ve kolayca tüketilebilmeleri için oldukça stabil yapıda üretilirler. Kullanılan bu ilaçların bir kısmı, düşük biyolojik bozunmadan dolayı, hiç değişime uğramadan vücuttan atılarak doğaya karışmaktadır.

Antieliptik bir ilaç olan Karbamazepin (CBZ) oldukça stabil yapıdadır. Bu sebeple klasik atıksu arıtma tesislerinden geçip kolayca deşarj noktasına ulaşır. Doğada yavaş bozunmasından dolayı, antropojenik bir iz bileşik olarak kabul edilmektedir. Doğada birikir ve su kirliliğine yol açar. 1960'lı yıllardan beri kullanılan CBZ, çevreyi kirleten mikro kirletici olarak sınıflandırılmaktadır.

CBZ, günümüzde yüzeysel sularda, yeraltı sularında hatta içme sularında tespit edilmektedir. Marmara denizinde, denizin su sütununda maksimum CBZ miktarı 1,84 µg/L olarak belirlenmiştir (Korkmaz ve diğ.,2022). Güney Kore'de arıtılmış içme suyunda 1,22 ng/L CBZ tespit edilirken, ülke çapındaki musluk sularında ise 22,2 ng/L CBZ tespit edilmiştir (Kim ve diğ.,2024). Sucul ortamlarda nano gram konsantrasyonlarda bulunmasına rağmen canlı yaşamını olumsuz etkileyen karbamazepinin arıtılması gerekmektedir.

Yapılan çalışmalar karbamazepinin, aktif çamur ve membran biyoreaktör ile gideriminin düşük olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra İOP (UV, ozon, Foto-fenton ve ultrases vs.), aktif karbon, nanofiltrasyon ve ters ozmoz prosesleri ile CBZ giderimi oldukça yüksektir.

Ultrases (US) prosesi, $^{\bullet}H$, $^{\bullet}OH$, $^{\bullet}HO_2$ ve H_2O_2 radikallerinin oluşmasına dayanan bir kimyasal oksidasyon prosesidir. Yenilikçi, modern ve sürdürülebilir bir teknoloji olan ultrases ışınımı kullanılarak, kimyasal kullanmadan -veyahut az miktarlarda kimyasal kullanılarak- su ortamında kavitasyon olayı gerçekleştirilerek ortamdaki kirleticilerin oksitlenmesi sağlanmaktadır.

US prosesi tek başına uygulanabileceği gibi kirletici giderim verimini arttırmak suretiyle başka proseslerle birlikte yahut ön arıtma olarak kullanılabilmektedir.

1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Ultrases destekli ileri oksidasyon prosesi ile sulu çözeltilerden ilaç arıtımını konu alan bu tezin amacı;

hedef kirletici olarak seçilen CBZ çözeltisinin US, US/oksidant, US/katalizör ve US/oksidant/katalizör prosesleri ile arıtılabilirlik seviyelerini belirlemektir. Ayrıca, ham çözelti ve arıtılmış suyun toksisite seviyelerinin fitotoksisite testleri ile belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda çalışmanın kapsamı;

- Sentetik CBZ çözeltisi dalga boyu taraması yapılması ve maksimum pik verdiği dalga boyunun belirlenmesi,
- Düşük (0,1-1 mg/L) ve yüksek (1-5,0 mg/L) konsantrasyonlarda CBZ çözeltilerine ait absorbans-konsantrasyon eğrilerinin çizilmesi,
- Ultrases prosesinde; başlangıç konsantrasyonu, reaksiyon süresi ve pH parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi,
- Optimum işletme şartlarında US prosesinin etkinliğinin oksidant ve katalizör ilavesi ile değişiminin incelenmesi,
- US, US/oksidant, US/katalizör ve US/oksidant/katalizör prosesleri ile arıtılabilirlik çalışmalarının absorbans giderimi üzerinden takip edilmesi,
- Toksisite testi için, arıtılmış atıksu ve ham su örnekleriyle, Lepidium sativum (bahçe teresi bitkisi) tohumu kullanılarak Fitotoksisite deneylerinin yürütülmesi,
- Deney sonuçlarının literatür verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi ve yorumlanması ile genel değerlendirme aşamalarından oluşmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İlaçlar, canlı hücreler üzerinde etki etmek üzere özel olarak tasarlanmış birkaç kimyasal grubundan birini temsil eder. Hastalıkların teşhisinde ve tedavisinde veya semptomların giderilmesinde veya hafifletilmesinde kullanılırlar (Wennmalm ve diğ., 2019). Sentetik ilaçlar esas olarak 20. yüzyılda tanıtılmış ve yılda milyonlarca ton kullanılmaktadır (Rastogi ve diğ., 2018). Çoğu ilaç kimyasal olarak kararlıdır ve hafif lipit çözünürlüğe sahiptir. İlaçlar bozulmadan atılır veya idrarla metabolize edilir (Wennmalm ve diğ., 2019). Su ve toprak ekosistemi neredeyse kaçınılmaz olarak tüm antropojenik kirleticilerin varacağı son duraktır (Beltran ve diğ., 2024).

Antiepileptik ilaçlar , antikonvülsanlar, merkezi sinir sistemini seçici olarak deprese eden ilaçlardır. Bu ilaçlar esas olarak merkezi sinir sistemine zarar vermeden ve solunumu deprese etmeden epileptik nöbetlerin baskılanması için kullanılırlar. Hastaların yaklaşık % 70'inde etkilidirler (Sonat, 2009). Antiepileptik ilaçlar beyin nöronları üzerindeki etki mekanizmalarına, etkili bir şekilde kontrol ettikleri nöbet tiplerine, farmakokinetik özelliklerine, yan etki profiline, teratojenitelerine ve ilaç-ilaç etkileşimlerine yatkınlıklarına göre çeşitlilik gösterir (Myint ve diğ., 2025).

Antiepileptik ilaçlar epilepsili kişiler için ana tedavi yöntemidir. Bununla birlikte, son yıllarda, giderek daha fazla insan bunları migren, kronik nöropatik ağrı ve duygudurum bozuklukları gibi diğer endikasyonlar için kullanılır. Bu ilaçlar dünya çapında çeşitli su kütlelerinde tespit edilmiş olup karbamazepin, çalışmaların çoğunda en sık tespit edilen antikonvülsan ilaç olmuştur (Jesus ve diğ., 2021).

2.1. Karbamazepin (CBZ) ve Çevresel Etkileri

Karbamazepin (CBZ), İlaç ve Kişisel Bakım Ürünleri (PPCP'ler) grubunun bir parçası olan antiepileptik bir ilaçtır. Epilepsi, nöropatik ağrı sendromları, bipolar depresyon ve için kullanılan, stabil yapıda bir ilaçtır. Ayrıca dirençli şizofreni, alkol yoksunluğu, huzursuz bacak sendromu, bunama ile ilişkili psikotik davranış ve travma sonrası stres bozuklukları gibi diğer duygusal bozuklukları tedavi etmek için de kullanılır. 20. yüzyılın 60'lı yıllarının başından itibaren tıbbi bir preparat olarak kullanımı başlamıştır (Tolou-Ghamari ve diğ., 2013).

PPCP'ler, insanlardaki belirli biyokimyasal yolları değiştirmek için geliştirilmiştir, ancak su ekosistemlerine deşarj edildiklerinde biyota üzerinde olumsuz etkilere de neden olabilirler. Bu bileşikler, göllere ve nehirlere sürekli deşarjları nedeniyle kalıcı olarak kabul edilirler (Webb, 2001). Yüzey sularında küçük konsantrasyonlarda bulunsa bile, sürekli girdileri, yerleşik organizmalar için nesiller boyu maruziyete yol açmaktadır (Daughton ve Ternes, 1999).

CBZ'nin su ekosistemine girişi esas olarak, CBZ'nin emilmeyen kısmının insan dışkısı, son kullanma tarihi geçmiş veya kullanılmamış ilaçların atılması yoluyla gerçekleşir. (Veigra ve diğ., 2010). Oral yoldan verilen karbamazepinin yaklaşık %72'si emilirken, %28'i değişmeden kalır ve daha sonra dışkı yoluyla atılır. Emildikten sonra karbamazepin karaciğer tarafından yoğun bir şekilde metabolize edilir, dozajın yalnızca yaklaşık %1'i değişmemiş bir formda vücuttan ayrılır (Tahar ve diğ., 2010,). Kronik olarak ve genellikle yüksek dozlarda (günlük 100-2000 mg) uygulanır ve bu nedenle yıllık üretimi yüksektir (Tina ve diğ., 2009)

Karbamazepini mevcut prosedürler, iz düzeyde yüzey sularında tespit edilmiştir. 2022 Nisan ayında gerçekleştirilen bir çalışmada Marmara denizinin farklı noktalardaki su sütununda <0,0038-1,84 mg/L CBZ tespit edilmiştir (Korkmaz ve diğ., 2022). CBZ kanalizasyon sularında ise 0,1-5 µg/L arasında değişen seviyelerde bulunmuştur (Viglino, 1983). Ayrıca karbamazepin arıtma proseslerinden neredeyse hiç etkilenmeyen birkaç bileşikten birisidir. Geleneksel atık su arıtma tesislerinden arıtılmadan geçen karbamazepin, kolayca su ortamına ulaşarak yüzey suyu, yeraltı suyu ve hatta içme sularına karışabilmektedir (Clara ve diğ., 2004; Dwivedi ve diğ., 2016). Sudan toprağa geçebilir ve oradan nemle birlikte emilerek bitkiler tarafından büyümeleri için tehlike oluşturabilir (Gworek ve diğ., 2021). Bu sebeple ileri arıtım teknolojileri ile kontrol edilmeleri gerekmektedir.

Karbamazepinin toksik etkilerinin olduğu yapılan çalışmalarla gözlemlenmiştir. CBZ toksisitesini belirlemek için yapılan çalışmalarda Daphnia magna ve Vibrio fischeri toksisite testi uygulanmıştır. Bu çalışmaya göre sırasıyla EC_{50} değerleri; 48 saat saat sonunda 9,53 mg/L, 15. dakika sonunda 36,1 mg/L konsantrasyonlarında olduğu tespit edilmiştir (Yıldız, 2018). CBZ'nin toksik etkilerinden bazıları arasında Nauphoeta cinerea'da lokomotorda azalma, davranışsal toksisite ve Danio rerio'da nörotoksisite yer

alır 1-10 μg/L gibi düşük bir konsantrasyonda bile CBZ'ye maruz kalmak, Carassius Carassius'ta malondialdehit aktivitesinin artmasına, Tigriopus fulvus'ta doğurganlığın azalmasına vb. neden olabilir (Adedara ve diğ, 2021; Chen ve diğ, 2020; Nkoom ve diğ, 2020; Prato ve diğ, 2023). Çin'de yapılan bir çalışmada balıklar (Gobiocypris rarus) üzerinde endokrin bozucu etkilere neden olduğu, balık embriyonik gelişimini hızlandırabildiği ve larva davranışını bozduğu tespit edilmiştir (Sun ve diğ.,2023). Daha da önemlisi, karbamazepin ayrıca insan embriyonik hücrelerinin büyümesi üzerinde inhibitör etkiler gösterir (Pomati ve diğ.,2006).

2.2. Karbamazepin Arıtım Metodları

Karbamazepinin aktif çamura tutunma potansiyeli düşüktür. Bu sebeple geleneksel atıksu arıtma tesislerinde %10'un altında giderilebilmektedir (Dwivedi ve diğ., 2016). Arıtım metodları; biyolojik ve ileri fiziko-kimyasal arıtma teknolojileri olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir.

Biyolojik arıtma teknolojileri;

- Aktif çamur
- Beyaz Kök Mantarları ve Hücre Dışı Enzimleri ile arıtım

İleri fiziko-kimyasal arıtma teknolojileri;

- Nanofiltrasyon ve Ters Ozmoz
- Aktif Karbon
- İleri Oksidasyon Prosesleri
- Kombine/Hibrit Arıtma Sistemleri ile arıtım.

Günümüzde ileri oksidasyon prosesleri (İOP) mikrokirleticilerin üzerinde önemli bir giderim metodu olarak kullanılmaktadır. İOP'ler, organik maddelerin oksidatif olarak parçalanması için hidroksil radikallerinin ($^{\bullet}OH$) üretilmesi prensibine dayanmaktadır (Sönmez, 2015). Ozon ve hidrojen peroksite kıyasla hidroksil radikali, daha hızlı tepkimeye girer ve seçici olmaksızın güçlü bir kimyasal oksidasyon işlemi gerçekleştirir. İOP'lerin en önemli avantajı kirleticiyi başka bir faza aktarmak yerine oksitleyerek daha az zararlı ve toksik forma dönüştürmektir (Loraine ve diğ.,1992).

2.3. Ses ve Ultrases

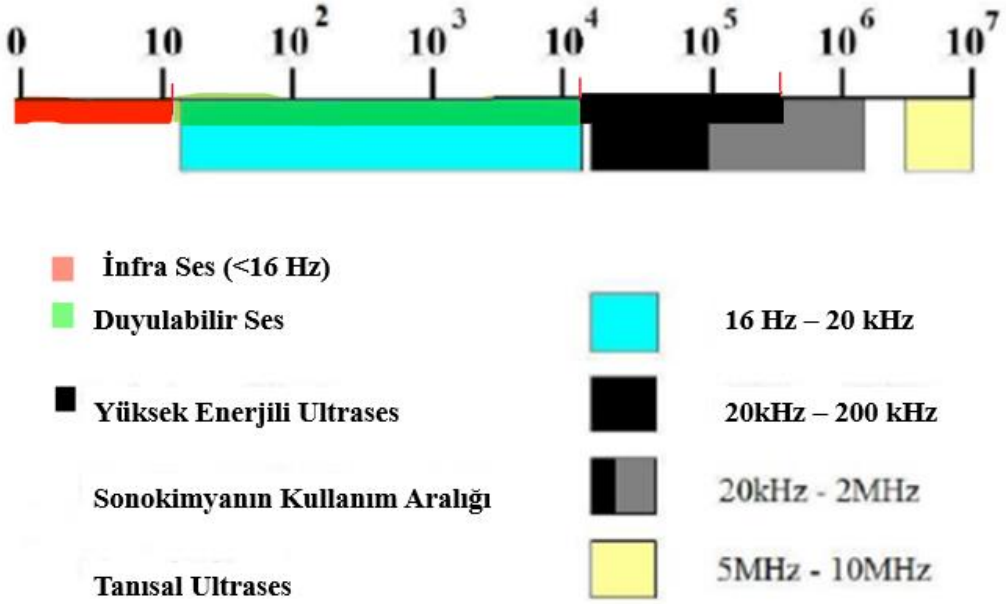
Mekanik bir enerji çeşidi olan ses, denge durumundaki taneciklerin titreşimleridir. Sinüzoidal dalga şeklinde hareket eden ses titreşimlerinin, saniyedeki devir sayısına sesin frekansı denir. Ses frekansının birimi Hertz'dir. Hertz bir saniyedeki dalga sayısıdır (Yakut, 2019; Ildırar , 2014).

Ses dalgaları boşlukta iletilmez ancak moleküler ortamda iletilebilirler. Sesin yayılabilirliği arttıkça ortamların sıkışabilirliği azalmaktadır. Bu yüzden ses hızı en hızlı katılarda, en yavaş ise gazlardadır. Ayrıca sıcaklığın artması ile katılarda sesin hızı değişmezken, sıvılarda ve gazlarda ise artmaktadır (Eren, 2018; Yıldız, 2021).

İnsan kulağının duyabildiği ses dalga aralığı 16 Hz ile 18 kHz'dir. Ultrases, insan kulağının işitebileceğinin üzerinde (20 kHz ile 10 MHz) frekansa sahip ses dalgaları olarak tanımlanır (Yıldız, 2021). Canlılar dünyasında ultrasesi yarasa ve yunus balığı kullanmaktadır (Aysun, 2010).

Ultrasesin varlığı röntgen ışınlarından öncesine dayanmaktadır. Ultrases, dünya savaşları sırasında denizaltılarının gönderdiği ses dalgalarının toplu balık ölümlerine neden olmasıyla keşfedildi. Ultrases ile ilgili çalışmalar 20.yüzyılın başlarından beri devam etmektedir. 1960'lı yıllarda düşük frekans ve yüksek enerjili ultrases endüstride yavaş yavaş yerini almaya başlamıştır (Yıldız, 2021; Alacahan, 2017). Ultrasesin bir İOP olarak kullanımı son yıllarda en ilgi çekici araştırma konulardan biri haline gelmiştir (Eren, 2018). Ultrases temel olarak, sucul ortamda radikaller oluşturarak, organik maddelerin bir dizi kimyasal reaksiyonlarla parçalanmasına sebep olan bir prosestir. Bu proseste kimyasal etkisinin yanı sıra fiziksel ve biyokimyasal etkiler de oluşur. Bu etkilerden en önemlisi kavitasyondur. Ultrases dalgaları sucul ortamda baloncuk veya kavitasyon oluştururlar. Kısaca kavitasyon, ultrases dalgalarının kısa zaman içerisinde oluşturduğu kararlı ve kararsız kabarcıkların giderek büyümesi ve daha fazla enerji absorplayamayacak kritik hacme ulaştıklarında patlaması veya içe doğru sönümlemesidir. Burada kavitasyon kabarcığı içerisinde ve dışarısında oluşan radikaller ile hidrojen peroksit zincir reaksiyonlar başlatarak kimyasal oksidasyon işlemi gerçekleşir (Ghodke, 2023). Ayrıca karıştırma, katı yüzey alanının artması, parçacıkların parçalanması ve kütle

transferinin artması gibi fiziksel işlemler de gerçekleşir. Ultrases frekans aralığı 20 kHz-10 MHz değişim göstermektedir (Eren ve İnce, 2010) (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Ultrasesin frekans aralığı

Su arıtımında 20 kHz veya daha yüksek ses dalgası kullanılması, ultrases, diğer bir değişle "sonikasyon" olarak adlandırılmaktadır. Sonikasyon prosesinde oluşan kavitasyon nedeniyle su moleküllerinin ayrışması sonucu radikaller oluşur. Bu radikaller kavitasyon kabarcığı içerisinde olağanüstü şartlarda bir dizi kimyasal reaksiyonlar başlatır. Böylece organik kirleticilerin parçalanmasına sebep olur. Ayrıca ultrasonik kavitasyon, karıştırma, parçacıkların parçalanması, katı yüzey alanının artması ve kütle transferinin artması gibi mekanik etkilere de sebep olur. Sonuç olarak ultrases yöntemi fazladan kimyasal ilavesi gerektirmeyen, uygulaması basit, temiz bir yöntemdir (Yakut , 2019).

2.4. Ultrases Dalgalarının Elde Edilmesi

Ultrases dalgalarını piezoelektrik ile dönüştürücü oluşturur ve bir iletici sayesinde yayınımı sağlanır. Piezoelektrik olay bir kuvars kristali veya herhangi bir piezoelektrik malzemenin mekanik baskı ve gerilime mağruz kalmasıyla elektrik açığa çıkarmasıdır. Oluşan bu elektrik enerjisinin potansiyeli dönüştürücüde değiştirilerek yüksek frekansta

mekanik titreşime yani ultrasese neden olur. Ultrases iletici sayesinde arıtımın sağlanacağı ortama iletilir.

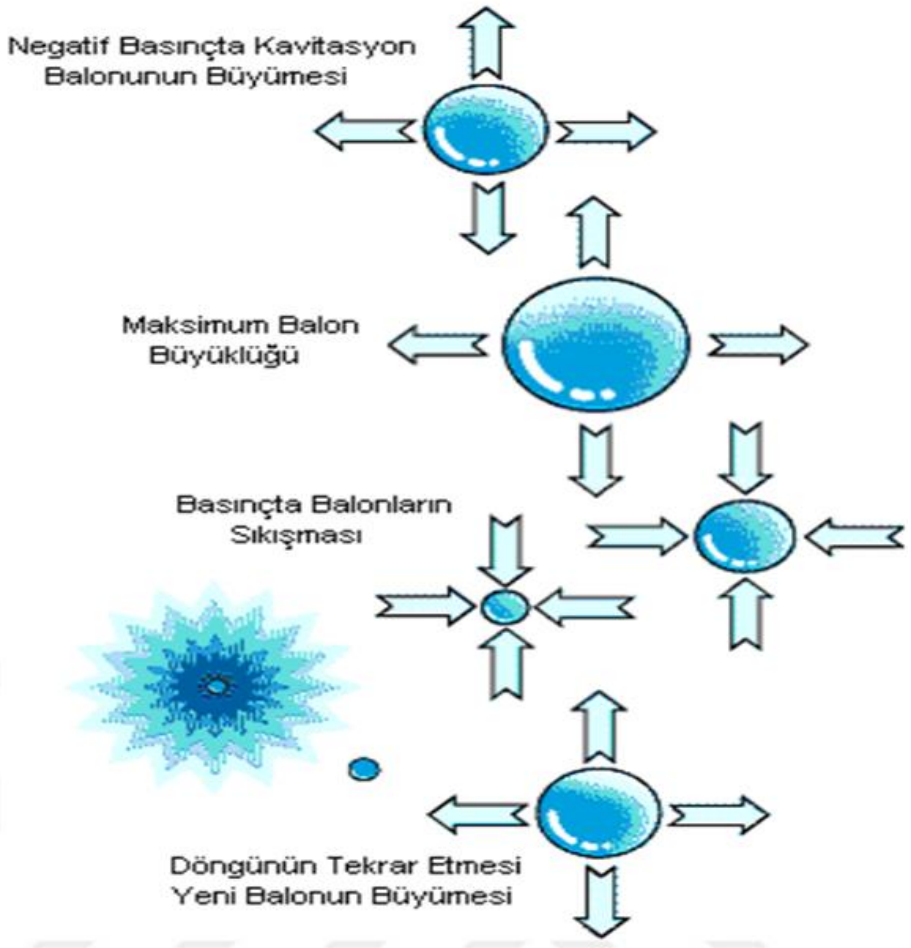
1917 yılında üretilen ilk ultrasonik deniz altı dedektörü temel olarak üç parçadan oluşuyordu; İki çelik levha, levhalarının arasına kaplanmış kuvars kristalleri ve hidrofor. Burada hidrofor dönen yankıyı algılamak için kullanılıyordu. Levhalar arasındaki kuvars kristallerinde elektirik üretilip dönüştürücüyle ultrasese çevriliyordu. İletici sayesinde denize ultrases yayınımı sağlanıp, yankılarını duymak için gereken zaman ölçülerek, nesneye olan uzaklık belirleniyordu (Cravotto ve diğ., 2012).

