



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



PLAZMA SİSTEMLERİNİN ÇEVRE
MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

Şule Büşra ZAMBAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Şule Büşra ZAMBAK tarafından hazırlanan “Plazma Sistemlerinin Çevre Mühendisliği Alanında Kullanılabilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması 10/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Mustafa KARATAŞ

Danışman

Doç. Dr. Süheyla TONGUR

Üye

Prof. Dr. Mehmet Emin ARGUN

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 221001047 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Şule Büşra ZAMBAK

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLAZMA SİSTEMLERİNİN ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Şule Büşra ZAMBAK

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Süheyla TONGUR

2023, Sayfa 106

Jüri

Doç. Dr. Süheyla TONGUR
Prof. Dr. Mehmet Emin ARGUN
Prof. Dr. Mustafa KARATAŞ

Termal olmayan atmosferik basınçlı plazma jetleri, çeşitli plazma destekli uygulamalarda gün geçtikçe artan bir öneme sahiptir. Sistemin tasarlanmasında bir elektrik akımını düşük basınçlı bir gaz akışından yönlendiren atmosferik plazma alanı oluşturularak atıksu ile temas ettirilmesi sonucu arıtım gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma ile ülkemizde ilk kez atmosferik basınçta sıvı (su) arıtımına izin veren bir plazma jet reaktörü kullanılarak, atıksu arıtma etkinliği araştırılmıştır. Özellikle tekstil, boya endüstrileri gibi bazı endüstrilerin atıksularında bulunan rengin atıksudan uzaklaştırılması geleneksel yöntemlerle oldukça zordur. Bu nedenle çalışmada, atmosferik basınçlı plazma sistemi kullanılarak renk giderimi etkinliği araştırılmıştır. Model boyalar olarak metilen mavisi (MM), metil orange (MO) giderim verimleri karşılaştırılmaktadır.

Besleme gazı olarak oksijen ve argon gazı denenmiştir. Çalışmada sadece 5 dk' da ve 12 mg/L akış hızında plazma işlemi gerçekleştirilmiştir ve sonuçları iki farklı boya için değerlendirilmiştir. 20 mg/L başlangıç konsantrasyonlarında MM için %99, MO için %97 en yüksek giderim verimlerinin elde edildiği gözlenmiştir. Yapılan argon gazı denemesi için metilen mavisi model boyası için %97 giderim verimi elde edilmiştir. Çalışmada en yüksek renk giderim verimi (MM, %99) için enerji verimi 15.32 mg/kWs ve reaksiyon hız sabiti 0.85 1/dk olarak hesaplanmıştır. Çalışmada renkli atıksu numunesi olarak nar atıksu numunesi denenmiştir. Plazma arıtımına tabi tutulan metilen mavisi, metil oranj ve nar atıksu numunesi için KOİ giderim verimleri sırası ile %88.6, %83.7 ve %98.4 olarak bulunmuştur. Ayrıca sistemde oluşan radikallerden kaynaklı herhangi bir toksik etkinin olup olmadığı da araştırılmıştır. Bunun için *Lepidium Sativum* toksisite testi kullanılmıştır. Sistemden kaynaklı bir toksik etki gözlenmemiştir.

Sonuç olarak; yapılan çalışma ile dünyada plazma teknolojisinin su arıtımında kullanılabilirliğine yönelik yapılan çalışmalardan ilham alınarak, ülkemizde de su arıtımı alanında yeni bir teknoloji olan atmosferik plazma sisteminin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atmosferik Basınçlı Plazma, Boyar madde, Nar atıksuyu, İleri oksidasyon

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE USAGE OF PLASMA SYSTEMS IN THE FIELD OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Şule Büşra ZAMBAK

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Environmental Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Süheyla Tongur

2023, 106 Pages

**Jury
Assoc. Prof. Dr. Süheyla TONGUR
Prof. Dr. Mehmet Emin ARGUN
Prof. Dr. Mustafa KARATAŞ**

Non-thermal atmospheric pressure plasma jets are of increasing importance in various plasma assisted applications. In the design of the system, treatment was carried out as a result of contacting the wastewater by creating an atmospheric plasma field that directs an electric current from a low pressure gas flow. With this study, wastewater treatment efficiency was investigated by using a plasma jet reactor that allows liquid (water) purification at atmospheric pressure for the first time in our country. It is very difficult to remove the color found in the wastewater of some industries such as textile and paint industries, from the wastewater with traditional methods. Therefore, in the study, the effectiveness of color removal was increased by using an atmospheric pressure plasma system. The removal efficiencies of methylene blue (MB), methyl orange (MO) as model dyes are compared.

Oxygen and argon gas were tried as feed gas. Plasma treatment results at 5 min plasma treatment times and 12 mg/L flow rates were evaluated for two different dyes. It was observed that the highest removal efficiencies of 99% for MB and 97% for MO were obtained at initial concentrations of 20 mg/L. For the argon gas test, 97% removal efficiency was obtained for the methylene blue model dye. In the study, energy efficiency was calculated as 15.32 mg/kWh and reaction rate constant 0.85 (1/min) for the highest color removal efficiency (MB, 99%). In the study, pomegranate wastewater sample was tried as a colored wastewater sample. The COD removal efficiencies for methylene blue, methyl orange and pomegranate wastewater samples subjected to plasma treatment were 88.6%, 83.7% and 98.4%, respectively. In addition, it was investigated whether there is any toxic effect caused by the radicals formed in the system. For this, the *Lepidium Sativum* toxicity test was used. And no toxic effect from the system was observed.

In conclusion; In this study, the usability of the atmospheric plasma system, which is a new technology in the field of water treatment in our country, was evaluated, inspired by the studies on the usability of plasma technology in water treatment in the world.

Keywords: Atmospheric Pressure Plasma, Dyestuff, Pomegranate wastewater, Advanced oxidation

ÖNSÖZ

Çalışmamın gerçekleşmesinde ve yürütülmesinde tüm bilgi ve birikimleriyle katkılarını esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Süheyla TONGUR' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

221001047 nolu tez projeme maddi destek sağlayan Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım için bana laboratuvar ve cihazlarını kullanıma sunan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezine (BİTAM) teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarımda etkin bilgi ve tecrübeleri ile kendimi ve projemi geliştirmemde yardımcı olan Necmettin Erbakan Üniversitesi'nden Sayın Arş. Gör. Ömer KAZAK' a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarımda bana laboratuvarını açan ve yardımlarını esirgemeyen Necmettin Erbakan Üniversitesi'nden ikinci danışmanım, Sayın Prof. Dr. Ali TOR' a, saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu yolda bana inanan, hayatım boyunca maddi ve manevi her koşulda desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Şule Büşra ZAMBAK
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Materyal.....	14
3.1.1. Kullanılan kimyasallar	14
3.1.2. Kullanılan cihazlar ve ölçüm materyalleri	14
3.2. Yöntem	20
3.2.1. Çözeltilerin hazırlanması	20
3.2.2. Nar numunesinin hazırlanması	21
3.2.3. UV-vis spektrofotometre çalışma prensibi	22
3.2.4. <i>Lepidium sativum</i> toksisite test prosedürü	23
3.2.5. KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı) ölçümü	28
3.2.6. Atmosferik basınçlı plazma sistemi çalışma prensibi	28
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	31
4.1. Başlangıç Konsantrasyonunun Etkisi	32
4.2. Plazma İşlem Süresinin Etkisi	36
4.3. Plazma ile Sıvı Arasındaki Mesafenin Etkisi	38
4.4. Manyetik Karıştırıcının Reaksiyon Hızına Etkisi.....	41
4.5. Oksijen Gaz Akış Hızının Etkisi.....	44
4.6. Plazmanın Metil Oranj Renk Giderimine Etkisi	47
4.7. Katalizörün Etkisi.....	50
4.8. Başlangıç pH'ının Giderim Verimine Etkisi	54
4.9. Plazmanın Renkli Atıksu Numunesine Etkisi	60
4.10. Plazmanın KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) Etkisi	62
4.11. Argon Gazının Etkisi	64
4.12. <i>Lepidium Sativum</i> Toksisite Test Sonuçları	65
4.12.1. Toksik Birim (TB) Değerlerinin Hesaplanması	66
4.13. H ₂ O ₂ Oluşumunun Etkisi	73
4.14. Enerji Verimi Hesaplaması	74
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	76
5.1 Sonuçlar	76

5.2 Öneriler	79
KAYNAKLAR	80
EKLER	83



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%: Yüzde
abs: Absorbans
A: Amper
Atm: Atmosferik basınç
C₀: Başlangıç konsantrasyon
C_t: t zamanındaki konsantrasyon
Cl: Klor
CO₂: Karbondioksit
°C: Santigrat derece
Fe⁺²: Demir
FeSO₄: Demir 2 sülfat
g: Gram
HCl: Hidroklorik asit
H₂O: Su
H₂O₂: Hidrojen peroksit
kWh/kWs: Kilo watt saat
kW: Kilo watt
kV: Kilo volt
L: Litre
M: Molar
mL: Mililitre
mg: Miligram
μS: Mikro siemens
NaOH: Sodyum hidroksit
NO₃⁻: Nitrat
nm: Nanometre
O₃: Ozon
OH⁻: Hidroksil
pH: Çözeltildeki hidrojen iyonu konsantrasyonu
ppm: Milyonda bir birim, derişim birimi
scm: Standart cubic centimeters per minute
SO₄⁻²: Sülfat iyonu
TiO₂: Titanyum dioksit
Torr: 0 °C 'de 1 mm yüksekliğindeki cıva sütununun tabanına yapmış olduğu basınç
V: Volt.

Kısaltmalar

AC: Düşük Frekans

AOP: İleri Oksidasyon Prosesleri

APPJ: Atmosferik Basınçlı Plazma Jeti

Ar: Argon

DBD: Dielektrik Bariyer Deşarjı

DC: Darbeli Deşarj

EC₅₀: Test popülasyonunun %50'sini etkileyen konsantrasyon değeri

KK: Kongo Kırmızısı

KOİ: Kimyasal Oksijen İhtiyacı

MM: Metilen Mavi

MO: Metil Oranj

MPB: Mikroplazma Kabarcığı

MW: Mikrodalga

RF: Radyofrekans Plazma

TB: Toksik Birim

UV: Ultraviyole

1. GİRİŞ

Su kaynaklarında tespit edilen organik kirleticilerin (boyalar, uçucu organik bileşikler, ilaçlar...) miktarında gün geçtikçe ciddi bir artış yaşanmakta ve bu durum insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. (Kumar ve ark. 2021) Özellikle yeraltı, yerüstü sularının kirlenmesinde etkili olan ve sağlıksal, ekolojik problemlere yol açan endüstriyel atıksuları, uygun yöntemlerle arıtıldıktan sonra uygun alıcı ortamlara deşarj edilmelidir. (Erkuş ve ark. 2018)

Endüstriyel tesislerden kaynaklanan su kirliliğinin yaklaşık %20'sinin tekstil, boyama, deri, boya, kâğıt endüstrilerinden geldiği bilinmektedir. (Rahimpour ve ark. 2019) Tekstil endüstrisi atıksularında renk hariç tüm kirleticiler genel olarak fiziksel ve kimyasal metotlarla azaltılabilir. (Gökkuş ve ark. 2010)

Boyaların çoğu karmaşık kimyasal yapıları sebebiyle bozulmaya karşı dirençlidir. (Rahimpour ve ark. 2019) Yapılan bir çalışmaya göre, dünyadaki toplam boya ürünleri üretiminin %15'i çevreye boyalı atıksu olarak deşarj edilmektedir. (Huang ve ark. 2010) Bu sebeple, organik kirletici olarak da bilinen boya içerikli atıksu arıtımına verilen önem artmıştır. (Rahimpour ve ark. 2019)

Ülkemizde boya endüstrilerinin üretim miktarı gün geçtikçe artmaktadır. Üretimdeki artış tesislerin oluşturduğu atıksu miktarlarıyla paralel ilerlediği için bu alanda oluşan atıksu miktarı da artmaktadır. Bu tarz atıksular koyu renkli, yüksek pH'lı, yüksek organik madde barındıran ve düşük biyolojik bozunurluğu olan atıksulardır. (Erkuş ve ark. 2018)

Renkli atık su, sadece tekstil atıklarının doğal bir özelliği değildir; gıda firmaları, damıtma fabrikaları, kozmetik endüstrileri, kimya ve ilaç firmaları, kâğıt fabrikaları, petrol endüstrileri (Collivignarelli ve ark. 2019) gibi endüstrilerin yanında, kahve çekme, maya hazırlama ve yemeklik yağ rafinerisi gibi diğer endüstriyel işlemlerde de üretilmektedir. (Barrera-Diaz ve ark. 2003)

Atıksulardan renk giderme; adsorpsiyon, iyon değişimi, membran filtrasyon, koagülasyon/flokülasyon, fenton oksidasyonu ve benzeri prosesler, ozonlama,

elektrokimyasal prosesler, aerobik prosesler, anaerobik prosesler, ileri oksidasyon prosesleri, fotokatalitik prosesler, sonikasyon, redoks araçları vb. yöntemler kullanılmaktadır. (Teker, 2013)

İleri oksidasyon işlemlerinden ozon, UV ışıması, hidrojen peroksit (H_2O_2), fenton reaktifi (Fe^{2+}) ve fotokatalitik oksidasyon (TiO_2) dahil olmak üzere bunların işlemlerinin kombinasyonu da kullanılmaktadır. Bu işlemler boyaların bozunabilirliğini OH gibi radikaller ile sağlamaktadır. (Yamada ve ark. 2020)

Günümüzde yenilikçi bir sistem olan atmosferik basınçlı plazmalar çok umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Renkli atıksuların içeriğindeki birçok boya türü kararlı moleküler yapıları nedeniyle geleneksel atık su arıtma yöntemleriyle yeterli bir şekilde arıtilamaz. Bu tür boyalar için yeni ve verimli bir atık su arıtma teknolojisinin geliştirilmesi gereklidir. (Huang ve ark. 2010)

Huang vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada, metilen mavisinin (MM) seçilmesinin nedeni olarak “kimyasal reaksiyonlarda bağ ayrışma enerjisi ne kadar düşükse kimyasal bağ o kadar aktif olur ve eski bağların kopması ve yeni bağların oluşması o kadar kolay olur” teorisini belirtmiştir. Buna göre; metilen mavisi molekülünün radikal türlerin varlığında bozunması ve kimyasal bağların kırılması daha kolay olduğu ve inorganik iyonlara dönüşene kadar okside oldukları bilinmektedir. Plazma prosesinin son aşamasında, metilen mavisi çözeltisinde birçok radikal tür üretilir. Bunlar, organik moleküler yapıları, CO_2 , H_2O , Cl , SO_4^{2-} , NO_3^- gibi inorganik iyonlara dönüşene kadar okside eder.

Plazma ile ilgili ilk bilimsel çalışmalar Humphry Davy tarafından başlamıştır. 1874’de William Crookes plazmayı maddenin dördüncü hali olarak tanımlamıştır. Plazmanın sistematik çalışmaları, 1920’lerde Irving Langmuir ve diğer araştırmacılar ile başlamıştır. İlk defa ‘plazma’ terimi, iyonize gazın bir tanımı olarak 1928’de Irving Langmuir tarafından kullanılmıştır. (Güleç, 2011)

Maddenin dördüncü hali olan plazma; yüksüz olan gazın yeterince enerjiye maruz bırakıldığında molekül atomlarının iyonize olması ile serbestçe hareket eden pozitif yüklü

iyonlara ve negatif yüklü elektronlara ayrılmış, iyonize gaz karışımı olarak tanımlanır. (Keskin, 2017)

Evrenin %99'u plazma halindedir. Plazmalar elektronlar, iyonlar ve nötr parçacıkların karışımı ile karakterizedir ve ortalama elektriksel olarak nötrdür (yani bir plazmanın toplam yükü kabaca sıfırdır) ayrıca serbest yük taşıyıcılarının varlığı sebebiyle elektriksel olarak iletkenidir. Düşük basınçta plazma üretmek için 1000-2000 V elektrik voltajı uygulanırken yüksek basınçlarda 20-40 kV gibi yüksek voltajlar uygulanmaktadır. (Keskin, 2017)

Plazma, maddenin diğer hallerinden farklıdır. Her iyonlaşmış gaz, plazma olarak nitelenmez. Özellikle, düşük yoğunluklu bir plazmayı yalnızca "iyonize gaz" olarak tanımlamak, her ikisinin de belirli bir şekil veya hacim almaması bakımından gaz fazına benzemesine rağmen yanlış ve yanıltıcıdır. (Keskin, 2017)

Plazma doğal yollarla oluşabileceği gibi laboratuvar şartlarında da oluşturulmaktadır. Plazma oluşum sebebi ve sahip olduğu özelliklere göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 1.1. Plazmanın sıcaklığa göre sınıflandırılması.

DOĞAL PLAZMALAR		YAPAY PLAZMALAR	
Sıcak Plazmalar	Soğuk Plazmalar	Yüksek Sıcaklıktaki Plazmalar	Soğuk Plazmalar
Güneş	Aurora		Ark Plazma
Yıldızlar		Termonükleer ve Lazer Füzyon	Plazma Torç
Yıldırım	Güneş Rüzgârı		APPJ
			DBD
			Korona

Çizelge 1.2. Plazmanın donanım özelliklerine göre sınıflandırılması.

GLOW DEŞARJ		
Düşük Frekans (AC)	DİELEKTRİK BARİYER DEŞARJI	KORONA DEŞARJ
Radyofrekans (RF)		
Mikrodalga (MW)		
Darbeli (DC)		

Çizelge 1.3. Plazmanın basınçta göre sınıflandırılması.

Atmosferik Basıncılı Plazma (Yüksek Basınç – 1 Atm)	Vakum Plazma (Düşük Basınç <1 Torr)
--	---

Yenilikçi bir teknoloji olan plazma teknolojisi çeşitli alanlarda kullanılmakta ve gün geçtikçe uygulama alanları artmaktadır. Plazmaların teknolojiye ilk uygulama alanlarından biri aydınlatma olurken daha sonraları başka alanlarda da kullanılmaya başlamıştır.

Bunlar; Plazma su arıtma sistemlerinin çevresel alanda kullanımı, su kaynaklarındaki mikroorganizmaların ozon üreterek yok edilmesinde atmosferik basınç korona (corona) deşarjın kullanılması (ilk olarak Siemens tarafından önerildi) (Güleç, 2011) plazmanın uçak (Petasch ve ark. 1997) ve İHA’larda kullanımı, plazma yakıt pilleri (Bromberg ve ark. 1995), plazma kesme/ kaynak makinası, plazma yüzey teknolojileri (Keskin, 2017) , plazma ile sterilizasyon (gıda ve tıp alanında kullanımı) (Keskin, 2017) , plazma yakma sistemleri (Askarova ve ark. 2005) , tekstil, plazma polimerizasyonu ve kaplama alanında kullanımı vs. (Keskin, 2017)

Ülkemizde çevre teknolojileri alanında plazma teknolojisinin kullanımı önem kazanmaya başlamıştır. Yapılan çalışmalara göre çevresel açıdan plazma sistemlerinin; içme suyu ve atıksularının arıtılmasında, katı atıkların bertarafında, atıksuların artımında kullanılan membran yüzeylerinin modifikasyonunda vb. pek çok alanda kullanılabilirliği araştırılmaktadır.

Termal plazmalar gazlaştırma, yakma ve atıkların bertarafı gibi reaksiyonlarda, sahip oldukları yüksek sıcaklık sayesinde her türlü zararlı bileşenin bozunmasını sağlayarak ve zararlı emisyon oranını önemli ölçüde azaltılmasını mümkün kıldığı için dünyada plazmaya bu alanda ilgiyi oldukça artırmıştır.

Atmosferik plazmalar, atmosferik koşullarda meydana gelen plazmalar olarak ifade edilmektedir. Atmosferik basınçtaki plazmalar kullanılan güç kaynaklarına göre; DC plazma, düşük frekans plazması, RF plazması ve mikrodalga plazması olarak sınıflandırılır. Atmosferik basınçtaki plazmalar yüksek basınç plazmaları olarak bilinirler. Oluşturulan plazmalar genellikle 1 atm'lik basınç ortamında bulunmaktadır. Kapalı bir sisteme ve vakum tertibatına gerek kalmamaktadır. Yapılan çalışmalar; yeni donanımların geliştirilmesi ve bu donanımların endüstriyel uygulanabilirliğinin sağlanması şeklinde yapılmaktadır. Atmosferik basınç plazmaları, düşük basınç plazmalardan ayıran en önemli özellikleri, düşük basınç plazma sistemlerinde bulunan, vakum sistemleri, vakum kontrol üniteleri, basınç göstergeleri, sızdırmazlığı sağlamak için kullanılan contalar ve bağlantı elemanları gibi pahalı ve karmaşık bileşenleri içermemeleridir. Bu tip plazmalarda kullanılabilecek gaz çeşitliliği fazladır ve bu da 3 plazma içinde oluşturulacak kimyasal reaksiyonlara elverişli parçacık çeşitliliğini artırır. Ayrıca elde edilen plazmanın yüksek sıcaklıklarda olmaması uygulama alanını da genişletir. Atmosferik basınçta oluşturulacak bir plazma kaynağı için, düzenli, farklı uygulamalara uyarlanabilir ve endüstriyel alanda kullanılabilir olması önemlidir. (Güleç, 2011)

Açıkel (2018) atmosferik basınçlı sistemlerin avantajlarından; “Suya ihtiyaç duyulmaması, prosesin gaz fazda gerçekleşmesi, kimyasal kullanım oranını en aza indirmesi, endüstriyel atığa sebep olmaması ve materyalin temel özelliklerini kaybettirmeden etkili modifikasyonlar yapması gibi çeşitli avantajlara sahiptir.” şeklinde bahsetmiştir.

Güleç (2011) bir çalışmada atmosferik basınçlı plazmaların düşük basınçlı plazmalar ile aralarındaki en önemli özelliklerini; “Atmosferik basınçlı sistemlerde, düşük basınç plazma sistemlerinde bulunan, vakum sistemleri, vakum kontrol üniteleri, basınç göstergeleri, contalar ve bağlantı elemanları gibi pahalı ve karmaşık bileşenleri içermemesi önemli bir özelliktir. Bu tip plazmalarda kullanılabilecek gaz çeşitliliği fazladır ve bu da plazma içinde oluşturulacak kimyasal reaksiyonlara elverişli parçacık çeşitliliğini artırır. Ayrıca elde edilen plazmanın yüksek sıcaklıklarda olmaması uygulama alanını da genişletir. Atmosferik basınçta oluşturulacak bir plazma kaynağı

için, düzenli, farklı uygulamalara uyarlanabilir ve endüstriyel alanda kullanılabilir olması önemlidir.” şeklinde özetlemiştir.

Dojčinović, ve arkadaşları (2011) ise; ‘‘Boya atık sularının arıtılmasında adsorpsiyon, koagülasyon, filtrasyon, sedimantasyon ve biyolojik arıtmalar gibi çeşitli geleneksel yöntemler kullanılmış, ancak atık suyun yüksek derecede polaritesi ve karmaşık moleküler yapısı nedeniyle bu arıtmaların hiçbiri tatmin edici olmamıştır. Ayrıca, hepsi daha fazla ele alınması gereken ikincil bir atık ürün üretmekle sonuçlanır. ‘’ diyerek geleneksel yöntemlerin sorunlarından bahsetmiştir.

Atmosferik basınçlı plazma sistemleri boya gibi parçalanması zor olan organik kirleticileri etkili bir şekilde parçalamaktadır. Ayrıca bu sistemler ikincil bir atık oluşturmaması ile oldukça çevreci bir sistemdir.

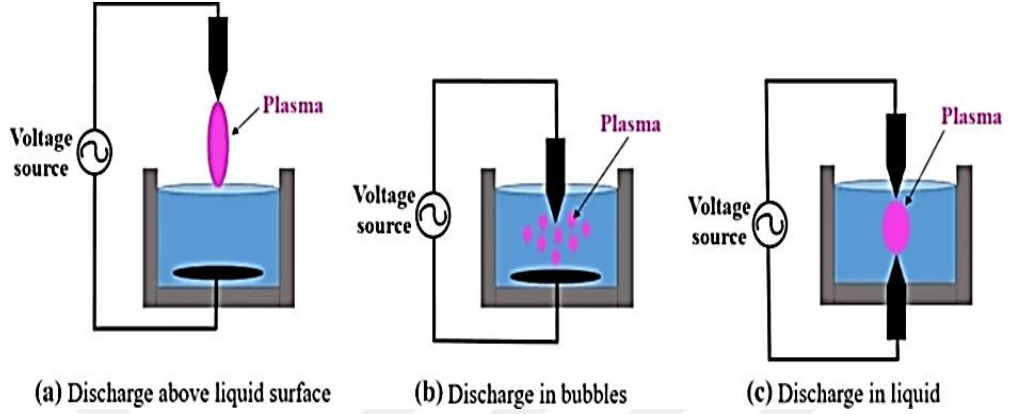
Kumar ve arkadaşları (2021) yapmış oldukları bir çalışmada; ‘‘Enerji tüketimi açısından, soğuk plazma sistemi, termal plazma sistemine göre reaktif türler üretmek için daha düşük enerji gerektirir. Plazma dekontaminasyon süreçlerini çevre dostu bir teknoloji olarak değerlendirebiliriz.’’ diyerek bu fikri savunmuşlardır.