Ultrases verilen ortama dalgalar halinde yayılır. Ultrases dalgasının farklı türleri olmasına karşın bütün teşhis uygulamalarında boyuna dalgalardan yaralanılır. Ultrases, ortamı oluşturan birim yapının denge hali civarına ileri geri titreşimidir. Ultrases dalgasıyla enerjinin, titreşime paralel doğrultuda ortama yayınımı sağlanır. Ultrasonik dalga çeşitleri atomların titreşim doğrultusu ile enerjinin yayınım doğrultusu birbiri ile karıştırılmamalıdır, bunlar ayrı şeylerdir. Titreşim ve yayınım doğrultularına göre ultrasonik dalgalar başlıca üç çeşittir; boyuna dalga, enine dalga ve yüzey dalgası. Bunlardan boyuna dalganın titreşim ve yayınım doğrultuları birbirine paralelken enine dalgada diktir. Yüzey dalgasında ise hem dik hemde elips şekillidir. Özellikleri itibariyle aralarında önemli farklar vardır (Seher ve diğ., 2006).

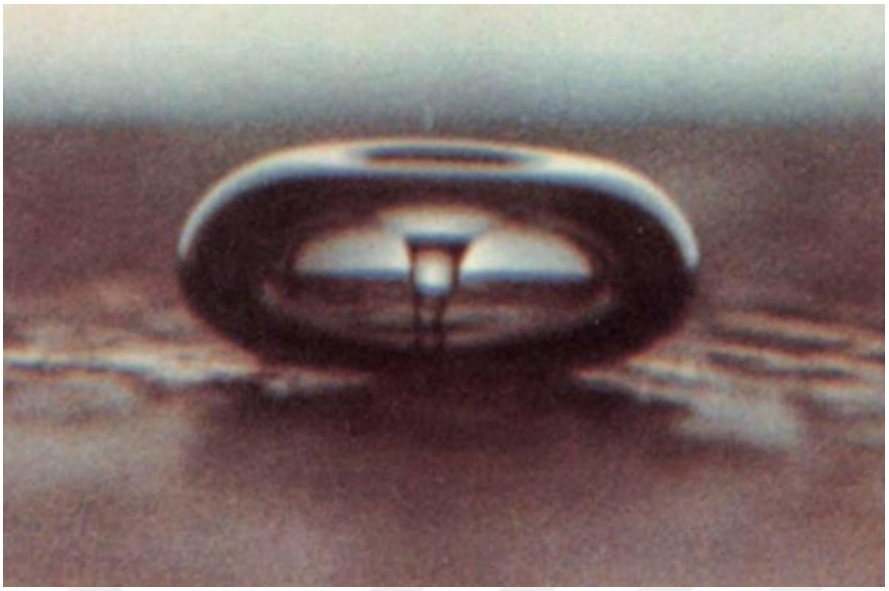
2.5. Ultrases Prosesi ve Kavitasyon

Ultrases dalgaları sucul ortama uygulandığında genleşme ve sıkışma döngüleri oluştururlar. Sıkıştırma döngüleri, sıvıda molekülleri beraber iterek " pozitif basınç " oluştururken genleşme döngüleri, sıvıda molekülleri birbirinden ayırarak "negatif basıç" oluşturur (Şekil 2.2.). Su molekülleri arasındaki "kritik moleküler mesafe" R için (su için 10^{-8} cm), sıvıya büyük bir akustik basınç (negatif basıç) uygulanırsa sıvı kırılır ve boşluklar meydana gelir. Burada kavitasyon kabarcığı adı verilen içi buharla dolmuş küçük baloncuk oluşur. Bu kavitasyon kabarcığı sucul ortamda geçici ve kararlı olmak üzere iki farklı durumda oluşabilir. Her iki kabarcık ta sahip olduğu rezonans frekansının, uygulanan ultrases frekansına eşit olduğu denge anına kadar içerisine ortamdan gaz ve buhar alarak denge durumuna kadar büyür (Şekil 2.3.). Bu noktada kabarcık ortamdaki yüksek frekanslı ses enerjisini absorplar. Kabarcık aşırı büyüdüğünde daha fazla enerji

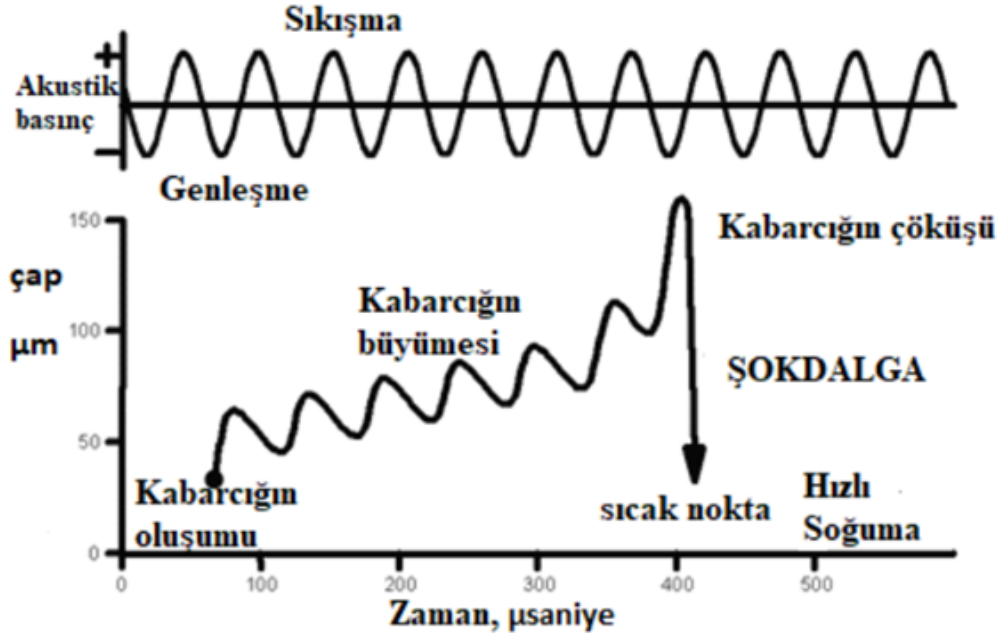
absorplayamaz ve patlar veya şiddetli sönerek çöker (Şekil 2.4.). Kararlı kavitasyon kabarcığı geçici kabarcığa neden olabileceği gibi geçici kabarcıkta kararlıya dönüşebilir (Wu ve diğ.,2013). Çöken kavitasyon kabarcığının içinde sıcaklık çok yüksek bir ısıtma ve soğutma hızıyla ($>10^{10}$ K/sn) ≈5000 K'e basınç ≈1000 atm'e kadar çıkabilmektedir. Böylelikle kavitasyon soğuk bir sıvıda olağanüstü fiziksel ve kimyasal şartlar meydana getirebilir (Eren,2018; Alacahan, 2017).



Şekil 2.2. Kavitasyon Kabarcıklarının Oluşumu (Duran ve diğ., 2006)



Şekil 2.3. Kavitasyon kabarcığı (Suslick, 1989)



Şekil 2.4. Bir akustik kavitasyon kabarcığının yaşam döngüsü (Eren, 2018)

Ultrases dalgalarının oluşturduğu akustik kavitasyon içerisinde su molekülleri parçalanır ve hidroksil ($^{\bullet}OH$), hidroperoksil ($^{\bullet}HO_2$) ve hidrojen ($^{\bullet}H$) radikalleri oluşur (Puttasrinivasa ve diğ.,2023). Bunun yanı sıra ortamda hidrojen peroksit te oluşur. Oluşan radikaller ve hidrojen peroksit kimyasal reaksiyonlar başlatarak ortamdaki kirleticinin parçalanmasına sebep olur. Bu akustik kavitasyonun kimyasal etkisidir. Kavitasyon ayrıca karıştırma,

parçacıkların parçalanması, katı yüzey alanının artması ve kütle transferinin artması gibi mekanik etkilere de sebep olur (Camargo ve diğ.,2020).

Kavitasyon kullanılarak organik kirleticinin bozunması sırasında meydana gelen bütün reaksiyonlar Eşitlik (2.1) -(2.11)'de özetlenmiştir (Eren, 2018):

$H_2O))) \rightarrow \cdot OH + \cdot H$ ..... (2.1)

$\cdot OH + \cdot OH \rightarrow H_2O_2$ .....(2.2)

$\cdot OH + \cdot OH \rightarrow H_2O + O$ .....(2.3)

$\cdot OH + \cdot OH \rightarrow H_2 + O_2$ .....(2.4)

$\cdot H + O_2 \rightarrow \cdot HO_2$ .....(2.5)

$\cdot HO_2 + \cdot H \rightarrow H_2O_2$ .....(2.6)

$\cdot HO_2 + \cdot HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$ .....(2.7)

$\cdot OH + H_2O \rightarrow H_2O_2 + \cdot H$.....(2.8)

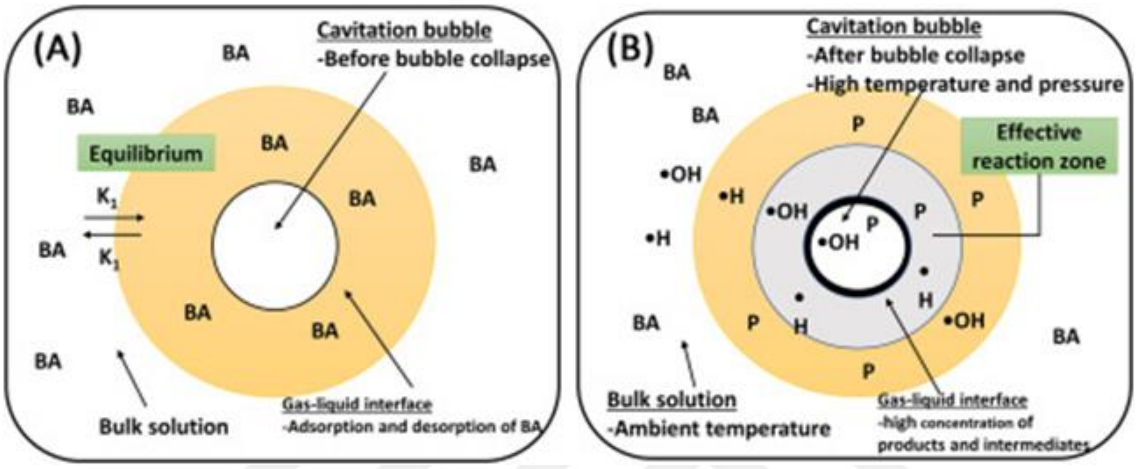
$\cdot H_2O + \cdot O \rightarrow H_2O_2$.....(2.9)

$\cdot H + \cdot H \rightarrow H_2$ .....(2.10)

$H + \cdot OH \rightarrow H_2O$.....(2.11)

Dolayısı ile sulu fazda ultrasonik reaksiyonların gerçekleştiği üç farklı bölge bulunur (Şekil 2.5.): Birincisi, kavitasyon kabarcığının içindeki gaz bölgedir. Burada çok yüksek sıcaklık ve basınç (5000 K ve 1000 atm) hakimdir (Puttasrinivasa ve diğ., 2023). Suyun sonolizi ile oluşan •OH radikallerinin gerçekleştirdiği reaksiyonlar kadar, piroliz reaksiyonları ile uçucu ve hidrofobik türler kolaylıkla parçalanır. İkincisi; kabarcık-sıvı ara yüzeyidir. Burada da yüksek sıcaklık (2000 K) ve 1 atm basınç hakimdir. •OH radikalleri yoğun olarak bulunur ve radikal reaksiyonları baskındır ve pirolitik reaksiyonlar da etkilidir. Bu faz tipik olarak uçucu olmayan maddelerden oluşur. Üçüncü bölge ise sıvı fazdır. Bu fazda ara yüzeyden kaçan serbest radikaller bulunur. Bu radikaller ikincil sonokimyasal reaksiyonlar başlatır ve kirleticiyi parçalar. •OH radikalleri yeniden

H_2O_2'yi oluşturabilirler ve bu durumun tam tersi de oluşabilir. •OH radikallerinin H_2O_2'yi oluşturmak üzere yeniden birleşmesi sıvı fazdan ziyade kabarcık bölgesinde meydana gelmektedir. Ultrasonik reaksiyonlarda ürün oluşumunu etkileyecek çeşitli faktörler mevcuttur: Frekans, ışınlama şiddeti, çözünmüş gazların varlığı, uygulanan dış basınç, çözücünün fiziksel özellikleri, reaksiyon ortamının sıcaklığı vb. (Wu ve diğ., 2013;Eren, 2018).



Şekil 2.5. (A) Kabarcık çökmeden önce sıvı-gaz sınırı ve (B) kabarcık çöktükten sonra bütirik asit sonolizi (Lakshmi ve diğ., 2022)

Bunun yanısıra ultrasesin fiziksel etkileri de mevcuttur. Sucul ortama ultrases dalgaları verildiğinde, ortam dalgalardan gelen enerjiyi emerek dalga yayınımına paralel hareket eder. Kavitasyonun fiziksel etkileri şu şekildedir (Wu ve diğ.,2013):

Mikroakış(microstream): Akustik olarak uyarılan kabarcıkların etrafında ortaya çıkan bir başka olgu da mikro akıştır; bu, hızlı kabarcık salınımlarına göre nispeten yavaş bir ortalama akış anlamına gelir (Sarah ve diğ.,2019).

Mikroakışkanlar(microstreamers): Ultrases dalgaları ve salınımlı gaz kabarcıkları arasındaki etkileşim nedeniyle akustik bir alanda kabarcık akışları gelişir. Salınımlı gaz kabarcığı akışlarının gelişimi, kabarcıkların basınç antinodlarına doğru yüksek hızda hareket ettiği birincil ve ikincil Bjerknes kuvvetlerinden kaynaklanır (Saadah ve diğ.,2016).

Mikrojetler(microjets) ve Şok dalgaları: Kavitasyon kabarcıkları asimetrik olarak çöktüğünde, örneğin bir sınırın yakınında çöktüğünde, metal yüzeyleri çukurlaştırabilen yüksek hızlı sıvı jetleri oluşur. Bunun sonucunda partikül yüzeyinde doğrudan hasar

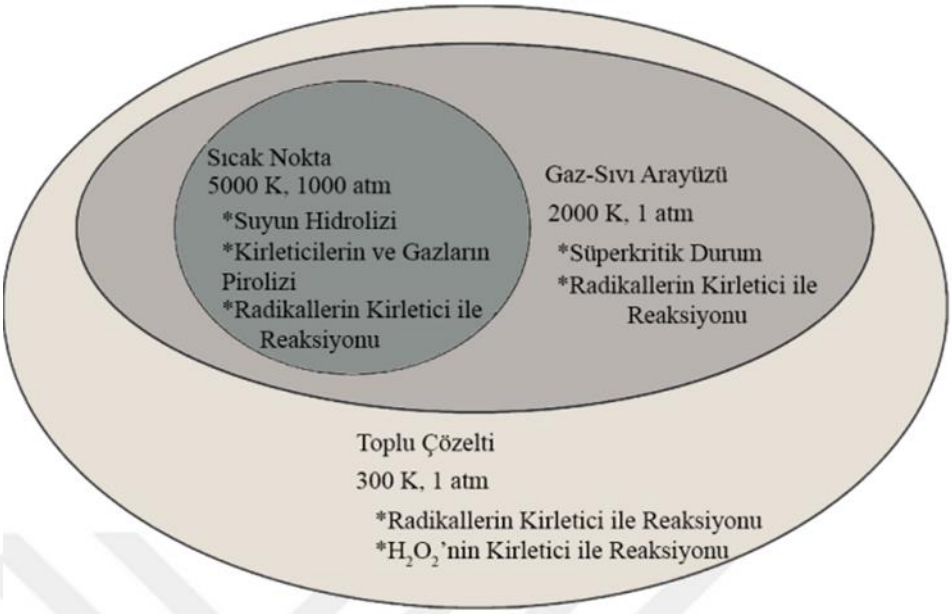
bırakır veya parçalanmasına sebep olur. Kabarcıklar simetrik olarak çöktüğünde, yüksek yoğunluklu şok dalgaları üretilir (Saadah ve diğ.,2016).

2.6. Kavitasyon Çeşidi

Kavitasyon olayı, geçici ve kararlı olacak şekilde 2 farklı biçimde gerçekleşmektedir. Geçici kavitasyon, prob sistemlerinde 20 kHz ve üzeri frekanslarda 10 W/cm^2 dalga şiddetinde meydana gelmektedir. Geçici kavitasyonda kabarcıklar az sayıda akustik salınımla beraber boyutları genişleyerek hemen patlamaktadır. Meydana gelen baloncukların boyutları küçük olmaktadır. Kararlı kavitasyonda ise kabarcıkların büyümesi 200 kHz ve üzerindeki frekanslarda yaklaşık 1000 akustik çevrim neticesinde gerçekleşmektedir. Baloncukların patlama şiddeti geçici kavitasyona kıyasla daha düşük seviyededir (Yıldız, 2021).

Kavitasyon kabarcıklarının içinde, kirleticinin reaksiyonu iki şekilde gerçekleşebilir: yüksek derecede uçucu bileşiklerin pirolizi veya oluşan serbest $^{\bullet}OH$ ile kimyasal reaksiyon. Meydana gelen ilk mekanizma suyun hidrolizidir. Bu durumda "hidrojen ve hidroksil" radikalleri oluşur. Bu radikallerle gerçekleşen oksidasyon reaksiyonları, sadece kabarcığı kapsar. Ya kabarcığın içerisindeki organik kirleticileri ya da kabarcığın dış yüzeyindeki organik kirleticilerin parçalanmasını sağlamaktadır (Camargo ve diğ.,2020).

Ultrases prosesinde meydana gelen diğer mekanizma ise "piroliz"dir. Piroliz işlemi oksijensiz ortamda organik maddenin yanmasıdır. Pirolizle organik maddelerin parçalanması için ortamda yüksek sıcaklık ve yüksek basınç olması gerekmektedir. Kavitasyon baloncukları içerdikleri yüksek sıcaklık ve basınçla adeta kısa süreli mikro reaktör görevi gören sıcak noktalar oluşturular. Ultrasesin kimyasal bir etkisi olan akustik kavitasyonda gerçekleşen bu kimyasal reaksiyonlar yüksek enerjili üç bölgede meydana gelir (Şekil2.6.); termolitik bölgesinde (hot-spot), ara yüzey bölgesinde,toplu çözelti bölgesinde.



Şekil 2.6. Kavitasyon kabarcığı bölgeleri (Wu ve diğ., 2013)

2.7. Kavitasyon Teorileri

Sonikasyon olayında gerçekleşen kimyasal olaylarla ilgili olarak dört teori belirtilmektedir. Bunlar; i) sıcak nokta, ii) elektrik alan, iii) plazma, iv) süperkritik teorisi. Sıcak nokta (hot-spot) teorisi, baloncukların patlamasıyla yüksek basınç (1000 atm) ve yüksek sıcaklık (5000 K˚) oluşmasından söz etmektedir. Elektrik teorisinde, baloncukların parçalanmasıyla yüksek bir elektrik alan farkı oluşması ve buna bağlı olarak bağların kırılmasına dayanmaktadır. Plazma alan teorisinde, baloncuklar içinde mikroplazmalar oluşmaktadır. Süperkritik teoride, ortam şartları suyun kritik koşullarının üstünde (674 K˚, 22.1 MPa) olmakta ve baloncukların parçalanmasıyla süper kritik su oluşumu gerçekleşmektedir (Yakut, 2019; Eren, 2018).