Yamada ve arkadaşları (2020) ise yapmış oldukları çalışmada; ‘‘Birçok plazma üretim yöntemi arasında düşük sıcaklıklı, atmosferik basınçlı deşarj plazması stabildir ve kullanımı kolaydır.’’ ifadelerini kullanmıştır.

Kumar ve ark. (2021) yaptıkları bir çalışmada atmosferik basınçlı plazma için plazmanın sıvı ile etkileşimini üç farklı şekilde değerlendirmişlerdir. Bunlar, sıvı yüzeyinin üzerine boşaltma, kabarcıklar halinde boşaltma ve sıvının içine doğrudan boşaltma. Bunlardan en yaygın olarak tercih edileni sıvı yüzeyi üzerinden boşaltmadır. Çalışmalarında reaktif türlerin (OH^- , H_2O_2 , O_3 vb.) ve gerçekleşen reaksiyon hızının organik kirletici üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve reaktif türlerinin nerelerde oluştuklarını belirtmişlerdir.

Kumar ve ark. (2021) çalışmalarında gaz fazında üretilen reaktif türlerin, ikincil türler üretmek için sıvıya yayılabildiğini veya sıvı içerisindeki kimyasal reaksiyonları etkileyebildiğini belirtmişlerdir. Bu reaktifler oksijen gazı için, arayüzeyde ve sıvı fazda

ya da bir argon gibi bir soy gazın eklenmesiyle plazmada ya da sadece sıvı yüzeyi üzerinde çevreleyen havada oluşan plazmada oluşturulmuştur.



Şekil 1.1. Plazmanın sıvı ile temas şekilleri (Kumar ve ark. 2021)

Bu zamana kadar yapılan çalışmaların neredeyse hepsinde, atmosferik basınçlı plazma sistemlerinin renk giderimi üzerindeki etkisi araştırılırken sentetik çözeltiler hazırlanmıştır. Araştırmalarımıza göre yapılan çalışmalarda en sık kullanılan model organik kirletici boya metilen mavisidir.

Bu çalışmada dünyadaki plazma teknolojisinin su arıtımında yapılan çalışmalarda kullanılmasından ilham alınarak, ülkemizde su arıtımı alanında yeni bir teknoloji olan atmosferik plazma sisteminin kullanılabilirliği değerlendirildi. Tez çalışmam kapsamında oksijen gazı beslemeli Atmosferik Basınçlı Plazma Sistemi sıvı ile muamele edilebilecek şekilde oluşturuldu, öncelikli olarak tercih edilen, karalı moleküler yapılı ve bozunmaya dirençli metilen mavisi ve metil oranjın giderilmesi sırasında sistemin etkinliği araştırıldı. Plazma sisteminin renkli atıksu üzerinde denenmesi için bir meyve işleme tesisinden temin edilen nar atıksu numunesi ile çalışıldı.

Ayrıca yenilikçi bir teknoloji olan plazma sistemlerinin araştırılması ile ileriye yönelik çevre mühendisliği ile ilgili yapılacak olan çalışmalarda literatüre katkı sağlaması amaçlandı.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Jiang ve ark. (2012) bir çalışmada Dolaşım Hava Geçirmez Termal Olmayan Plazma Reaktörü ile çalışmışlardır. Model boya olarak metil oranj, besleme gazı olarak oksijen, hidroklorik asit, sodyum hidroksit, sodyum klorür kullanmışlardır. Çalışmada gaz akış hızı 1000 ml/dk olarak ayarlanmıştır. Sistem, boya konsantrasyonu 60 mg/L' ye ayarlanan çözelti 20 dk' lık işlem görmüş ve %92 bozunma verimi elde edilmiştir. Ayrıca 11.68 g/kWh enerji verimi elde edilmiştir.

Chen ve ark. (2018) çalışmalarında DBD (Dielektrik Bariyer Deşarj) plazma sistemi kullanmışlar ve model boya olarak kristal menekşe ile çalışmışlardır. Bu çalışmada besleme gazı olarak hava ile çalışılmış, demir iyonu ve sodyum persülfat kimyasalları ekleme yapılmış. Çözelti pH'ı başlangıçta 3 iken işlem sonrası 7' ye yükselmiştir. Gaz akış hızı 1333.4 ml/dk' ya ayarlanmış ve 1 ile 90 dk' lık çalışma sürelerinde 40 mg/L' lik boya konsantrasyonundan %94 giderim verimi elde edilmiştir. Çalışma sürelerine bağlı olarak 0.0627 ve 5.64 g/kWh enerji verimleri elde edilmiştir.

Chen ve ark. (2017) yapmış oldukları başka bir çalışmada yine kristal menekşe boya modeli ile Dielektrik Bariyer Deşarjlı Plazma sistemini kullanmışlar, ve yine besleme gazı olarak hava kullanıp akış hızını 1333.4 ml/dk' ya ayarlamışlardır. İl pH 3.55 iken işlem sonrasında bu değer 2.93' e kadar düşmüştür. Çalışmada iletkenlik ölçümü yapılmış olup başlangıç değer 102 $\mu\text{S/cm}$ iken işlem sonrası iletkenlik 203 $\mu\text{S/cm}$ ' ye kadar yükselmiştir. Bu sefer 5 dk' lık bozunma süresi ile %97 giderim verimi ve 1.164 g/kWh enerji verimi elde edilmiştir.

Rashid ve ark. (2020) çalışmalarında Su Altı Paralel Çok Tüplü Hava Deşarjlı Plazma Jeti kullanarak remazol mavisi (RM), remazol kırmızısı (RK), remazol sarısı (RS) model boyalarının giderim verimlerini araştırmışlardır. Besleme gazı olarak hava kullanılmıştır. Çalışmalarında her boya modeli için farklı sürelerde çalışılmış (RM:20 dk, RK:60 dk, RS:60 dk), boya konsantrasyonları her bir renk için 4 mg/L' ye ayarlanmıştır. Bu işlem sürelerinde sırası ile %93, %86, %73 boya giderim verimleri elde edilmiştir. Enerji verimleri de sırası ile 0.863, 0.303, 0.239 g/kWh elde edilmiştir. Ayrıca pH ve iletkenlik ölçümleri her bir boya modeli için 25. dk' daki değerleri ölçülmüştür. pH, remazol mavisi için başlangıçta 7.45, işlem sonrasında 7.15 olmuştur. Remazol

kırmızısı için başlangıçta 7.05, işlem sonrasında 6.55 olmuştur. Remazol sarısı için başlangıçta 7.08, işlem sonrasında 6.65 olmuştur. İletkenlik değerleri ise başlangıç ve işlem sonrası ölçümleri sırası ile RM:104.5-112 $\mu\text{S/cm}$, RK:109.5-125 $\mu\text{S/cm}$, RS:106-116 $\mu\text{S/cm}$ olarak ölçülmüştür.

Chandana ve ark. (2015) metilen mavisi boya modeli kullanarak atmosferik plazma jeti ile çalışmışlardır. Çalışmalarında hava, nitrojen, argon besleme gazlarının verimlerini karşılaştırmışlardır. Giderim verimini arttırmak için demir, titanyum sülfat kimyasal ilavesi yapılmıştır. Gazların akış hızı 300 sscm' ye ayarlamıştır. Boya konsantrasyonu üç araştırma içinde 100 mg/L' dir. 40 dk' lık işlem süresinde boya giderimi 20ppm argon ile %100, 50ppm nitrojen ile %72, 50ppm hava ile %88 verimleri elde edilmiştir. Enerji verimi ise 0.4 g/kWh' tir.

Abdel-Fattah, (2019) çalışmasında helyum besleme gazı kullanarak atmosferik basınçlı plazma jeti ile metilen mavisinin giderimini araştırmıştır. Gaz akış hızı 7500scm ve boya konsantrasyonu 35 mg/L olarak ayarlanmıştır. Çalışmada 40 dk' lık işlem süresinde %98.52 bozunma verimi elde edilmiştir.

Attri ve ark. (2016) araştırmalarında İki İğne Tipi Doğrudan ve Dolaylı Atmosferik Basınçlı Plazma Jetleri ile çalışmışlar ve üç model boyanın (metilen mavisi (MM), metil oranj (MO), kongo kırmızısı (KK)) giderim verimini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında argon besleme gazını kullanmışlardır ve 20 ila 30 dk' lık işlem sürelerinde doğrudan ve dolaylı işlem sonuçları üç farklı boya içinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Çalışmada 20 dk' lık doğrudan işlem sonucunda MM %95, MO %97, KK %86, dolaylı işlemde MM %71, MO %81, KK %76 giderim verimi elde edilirken, 30 dk' lık işlem süresinde doğrudan işlemde MM %97, MO %99, KK %90, dolaylı işlemde MM %87, MO %92, KK %84 giderim verimi elde edilmiştir. Enerji verimleri ise yine 20 dk' lık işlem sonucunda dolaylı işlemde MM 2.8, MO 2.9, KK 2.6, dolaylı işlemde MM 4.3, MO 4.9, KK 4.5 g/kWh elde edilirken, 30 dk' lık işlem süresinde doğrudan işlemde MM 1.99, MO 1.98, KK 1.8, dolaylı işlemde MM 3.4, MO 3.6, KK 3.3 g/kWh elde edilmiştir.

Yamada ve ark. (2020) yaptıkları araştırmada Atmosferik Basınçlı Plazma Jeti Slug Flow Reaktör Sistemi kullanarak argon, helyum, oksijen besleme gazları karşılaştırılmıştır. Model boya olarak 15 mg/L konsantrasyonunda metilen mavisi

kullanılmıştır. Sodyum klorür kimyasal ilavesi yapılmıştır. pH 5.5 ve iletkenlik 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Gaz akış hızları 0,2 ml/dk olarak ayarlanmıştır. 3.2 dk'lık sürede argon işleminde %89.3, helyum işleminde %75.8, oksijen işleminde %94.5 boya giderim verimleri elde edilmiştir. Argon ve helyum işlemlerinde enerji verimleri sırası ile 0.0241, 0.0226 g/kWh elde edilmiştir.

Matinzadeh ve ark. (2017) çalışmalarında bromofenol mavisi' nin Atmosferik Basıncılı Plazma Jeti ile bozunması araştırmışlardır. Çalışmada argon besleme gazı kullanılmış ve akış hızı 5000ml/dk'ya ayarlanmıştır. Model boyanın konsantrasyonu 10 mg/L' dir. Çözeltinin pH ve iletkenlik başlangıç ve işlem sonu değerleri sırası ile 5.2-2.7 ve 32-43 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. İşlem süresi 10 dk' dır.

Rahimpour ve ark. (2019) yapmış oldukları çalışmada Dielektrik Bariyer Deşarjlı Plazma Sistemi kullanarak oksijen ve argon besleme gaz karışımında kristal viyole model boyasının giderim verimi araştırılmıştır. Giderim verimi için sodyum tiyosülfat, indigotrisülfonat reaktifi kimyasal eklemeleri yapılmış, boya konsantrasyonu 4.08 mg/L olarak ölçülmüştür. Gaz akış hızı 900 ml/dk olarak ayarlanmıştır. 1 dk'lık işlem süresinin sonucunda giderim verimi %100, enerji verimi 12.24 g/kWh elde edilmiştir.

Iervolino ve ark. (2019) çalışmalarında Dielektrik Bariyer Deşarjlı Silindirik Konfigürasyon Sistemi ile, hava ve oksijen besleme gazlarının, metilen mavisinin giderim veriminin karşılaştırmasını yapmışlardır. Boya konsantrasyonu 10 mg/L olarak ölçülmüştür. 5 dk'lık işlem sonunda oksijen kullanılarak %96, hava kullanılarak %76 boya giderim verimi elde edilmiştir. Enerji verimi ise 0.79 g/kWh elde edilmiştir.

Magureanu ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada Çok Telli Plaka- Darbeli Korona Deşarjı Sistemi ile metilen mavisi renk giderimini incelemişlerdir. Çalışmada besleme gazı olarak oksijen kullanılmış ve gaz akış hızı 1000sccm' ye ayarlanmıştır. Giderim verimini arttırmak için demir (II) klorür kimyasal eklemesi yapılmıştır. Boya konsantrasyonu 50 mg/L olarak verilmiştir. 10 dk'lık işlem sonucunda %98 boya giderim verimi ve 1.5 g/kWh enerji verimi elde edilmiştir.

Liu ve ark. (2016) çalışmalarında Atmosferik Basıncılı Glow Deşarj Plazma Jeti ile metil oranj boya bozunumunu araştırmışlardır. Çalışmada besleme gazı olarak oksijen

kullanılmıştır. Boya konsantrasyonu 10 mg/L olarak verilmiştir. 15 dk' lık işlem süresinde %93 boya giderim verimi elde edilmiştir.