Kavitasyona etki eden parametreler; ses dalgası frekansı, çözücü viskozitesi, çözücü yüzey gerilimi, çözücü buhar basıncı, sıcaklık, dış basınç, yoğunluk, sesin azalmasıdır (Ildırar, 2014).

a) Frekans: Artan frekans ile kabarcık ömrünün arttığı bulunmuştur. Bunun nedeni, daha yüksek frekanslarda bir balonun çökmesi için gereken sürenin, sıkıştırma döngüsü sırasında mevcut olan süreden daha uzun olmasıdır. Ancak, yoğunluk aynı kaldığında, çökmeden önce ulaşılan maksimum yarıçapta önemli bir artış yoktur. Benzer şekilde,

yüksek frekanslı ses dalgaları için, bir baloncuk oluşturmak için gereken süre, seyrekleşme döngüsü sırasında mevcut olandan daha uzun olabilir. Bu nedenle, daha yüksek frekanslı ses dalgaları için, kavitasyon kabarcıklarının üretimi için daha yüksek yoğunluk gereklidir (Moholkar ve diğ.,1999).

b) Viskozite: Düşük viskoziteye sahip çözeltilerde kavitasyon daha kolay gerçekleşir. Kavitasyon kabarcıklarının oluşması için vizkozitesi yüksek sıvıların gerilme anında negatif basınç gerektirir.

c) Yüzey Gerilimi: Yüzey gerilimi yüksek çözücüler kavitasyon kabarcığının oluşumunu olumsuz etkiler bu yüzden düşük yüzey gerilimli çözücülerde kavitasyon daha kolay gerçekleşir.

d) Buhar Basıncı: Düşük buhar basınçlı çözücüde kavitasyon kabarcıklarının çöküşü şiddetli olur. Bu da kavitasyon kabarcığının oluşmasına ve kendiliğinden kritik hacme gelip gerek kavitasyon kabarcığı içerisinde giderim yapmasını engeller (Maria ve diğ.,2025).

e) Sıcaklık: sıcaklığın artması akustik kavitasyon oluşumunu olumsuz etkiler. Yüksek sıcaklıkta meydana gelen kavitasyon kabarcığı gerkenden daha hızlı bir şekilde patlar veya sönümlenir. Bu da giderim performansını etkiler.

f) Dış Basınç: Yüksek dış basınç, sıvıdaki buhar basıncını düşürür ve kavitasyonun başlaması için gereken yoğunluğu arttırır. Yani dış basıncı artırmak sonokimyasal etkiyi arttırır.

g) Yoğunluk: Artan yoğunluk akustik genliği arttırdığından daha şiddetli kabarcık çöküşü gerçekleşir.

h) Sesin Azalması: Sesin azalmasıyla aslında ortama verilen frekans da azalır. Bu sebeple kavitasyon kabarcığı oluşumu olumsuz etkilenir.

2.8. Ultrasesin Etkileri

Ultrases dalgalarının etkisinin, ortamın homojen veya heterojen olmasıyla farlı sonuçları vardır. Homojen ortam için, kavitasyon baloncuklarıyla radikallerin üretilmesi ve sonokimyasal reaksiyonların oluşmasıdır. İkincisi ise sonikasyon işlemi ile sucul ortama indüklenen mekanik etkilerle ilişkilidir (Wu ve diğ., 2013).

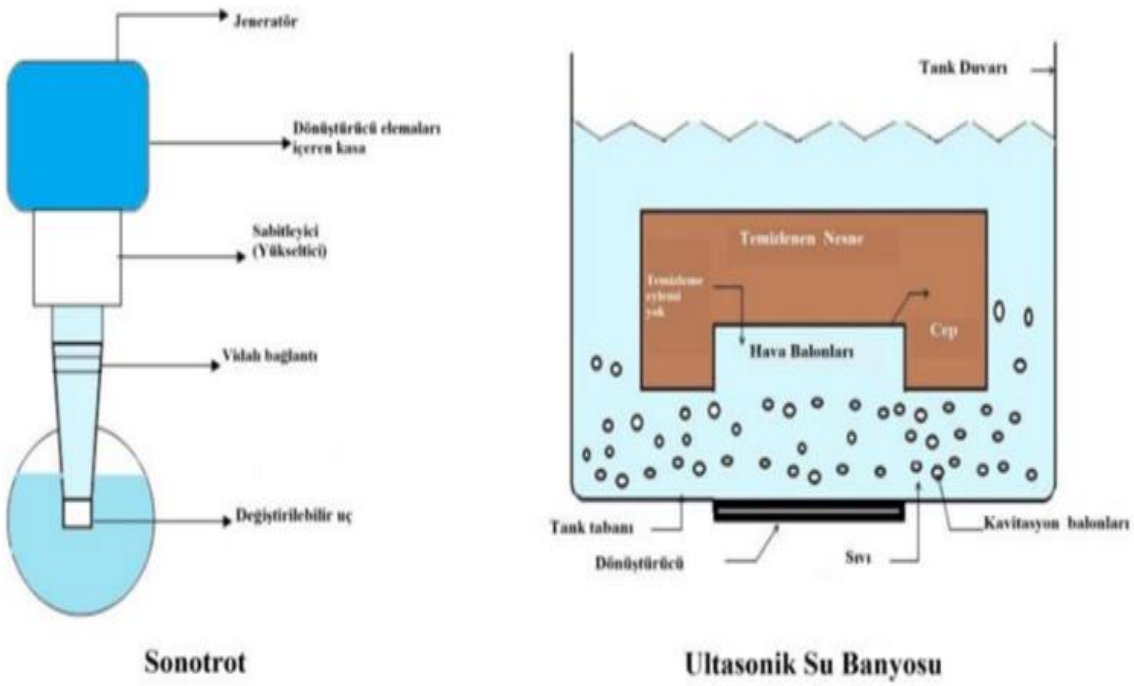
Ultrasesin etkileri genel olarak; fiziksel etkiler, biyokimyasal etkiler ve kimyasal etkiler olarak incelenebilir. Kimyasal etkisi başta kavitasyon olayı ve oksidasyondur. Bunum

yanı sıra reaksiyon hızlanması, kaynama sıcaklığının değişmesi etkileri de sayılabilir (Koparal, 2018; Yıldız, 2021).

Fiziksel etkileri şunlardır; mikroakış, mikroakışkanlar, mikrojetler ve şok dalgaları. Misal katı ve sıvı ortamlardan arıtılmak istenen çözünmüş gazlar için kullanılabilir. Bunun için çözünmüş gazlardan arıtılmak istenen madde ultrasese tabi tutulabilir (Sönmez, 2015; Alacahan, 2017).

2.9. Ultrases Uygulama Yöntemleri

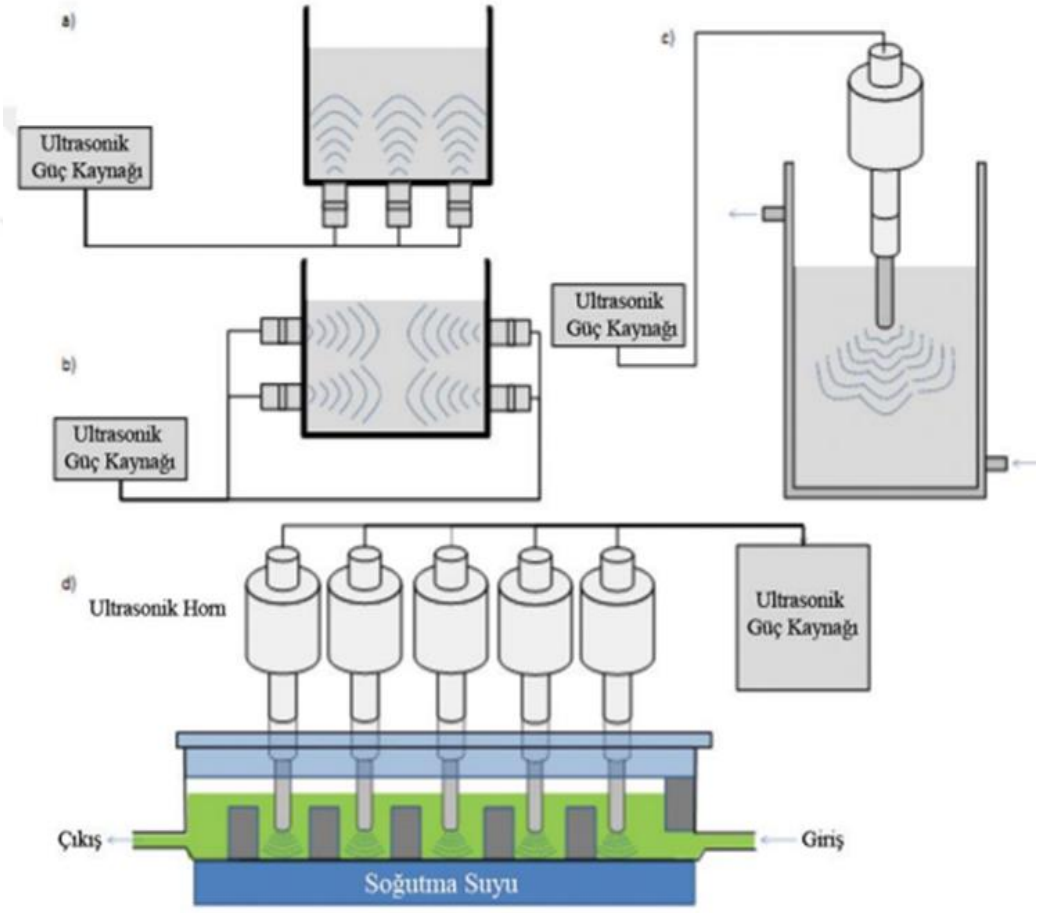
Ultrases; ultrasonik banyo ve ultrasonik prob olmak üzere iki faklı metotla uygulanmaktadır (Şekil 2.7.). Ultrasonik banyolarda ses dalgaları daha homojenik şekilde yayılabilmektedir. Bu sistemin dezavantajı, yalnızca sabit frekanslarda çalışabilir olması, prob tipine nazaran daha az oranda akustik şiddet uygulanabilmekte olması ve sıcaklık kontrolünün zayıf olmasıdır. Ultrasonik su banyolarında bir miktar enerji kaybı olurken, ultrasonik prob kullanımında yüksek enerjinin, kayıp olmaksızın, ortama aktarılmasıyla ultrases gücünün daha etkin kullanılabilmesi bu yöntemi daha avantajlı kılmaktadır.



Şekil 2.7. Ultrason uygulama yöntemi (Wen ve diğ., 2018)

2.10. Çeşitli Ultrases Prosesleri

Ultrases prosesleri uygulama yöntemlerine göre çeşitli şekilde olabilir (Şekil 2.8.). Ultrasonik su banyosu kullanımında güç reaktörün alt kısmından veya yan duvarlarından uygulanabilir. Ultrasonik prob kullanımında ise tek başına kullanılabileceği gibi birçok prob art arda da bağlanılabilir.



Şekil 2.8**.** Çeşitli ultrases prosesleri: (a,b) Ultrasonik banyolar (c) Ultrasonik prob (d) Çok problu ultrasonik reaktör (Tiwari, 2015)

2.11. Ultrases Probunun Yapısı

Elektrik enerjisinin ultrases dalga enerjisine dönüşen yer ultrases cihazının probudur. Ultrases probu aynı zamanda ultrases dalga enerjisinin elektrik enerjisine dönüştüğü yerdir. Ultrases probu, sistemin hem enerji yayıcısı hem de alıcısıdır. Bu sistemdeki enerji dönüşümünü kısaca; ilk olarak voltaj ve akım halindeki elektrik enerjisi dönüştürücüye iletilir, dönüştürücüde bu enerji mekanik enerjiye dönüştürülür, dönüştürücü tarafından

ortama yayınımı sağlanan ses dalgaları akustik kavitasyon baloncuğu oluşturur ve son olarak kritik hacme ulaşan, yüksek sıcaklık ve basınca sahip, kavitasyon baloncuğu patlayarak veya sönümlenerek kavitasyon enerjisi ortama yayılır.

2.12. Ultrases Destekli Prosesler

Ultrasonik arıtım çalışmalarında, gerek arıtma veriminin arttırılması gerek sistemin sarfettiği enerjinin ve reaksiyon süresinin azalması için eş zamanlı oksidant, katalizör, ozon, UV ve EK gibi proseslerle birleştirilir. Bu yöntemler ayrı ayrı uygulandığında kirletici gideriminde etkiliyken aynı anda uygulandığında, sistemde reaksiyon için daha fazla radikal üreteceğinden arıtımı olumlu yönde etkiler.

2.12.1. US / oksidant

Hidrojen peroksit (H_2O_2) ve sodyum persülfat, sırasıyla son derece yüksek reaktif hidroksil radikalleri ($^{\bullet}OH$) ve sülfat radikalleri ($^{\bullet}SO_4^{-}$) oluşturan en yaygın kullanılan oksidanlardır(Arvaniti ve diğ.,2020). Sülfat radikalleri ($^{\bullet}SO_4^{--}$) organik kirleticilerin oksidasyonu için hidroksil radikallerinden daha seçicidir. Ayrıca, sülfat radikalleri tarafından oksidasyon yoluyla daha iyi mineralizasyon elde edilebilir. Nispeten yüksek kararlılığı, suda çözünürlüğü ve düşük maliyeti nedeniyle, persülfat genellikle saha uygulamasında sülfat radikalleri kaynağı olarak kullanılır (Deng ve diğ., 2013).

Persülfat (PS), yüksek redoks potansiyeli (SO_4^{-2}, 2,5 V – 3,1 V ; OH^-, 1,8 V –2,7 V) ve OH'den daha uzun ömrü nedeniyle son yıllarda ileri oksidasyon prosesleri için H_2O_2'ye bir alternatif olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir (Yang ve diğ., 2019). Ayrıca, SO_4^{-} tarafından aracılık edilen reaksiyonlar daha geniş bir pH spektrumunda etkilidir (Li ve diğ., 2025). Ek olarak, PS, inaktif durumdaki kararlılığı nedeniyle katı parçacıklar halinde rahatlıkla depolanabilir ve iletilebilir. PS ayrıca uzun ömürlü olma avantajına sahiptir ve çeşitli kirleticilerin bozunması için seçici değildir (Yang ve diğ., 2019).

Genel olarak, "US / PS" kombinasyonlarının giderim oranının, tek başına US veya PS işlemine göre daha yüksek olduğu açıktır. Ek olarak, US, tek başına US ve PS ile karşılaştırıldığında organik bileşiklerin reaksiyon süreçlerini önemli ölçüde hızlandırır (Yang ve diğ.,2019). Ultrasonik olarak aktive edilen persülfat, tehlikeli, dirençli ve

biyolojik olarak parçalanmayan organik kirleticilerin giderilmesini önemli ölçüde artırır (Ferkous ve diğ.,2025).

2.12.2. US / katalizör

Mühendislik nanopartikülleri (NP'ler), biyomedikal, ilaç, bahçecilik, elektronik, inşaat projeleri vb. gibi farklı sektörlerde daha geniş uygulama alanlarının arkasındaki önemli nedenlerden biri olan yüksek bir özgül yüzey alanına sahiptir. Çinko oksit nanopartikülleri (n-ZnO), çeşitli kozmetik ürünlerde, elektronik cihazlarda, tıbbi ürünlerde vb. kullanılan NP'lerden biridir. ZnO'nun etkili sorpsiyon kapasitesi nedeniyle, çeşitli araştırmacılar tarafından ağır metaller, boyalar, fenoller ve ilaçlar gibi çeşitli kirleticileri gidermek için kullanılmıştır (Chhaya ve diğ.,2024).

ZnO en yaygın kullanılan yarı iletkenler arasındadır (Selvakumar ve diğ.,2023). Uygun fiyatı, kolay bulunabilmesi, kimyasal kararlılığı, maliyet etkinliği, toksik olmaması, çevre dostu olması, uzun ömürlü olması, önemli elektron hareketliliği ve kuantum verimleri nedeniyle umut vadeden bir katalizördür (Mubeen ve diğ.,2024).

Katalizör, reaktanların yüzeyine yapışması için daha aktif noktalara yol açan geniş bir yüzey alanına sahiptir ve bu da reaksiyon süresini azaltarak işlemi daha verimli hale getirir. Nano katalizörün sunduğu geniş yüzey alanı, reaksiyon oranını artıran küçük kristal ve parçacık boyutuna atfedilir (Maleki ve diğ.,2023). Nano ZnO, organik madde mevcut olduğunda elektron akışı asetil grubunu parçalayarak CO_2 üretir . ZnO'dan transfer edilen atomdan Zn^{+1} 'in geçici sentezi, fotokatalistin yakınındaki O_2'yi düşürerek H_2O_2 üretir. Bu transfer yüklü ZnO parçacıkları üretir (Selvakumar ve diğ.,2023. Çinko oksit, çeşitli çevresel kirleticileri tamamen mineralize etmek için iyi bilinen bir katalizördür.

2.13. Fitotoksisite testi

İlaçlar; üretim aşamasında, insan yahut hayvan kullanımında ve kullanılmayan raf ömrü geçmiş ilaçların birtakım sebeplerle çevreye geçmesi sonucunda ciddi çevresel kontaminasyona neden olur. Bu sebeple çevreye geçtiklerinde meydana gelebilecek olası zararlı etkilerinin değerlendirilmesi ve bu kirleticilerin su ekosistemindeki miktarlarının izlenmesi gerekmektedir (Tongur ve diğ., 2019).

Kirleticilerin su ekosistemi üzerindeki etkisini belirlemede fiziksel ve kimyasal yöntemler eksik kaldığından toksisite testleri gereklidir. Toksisite testleri, kirleticilerin çevreye deşarjlarının kontrol edilmesi ve denetlenmesi için EPA tarafından önerilmektedir. Çevresel risk değerlendirmeleri ve su kalite kontrolünde ekotoksisitenin belirlenmesi için bu testlerin yapılması gereklidir (Aydın ve diğ., 2006).

Lepidium sativum, Crucifare familyasından gelmektedir ve fitotoksik etkinin belirlenmesinde kullanılır. Genellikle kahverengi ve kahverengimsi kırmızı renklerinde bulunmaktadır (Tongur ve diğ.,2019). Bahçe teresi tüm yüksekliklerde yıl boyunca yetiştirilebilir, ancak en iyi verimler özellikle Akdeniz iklimlerinde, hektar başına altı tona kadar verimle serin kış aylarında elde edilir. Çeşitli iklimlerde ve topraklarda gelişse de, hızlı büyüme ve yüksek kaliteli üretim için son derece verimli toprak şarttır (Kumar ve diğ.,2024).

Lepidium sativum toksisite testinin test kriteri ve test prensibi bitki kök uzunluğunun ölçülmesidir. Başlangıç aşamasında kazık kök oluşmaktadır. Kazık kök 4-6 cm'ye ulaştığında yan kök oluşumu gerçekleşir ve zamanla saçak kök şeklini almaktadır. (Tongur ve diğ., 2019).

Devare ve Bahadır'ın toksik etkiyi belilemek için yaptığı fitotoksisite çalışması ve Braunschweig Teknik Üniversitesi Sürdürülebilir Kimya ve Çevre Enstitüsü'nde geliştirilen yönteme göre Lepidium sativum toksisite testi; çift kat filtre kağıdı yerleştirilen petri kaplarına 25 adet eşit büyüklükte tohum eşit aralıklarla yerleştirilir, üzerine cam pipetle 5 ml numune eklenerek (4-6 adet kontrol, 2'şer adet atıksu numuneleri ve arıtılmış numuneler) kapakları kapatılır ve oda sıcaklığında karanlık ortamda 72 saat inkübe edilir. En iyi gelişim gösteren 20 adet tohumun kök ve gövde uzunluklarının ortalama değerleri kontrol numunelerinin kök ve gövde uzunlukları ile kıyaslanarak; % inhibisyon, çimlenme indisi, EC_{50} ve buna bağlı olarak toksik birim değeri hesaplanmaktadır (Tongur ve diğ., 2019; Ulvi ve diğ., 2022).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Metaryal ve Metot

3.1.1. Kullanılan Kimyasallar

Terra İlaç ve Kimya Sanayi Ticaret Anonim Şirketi tarafından temin edilen karbamazepin ilaç ham maddesi kullanılarak sentetik çözelti hazırlanmıştır. Merck marka sodyum hidroksit (NaOH) ve sülfirik asit (H_2SO_4) çözelti pH'nın ayarlanması için kullanılmıştır. Oksidant olarak Merck marka %30'luk, yoğunluğu 1,11 kg/L olan hidrojen peroksit (H_2O_2) ve potasyum persülfat ($K_2S_2O_8$/PS), katalizör olarak ise nano çinko oksit (n-ZnO) yarı iletken metal oksiti kullanılmıştır.

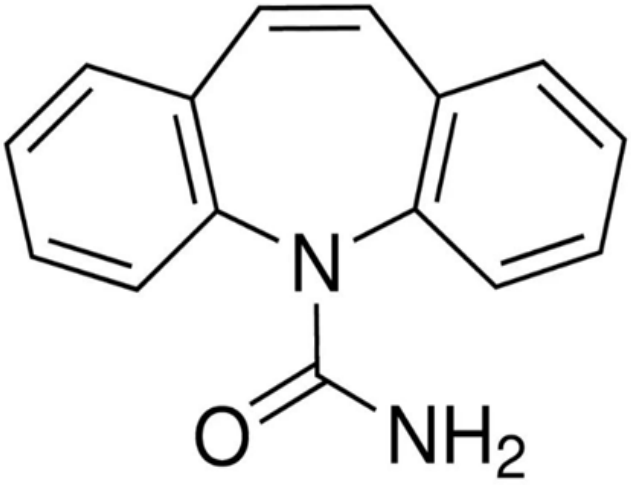
3.1.2. Kullanılan Cihazlar

Deneysel çalışmalarda;

- BANDELIN Marka, SONOPULS HD 3400 Model, prob Tipi Ultrasonik Cihaz,
- Labo SM 3 Marka C200-H13 Model soğutmalı sirkülasyonlu su banyosu,
- Precisa Marka XB220A Model Hassas Terazi,
- HACH Marka HQ40d Model pH Metre,
- Nüve FN 400 Marka Etüv,
- Hach Lange DR 6000 Marka Spektrofotometre,
- ELGA PURELAB Quest Marka Saf Su Cihazı,
- Biocomma SPEMFP02 Marka Askıda Katı Madde Cihazı,
- MTOPS Marka Ms 300 Hs Model Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı,
- Wisd Marka, WiseStir MSH-20D Model Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı cihazları kullanılmıştır.