Pankaj ve ark. (2017) bu araştırmada Dielektrik Bariyer Deşarjı Plazma Sistemi ile metil kırmızısının oksijen besleme gazı varlığında giderimini çalışmışlardır. Boya konsantrasyonu 100 mg/L olarak ayarlanmıştır. 5 dk' lık işlem sonunda %100 boya giderim verimi elde etmişlerdir.

Pankaj ve ark. (2017) bu çalışmalarında ise Dielektrik Bariyer Deşarjı Plazma Sistemi ile kristal menekşenin oksijen besleme gazı varlığında giderim verimini araştırmışlardır. Boya konsantrasyonu 100 mg/L olarak ayarlanmıştır. 5 dk' lık işlem sonunda %100 boya giderim verimi elde etmişlerdir.

Reddy ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada Dielektrik Bariyer Deşarjı Silindirik Konfigürasyon Sistemi ile oksijen besleme gazı kullanarak kristal menekşenin boya giderim verimini araştırmışlardır. 25dk' lık işlem sonucunda 100 mg/L konsantrasyondaki boyanın giderim verimi %89' dan yüksek çıkmıştır. Çalışmada 86.3 g/kWh enerji verimi elde edilmiştir.

Kazemi ve ark. (2021) çalışmalarında bir model organik bileşik olan kristal menekşenin (CV) bozunmasında yer alan kimyasal reaktif türleri, yeni Birçok Dizili Dielektrik Bariyer Deşarjı (MADBD) plazma gaz difüzörü ile incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, en iyi çalışma koşulları için renk giderme oranının %95, enerji verimliliğinin 7.8 g/kWh ve CV renk giderme oranı sabitinin 2.83 l/dk olduğunu göstermiştir. İlgili reaktif türlerin etkisinin araştırılması, MADBD plazmasında CV renk bozulmasına yol açan en önemli reaktif türün ozon olduğunu, kısa canlı türlerin ve reaktif nitrojen türlerinin ise CV bozulması üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Dojčinović ve ark. (2011) yapmış oldukları çalışmada reaktif tekstil boyalarının, yani reaktif siyah 5, reaktif mavi 52, reaktif sarı 125 ve reaktif yeşil 5'in renk gideriminde ileri oksidasyon prosesleri (AOP'ler) ile birleştirilmiş Dielektrik Bariyer Deşarjlarının (DBD) kullanılıp kullanılamayacağını araştırılmıştır. H₂O₂ ilavesi ile %97 oranında reaktif siyah 5 dekolizasyonunun etkili bir sonucu elde edilmiştir . Yapılan toksisite testleri, sadece bir konsantrasyon değeri için hafif toksisite artışının tespit edildiği reaktif

yeşil 15 dışında, arıtmadan sonra boya çözeltilerinin toksisitesinin azaldığını veya aynı seviyede korunduğunu göstermiştir. Sonuç olarak laboratuvar düzeyinde elde edilen sonuçlar, DBD plazma reaktörünün tekstil atık sularının dekolorizasyonu için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Zhou ve ark. (2021) çalışmalarında, hedef organik kirleticilerin bozunması için reaktif türler sağlamanın etkili bir yolu olarak küçük oluşum kabarcıkları içinde plazma deşarjları oluşturmak üzere yeni bir Mikroplazma Kabarcığı (MPB) Reaktörü geliştirilmiştir. Plazmanın su altı mikroplazma kabarcıkları (MPB'ler) biçimindeki kabarcıklarla kombinasyonunun boyaların bozunmasını 20 g/kWh'ye kadar yüksek enerji verimliliği ile arttırdığı gözlemlenmiştir. Alizarin sarı, turuncu-II ve metilen mavisi' nin tamamen bozunması, sırasıyla 10, 5 ve 3 dakikalık arıtmada elde edilmiştir.

Taghvaei ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada Atmosferik Basınçlı Radyofrekans (RF) Plazma Jeti ile kristal menekşe'nin bozunmasından sorumlu kimyasal reaktif türler araştırılmıştır. Argon besleme gazına yapılan (H_2O , hava ve O_2) farklı moleküler katkılar, plazma tarafından üretilen farklı türlerin etkisini değerlendirmek için karşılaştırılmıştır. Argon, diğer koşullara kıyasla en yüksek renk giderme etkisini göstermiş ve $Ar + \%0.27 H_2O$, kristal menekşenin en düşük renk giderme etkisine yol açmıştır. Sonuçlar, kristal menekşenin homojen olmayan renk giderimi için OH gibi kısa ömürlü radikallerin yüzeye yakın reaksiyonlarının baskın bir rolü olduğunu göstermektedir.

García ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada metilen mavisi içeren sentetik bir çözelti hazırlanarak Mikrodalga Plazma Jet ile bozunabilirliğini araştırılmıştır. Eşit toplam akış ve toplam giriş gücü ile bile birden fazla aplikatörün tek bir aplikatörden biraz daha verimli olduğu bulunmuştur. Çalışmada 50 ml' lik eşit veya daha düşük numune hacimleri için, boya dönüşümünün $\%50$ 'sindeki enerji verimi değerleri, literatürde bildirilen en iyi değerler arasında, 0.033 ile 0.296 g/kWh arasındadır. Çözelti, plazmaya 30 dakika maruz kaldıktan sonra renksiz hale gelmiştir. Plazma reaktörü, konsantrasyonu plazma argon akış hızıyla artan, saf suda hidrojen peroksit türleri üretebilmiştir. İncelenen en uygun durum için, enerji verimi oluşumu $2.7mg/(kWh)$ 'tir.

Sun ve ark. (2012) yaptıkları bu çalışmada Darbeli Yüksek Voltajlı Deşarj Plazması kullanılmışlardır. Metil oranj (MO) boya atıksuyu hedef nesne olarak

seçilmiştir. İşlem süresinin artmasıyla renk giderim hızı artmıştır. İlk iletkenlik 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olduğunda, renk giderim oranı en yüksektir. MO' nun bozunma verimi reaktördeki gazdan etkilenmiş ve oksijen > hava > argon > nitrojen sırasına göre bozunma verimi elde edilmiş ve bu araştırmada elde edilen enerji verimi 0.45 g/kWh olmuştur.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

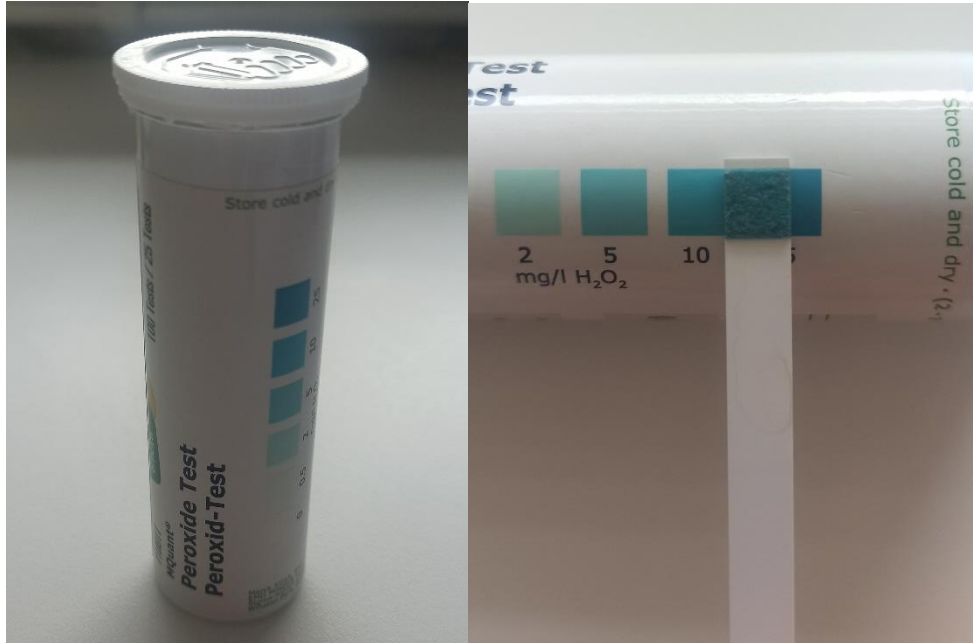
3.1.1. Kullanılan kimyasallar

Bu çalışmada özel medikal bir firmadan toz halinde metilen mavisi (ChemBio CB9310), toz halinde metil oranj (ZAG Kimya) ve toz halinde FeSO_4 (Carlo Erba) tozu kullanıldı. Kimyasallar saf su ile sentetik çözelti haline getirilerek kullanıldı. pH ayarlamaları için 1M NaOH ve %2 HCl kullanıldı.

3.1.2. Kullanılan cihazlar ve ölçüm materyalleri

3.1.2.1. Hidrojen peroksit (H_2O_2) testi

Ölçüm için Supelco marka MQuant 0.5-25 mg/L(H_2O_2) aralıkta ölçüm yapabilen hidrojen peroksit test şeritleri kullanıldı (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Hidrojen Peroksit test kiti

3.1.2.2. pH ve iletkenlik

Çalışmada kullanılan pH metre Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Teknoloji ve Araştırma Merkezinden temin edildi ve sıcaklık ölçümü de bu cihazda gerçekleştirildi. İletkenlik cihazı ise Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü Atıksu Arıtımı ve Araştırma Laboratuvarından temin edildi.

3.1.2.3. UV-Vis spektrofotometre

Absorbans ölçümü için Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Teknoloji ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan, SHIMADZU marka UV-3600 Plus model UV-VIS-NIR Spektrofotometre kullanıldı.

3.1.2.4. *Lepidium sativum* toksisite testi

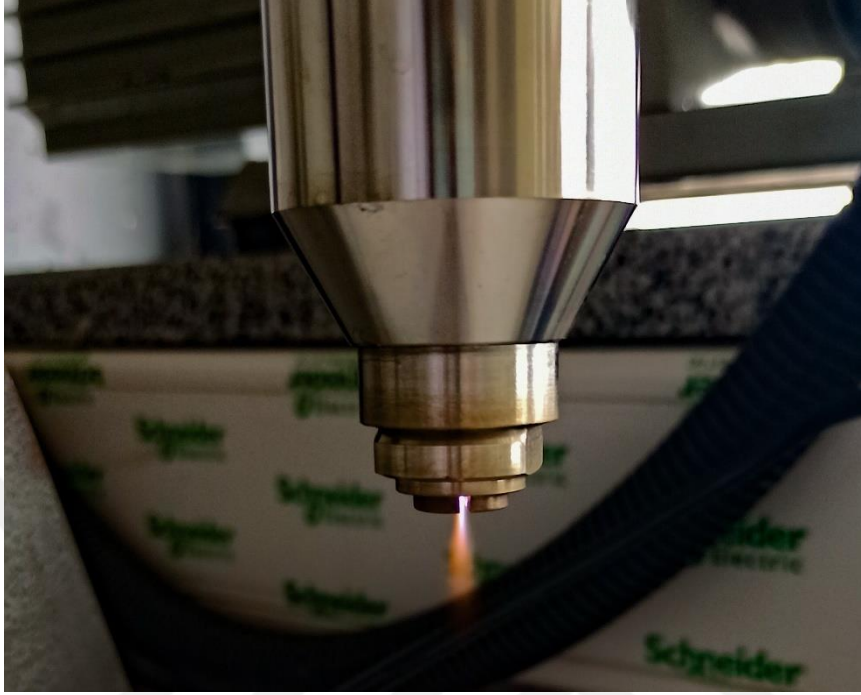
Toksisite analizi için tercih edilen bu yöntemde 9 cm'lik cam petri kapları, 90 mm çapında Watman 1 marka filtre kâğıdı, saf su ve tere tohumları kullanıldı.

3.1.2.5. Atmosferik basınçlı plazma sistemi

Çalışmada Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Teknoloji ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan OptoSense marka mini Atmosferik Plazma Sistemi kullanıldı. Cihaz Radyofrekans jeneratörü (Şekil 3.5.), esnek gaz dağıtım borusu ve probdan oluşmaktadır. Cihaz 380x280x280 mm UXYXG boyutundadır. Cihazın probunda, 10-12 mm boyutunda yuvarlak baş kısım ve gövdesinde 15-18 mm boyutunda dikdörtgen kısım mevcuttur (Şekil 3.2). Cihaz 1000VA arttırılabilir güç ve 220 ($\pm$ %5) güce sahiptir. Giriş gaz basıncı 2-2.5 kg 0.12 m³/dk' dır.

Cihaz, laboratuvar şartlarında kullanılmak üzere modifiye edilerek, sıvı numune işlemi için uygun hale getirildi. Cihazın probu sporla aşağı doğru tutturuldu. İşlem sırasında giderimi arttırması amaçlanarak, sıvı numunenin bulunduğu ısıya dayanıklı cam kabın altına manyetik karıştırıcı yerleştirildi (Şekil 3.6.). Cihaz besleme gazı ile çalıştığı için oksijen tüpüne bağlandı (Şekil 3.4.). Gaz akışını kontrol edebilmek için akış ölçer

kullanıldı (Şekil 3.3.). Basınç ayarlaması ve gaz akışını sağlamak için regülatör kullanıldı (Şekil 3.3). Şekil 3.7’ de plazma sisteminin deneysel düzeneği verilmiştir.



Şekil 3.2. Plazma Işını



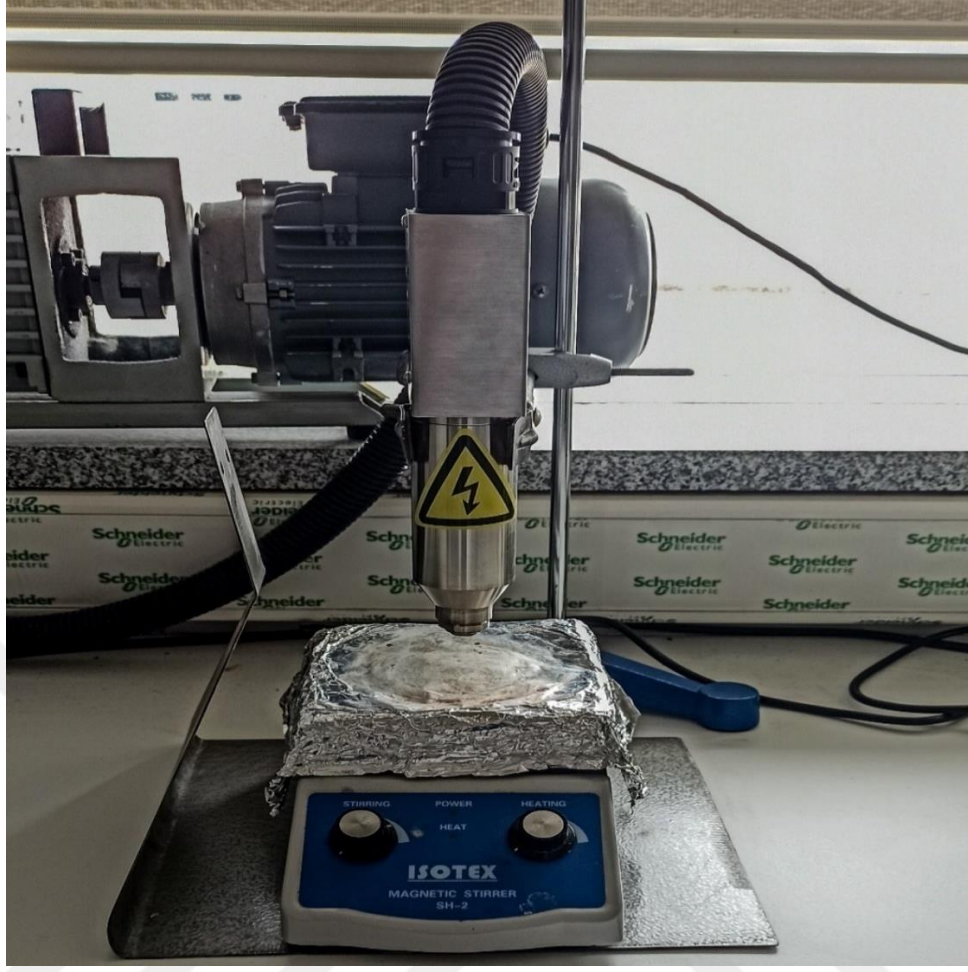
Şekil 3.3. Regülatör ve Akış Ölçer



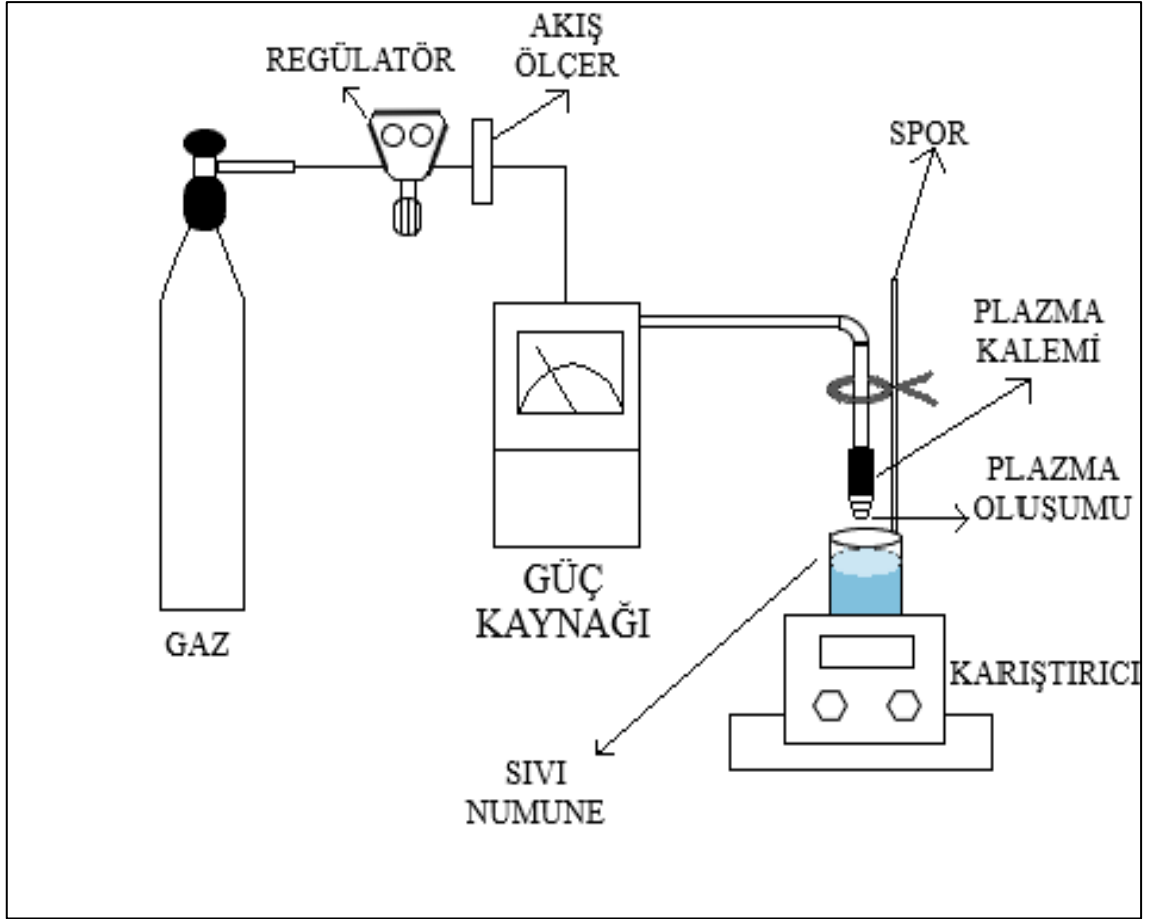
Şekil 3.4. Oksijen Tüpü



Şekil 3.5. Plazma Güç Kaynağı



Şekil 3.6. Atmosferik Basıncılı Plazma Düzenegi



Şekil 3.7. Atmosferik Basıncılı Plazma Sisteminin Deneyel Düzenneği

3.2. Yöntem

3.2.1. Çözeltilerin hazırlanması

3.2.1.1. Metilen mavisi ve metil oranj çözeltileri

100 mg/L metilen mavisi stok çözeltisi hazırlamak için öncelikle toz halindeki metilen mavisinden 0.1 g 100 ml'lik behere alınarak hassas terazide tartımı yapıldı. Beherin üzerine öncelikle 80 ml kadar saf su eklenerek karıştırıcıda 5 dk karıştırıldı. Karışım 1000 mL' lik balon jojeye boşaltıldı. Daha sonra behere 20 mL saf su eklenerek tekrar 5 dk karıştırıcıda karıştırıldı ve balon jojeye boşaltıldı. Bu işlem beherde kalan boya kalıntıları için yapıldı. Balon jojenin üzerine saf su eklenerek 1000 mL 'ye tamamlandı ve çalkalandı. 100 mg/L metilen mavisi stok çözeltisi elde edildi. Metil oranj stok çözeltisi de aynı prosedürle hazırlandı.

Farklı konsantrasyonlarda seyreltik çözeltiler hazırlamak için aşağıdaki formülden yararlanıldı;

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

M_1 = Hazırlanacak konsantrasyon (mg/L)

V_1 = Hazırlanacak hacim (mL)

M_2 = Stok çözelti konsantrasyonu (mg/L)

V_2 = Stok çözeltilerden alınacak hacim (mL)

100 mL' lik balon jojelerin üzerine hazırlanacak konsantrasyonlar yazıldı. Her birine yukarıdaki formülden hesaplanan V_2 kadar stok çözeltilerden ekleme yapıldı. Her bir balon jojenin üzeri 100 mL' ye tamamlanacak şekilde saf su eklendi ve çalkalandı.

3.2.1.2. Demir 2 sülfat (FeSO_4) çözeltisinin hazırlanması

Mol kütlesi 278.05 g olan toz halindeki FeSO_4 ile 1000 mg/L stok çözelti hazırlamak için 4.978 g FeSO_4 tozunun tartımı yapılarak stok çözelti hazırlama prosedürüne göre hazırlandı.

3.2.1.3. Katalizörlü çözeltilerin hazırlanması

Çalışmada metilen mavisi ve metil oranj boyalarının plazma ile giderim verimine etkisini araştırmak için demir II sülfat (FeSO_4) katalizörü kullanıldı. Metilen mavisi için katalizörlü çözelti hazırlandı. Çözelti hazırlanırken stok çözeltiden alınacak miktar $M_1V_1 = M_2V_2$ formülünden hesaplandı.

250 ml hacminde, 20 mg/L konsantrasyonunda metilen mavisi + FeSO_4 çözeltisi hazırlamak için 1000 mg/L FeSO_4 stok çözeltisinden alınacak miktar;

$$250 \times 20 = 1000 \times V_2$$

$V_2 = 5$ mL olarak hesaplandı.

1000 mg/L metilen mavisi stok çözeltisinden alınacak miktar ise;

$$250 \times 20 = 1000 \times V_2$$

$V_2 = 5$ mL olarak hesaplandı.

Hazırlanan FeSO_4 ve metilen mavisi stok çözeltilerinden 5' er mL alınarak 250 mL' lik balon jojeye eklendi. Üzeri saf su ile tamamlanarak çalkalandı.

Metil oranj + FeSO_4 çözeltisi hazırlamak için de yukarıda anlatılan deneysel süreç uygulandı.

3.2.2. Nar numunesinin hazırlanması

Çalışmada renkli bir atıksu numunesinde, Atmosferik Basıncılı Plazma Sisteminin veriminin araştırılması yapıldı. Bunun için bir Meyve İşleme Endüstrisinden temin edilen nar atıksu numunesinin plazma sistemi ile renk giderimi denendi. Temin edilen nar atıksu numunesi plazma çalışması öncesinde %100, %25, %10 ve %5 oranlarında seyreltildi. Bu seyreltmelerin başlangıç absorbans ölçümleri için 50'şer mL numune kaplarına alındı.

3.2.3. UV-Vis spektrofotometre çalışma prensibi

Çalışmada renk giderim verimlerinin belirlenmesi için UV-Vis Spektrofotometre kullanıldı ve absorbans ölçüm sonuçlarına göre gerekli hesaplamalar yapıldı. Ölçüm yapılmadan önce bilgisayar açılarak cihazın yazılımı açıldı. Sonrasında cihazın kendisi açıldı ve ikinci uyarı tonundan sonra cihaz ile yazılım arasında bağlantı sağlandı. Ölçüm absorbans olarak seçildi. Referans olan saf su kiti ön odacıkta bırakıldı diğer kite ölçüm yapılacak numune koyuldu ve ölçüm yapıldı.

Yapılan her çalışmanın plazma işlemi öncesi başlangıç numuneleri ve plazma işlemi sonrası numuneleri ölçüldü. Ölçümler 200-800 nm aralığında (Chandana ve ark. 2015) yapıldı.

Giderim verimi hesaplamaları için metilen mavisi numunelerinin ölçümü için 1, 3, 5, 7 ve 10 mg/L konsantrasyonlarında standart çözeltiler hazırlanarak bunların absorbans ölçümleri yapıldı. Aynı işlem metil oranj çözeltileri için de yapıldı. Standart çözeltilerin metilen mavisi için 660 nm' deki (Chandana ve ark. 2015) ve metil oranj için de 465 nm' deki (Jiang ve ark. 2012) absorbans değerleri ile kalibrasyon grafikleri elde edildi. Bu kalibrasyon grafiğinden $y = ax + b$ formülü elde edildi. Giderim verimi hesabı yapılırken başlangıç numunenin absorbans değeri (C_0) formüldeki y değeri olarak kabul edildi. Formülde x değeri plazma işleminden sonraki numunenin absorbans değeri (C) olarak kabul edildi. Absorbans ölçümü öncesinde numunelerde seyreltme yapıldıysa seyreltme oranı ile çıkan sonuç çarpıldı. C değeri bulunduktan sonra $(C_0 - C)/C_0 \cdot 100$ (Yamada, Wahyudiono, Machmudah, Kanda, & Goto, 2020) formülünden % giderim verimi hesaplandı.