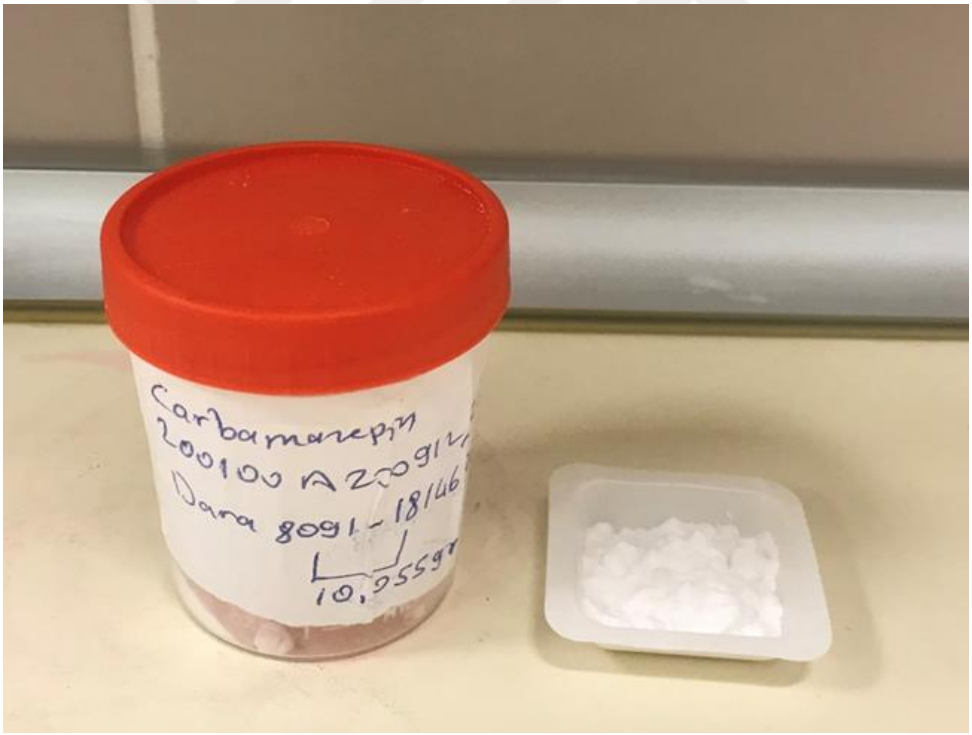
3.1.3. Karbamazepin Sentetik Çözeltisi

Yurt dışından ithal edilen Karbamazepin sentetik çözeltisi, Karbamazepin ($C_{15}H_{12}N_2O$) kullanılarak, saf su ile hazırlanmıştır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Karbamazepinin yapısal formülü (Dural ve diğ.,2020)

Karbamazepin ilaç ham maddesinin görseli Şekil 3.2.'de, CBZ hakkındaki teknik bilgiler ise Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan Karbamazepin (CBZ)

Tablo 3.1. İlaç ham maddesi Karbamazepin (CBZ) teknik bilgileri

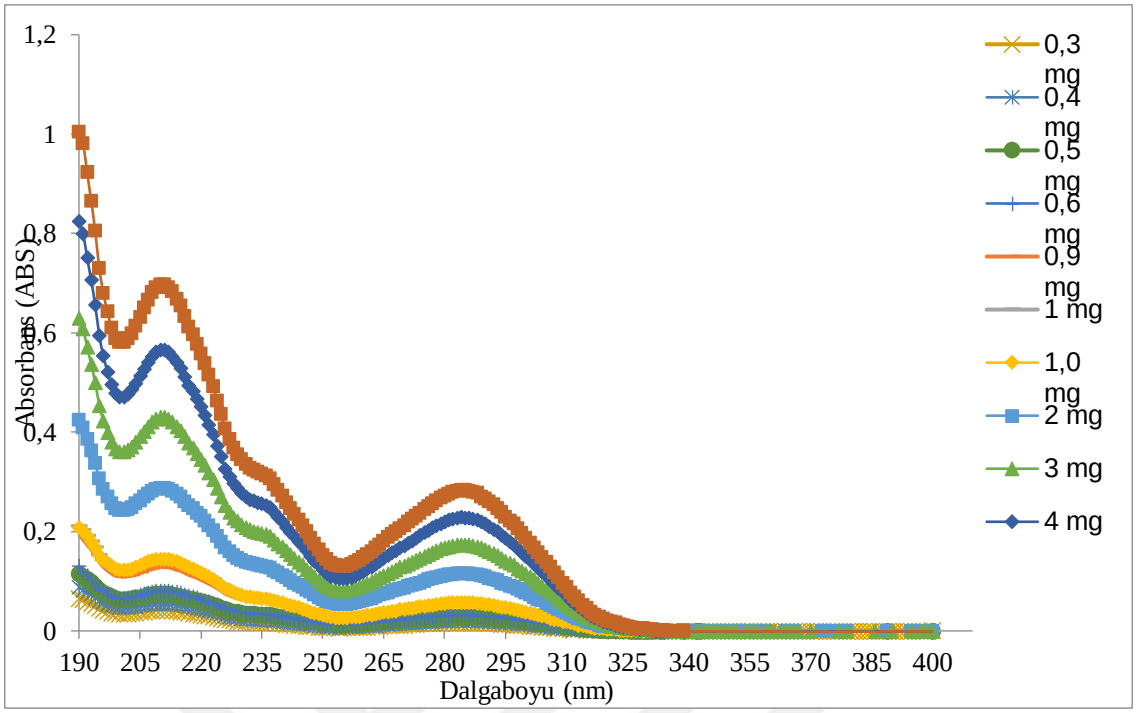
Kimyasal Formülü	$C_{15}H_{12}N_2O$
IUPAC Adı	Benzo[b][1]benzazepine-11-carboxamide
CAS Numarası	298-46-4
pKa	13,9
Görünüm	beyaz toz
Suda Çözünürlük	<1 mg/mL
Doğada Kararlılık	Stabil
Erime Noktası	190.2 °C

3.1.3.1. Karbamazepin Kalibrasyon Grafiği

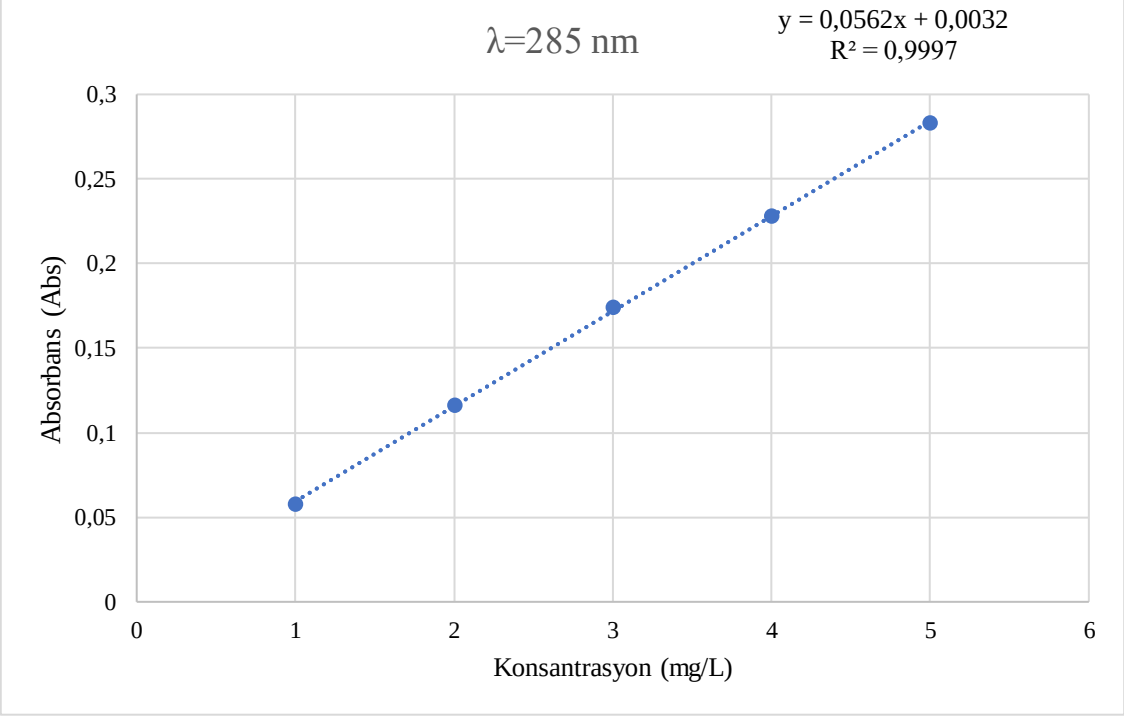
Deneysel çalışmalara başlamadan önce 0,3-5 mg konsantrasyonunda hazırlanan CBZ çözeltisinde absorbans taraması yapılmıştır. Kalibrasyon grafikleri, farklı konsantrasyonlardaki CBZ sentetik çözeltilerinin 285 nm dalga boyunda absorbans değerlerinin okunması ile elde edilmiştir.

CBZ giderimi için için farklı konsantrasyon değerlerine (0,3-5 mg/L) karşılık gelen dalga boyu taraması sonuçları Şekil 3.3. de, bu sonuçlara göre çizilen kalibrasyon grafikleri, doğru denklemi ve R^2 değerleri ise Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'te verilmiştir.

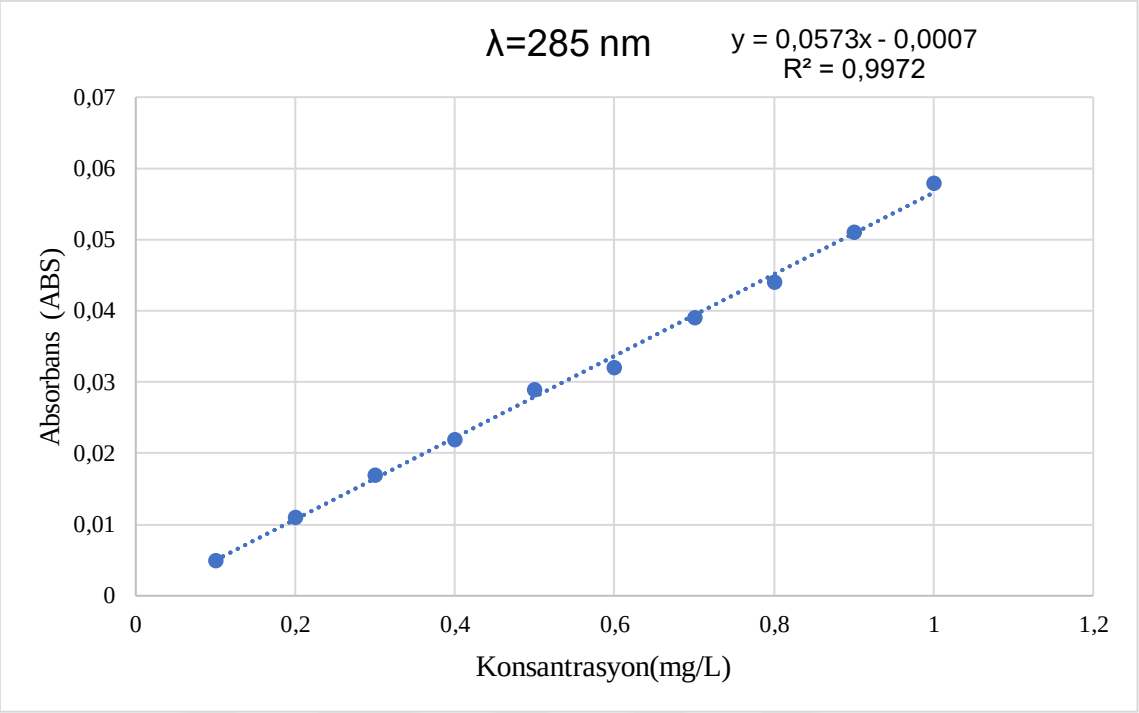
Deneysel çalışmaların sonucunu hesaplarken hatayı en aza indirmek için iki farklı kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. Buna göre sonuç değeri 1-5 mg/L arasındaysa yüksek kalibrasyon eğrisinin denklemi (Şekil 3.4.), 1 mg/L'nin altındaysa düşük kalibrasyon eğrisinin denklemi (Şekil 3.5.) kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Farklı konsantrasyonlarda CBZ'nin Dalgaboyu taraması



Şekil 3.4.CBZ yüksek konsantrasyon kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.5. CBZ düşük konsantrasyon kalibrasyon eğrisi

Absorbans % giderim değerleri aşağıda verilen denklem (3.1)'e göre hesaplanmıştır.

% Giderim = [(C_0 - Ct) / C_0] x 100 .....(3.1)

C_0: Başlangıç absorbans değeri

Ct: Arıtım sonrası absorbans değeri

3.1.4. Ultrases Sistemi

Sonikasyon deneyleri; Bandelin marka Sonopuls HD 3400 model sonikatör ve VS200T model titanyum prob kullanılarak kesikli olarak yürütülmüştür. Sonikatör frekansı ve gücü sırası ile 20 kHz ve 400 W dır. Ultrasonik prob; 130 mm uzunluğunda ve 25 mm çapındadır. Sıcaklığı kontrol altında tutmak için soğutmalı sirkülasyonlu su banyosu kullanılmıştır. Numune kabı çift katlı camdan oluşmaktadır ve 1000 ml hacme sahiptir. US prob çalışırken oluşan gürültüyü önlemek için, sistem ses yalıtımlı kabin içerisine kurulmuştur (Arslan ve diğ, 2018). US deney sistemi Şekil 3.6.'de verilmiştir.

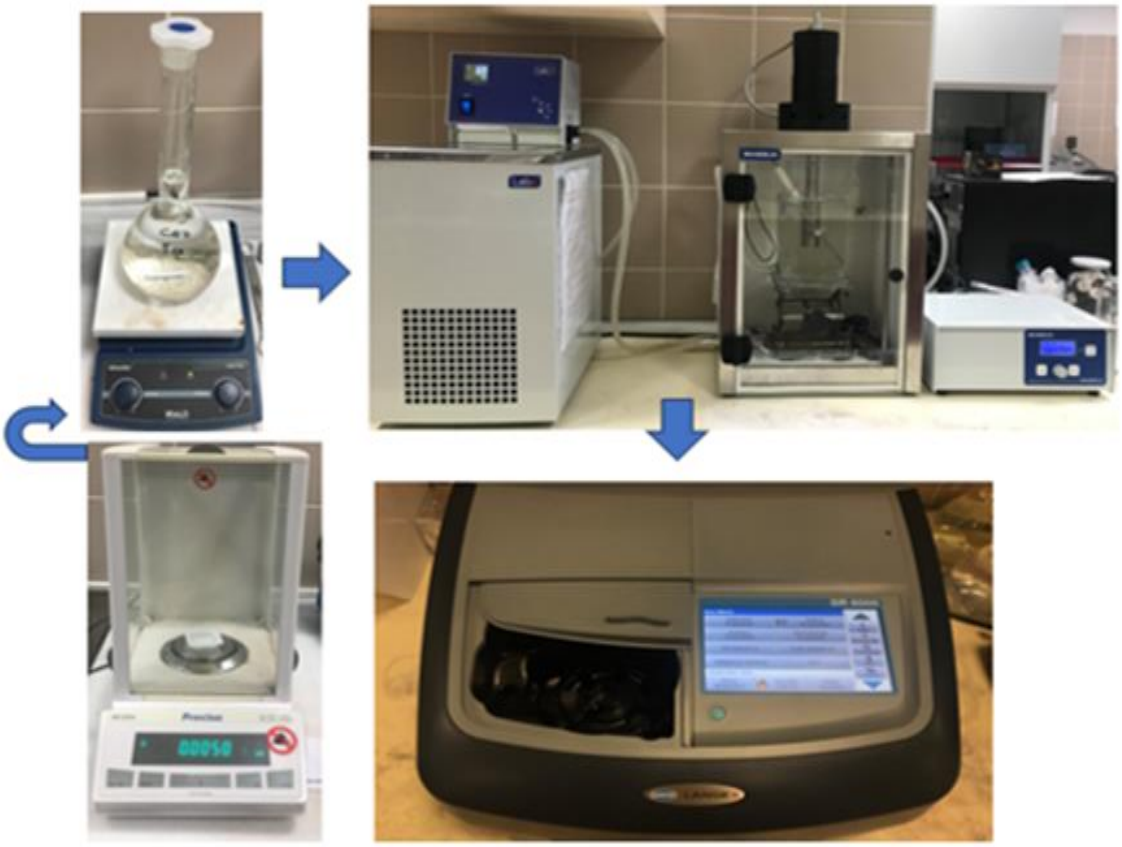


Şekil 3.6. US sistemi

3.1.5. Deneysel Yöntem

Deneyler, 1 L sentetik CBZ çözeltileri ile yapıldı. 5mg/L CBZ çözeltisi hazırlanırken hassas terazide 0,0050 g tartıldı. 1000 ml'lik balonjoje içerisinde manyetik karıştırıcıda, 50^{o}C-80^{o}C arasında ısı verilerek, yaklaşık 2 saatte homojen hale getirildi. Oda sıcaklığında yürütülen kesikli deneylerde sonikasyon cihazı %60 genlikte sabit tutuldu. Başlangıç konsantrasyonu, reaksiyon süresi, pH, oksidant etkisi, katalizör etkisi, optimum oksidant ve katalizörün etkisi çalışıldı. Deney öncesi ve sonrasında spektrofotometre cihazı kullanılarak absorbans ölçümleri gerçekleştirildi. Katalizör kullanılarak yapılan tüm deneylerde numuneler analiz öncesi, Millipore AP40 filtre kağıdından süzülmüştür. Absorbans verileri üzerinden % giderim değerleri hesaplandı. Deneyler 3 tekrar ile çalışıldı. Kontrol deneyleri optimum oksidant, optimum katalizör ve optimum oksidant / katalizör ile gerçekleştirildi. Fitotoksisite testlerinde; Lepidium sativum (bahçe teresi) tohumları kullanıldı. Fitotoksisite test sonuçları; oksidasyon deney numuneleri (US, US/ optimum oksidant, US/optimum oksidant/optimum katalizör) ile kontrol numunelerindeki tohumların ortalama kök ve gövde uzunlukları karşılaştırılarak değerlendirildi.

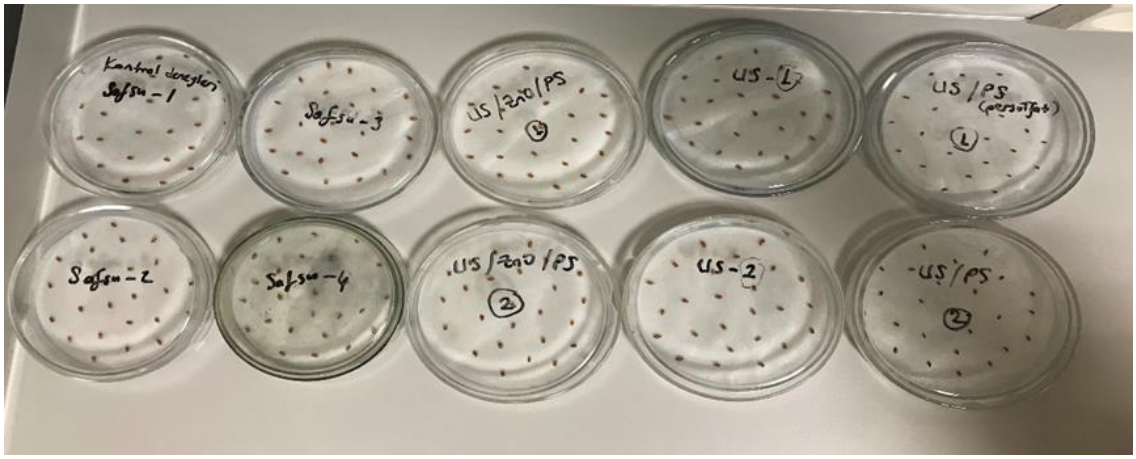
Bu sonuçlara göre; (%) inhibisyon, (%) çimlenme indeksleri, etkili konsantrasyon (EC_{50}) ve toksik birim (TB) değerleri belirlendi. Uygulanan deneysel yöntem aşamaları Şekil 3.7.'te görsel olarak verilmiştir.



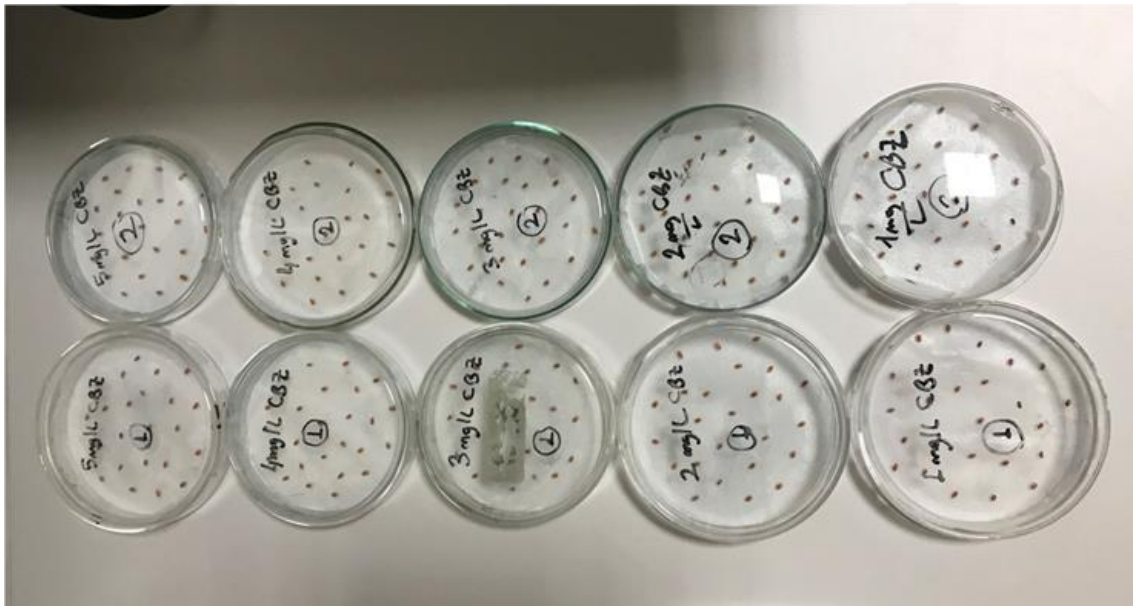
Şekil 3.7. Deneysel yöntem aşamaları

3.1.6. Fitotoksisite Testi

Çalışmada kullanılan Lepidium sativum (bahçe teresi bitkisi) tohum halde , N.E.O.Bİ. Tohumculuk A.Ş. İzmir firmasından temin edilmiştir. Bu tohumlar kahverengi renginde, yaklaşık 0,1 cm genişliğe ve 0,3 cm uzunluğa sahiptir. Çalışmada kullanılan 5 mg/L CBZ sentetik çözeltisi ve hazırlanan sentetik çözeltilerle yapılan; US, US/PS, US/PS/n-ZnO deneylerinin arıtılan çıkış numuneleriyle bahçe teresi bitkisi tohumlarıyla toksisite testleri yapılmıştır. Toksisite testleri; çalışmada kullanılan safsu ile kontrol numunesinden 4 adet, US, US/PS, US/PS/n-ZnO deneylerinin arıtılan çıkış numunelerinden 2'şer adet ve kalibrasyonda kullanılmak için 1-5 mg/L CBZ numuneleriyle yapılmıştır (Şekil 3.8./ Şekil 3.9.)



Şekil 3.8. Fitotoksisite deneyi (kontrol numuneleri 4 adet, US, US/PS, US/PS/n-ZnO deneyleri 2'şer adet)



Şekil 3.9. Fitotoksisite deneyi (1-2-3-4-5 mg/L CBZ)

Fitotoksisite testleri için 9 cm'lik cam kapaklı petri kaplarına 110 mm çapında 2 adet Whatman 1filtre kağıdı koyulmuştur. Her bir petri kabı içerisine 5 mL numune (safsu, US- US/PS-US/PS/n-ZnO prosesleriyle arıtılmış çıkış suyu ve kalibrasyon için 1-5 mg/L CBZ) konulmuştur. Bahçe teresi tohumundan eşit büyüklükte 25 adet tohum seçilip eşit aralıklarla petri kaplarına yerleştirilmiştir. Petri kaplarının kapakları kapatılmış ve karanlık bir ortamda oda sıcaklığında 144 saat inkübe edilmiştir. 144 saat sonunda, en iyi büyüyen bahçe teresi tohumlarının kök ve gövde uzunlukları esnek cetvelle ölçülmüştür (Şekil 3.10). Numunelerdeki bahçe teresi tohumlarının ortalama kök ve gövde uzunlukları

kontrol numuneleri ile karşılaştırılarak (%) inhibisyon değerleri, (%) çimlenme indeksleri (Çİ), etkili konsantrasyon (EC_{50}) ve toksik birim (TB) değerleri belirlenmiştir.



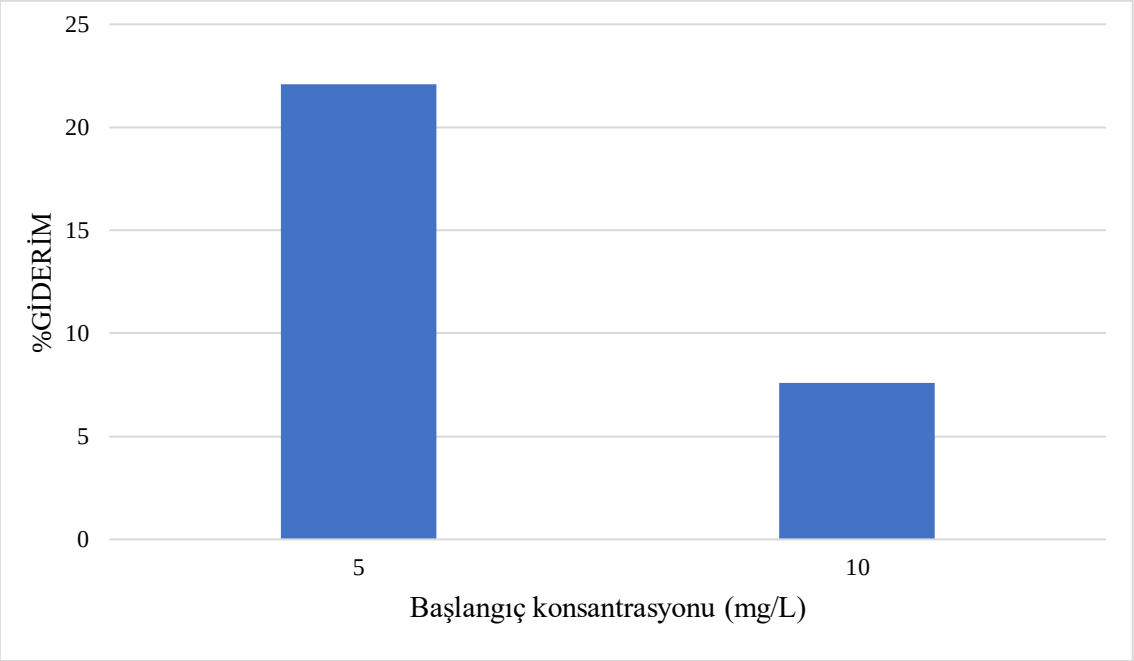
Şekil 3.10. Lepidium sativum tohumunun gövde ölçümü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. US prosesi

4.1.1. Başlangıç Konsantrasyonunun Etkisi

CBZ giderimi üzerinde başlangıç CBZ konsantrasyonunun etkisini tespit etmek için 5 mg/L ve 10 mg/L CBZ başlangıç konsantrasyonlarında deneyler yapıldı. 120 dk reaksiyon süresinde ve orijinal pH değerlerinde (7,81) US prosesinde başlangıç konsantrasyonunun etkisine bakıldı. 5 mg/L CBZ çözeltisinde giderim verimi (%22,1) daha yüksek bulundu (Şekil 4.1.). Başlangıç konsantrasyonu 5 mg/L CBZ olacak şekilde çalışmalara devam edildi.



Şekil 4.1. Başlangıç konsantrasyonunun absorbans gderimi üzerine etkisi (Co=5-10 mg/L, t= 120 dk, V=1000 mL, Am=%60)

Şekil 4.1. de görüldüğü üzere başlangıç konsantrasyonunun azalmasıyla CBZ giderim verimi %7,6'dan %22,1'e yükseldi. Bu durum başlangıç CBZ konsantrasyonu daha düşük olduğunda radikal üretim oranı, CBZ bozunumuyla parçalanma oranından daha yüksek olacak ve bu da daha yüksek CBZ giderimine yol açmasıyla ilişkilendirildi. Başlangıç CBZ konsantrasyonu arttığında $^{\bullet}$OH radikalleri yetersiz kalacak ve bu da daha düşük CBZ giderimi ile sonuçlanacaktır.

Yentür ve diğerlerinin (2019) yaptığı çalışmada, ilaç ham maddesi karbamazepinin (CBZ) başlangıç konsantrasyonunun sonikasyon prosesindeki etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm olarak seçilen çeşitli CBZ konsantrasyonlarının, sonikasyon prosesine uygulandıktan sonra sırasıyla %94,9, %90,3 ve %76,7 CBZ giderim verimlerine ulaşmışlardır.Başlangıç konsantrasyonunun artması arıtım verimini olumsuz yönde etkilemiştir.

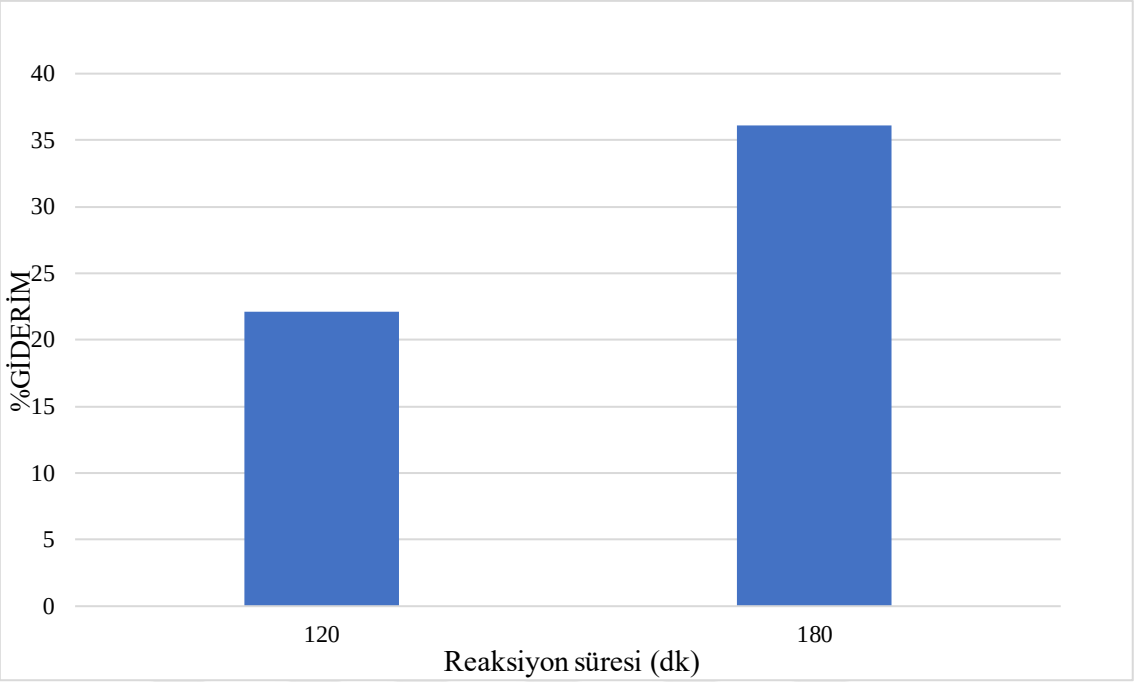
Isariebel ve diğerlerinin (2009) yaptığı çalışmada, ilaç hammaddesi parasetamolün (PRC) başlangıç konsantrasyonunun sonikasyon prosesindeki etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L ve 150 mg/L PRC başlangıç konsantrasyonlarında 4 saatlik sonolizden sonra sırayıyla %95, %82, %70 ve %56 PRC giderim verimine ulaşmışlardır. Kirletici konsantrasyonunun artması PRC giderim verimi üzerine olumsuz etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Mendez ve diğerlerinin (2008) yaptığı çalışmada, ilaç ham maddesi ibuprofenin (IBP) başlangıç konsantrasyonunun ultrases prosesine etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Farklı konsantrasyonlarda yürütülen çalışmalarda başlangıç konsantrasyonunun artmasıyla arıtılan madde miktarı da artmış olup, giderim verimleri azalmıştır. Buna göre başlangıç konsantrasyonunun artmasıyla IBP giderim verimi azalmıştır.

4.1.2. Reaksiyon Süresinin Etkisi

Reaksiyon süresi sonokimyasal süreçteki önemli parametrelerden biridir. Reaksiyon süresi arttıkça, başta hidroksil olmak üzere, ortamda oluşan radikaller CBZ'nin bozunmasını sağlamak için daha fazla fırsata sahip olur, bu da daha yüksek oksidasyon oranlarına ve organik maddenin olası mineralizasyonuna sebep olur.

5 mg/L başlangıç konsantrasyonunda ve çözeltinin orijinal pH (7,8) değerinde reaksiyon süresinin etkisini belirlemek için; 120 dk ve 180 dk sürelerde deney yapıldı. 180 dk reaksiyon süresi, daha yüksek CBZ giderim veriminin (%36,1) elde edildiği optimum süre olarak belirlendi (Şekil 4.2.).

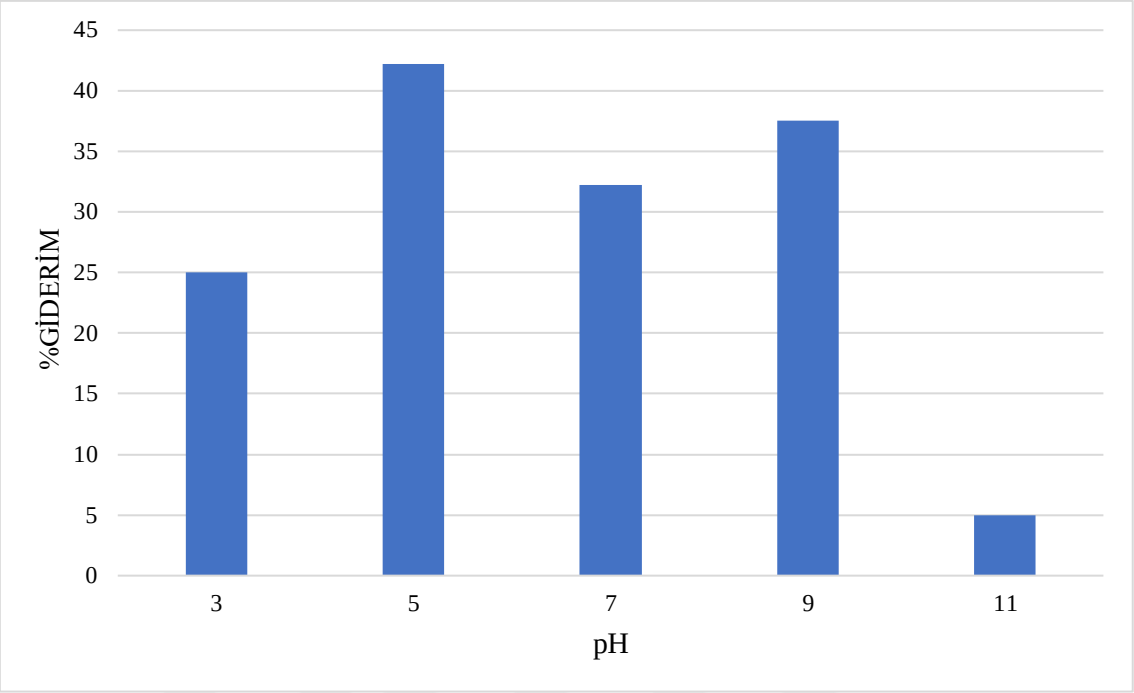


Şekil 4.2. Reaksiyon süresinin arıtıma etkisi (Co=5 mg/L, Am=%60, V=1000 mL, t=120 ve 180 dk)

Tran ve diğerlerinin (2017) yapmış olduğu çalışmada, 1 A'lık akım yoğunluğuna sahip sonikasyon prosesindeki reaksiyon süresinin CBZ bozunma verimliliği üzerine etkisini incelemişlerdir. Buna göre 90 dk,120 dk,150 dk, 180 dk reaksiyon sürelerinde zaman arttıkça sırasıyla; %24,9, %34,1, %39,2, %45 CBZ bozunma verimliliğini ölçmüşlerdir.

4.1.3. pH'ın Etkisi

pH proses verimi üzerinde önemli bir parametredir. 5 mg/L CBZ başlangıç konsantrasyonunda ve 180 dk reaksiyon süresinde pH'nın etkisini belirlemek için; pH 3-5-7-9-11 değerlerinde deneyler yapıldı. Asidik koşullarda pH=3 iken %25, pH=5 iken %42,2 CBZ giderim verimine ulaşıldı. Alkali koşullarda ise pH=9 iken %37,5, pH=11 iken %5 CBZ giderim verimine ulaşıldı. Nötr pH'da ise %32,2 CBZ giderim verimine ulaşıldı. En yüksek CBZ giderim verimi %42 ile pH 5'te elde edildi (Şekil 4.3.). Şekil 4.3.'e göre; pH 5, optimum pH değeri olarak belirlendi.



Şekil 4.3. pH'nın arıtıma etkisi (Co= 5 mg/L, Am=%60, V=1000mL, t= 180 dk)

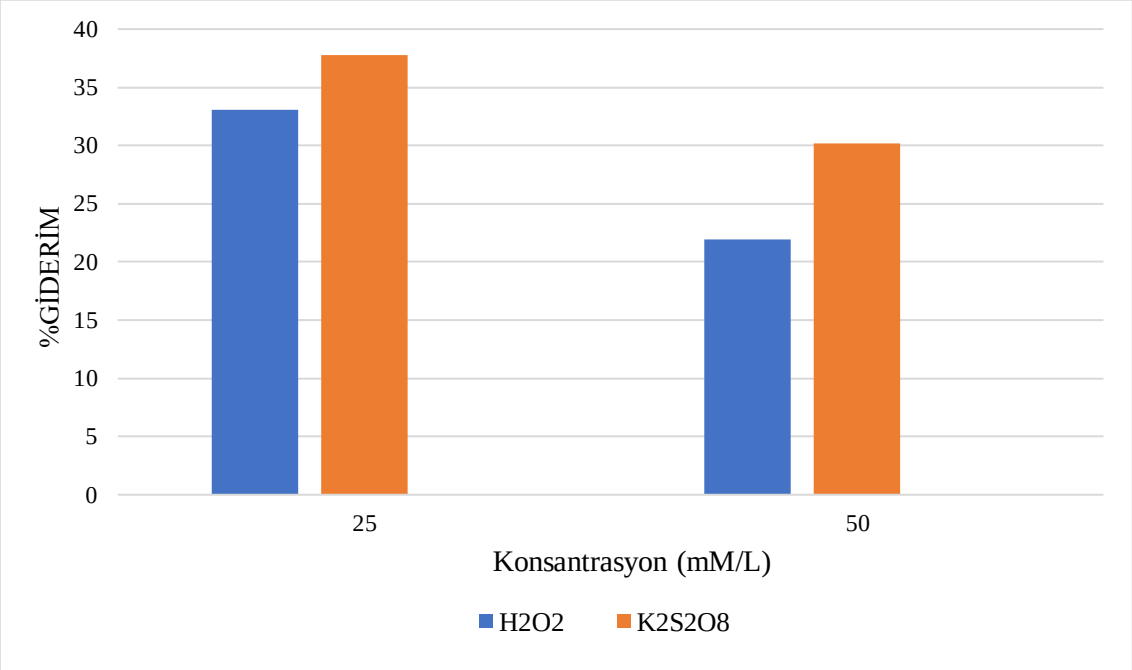
Şekil 4.3.'e göre US prosesindeki CBZ giderim verimliliği pH'ya bağlıdır. pH 3'ten pH 5'e büyük oranda artış mevcut olmakla birlikte pH 7 iken tekrar düşüş söz konusudur. Asidik koşulları oluşturmak için kullanılan sülfirik asitin ortama verdiği H^+ iyonlarının yoğun olması, ortamda oluşan radikalleri olumsuz yönde etkileyebilir. Şöyle ki H^+ iyonları $^{\bullet}OH$ ile tepkimeye girip H_2O oluşturabilir. Ayrıca $^{\bullet}OH$ radikali asidik çözeltide nötr çözeltiden daha yüksek oksidasyon potansiyeline sahiptir. pH=7 iken CBZ giderim veriminin düşmesinin sebebi bu olabilir. pH= 11 iken,US prosesi ile giderim neredeyse hiç yapılmamış gibidir. Bunun sebebi yine bazik pH'da oksidasyon potansiyelinin daha düşük olmasından kaynaklanıyor olabilir.

Tran ve diğerleri (2017) yaptığı çalışmada, pH'nın US prosesinde CBZ giderimi üzerine deneyler yapmışlardır. 0,025mmol/L CBZ konsantrasyonunda 3-5-7-11 pH değerlerinde 120 dk deney yapmışlar. Buna göre en yüksek CBZ giderim verimine pH=5 iken ulaşmışlardır.