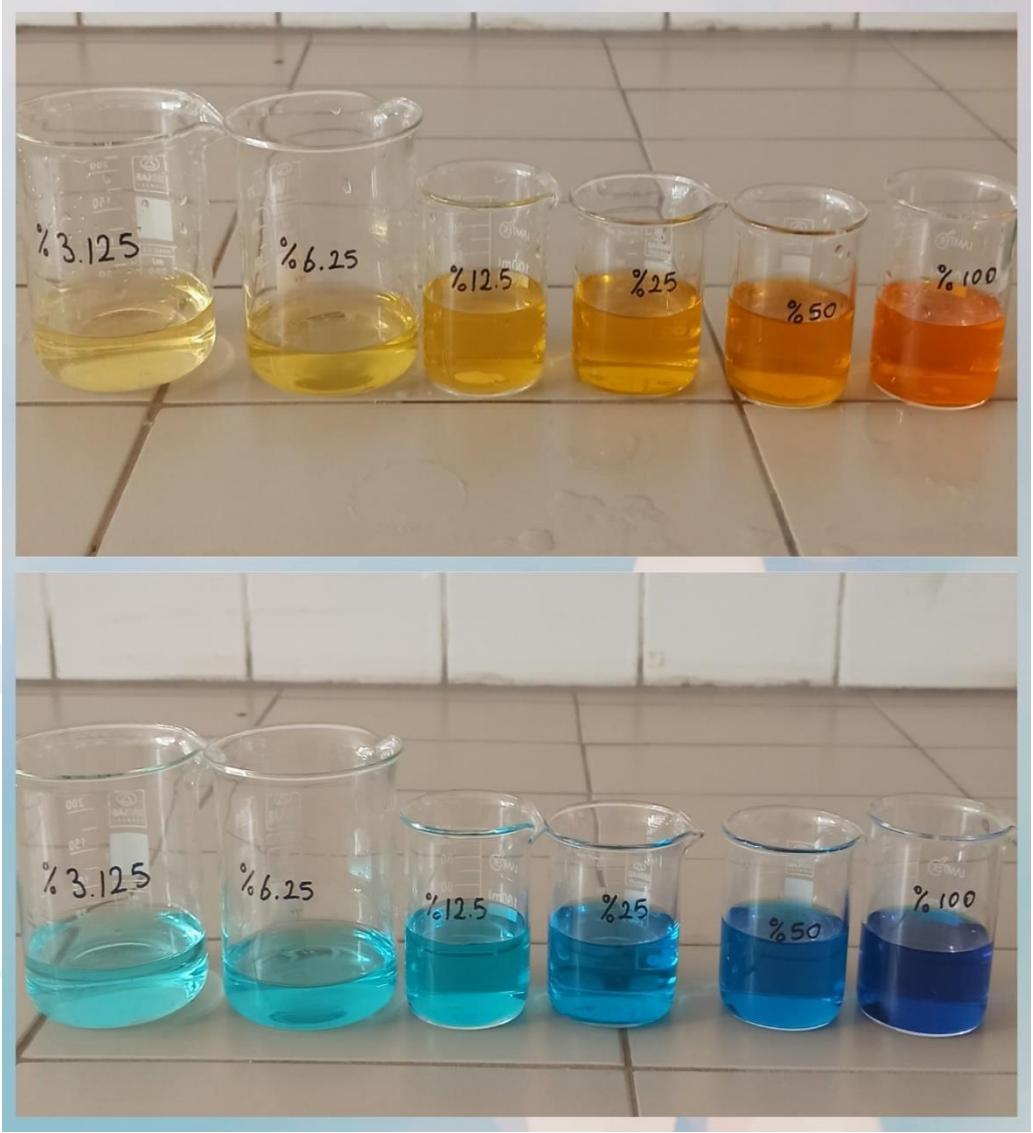
3.2.4. *Lepidium sativum* toksisite test prosedürü

Toksisite analizleri için *Lepidium Sativum* akut toksisite test yöntemi tercih edildi. Toksisite testi optimum şartlarda (20mg/L konsantrasyon, 5dk plazma süresi, 5dk karıştırıcı süresi, 1.5 cm mesafe, 12mg/L akış hızı) hazırlanan metilen mavisi ve metil oranj çözeltilerinin başlangıç ve plazma işlemi sonrası numuneleri için yapıldı.

Lepidium Sativum toksisite testi 6 adet kontrol ve 3'er adet %3.125, %6.25, %12.5, %25, %50, %100 seyreltmelerinde hazırlanan metilen mavisi ve metil oranj çözeltileri ile çalışıldı. Başlangıç ve plazma sonrası numuneleri için hazırlanan seyreltmeler Şekil 3.9' da ve Şekil 3.10' da verildi. Deneyde 9 cm'lik cam petri kapları içerisine 2'şer adet 90 mm çapında Watman 1 marka filtre kâğıdı yerleştirildi. Kontrol petri kaplarına 5'er ml saf su, numune petrilere ise hazırlanan farklı seyreltmelerdeki numuneden 5'er ml konularak, filtre kâğıdı altında hiç hava kabarcığı kalmayacak şekilde yerleştirildi. Her bir petri kabının içerisine eşit büyüklükte, zarar görmemiş *Lepidium Sativum* tohumlarından 25'er adet eşit aralıklarla olacak şekilde yerleştirildi ve ağzıları kapatılan petri kapları 72 saat süresince karanlık ortamda, yaklaşık 25 °C sıcaklıkta inkübe edildi. MM ve MO için hazırlanan başlangıç ve plazma sonrası toksisite deneyleri Şekil 3.11 ve Şekil 3.12' de verildi. *Lepidium Sativum* tohumlarının büyümesi Şekil 3.8' de verildi. Test süresi sonunda her petri kabında bulunan *Lepidium Sativum* tohumlarının en iyi gelişim gösteren 20 tanesinin kök ve gövde uzunlukları ölçüldü. Test süresi sonunda numunelerin *Lepidium Sativum* tohumlarında gözlemlenen kök ve gövde uzunluklarının ortalama değerleri kontrol petri kaplarında ölçülen ortalama kök ve gövde uzunluk değerleri ile kıyaslanarak % inhibisyon oranı ve EC₅₀ değeri belirlendi. Yapılan çalışmalar %3.125, %6.25, %12.5, %25, %50, %100 seyreltmelerine karşılık %inhibisyon değerleri ile Toksik Birim değeri hesaplandı toksiklik sınıflandırmasına göre değerlendirildi.



Şekil 3.8. *Lepidium Sativum* Büyümesi



Şekil 3.9. MM ve MO Başlangıç Seyreltmeleri



Şekil 3.10. MM ve MO Plazma Sonrası Seyreltmeleri



Şekil 3.11. MM ve MO Başlangıç Toksisite Deneyi



Şekil 3.12. MM ve MO Plazma Sonrası Toksisite Deneyi

3.2.5. KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı) ölçümü

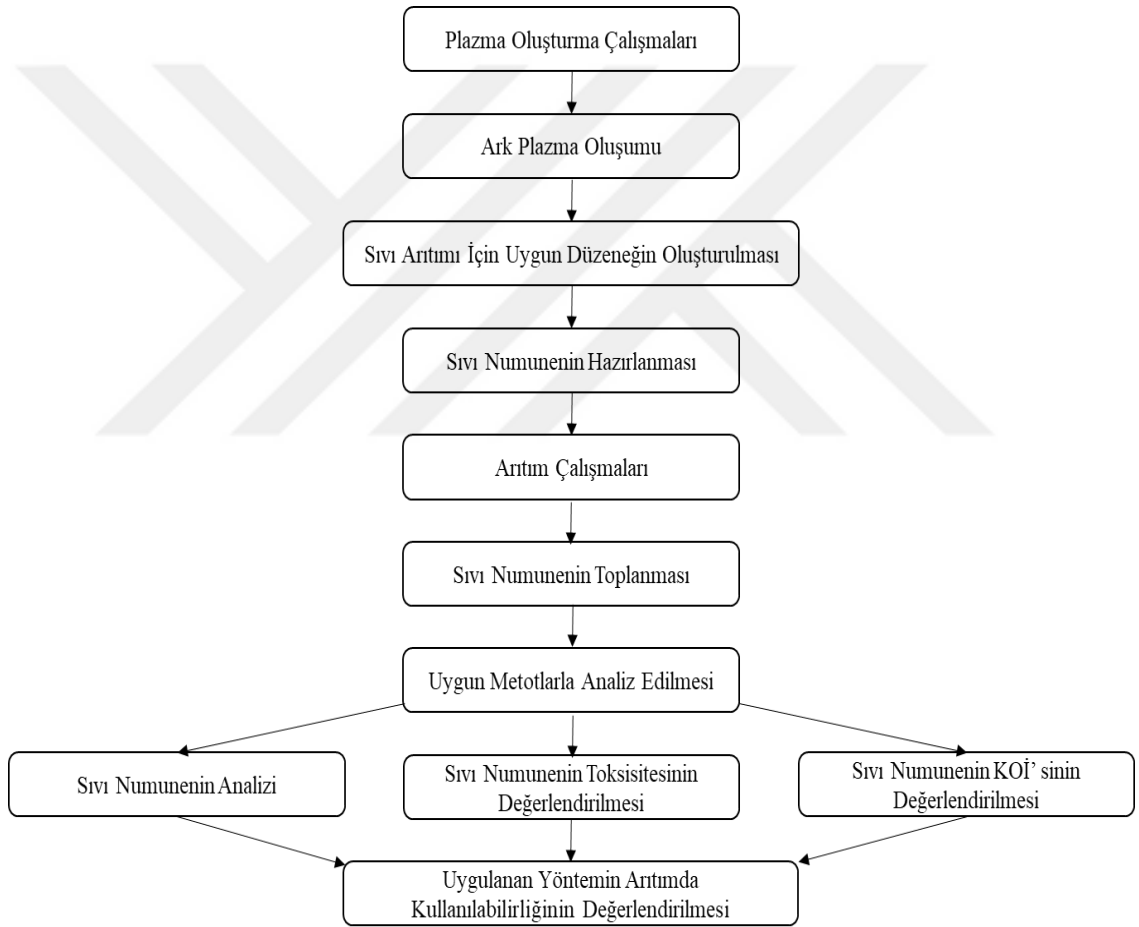
Analiz SM 5220 C metodu ile gerçekleştirildi. Bu çalışma için optimum şartlarda hazırlanan metilen mavisi, metil oranj çözeltileri ve nar numunesinin başlangıç ve plazma sonrası KOİ analizleri yapıldı. Analiz sonuçlarından % giderim verimleri hesaplandı.