Yalnızca pH' nın CBZ giderim verimi üzerine etkisini incelemek için kontrol deneyi yapıldı. Başlangıç konsantrasyonu 5mg/L CBZ olan numune pH=5' e ayarlandı ve manyetik karıştırıcıda 3 saat karıştırıldı. Başlangıç ve sonuç absorbans değerleri okundu. Sonuç değişmedi ve arıtım gözlemlenmedi.

4.2. US / Oksidant

CBZ giderim verimini arttırmak için optimum şartlarda yürütülen US prosesine oksidant ilavesi yapıldı. Bunun için oksidant olarak seçilen hidrojen peroksit (H_2O_2) ve potasyum persülfattan ($K_2S_2O_8$), 25 mM ve 50 mM konsantrasyonlarında 1 ml ilave edilerek US/oksidant prosesinde etkili oksidant türü belirlenmiştir (Şekil4.4.). Şekil 4.4.'e göre; her iki konsantrasyon içinde $K_2S_2O_8$ ile giderim verimleri (sırasıyla %37,8, %30,2) H_2O_2 ile giderim verimlerinden (sırasıyla %33,1, %21,9) daha yüksek olup optimum oksidant olarak $K_2S_2O_8$ seçildi. Optimum konsantrasyon miktarını belirleme deneyleri yapıldı (Şekil 4.5.).

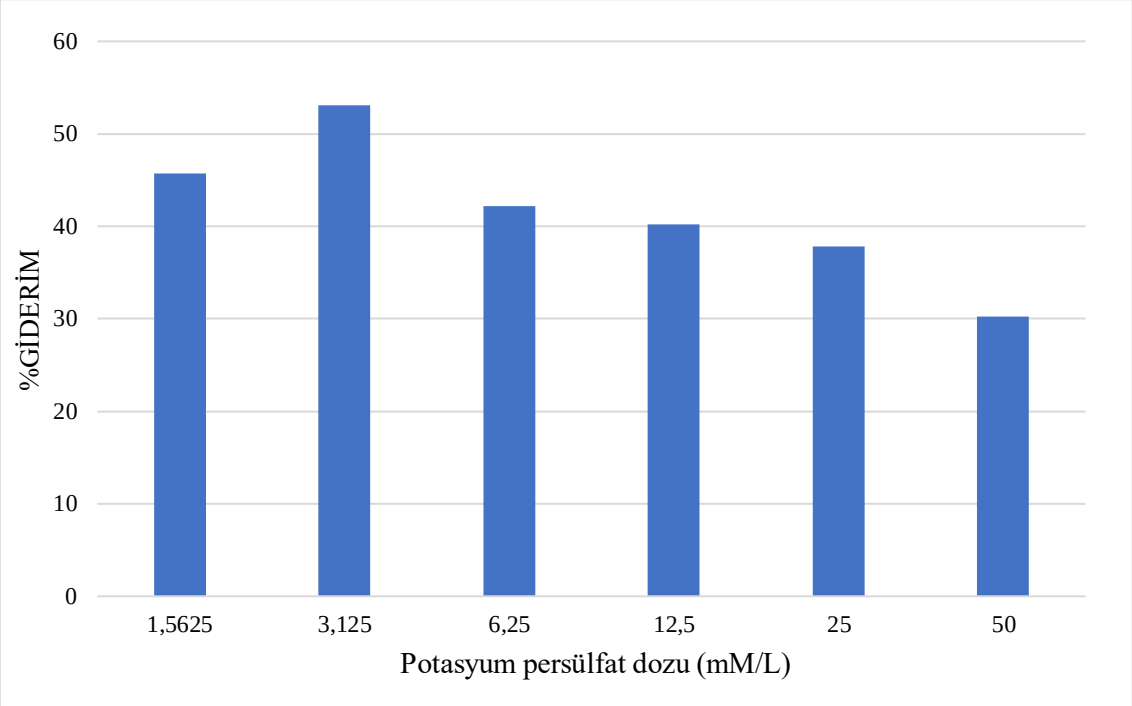


Şekil 4.4. Farklı oksidantların absorbans giderim verimi üzerine etkileri (Co= 5 mg/L, Am=%60, V=1000mL, t= 180 dk, pH=5)

Hidrojen peroksit ile potasyum persülfat ilavesiyle arıtımın artması hedeflenirken her iki oksidant içinde arıtım yalnız US prosesinden (%42,2) daha düşük oldu. Bunun sebebi eklenen oksidantın konsantrasyonunun fazla yüksek olması şeklinde yorumlandı.

Potasyum persülfatın optimum dozunu belirlemek için ; 1,5625 mM, 3,125mM, 6,25 Mm, 12,5 mM, 25 mM ve 50 mM konsantrasyonlarında US/oksidant prosesinde CBZ arıtma deneyleri yapıldı(Şekil19). CBZ giderim verimi %53 ile 3,125 mM $K_2S_2O_8$

konsantrasyonunda elde edildi. Optimum oksidant miktarı 3,125 mM $K_2S_2O_8$ olarak belirlendi.



Şekil 4.5. $K_2S_2O_8$ oksidant miktarının Absorbans giderimi üzerine etkisi (Co= 5 mg/L, Am=%60, V=1000mL, t= 180 dk, pH=5)

Yapılan deneylerde 50 mM konsantrasyondan 3,125 mM konsantrasyona kadar CBZ giderim veriminin giderek arttığını gözlemlendi. Çalışmaya çok yüksek potasyum persülfat konsantrasyonlarında başlandığından 6,25 mM konsantrasyona kadar arıtım olumsuz yönde etkilenmiştir. 1,5625 mM konsantrasyonunda ise CBZ giderim veriminin düşmesi optimum dozu belirlemede yardımcı olmuştur.

Sadece optimum olarak belirlenen $K_2S_2O_8$ oksidantının CBZ giderim verimi üzerine etkisini incelemek için optimum koşullarda kontrol deneyi yapıldı. Başlangıç konsantrasyonu 5 mg/L CBZ olan numune pH= 5,05 ayarlandı ve 3,125 mM $K_2S_2O_8$ 1 ml eklenerek manyetik karıştırıcıda 3 saat karıştırıldı. Başlangıç ve sonuç absorbans değerleri okundu. Sonuç değişmedi ve arıtım gözlemlenmedi.

Yapılan US/PS deneylerinde CBZ giderimi üzerinde US ile PS proseslerinin sinerjik etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu etkinin sebepleri; potasyum persülfatın

parçalanmasıyla ortamdaki kütle transfer reaksiyonlarının artması, $SO_4^{-\bullet}$ radikallerinin oluşması ile kirleticiyi parçalayacak radikallerin artması şeklinde yorumlandı.

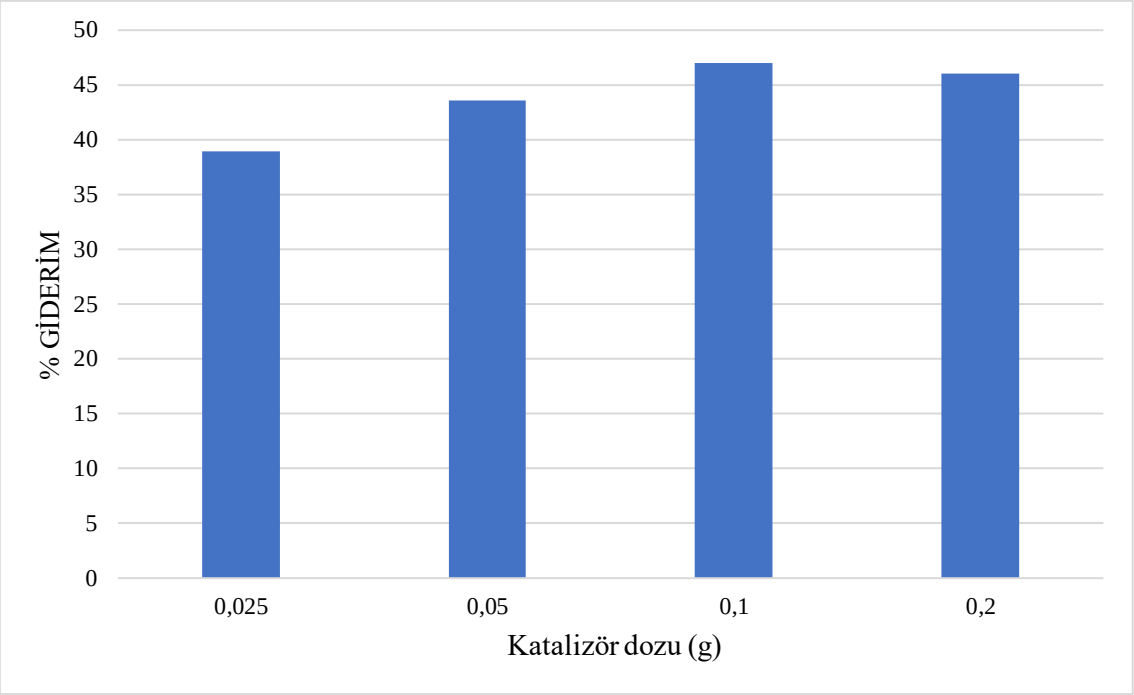
Wang ve arkadaşları (2016) yaptığı çalışmada, US prosesine persülfatın eklenmesiyle oluşan US/PS prosesinin CBZ giderim verimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Buna göre pH=3, sıcaklık =50^oC, $S_2O_8^{2-}$ =1 mmol/L, 0,025 mmol CBZ şartlarında yürütülen US, PS, US/PS deneylerinde en yüksek CBZ giderim verimine %43,8 ile US/PS prosesinde ulaşmışlardır.

Sönmez (2015) yaptığı çalışmada, US prosesine hidrojen peroksit eklenmesiyle oluşan US/ H_2O_2 prosesinin CBZ giderim verimi üzerindeki etkisini incemiştir. Buna göre deneyler; orijinal pH değerinde, Co=0,46 mg/L CBZ, H_2O_2 =5 mg/L , t= 60 dk, 53 kHz ve 90 W şartlarında yürütmüştür. US ve US/ H_2O_2 deneylerinde sırasıyla %3 ve %30 CBZ giderim verimine ulaşmıştır. Buna göre US prosesine hidrojen peroksit eklenmesiyle arıtım 10 kat artmıştır.

4.3. US / Katalizör

CBZ giderim verimini arttırmak için optimum şartlarda yürütülen US prosesine katalizör olarak n-ZnO eklendi. 0,025 g, 0,05 g, 0,1 g ve 0,2 g n-ZnO eklenerek yürütülen US/ katalizör prosesinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.6.'da verilmiştir. n- ZnO miktarı arttıkça arıtım veriminin arttığı gözlemlendi. Buna göre en yüksek absorbans giderim verimine % 47 ile 0,1g n- ZnO miktarında ulaşıldı. Optimum katalizör miktarı 0,1 g n-ZnO olarak belirlendi.

Sadece n- ZnO katalizörünün CBZ giderim verimi üzerine etkisini incelemek için optimum koşullarda kontrol deneyi yapıldı. Başlangıç konsantrasyonu 5 mg/L CBZ olan numune pH=5,05 ayarlandı ve 0,1 g n- ZnO eklenerek manyetik karıştırıcıda 3 saat karıştırıldı. Başlangıç ve sonuç absorbans değerleri okundu. Sonuçlara göre optimum koşullarda yalnız 0,1 g n- ZnO eklenmesiyle %2,6 CBZ giderim verimine ulaşılmıştır. Bu da ihmal edilebilir bir değerdir.



Şekil 4.6. n-ZnO katalizör miktarının absorbans giderimi üzerine etkisi (Co= 5 mg/L, Am=%60, V=1000mL, t= 180 dk, pH=5)

Şekil 4.6.'da n- ZnO miktarıyla doğru orantılı CBZ giderim verimi gözlemlense de 0,025 g n-ZnO katalizörü eklenmesiyle arıtım yalnız US prosesine göre (%42,2) daha düşük oldu. 0,1 g n- ZnO ile 0,2 g n- ZnO arasında neredeyse göz ardı edilecek bir fark olmasına karşın optimum katalizör miktarı olarak 0,1 g n- ZnO seçilmesinin sebebi daha az kimyasal kullanmaktır.

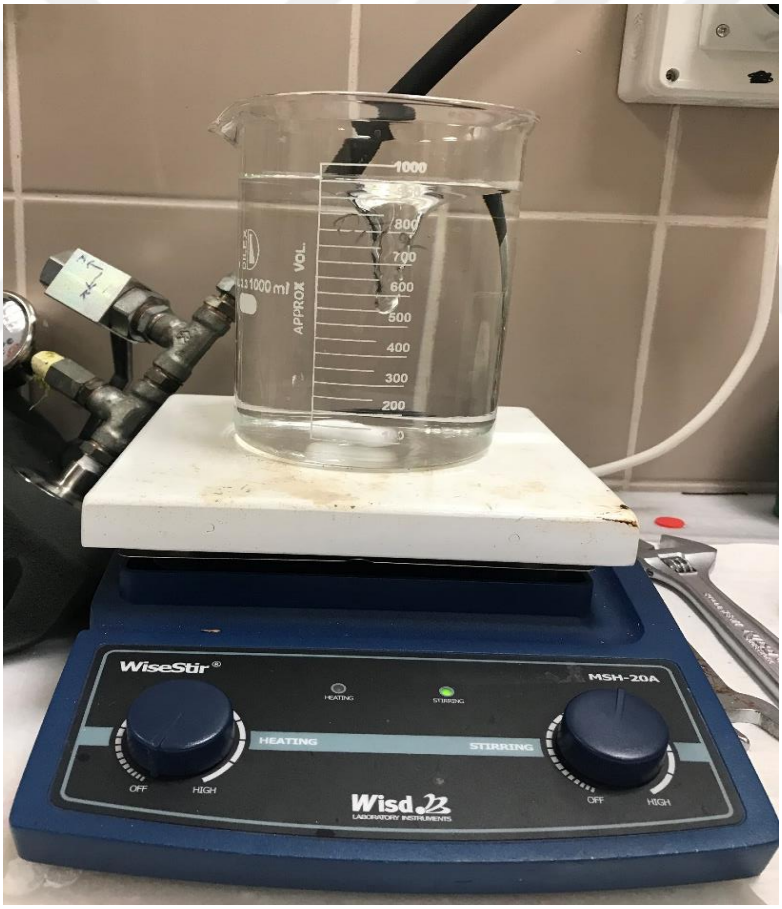
Yentür ve diğerleri (2021) yapmış olduğu çalışmada, US prosesine Ag/AgCl/BiVO katalizör ilave ederek CBZ giderimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır.0,5-0,75-1-1,25-1,5 g/L katalizör ilave ederek yürütülen çalışmalarda optimum katalizör miktarı 1,5 g/L olarak belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada katalizör miktarı arttıkça arıtım verimi de artmıştır. pH=10, CBZ =5 ppm, t=4 saat olarak yürütülen çalışmada CBZ giderim verimini %93 olarak tespit etmişlerdir.

4.4. US / Oksidant / Katalizör

Önceki aşamalarda belirlenen optimum oksidant ve katalizör miktarları ilave edilerek US/oksidant/katalizör prosesi ile CBZ çözeltisinin arıtılabilirlik deneyleri yürütüldü. Başlangıç CBZ konsantrasyonu Co= 5 mg/L, Am=%60, t= 180 dk, pH=5, 3,125 mM

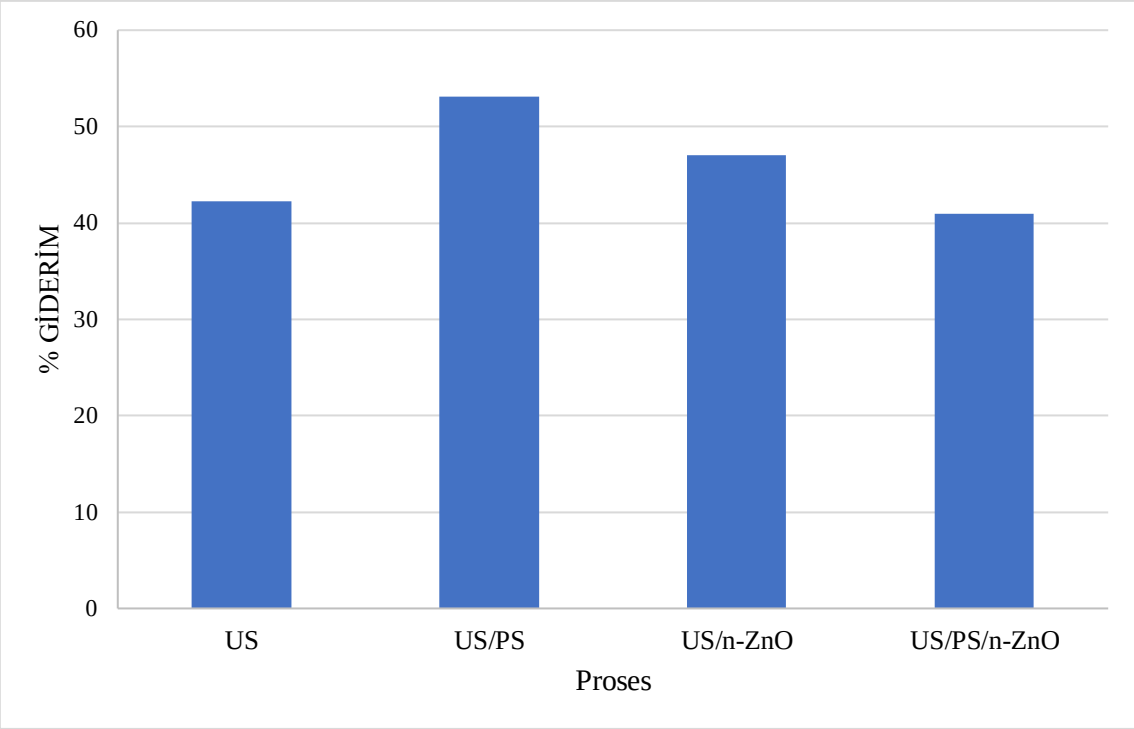
$K_2S_2O_8$ ve 0,1 g n-ZnO eklenerek yapılan çalışmalarda, CBZ giderim verimi %41 olarak belirlendi. Tekrarlı yapılan çalışmalarda gözlemlenen giderim verimi US/oksidant ve US/katalizör proseslerinde elde edilen absorbans giderim verimlerinden daha düşük olmuştur.US bazlı prosese aynı anda katalizör ve oksidant ilavesinin sinerjik bir etki yaratmadığı belirlenmiştir.

Optimum oksidant ve katalizör dozlarında kontrol deneyleri yürütüldü (Şekil 4.7.). Başlangıç konsantrasyonu 5 mg/L CBZ olan numune pH=5'e ayarlandı, 1 ml 3,125 mM $K_2S_2O_8$ ve 0,1 g n-ZnO eklenerek manyetik karıştırıcıda 3 saat karıştırıldı. Başlangıç ve sonuç absorbans değerlerinden. %5 CBZ giderim verimi hesaplanmıştır. Bu da ihmal edilebilir bir değerdir.



Şekil 4.7. PS/n-ZnO kontrol deneyi

Yapılan çalışmalarda CBZ giderimi için farklı prosesler üzerinde çalışıldı. US, US/PS, US/n-ZnO, US/PS/n-ZnO proseslerinden US-PS prosesinin arıtım verimi daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Farklı proseslerin CBZ giderimi üzerine etkisi(Co= 5 mg/L, Am=%60, V=1000mL, t= 180 dk, pH=5, 3,125 mM $K_2S_2O_8$, 0,1 g n-ZnO)

Literatürde CBZ ve farklı ilaçlarla yürütülen ultrasonik arıtım çalışmaları incelenmiş olup bu çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 4.1.).

Tablo 4.1. US ve US destekli proseslerle ilaç arıtımı

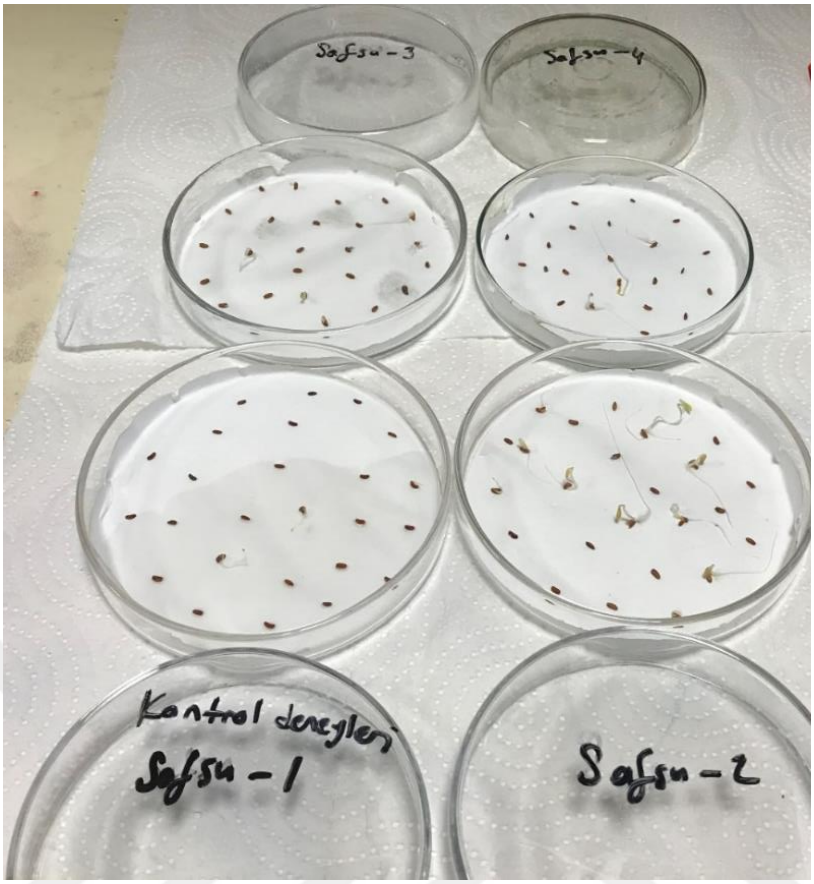
İlaç	**Yöntem**	**Koşullar**	**GİDERİM (%)**	**Referans**
CBZ	US/ US+H_2O_2/US+UV	Co=0,46 mg/L CBZ,53 kHz, 90W , t= 60dk H_2O_2 =5 mg/L	3 / 30 / 99	Sönmez,2015
PRC	US	Co=25mg/L, 254kHz, 32W, t=240 dk	39	Isariebel vd,2009
Ibuprofen	US	IBP=21 mg/L, 300 kHz	35	Mendez-Arriaga,2008

Tablo 4.1. (Devam)US ve US destekli proseslerle ilaç arıtımı

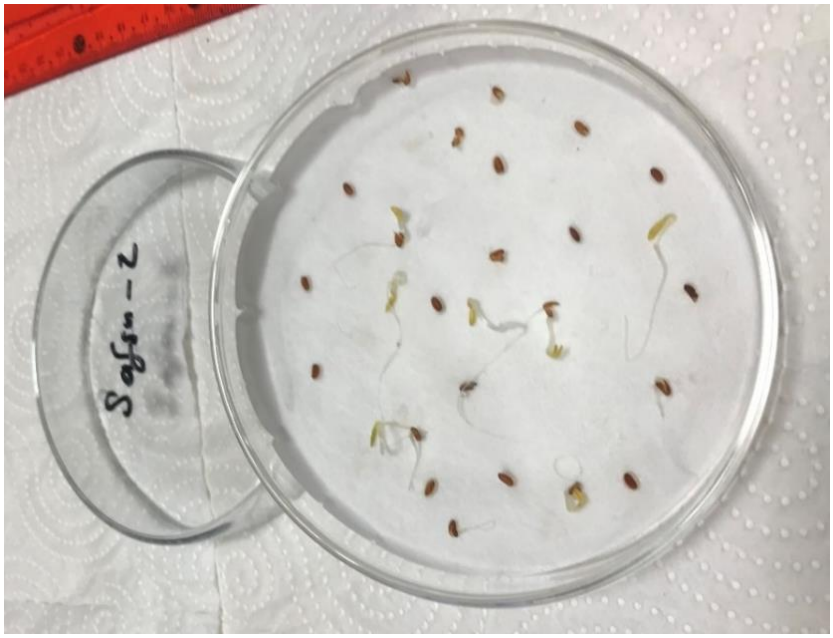
İlaç	Yöntem	Koşullar	GİDERİM (%)	Referans
CBZ	US/ EK/ US+EK	6-9-4 pH, t=120 dk, 40W, 520kHz	33/ 45/ 99	Tran vd.,2017
IBP	US/ US+$FeSO_4$/ US +Fe_3O_4	120 dk / 60 dk+0,05mm/ 45dk+ 5 mg	100/ 100 / 100	Doğan,2015
CBZ	US+(Ag/AgCl/BiVO)	240 dk, 10 pH, 1,5g, 308 K	93	Yentür vd,2021
CBZ	US/ US+H_2O_2	53 kHz, 90 W, 7 mg/L	3/ 33	Sönmez,2017
CBZ	US/ Persülfat/ US+Persülfat	0,025 mmol/L CBZ, 3 Ph, 50^{O}C, 50 W, t= 120 dk	1,2/ 25,7/ 43,8	Wang vd, 2016
CBZ	US/ US+PS/ US+n-ZnO/US+PS+n-ZnO	20 kHz,400 W, t=180 dk, 5 pH	42/ 53/ 47/ 41	Bu çalışma

4.5. Fitotoksisite Testi

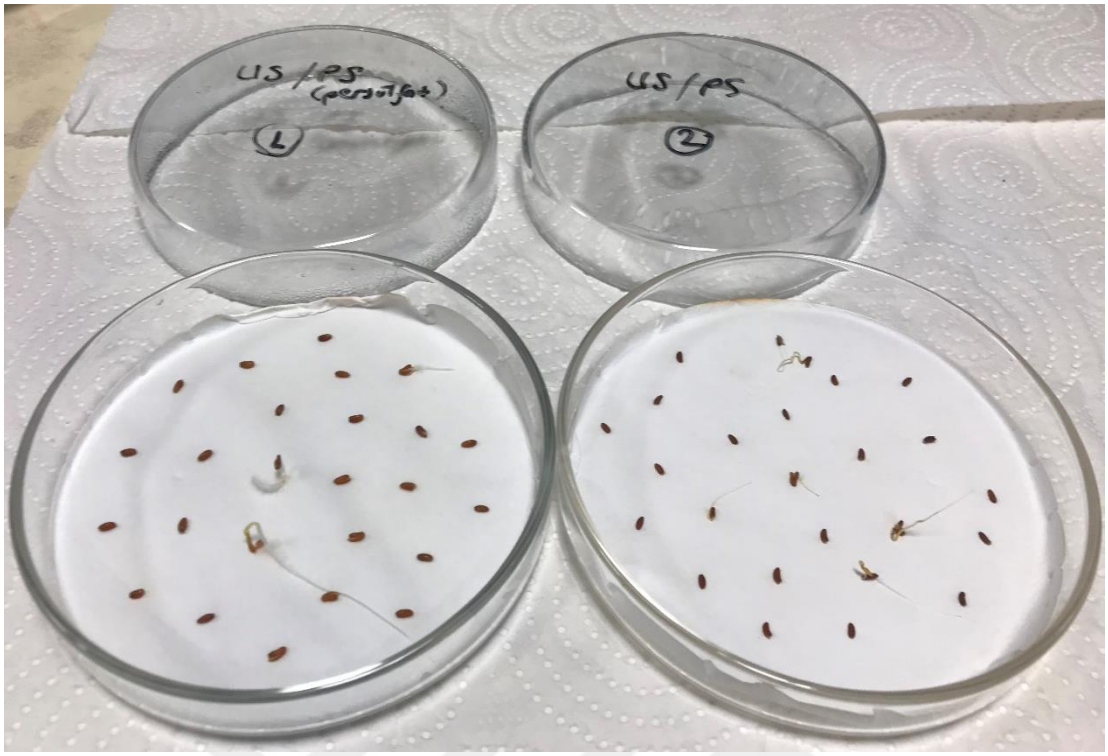
144 saat sonunda, karanlık ortamda ve oda sıcaklığında inkübe edilen bahçe teresi tohumlarında filizlenme gözlemlendi (Şekil 4.9., Şekil 4.10., Şekil 4.11., Şekil 4.12.). Filizlenen tohumların sayısı belirlenerek kök ve gövde uzunlukları ölçülmüştür. Sonuçlar kontrol numuneleri ile karşılaştırılarak (%) inhibisyon değerleri, (%) çimlenme indeksleri (Çİ), etkili konsantrasyon (EC_{50}) ve toksik birim (TB) değerleri belirlenmiştir (Tablo 4.2.).



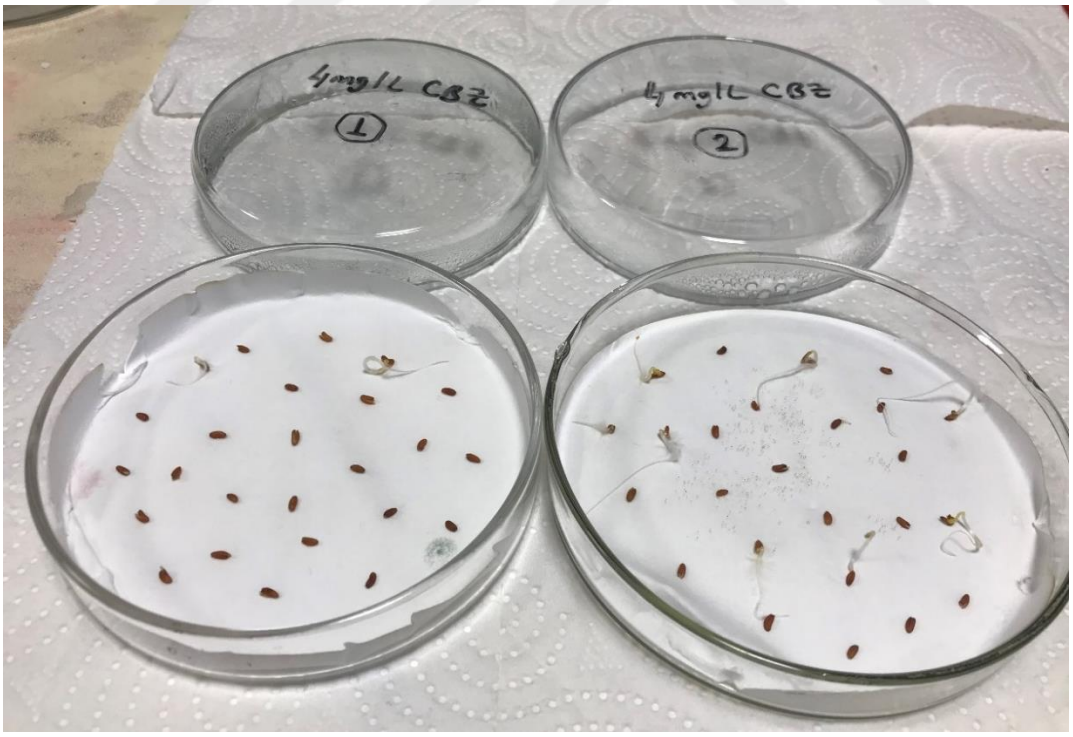
Şekil 4.9. İnkübe edilmiş kontrol deneyleri



Şekil 4.10. İnkübe edilmiş kontrol deneyi



Şekil 4.11. İnkübe edilmiş US/PS deneyleri



Şekil 4.12. İnkübe edilmiş 4 mg/L CBZ deneyleri

% inhibisyon değerleri Denklem (4.1)'e göre; % çimlenme indisleri Denklem (4.2)'ye göre; EC_{50} değerleri; sentetik çözeltilerin farklı konsantrasyonlarına (1 mg/L, 2 mg/L, 5 mg/L ve 10 mg/L) karşılık gelen % inhibisyon değerleri kullanılarak çizilen grafikten interpolasyonla belirlenmiş(Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.). TB değerleri ise EC_{50} verilerine bağlı olarak Denklem (4.3)'deki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

TB sonuçları; ''TB=0 toksik değil'', ''0<TB<1 hafif toksik'', ''1<TB<10 toksik'' ve ''11<TB<100 çok toksik'' sınıflandırmasına göre değerlendirilmiştir (Persoone ve diğ., 1993; Persoone ve diğ., 2003).

$$\%\ İnhibisyon = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0}\right) * 100 \quad (4.1)$$

C_0, kontrol numunesine ait ortalama kök veya gövde uzunluk değeri (cm);

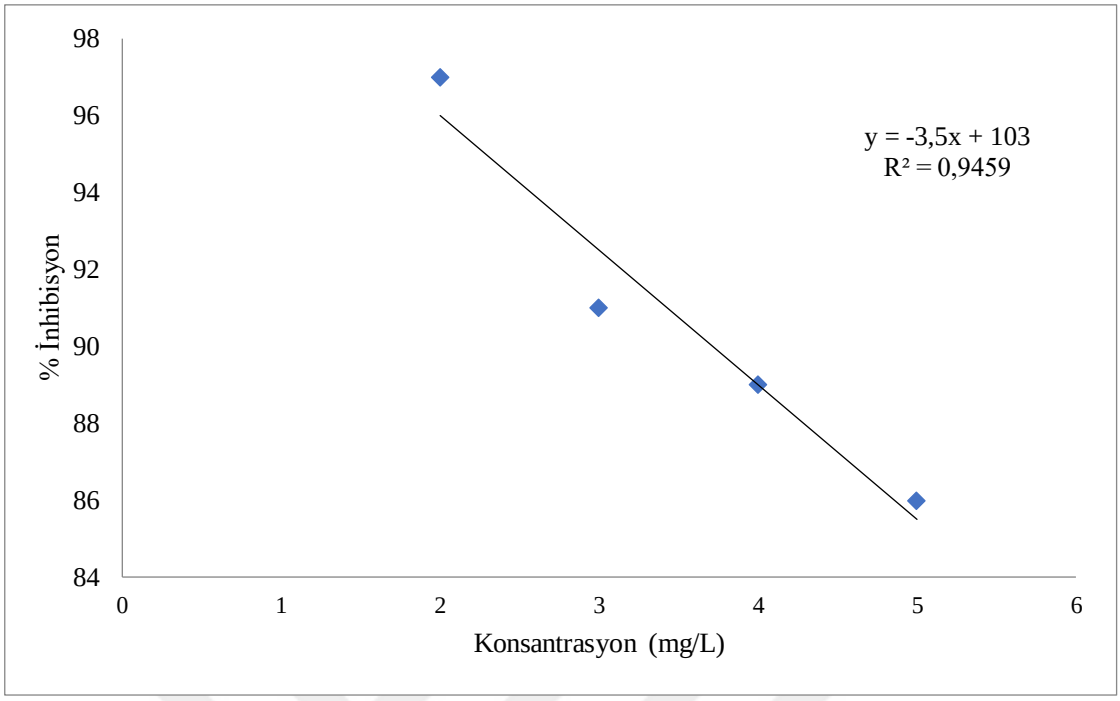
C_1, numuneye ait ortalama kök veya gövde uzunluk değeri (cm)'dir.

$$Çİ = \frac{Ç_1 * L_1}{Ç_C * L_C} \quad (4.2)$$

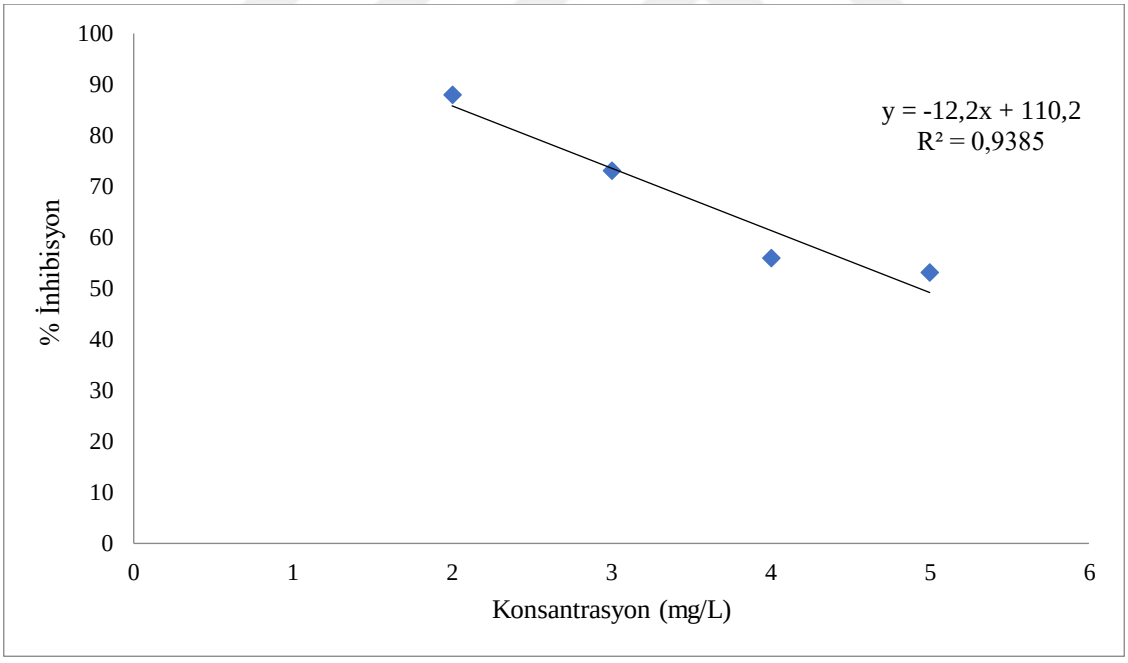
burada $Ç_1$, numuneye maruz kalan filizlenmiş tohum sayısı ortalamasıdır; Çc, negatif kontrol ortamına maruz kalan filizlenmiş tohum sayısı ortalamasıdır; L_1, numuneye maruz kalan köklerin uzunluğu ortalamasıdır; L_C, negatif kontrol ortamına maruz kalan kök uzunluğu ortalamasıdır.

$$TB = \left[\frac{1}{EC_{50}}\right] * 100 \quad (4.3)$$

EC_{50}; etkili konsantrasyon: organizmaların %50'sinin azalması ile sonuçlanan test maddesinin konsantrasyonudur. TB; toksik birimi ifade etmektedir.



Şekil 4.13. CBZ' nin farklı konsantrasyonlarının kök % inhibisyon değerleri



Şekil 4.14. CBZ'nin farklı konsantrasyonlarının gövde % inhibisyon değerleri

Tablo 4.2. CBZ'nin Lepidium Sativum fitotoksisite testi sonuçları

Konsantrasyon	Proses	Zaman (dk)	İnhibisyon Değerleri (%)		Çİ (çimlenme indisi) (%)		EC_{50}		Toksik Birim	
			Kök	Gövde	Kök	Gövde	Kök	Gövde	Kök	Gövde
5 mg/L CBZ		0	89	53	8	29	16,71	6,86	5,98	14,58
	US	180	26,32	25	59	60	25,67	8,01	3,90	12,49
	US/PS	180	26	40	59	48	25,71	7,39	3,89	13,53
	US/PS/n-ZnO	180	26	34	59	53	25,71	7,64	3,89	13,09

Kontrol deneyleri saf su ile çalışılan 5 mg/L CBZ'nin; US, US/PS, US/PS/n-ZnO deneylerinden sonra; % inhibisyon değerlerinin azaldığı, çimlenme indisinin arttığı ve Toksik biriminin azaldığı tespit edilmiştir. Ham atıksuyun% inhibisyon kök değeri 89 iken US,US/PS ve US/PS/n-ZnO proseslerinin çıkış sularıyla yapılan deney sonucuna göre sırasıyla kök değerleri 26,32; 26 ve 26 değerine düşmüştür. Ham atıksuyun % inhibisyon gövde değerleri 53 iken iken US,US/PS ve US/PS/n-ZnO proseslerinin çıkış sularıyla yapılan deney sonucuna göre sırasıyla gövde değerleri 25, 40, 34 değerlerine düşmüştür. Burada uygulanan US prosesinde % inhibisyon değeri yaklaşık %53 azalırken, US/PS prosesinde ortalama %25, US/PS/n-ZnO deneylerinde %35 azalmıştır.

% inhibisyon değerinin azalması ve Çİ değerinin artması arıtımın olumlu etkisini göstermektedir. Yapılan çalışmalarda % inhibisyon değerleri için, kök değerlerindeki değişim eşit olsa da gövde değerlerindeki değişim en çok yalnız US prosesinde meydana gelmiştir. Çİ değerleri içinde bu durum aynıdır. Köklerdeki Çİ değerleri aynı miktar artmış olup, gövdelerdeki miktar farklıdır. Burada en çok artış yine yalnız US prosesinde meydana gelmiştir.

Ham atıksuyun toksik birimi kök değeri 5,98 iken US, US/PS ve US/PS/n-ZnO proseslerinde sırsıyla 3,90; 3,89 ve 3,89 değerlerine düşmüştür. Sonuçlar burada uygulanan tüm prosesler için toksisitenin kökte ortalama %30 azaldığını gösterir. Ham atıksuyun toksik birimi gövde değeri 14,58 iken US, US/PS ve US/PS/n-ZnO

proseslerinde sırsıyla 12,49; 13,53 ve 13,09 değerlerine düşmüştür. Buna göre toksisite gövdede; US prosesinde %14,3 azalırken, US/PS ve US/PS/n-ZnO deneylerinde ortalama %8,7 azalmıştır.

Toksik birim değerlerindeki azalma toksisitenin azaldığını göstersede hala toksik sınır değerleri içerisindedir. Toksisitenin daha çok azalması için proses (UV gibi) başka proseslerle birleştirilebilir.

Yentür ve arkadaşları (2021), CBZ'nin toksik etkisini belirlemek için çalışmalar yapmıştır. Bunun için 10 ppm CBZ ham atıksuyu ve sono-fotokatalitik oksidasyonla muamele edilmiş CBZ çözeltisi kullanmışlardır. Deneyler 10 ppm CBZ için, 1 g/L katalizör yüklemesinde, 298 K sıcaklıkta, nötr pH'da, 60 dk reaksiyon süresinde gerçekleştirmişlerdir. Toksisite testi için tere tohumlar (Lepidium Sativum L.) kök uzunluğu ölçümü ile yapmışlardır. Bu amaçla içerisine filtre kağıdı yerleştirilen petri kaplarına 20 adet tohum ekilmiş ve üzerlerine 5 ml ham atıksu ve arıtılmış atıksu damlatmışlardır. 120 saat inkübe edilen tohumlarda %14 toksisite azalması ölçmüşlerdir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, geleneksel atıksu arıtma tesislerinde giderimi neredeyse yapılmayan ve buradan su ekosistemine katılan Karbamazepin'nin (CBZ), bir ileri oksidasyon prosesi olan sonikasyon prosesi ile arıtılabilirliği incelenmiştir.