3.2.6. Atmosferik basınçlı plazma sistemi çalışma prensibi

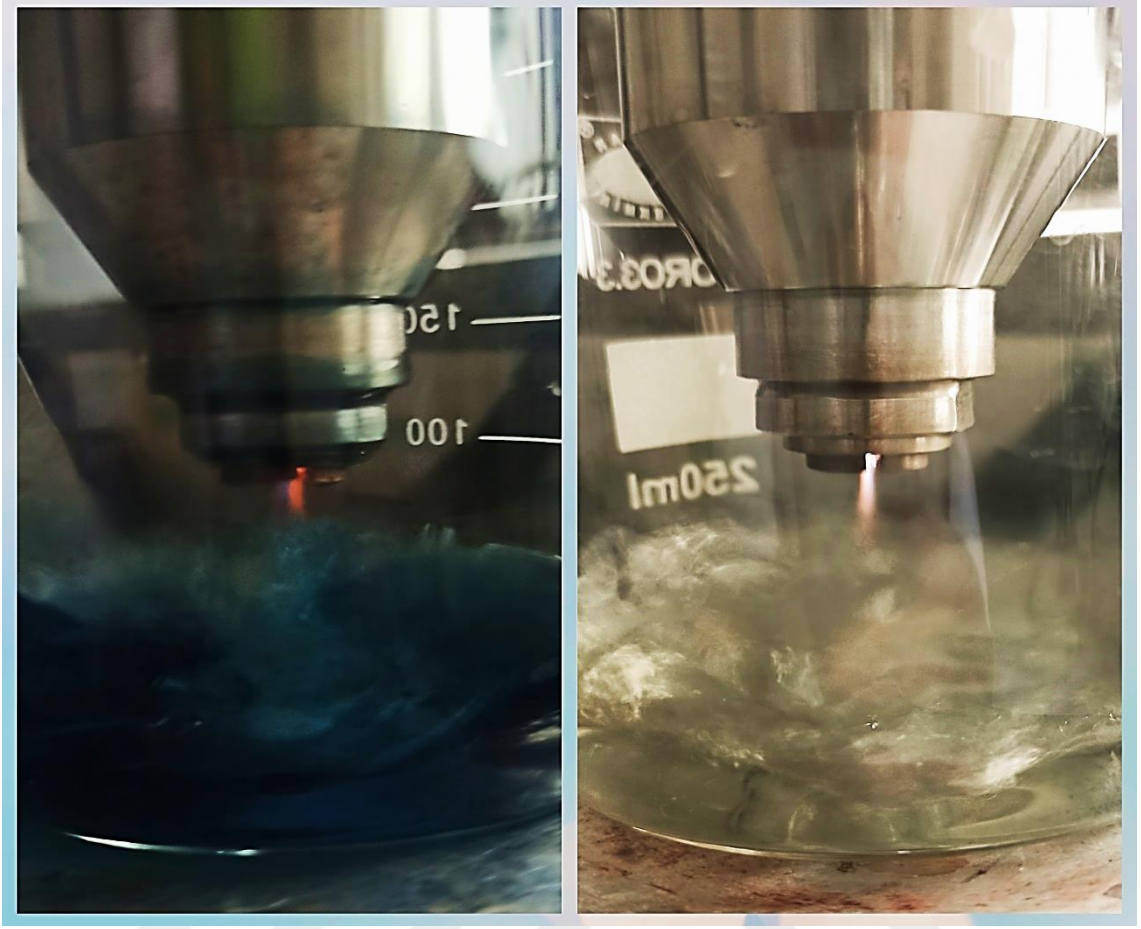
Atmosferik basınçlı plazma ve manyetik karıştırıcı cihazları açıldı. Probu numune ile arasındaki mesafe istenilen ölçüde ayarlandı. Çalışma yapacağımız cam kaba 50 ml numuneden alınarak hazırlanan plazma düzeneğinde manyetik karıştırıcıya

yerleştirildi ve içerisine balık atıldı. Karıştırıcı, plazma işlemi sırasında ve sonrasında oluşan reaksiyonları hızlandırması amaçlanarak sisteme eklendi. Plazma çalışırken ve plazma kapatıldıktan sonra da istenilen sürelerde numuneyi karıştırmaya devam etti. Örnek bir çalışma fotoğrafı Şekil 3.14’ de verildi.

Çalışmada besleme gazı olarak oksijen gazı kullanıldı. Gaz tüpünün vanası açıldıktan sonra akış ölçer ve amper seviyeleri sabitlendi ve regülatörün vanası çevrilerek gaz basıncı istenilen seviyeye getirildi ve plazma ışını ile numune etkileşimi başlatıldı. Çalışma sürecinin daha iyi anlaşılması için iş akış şeması Şekil 3.13’ de verildi.



Şekil 3.13. Deneysel akış şeması



Şekil 3.14. Plazma ile Metilen Mavisi renk giderimi

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışmada Atmosferik Basıncılı Plazma Sisteminin arıtma verimi iki farklı model boya ve bir renkli atıksu numunesi için araştırıldı. Sisteme besleme gazı olarak oksijen verildi. Sistem aynı zamanda argon gazında da denendi. Sentetik boya modeli olarak metilen mavisi ve metil oranj çözeltileri ile çalışıldı. Sistem aynı zamanda özel bir meyve işleme endüstrisinden temin edilen nar atıksuyunda da denendi.

Çalışmalar için öncelikli boya modeli olarak metilen mavisi tercih edildi. Yapılan çalışmalar sonucunda optimum değerler belirlendi. Optimum değerler ile metil oranj renk giderimi, nar numunesi renk giderimi, KOİ çalışması, katalizör çalışması, toksisite testi, argon gazı denemesi, ve pH çalışması yapıldı.

Yamada ve ark. (2020) çalışmalarında plazma işleminden sonra pH değerlerinin değişimini izlemişler. Plazma temasından sonra tüm gaz türleri için pH değerlerindeki azalışı doğruladıklarını ifade etmişler. Araştırmalarında plazma ile üretilen oksidan yoğunluğunun pH değerlerine bağlı olarak değiştiğini bu nedenle, deneyler sırasında devam eden reaksiyonların türünü gösterebileceğinden, plazma sonrası çözeltinin pH değişimini izlemenin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Huang ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada saf suyu plazma ile temas ettirerek saf suyun iletkenlik değişimini incelemişler. Çalışmalarında plazma süresinin artışı ile iletkenliğin de arttığını görmüşler ve plazmanın deşarj işlemi sırasında saf sudaki inorganik iyon miktarının arttırdığı sonucuna ulaşmışlar. Bu bilgilere bağlı olarak bu çalışmada yapılan deneylerin pH ve iletkenlik izlemesi yapıldı ve aşağıda verilen alt başlıklarda grafik eğrileri verildi.

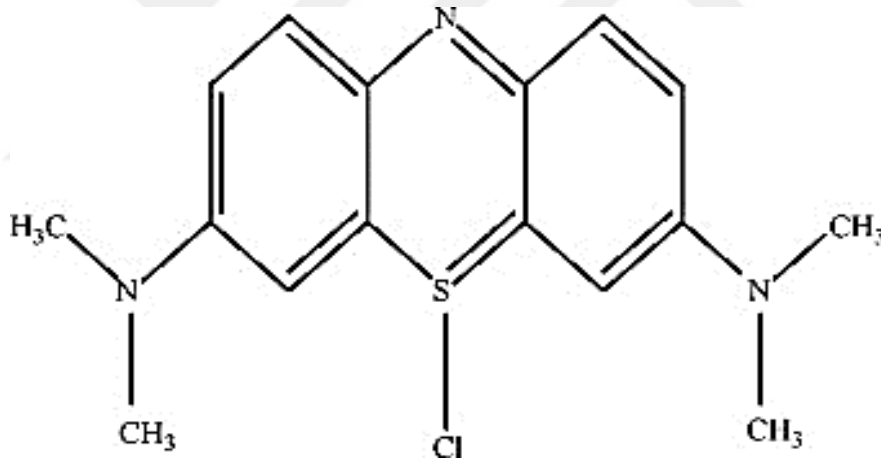
Yapılan her çalışmanın sonrasında başlangıç numunelerinin ve plazmaya tutulan numunelerin absorbans ölçümleri yapıldı, sonuç grafikleri her çalışma için verildi. Renk giderim verimi hesabı için UV-Vis Spektrofotometrede, 200-800 nm aralığında ölçüm yapıldı ve MM için 660 nm’ deki, MO için 465 nm’ deki absorbans okumaları yapıldı. Yapılan çalışmalarda giderim verimi, okunan absorbans değerleri ile oluşturulan kalibrasyon eğrisi ile hesaplandı. Gaz basıncı yapılan bütün çalışmalar için 1.5 bar’ a sabitlendi. Aşağıda verilen alt başlıklarda yapılan analizler ve hesaplamalar detaylı olarak açıklandı.

4.1. Başlangıç Konsantrasyonunun Etkisi

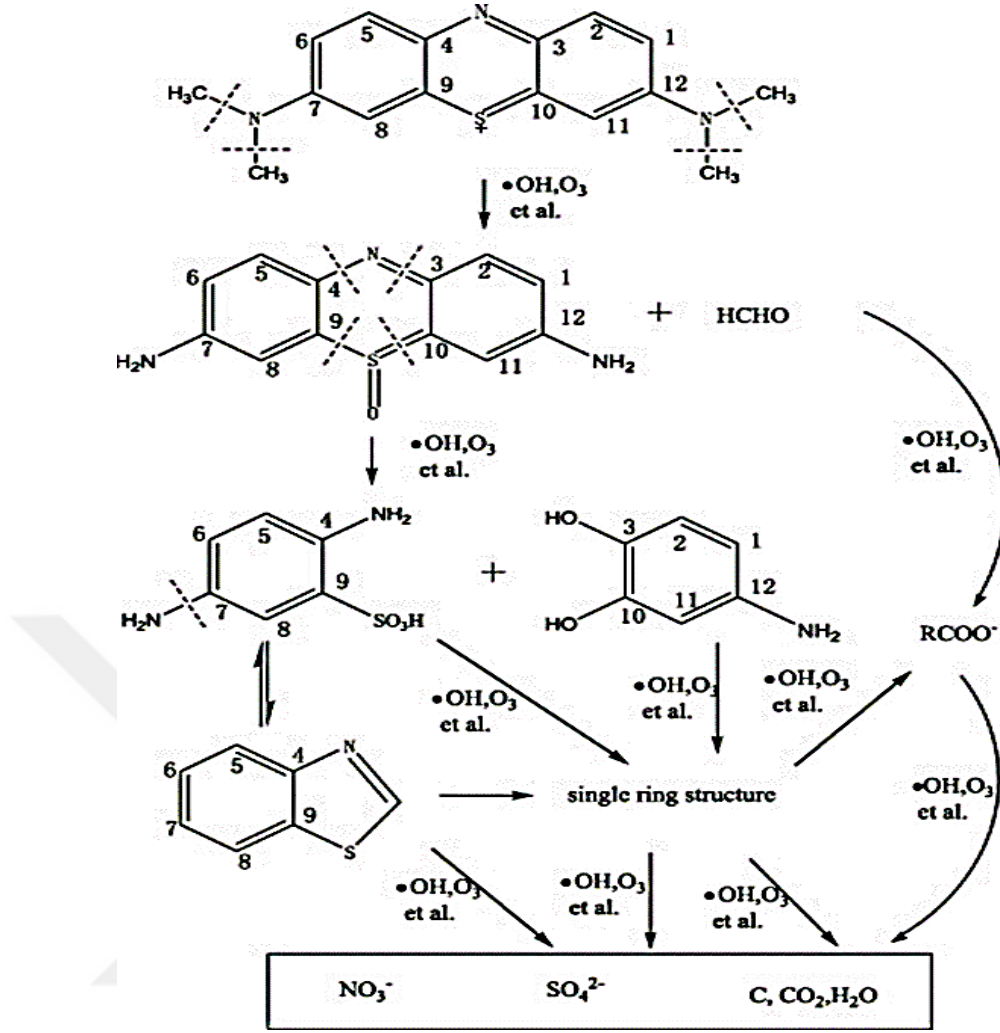
Konsantrasyon çalışması için öncelikli olarak seçilen metilen mavisi boya modeli kullanılarak 20, 30, 40 ve 50mg/L konsantrasyon seviyelerinde sentetik çözeltiler hazırlandı.

Chandana ve ark. (2015), yapmış oldukları araştırmalarında Atmosferik Basıncılı Plazma Jeti kullanarak farklı konsantrasyonların giderim verimine etkisini araştırmışlar ve 20 ppm metilen mavisi için yaklaşık %100, 30, 40 ve 50 ppm için %99, %97 ve %96 renk giderim verimi elde etmişlerdir.

Huang ve ark. (2010) çalışmalarında metilen mavisinin molekül yapısı ve tespit edilen ara ve nihai ürünlere dayalı olarak metilen mavisinin olası parçalanma sürecini Şekil 4.1. ve Şekil 4.2' de gösterildiği gibi analiz edildiğini ve açıklandığını belirtmişler.



Şekil 4.1. Metilen mavisi molekülünün kimyasal yapısı (Huang ve ark. 2010)



Şekil 4.2. Metilen Mavisinin parçalanma süreci (Huang ve ark. 2010)

Jiang ve ark. (2012), çalışmalarında giderim veriminin, kullanılan renkli numunenin ilk konsantrasyon ve numune hacmine bağlı olduğunu, daha yüksek hacim ve konsantrasyonlar için daha yavaş olduğunu, yani numunenin hacmi ve konsantrasyonu arttıkça giderim veriminin azaldığını belirtmişlerdir.