Deneyler oda sıcaklığında ve %60 genlikte sabit tutulan bir homojenizatör ile kesikli olarak yürütülmüştür. Buna göre en yüksek giderim veriminin elde edildiği sonikasyon prosesinin optimum koşulları; başlangıç konsantrasyonu 5 mg/L, reaksiyon süresi 180 dk, pH 5 olarak belirlenmiştir. Bunun üzerine US/PS ve US/n-ZnO deneyleri yapılmıştır. Her iki proseste de arıtma verimi artmıştır. US prosesinde en yüksek %42 giderim verimine ulaşılırken, US/PS prosesinde %53 ve US/n-ZnO prosesinde %47 giderim verimine ulaşılmıştır.

Çalışmada belirlenen optimum koşullarda oksidant ve katalizör ultrasonik prosese uygulandığında, sistemin sinerjik etkisi olmadığı ortaya konmuştur. Fitotoksisite test sonuçlarına göre US, US/PS, US/PS/n-ZnO deneylerinden sonra; % inhibisyon değerlerinin azaldığı, çimlenme indisinin arttığı ve toksik biriminin azaldığı tespit edilmiştir. Kök bölgesindeki toksisite en çok %53 azalma ile US prosesinde gerçekleşmiştir. Bu da arıtımın olumlu yönde sonuçlansa da hala toksik değer aralığındadır.

Çalışmanın sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde, Karbamazepin ilaç ham maddesinin sucul ortamdan arıtılması için sonikasyon prosesinin etkili olabileceği, daha yüksek giderim verimi için proses şartlarının iyileştirilebileceği kanaatine varılmıştır. Optimum proses şartlarının doğru belirlenmesi hedef giderim verimlerine ulaşmak için çok önemlidir. Ayrıca, farklı oksidant ve katalizör türleri ile çalışma geliştirilebilir. Arıtma verimliliğini arttırmak için ayrıca sıcaklık, reaksiyon süresi ve sonikasyon cihazının gücü arttırılabilir. Hibrit proseslerle arıtım arttırılabilir.

KAYNAKLAR

Adedara I.A., Ajayi B.O., Afolabi B.A., Awogbindin I.O., Farombi E.O., Rocha J.B.T. (2021). Toxicological Outcome Of Exposure To Psychoactive Drugs Carbamazepine And Diazepam On Non-Target İnsect Nauphoeta Cinerea. *Chemosphere. Feb;264(Pt 1):128449*. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128449

Ak Sonat F. (2009). Antiepileptikler ve Yeni Bir Antiepileptik Olan Topiramatın Epilepsi Tedavisindeki Yeri ve Önemi. *Kafkas Univesitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi. 15* (6), 987-992. DOI:10.9775/Kvfd.2009.201

Alacahan F. Ö., (2017). Ultrases Destekli Elektrokimyasal Metot ile Sulu Çözeltilerdeki İlaç Kalıntı Maddesi Tetracycline Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas,465231.

Arslan, A., Topkaya, E., Veli, S., And Bingöl D. (2018). Optimization of Ultrasonication Process For The Degradation Of Linear Alkyl Benzene Sulfonic Acid by Response Surface Methodology, Clean – Soil, Air, *Water, 46*, 1700508. doi.org/10.1002/clen.201700508

Arvaniti O.S., Bairamis F., Konstantinou I., Mantzavinos D., Frontistis Z.(2020). Degradation Of Antihypertensive Drug Valsartan İn Water Matrices By Heat And Heat/Ultrasound Activated Persulfate: Kinetics, Synergy Effect And Transformation Products. *Chemical Engineering Journal Advances*, *4*, 100062, 2666-8211. doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100062

Aubenneau M., Tahar A., Casellas C., Wisniewski C. (2010). Membrane Bioreactor For Pharmaceutically Active Compounds Removal: Effects Of Carbamazepine On Mixed Microbial Communities İmplied İn The Treatment, *Process Biochemistry, 45*(11), 1826-1831. doi.org/10.1016/j.procbio.2010.04.011

Aydın M.E., Kara G.(2006). Organize Sanayi Atıksularının Zehirliliği. *S.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21*, 3-4, Selçuk Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye.

Beltrán E. M., Pablos M. V., González-Doncel M. (2024). Pharmaceuticals Effects İn The Environment,Editor(S): Philip Wexler,Encyclopedia Of Toxicology (Fourth Edition),*Academic Press*, 455465. doi.org/10.1016/b978-0-12-8243152.000993

Camargo-Perea, Ana L., Rubio-Clemente A. and Gustavo A. P. (2020). Use Of Ultrasound As An Advanced Oxidation Process For The Degradation Of Emerging Pollutants İn Water. *Water 12, 4*, 1068. doi.org/10.3390/w12041068

Cardoso-Vera J.D., Elizalde-Velázquez G.A., Islas-Flores H., Mejía-García A, Ortega-Olvera J.M., Gómez-Oliván L.M. (2021). A Review Of Antiepileptic Drugs: Part 1 Occurrence, Fate İn Aquatic Environments And Removal During Different Treatment Technologies. *Sci Total Environ*, *May 10; 768*,145487. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145487

Chen H, Yang H, Zhao Y, Gu X, Martyniuk CJ. (2020). Development and Molecular Investigation into the Effects of Carbamazepine Exposure in the Zebrafish (Danio rerio). *Int J Environ Res Public Health*. Nov 29,*17*(23),8882. doi: 10.3390/ijerph17238882

Chhaya, Ramakrishna B., Raychoudhury T. (2024). Effect Of A Typical Anticonvulsant Drug Carbamazepine On The Aggregation Of Zinc Oxide Nanoparticles and an İnsight İnto Their Co-Transport İn Porous Media,Environmental Nanotechnology. Monitoring Management, *21, 100933*, 22151532. doi.org/10.1016/j

Clara, M., Strenn, B. and Kreuzinger, N. (2004). Carbamazepine As A Possible Anthropogenic Marker İn The Aquatic Environment: Investigations On The Behaviour Of Carbamazepine İn Wastewater Treatment And During ,Groundwater İnfiltration. *Water Research, 38*(4), 947–954. doi.org/10.1016/j

Cravotto, G., Cintas, P. (2012). Introduction To Sonochemistry, Handbook On Applications Of Ultrasound Sonochemistry For Sustainability. Edited By Chen, D.,Sharma, S.J., Mudhoo, A., *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 24-25, 6000 Broken Sound Parkway, New York.

Daughton and Ternes C.G., Daughton, T.A. (1999). Ternes,Pharmaceuticals and Personal Care Products İn The Environment. Agents Of Subtle Change,Environ. *Health Perspect., 107 (Suppl. 6),* 907-938.

Deng J., Shao Y., Gao N., Deng Y., Zhou S., Hu X. (2013). Thermally Activated Persulfate (TAP) Oxidation Of Antiepileptic Drug Carbamazepine. *Chemical Engineering Journal, 228,* 765–771. doi.org/10.1016/ j.cej.2013.05.044.

Doğan S. (2015). Combıned Treatment Of Ultrasound And Iron Based Nanopartıcles For Degredatıon Of Ibuprofen As An Advanced Treatment Optıon. Yüksek Lisans Tezi, Fatih Unıversıty, The Graduate School Of Sciences And Engineering, İstanbul,424401.

Dural, E., Çetin, S., Bolayır, A., Çiğdem, B. (2020). Development And Validation Of An HPLC Method For Determination Of Carbamazepine İn Human Plasma And Applications To A Therapeutic Drug Monitoring Study. *İstanbul Journal Of Pharmacy, 50(*1*),* 6-15.

Duran, K., Bahtiyari, M. İ., Ekmekçi Körlü, A., Dereli, S., (2006). *Ultrason Teknolojisi. Tekstil ve Konfeksiyon, 16*(3), 155-158.

Dwivedi R, Singh M, Kaleekal T, Gupta YK, Tripathi M. (2016). Concentration Of Antiepileptic Drugs İn Persons With Epilepsy: A Comparative Study İn Serum and Saliva. *Int J Neurosci. Nov, 126*(11), 972-8. doi: 10.3109/00207454.2015.1088848. PMID: 26441313.

Eren,Z.(2018). Su Kaynaklarındaki İlaç Kalıntılarının İleri Oksidasyon Yöntemleri İle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. *Academic Platform Journal Of Engineering And Science 6-3,* 153-163.

Eren,Z,İnce,NH.(2010), Sonolytic And Sonocatalytic Degradation Of Azo Dyes By Low And High Frequency Ultrasound. *Journal Of Hazardous Materials*. *177*, *1–3*, 1019-1024.

Ferkous H., Hamdaoui O. (2025). Chapter 20 - Ultrasound/persulfate process,Editor(s): Oualid Hamdaoui,Innovative and Hybrid Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. *Elsevier*, 491-504, 9780443141003. doi.org/ 10.1016/ B978-0-443-14100-3.00008-9

Fleite S., Cassanello M., Del Pilar Buera M. (2025). Modifications Of Biological Membranes, Fat Globules And Liposomes Promoted By Cavitation Processes. Consequences And Applications. *Chemistry And Physics Of Lipids. 267*, *105462*, 0009-3084. doi.org/10.1016/j.chemphyslip.2024.105462

Gworek B., Kijeńska M., Wrzosek J., Graniewska M.(2021). Pharmaceuticals İn The Soil And Plant Environment. *A Review, Water Air Soil Pollut., 232*, 145, doi.org/10.1007/s11270-020-04954-8

Ildırar, D. (2014). Maya Endüstrisi Atıksuyunun Ultrases İle Koyu Renginin Giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum,387593.

Isariebel Q.P., Carine J.L., Ulises-Javier J.H., Anne-Marie W., Henri D. (2009) Sonolysis Of Levodopa And Paracetamol İn Aqueous Solutions. *Ultrason Sonochem. Jun, 16*(5),610-6. doi: 10.1016/j.ultsonch.2008.11.008

Kim, I., Yamashita, N. ve Tanaka, H., (2009a). Photodegradation Of Pharmaceuticals And Personal Care Products During UV And UV/H2O2 Treatments. *Chemosphere, 77,* 518-524. Kim, I., Yamashita, N. Ve Tanaka, H., (2009b). Performance Of UV And UV/H2O2 Processes For The Removal Of Pharmaceuticals Detected İn Secondary Effluent Of A Sewage Treatment Plant İn Japan, Journal Of Hazardous Materials, *166,* 1134-1140.

Korkmaz N.E., Savun-Hekimoğlu B., Aksu A., Burak S., Caglar N.B. (2022). Occurrence, Sources And Environmental Risk Assessment Of Pharmaceuticals İn The Sea Of Marmara, Turkey. *Science Of The Total Environment, 819,*152996, SSN 0048-9697.

Kosjek T., Andersen H.R., Kompare B., Ledin A., Heath E. (2009) Fate Of Carbamazepine During Water Treatment. *Environ Sci Technol. Aug 15,43*(16), 6256-61. doi: 10.1021/es900070h

Kumar N., Singh S. (2024). Nutritional composition, nutraceutical aspects, and medicinal benefits of garden cress (Lepidium sativum) seeds – A geographical and processing perspective. *Trends in Food Science & Technology, 154*, 104791, 0924-2244. doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104791

Li J, Peng X, Zeng P, Shen L, Li M, Guo Y. (2025). Removal Of Sulfonamides By Persulfate-Based Advanced Oxidation: A Mini Review. *Chemosphere. Feb;370*, 143874. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.143874

Loraine, G.A. ve Glaze, W.H., (1992). Destruction Of Vapour Phase Halogenatedmethanes By Means Of Ultraviolet Photolysis, 47th. *Purdue Industrial Wasteconference Proceedings,* Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan, 367-376, USA.

Maleki B., Esmaeili H., Mansouri M., Kumar D., Singh B.(2023). Enhanced Conversion Of Dairy Waste Oil To Biodiesel Via Novel And Highly Reactive Uio66-NH2/ZnO/TiO2 Nano-Catalyst. *Optimization, Kinetic, Thermodynamic And Dieselenginestudies, Fuel, 339*, 126901. doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126901.

Méndez-Arriaga F., Torres-Palma R.A., Pétrier C., Esplugas S., Gimenez J., Pulgarin C. (2008). Ultrasonic Treatment Of Water Contaminated With İbuprofen. *Water Res. Oct;42(*16*)*,4243-8. doi: 10.1016/j.watres.2008.05.033

Moholkar V.S., Senthil Kumar P., Pandit A.B. (1999) Hydrodynamic Cavitation For Sonochemical Effects*, Ultrasonics Sonochemistry, 6,* 1–2, 53-65. doi.org/10.1016/s1350-4177(98)000303

Muambo K.E., Kim M.G., Kim D.H., Park S., Oh J.E. (2024). Pharmaceuticals İn Raw And Treated Water From Drinking Water Treatment Plants Nationwide: Insights İnto Their Sources And Exposure Risk Assessment. *Water Res X. Sep 3,24*, 100256. doi: 10.1016/j.wroa.2024.100256

Myint M.Z., Kumar Sharma V., Disorders S. (2025). Quah,International Encyclopedia Of Public Health (Third Edition). *Academic Press*, 158-164. doi.org/10.1016/b978-0-323-99967-0.00265-9

Nkoom M., Lu G., Liu J., Dong H. (2020). Biological Uptake, Depuration And Biochemical Effects Of Diclofenac And Carbamazepine İn Carassius Carassius. *Ecotoxicol Environ Saf, Dec 1,*205, 111106. doi: 10.1016/j.ecoenv.111106. PMID: 32818877.

Pomati F, Castiglioni S, Zuccato E, Fanelli R, Vigetti D, Rossetti C, Calamari D. (2006). Effects Of A Complex Mixture Of Therapeutic Drugs At Environmental Levels On Human Embryonic Cells. *Environ Sci Technol Apr 1;40(*7): 2442-7. doi: 10.1021/es051715a

Prato E, Biandolino F, Grattagliano A, Ruscito A, Lofrano G, Libralato G, Trifuoggi M, Albarano L, Parlapiano I. (2023). Individual and Combined Effects Of Amoxicillin And Carbamazepine To The Marine Copepod Tigriopus Fulvus. *Environ Sci Pollut Res Int. May;30(*22*),*61672-61681. doi: 10.1007/s11356-023-26498-0. PMID: 36933130.

Puttasrinivasa,C.S., Yogarajachari,M.R., Gurusiddappa,H.L., Kachintays C.K., Kalikeri S. (2023). Advance Oxidation Processes For Wastewater Treatment: A Crucial Tool For Sustainability, Concept Of Zero Liquid Discharge. *Innovations And Advances For Sustainable Wastewater Management,* 163-185, 9780323917452. doi.org/10.1016/b978-0-323-91745-200010-3.

Rastogi T., Mahmoud W.M., Kümmerer K. (2018). Human And Veterinary Drugs İn The Environment. *Encyclopedia Of The Anthropocene, Elsevier*, 263-268, 9780128135761. doi.org/10.1016/b978-0-12-809665-9.09991-2.

Saadah N., Yusof M., Babgi B., Alghamdi Y., Aksu M., Madhavan J., Ashokkumar M. (2016). Physical And Chemical Effects Of Acoustic Cavitation İn Selected Ultrasonic Cleaning Applications. *Ultrasonics Sonochemistry, 29*, 568-576, 1350-4177. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.013

Sarah C., Matthieu G., Cyril M., Claude I., Philippe B.B. (2019). Microstreaming induced by acoustically trapped, non-spherically oscillating microbubbles. *Journal of Fluid Mechanics, 875,* 597-621. doi.org/10.1017/jfm.2019.511

Selvakumar, N., Shanavas, S., & Jeyasubramanian, K. (2023). Fabrication Of Semiconducting Photo Nano Catalyst ZnO/SnO2/ CdS To Cleanup The Dairy Wastewater İn Sunlight. *Materials Today: Proceedings*, 22147853. doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.443.

Sönmez G. (2015), İleri Oksidasyon Prosesleri ile Bazı İlaç Kalıntılarının Giderimi. Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray ,415767.

Sönmez G., IŞIK M. (2017). Bazı İlaç Kalıntılarının US ve US/H2O2 Prosesleri ile Giderimi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt 6(ICOCEE 2017 Özel Sayı)* 371-379. DOI:10.17100/Nevbiltek.322699, URL:Http://Dx.Doi.Org/10.17100/ Nevbiltek.322699.

Sun H., Zhang L., Wang L., Dong D., Li Y., Guo Z. (2023). Enhanced Freezing-İnduced Carbamazepine Degradation By Bromate Under Solar İrradiation Via The Formation Of Hypobromous Acid And Hydroxyl Radical. *Journal Of Hazardousmaterials, Volume 457,* 131793,03043894 doi.org/10.1016/ j.jhazmat.2023.131793.

Thokchom B., Kim K., Park J., Khim J. (2015). Ultrasonically Enhanced Electrochemical Oxidation Of İbuprofen. *Ultrasonics Sonochemistry, 22*, 429-436,13504177. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.04.019.

Tolou-Ghamari Z., Zare M., Habibabadi M., Najafi M.R. (2013). A Quick Review Of Carbamazepine Pharmacokinetics İn Epilepsy From 1953 To 2012. *J Res Med Sci. Mar;18(Suppl 1),* 81-5.

Tran N., Drogui P., Brar S.K., De Coninck A. (2017). Synergistic Effects Of Ultrasounds İn The Sonoelectrochemical Oxidation Of Pharmaceutical Carbamazepine Pollutant*. Ultrasonics Sonochemistry, 34,* 380-388, 1350-4177. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.014

Ulvi A., Aydın S., Emin M. (2022). Aydın Hastane atıksularının ekotoksikolojik etkisinin değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi.11(*2*),* 239-245.

Wang S., Zhou N. (2016). Removal Of Carbamazepine From Aqueous Solution Using Sono-Activated Persulfate Process. *Ultrasonics Sonochemistry, 29*, 156-162, 1350-4177. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.09.008

Webb S., (2001). A Data Bases Perspective On The Environmental Risk Assessment Of Human Pharmaceuticals. Aquatic Risk Characterization K. Kummerer (Ed.), Pharmaceuticals İn The Environment. *Sources, Fate, Effects And Risks (First Ed.),* 205-219.

Wennmalm A. (2019). Pharmaceuticals: Environmental Effects, Jerome Nriagu, Encyclopedia Of Environmental Health. *Elsevier,* 142-150, 9780444639523. doi.org/10.1016/b978-0-12-4095489.113454

Wu, T.Y., Guo N., Teh, C.Y., Hay, J.X.W. (2013). Theory And Fundamentals Of Ultrasound, Advances İn Ultrasound Technology For Environmental Remediation. *Springer Dordrecht Heidelberg,* 5-12.

Veiga A., Dordio, Palace Carvalho A.J., Martins Teixeira D., Teixeira J. G.(2010). Ultra-Sensitive Voltammetric Sensor For Trace Analysis Of Carbamazepine. *Analytica Chimica Acta, 674*, *2,* 182-189, 0003-2670. doi.org/10.1016/j.aca.2010.06.031

Viglino L., Hvidberg E.F. (1983). Active Metabolites İn Antiepileptic Therapy. Reflections On A Pharmacological Joker. *Acta Neurol Scand Suppl.,94*,9-13. PMID: 6410677.

Yakut,Ş.M.(2019). Çevre Mühendisliğinde Su Arıtımında Ultrases Uygulamaları. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8*(1), 73-81. doi: 10.17100/nevbiltek.431224

Yang L., Xue J., He L., Wu L., Ma Y., Chen H., Li H., Peng P., Zhang N. (2019). Review On Ultrasound Assisted Persulfate Degradation Of Organic Contaminants İn Wastewater: Influences, Mechanisms And Prospective. *Chemical Engineeringjournal, 378,* 122146. doi.org/ 10.1016/j.cej.2019.122146

Yentür G., Dükkancı M. (2021). Synergistic Effect Of Sonication On Photocatalytic Oxidation Of Pharmaceutical Drug Carbamazepine. *Ultrasonics Sonochemistry, 78*,105749, 1350-4177. doi.org/10.1016/j.ultsonch.105749

Yıldız,G.(2021). Ultrases Teknolojisinin Gıdaların Biyoaktif Bileşenleri Üzerine Etkisi, İktisad Yayınevi, Ankara. ISBN: 978-625-8007-21-3.

.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Eren E., Arslan, A., Topkaya, E. (2024). Karbamazepinin Sucul Ortamlardan Sonikasyon Prosesi ile Giderimi*, Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi İMASCON 2024 GÜZ*, Kocaeli, 3990,29-30 Kasım 2024.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve liseyi Kocaeli'de okudu. 2016 yılında İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümüne başladı. Zorunlu olan laboratuvar stajını Tübitak MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü Su ve Atıksu Laboratuvarında, işletme stajını ENERNJİSA Balıkesir Rüzgar Enerji Santralinde (BARES) tamamladı. Bunların yanı sıra İSU laboratuvarında staj yaptı. 2020 yılının Haziran ayında mezun olarak Çevre Mühendisi unvanına sahip oldu. 2022 yılı Ocak ayında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans programına başladı.