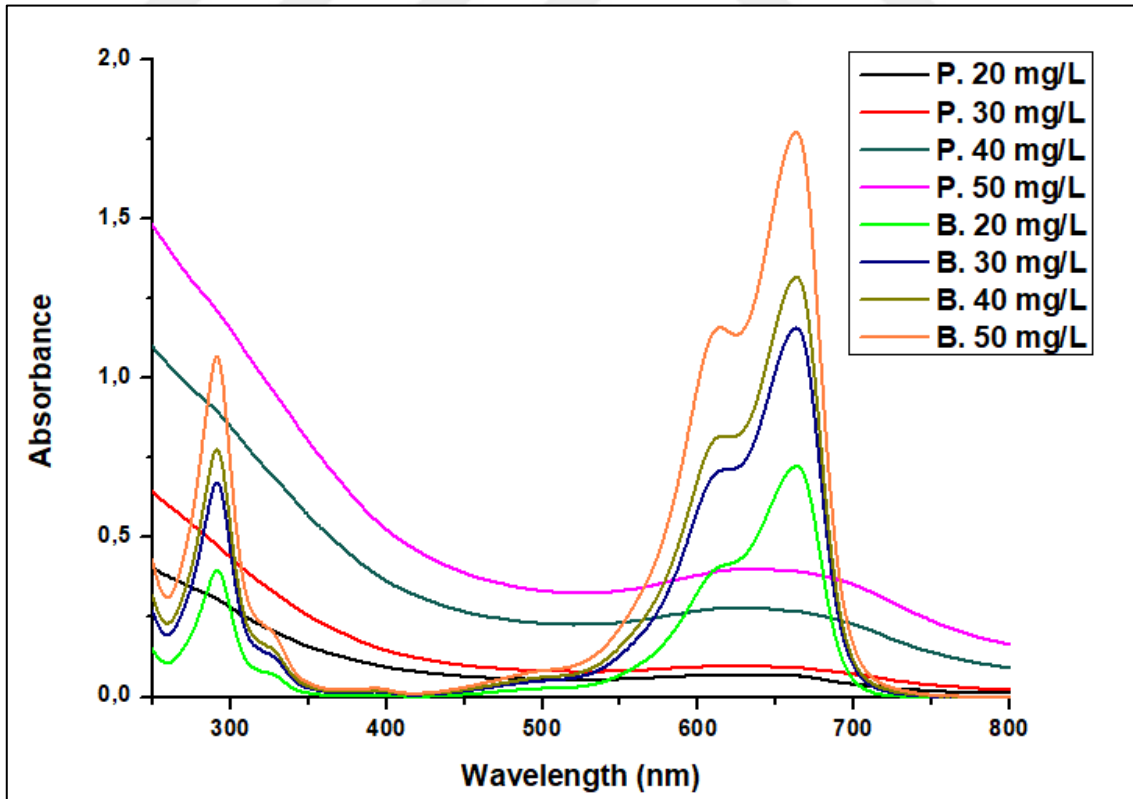
Bu çalışmada her bir konsantrasyon seviyesi için 50 mL kadar başlangıç numunesi, 50 mL kadar da plazma işlemi için numuneler hazırlandı. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan numuneler 5' er dk. sürelerde plazmaya tutuldu. Plazma ile numune mesafesi 1.5 cm olarak ayarlandı. Gaz basıncı 1.5 bar' da sabitlendi. Çalışılan numunelerin hesaplanan % giderim verimleri Çizelge 4.1' de, absorbans eğri grafiği ise Şekil 4.3' te verildi.

Çizelge 4.1’ de verilen ölçüm sonuçları konsantrasyonun artması ile giderim veriminin azaldığını göstermektedir. Çalışmada 20 ve 30 mg/L konsantrasyonlarının giderim verimleri arasında önemli bir fark olmadığı için 20 mg/L konsantrasyon seviyesi optimum olarak belirlendi.

Chandana ve ark. (2015), yaptıkları araştırmada aynı durumla karşılaşmışlar ve “Artan metilen mavisi konsantrasyonu ile, muhtemelen daha yüksek sayıda reaktan molekülünün varlığından dolayı giderim veriminin düştüğü gözlenmiştir.” sonucuna ulaşmışlardır.

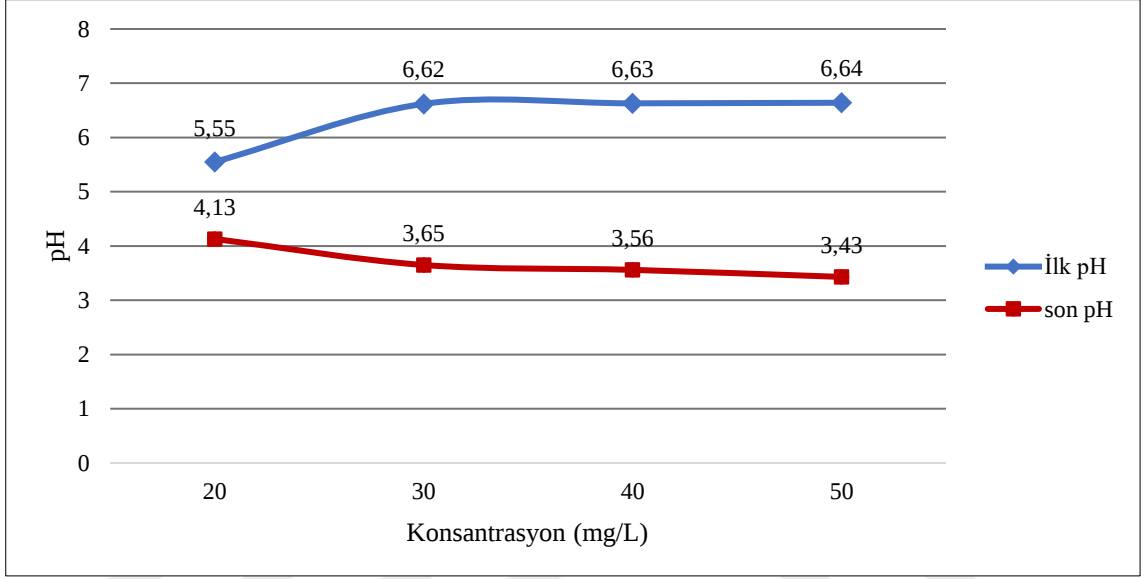
Çizelge 4.1. Farklı konsantrasyonların giderim verimine etkisi

Konsantrasyon	Başlangıç UV	Plazma Sonrası UV	Giderim
mg/L	abs.	abs.	%
20	0,718	0,066	98,6
30	1,149	0,092	98,7
40	1,292	0,269	96
50	1,761	0,394	95,7

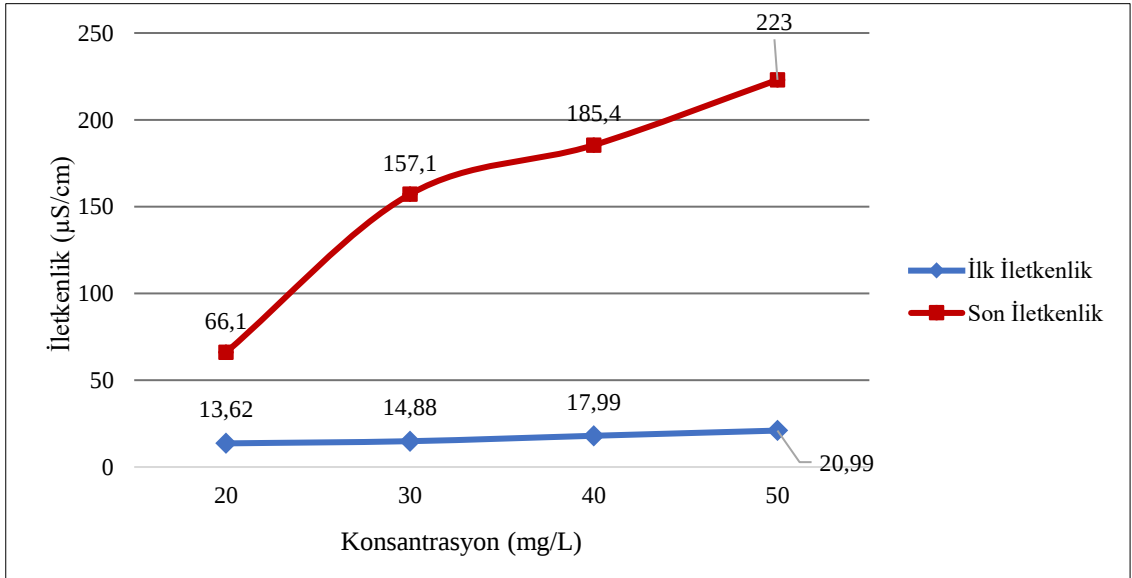


Şekil 4.3. Farklı başlangıç konsantrasyonları ile hazırlanan plazma işlemi öncesi (B) ve işlem sonrası (P) numunelerin absorbanans grafiği

Şekil 4.4. ve Şekil 4.5' te farklı başlangıç konsantrasyonları ile yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH' nın plazma sonrasında azaldığı görüldü. Ayrıca konsantrasyon arttıkça başlangıç pH değerinin arttığı ve buna bağlı olarak plazma sonrası pH değerlerinin de azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise konsantrasyon artışına bağlı olarak plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü.



Şekil 4.4. Farklı başlangıç konsantrasyonlarındaki numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) pH değerleri



Şekil 4.5. Farklı başlangıç konsantrasyonlarındaki numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

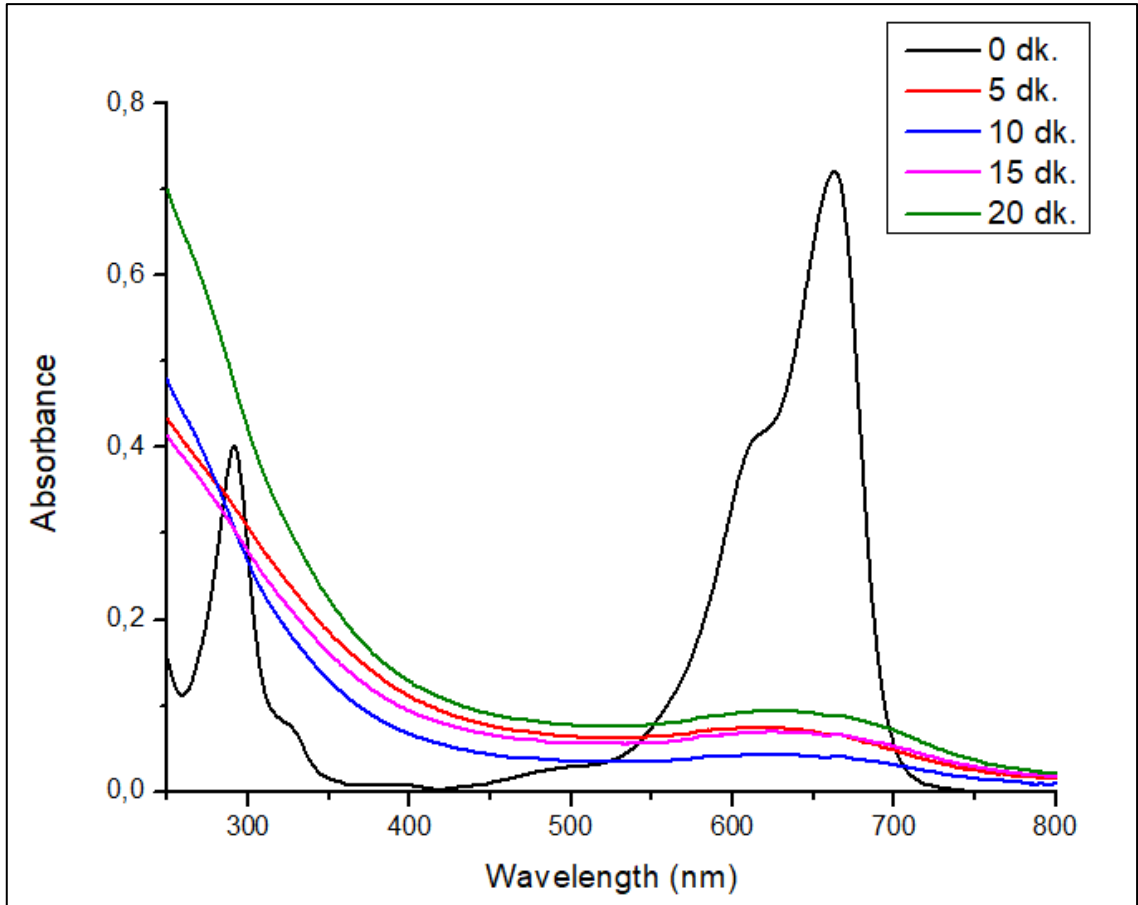
4.2. Plazma İşlem Süresinin Etkisi

Atmosferik Basıncılı Plazma Sisteminin, çalışma süresinin giderim verimi üzerine etkisinin araştırılması için hazırlanan her biri 50 mL' lik ve 20 mg/L konsantrasyonlarında metilen mavisi çözeltisi için farklı sürelerde çalışmalar yapıldı. Plazmanın numunelere temas süreleri 5, 10, 15, 20dk olarak belirlendi.

Çalışılan numunelerin hesaplanan % giderim verimleri Çizelge 4.2' de verildi. Çizelge 4.2' ye göre farklı plazma temas sürelerinin giderim verimleri arasında ciddi bir fark görülmedi. Plazmanın 5 dakikalık temas süresinde de yaklaşık %99 giderim verimi elde edilmesi, zaman ve enerji verimi açısından optimum süre 5 dakika seçildi. Çalışmanın absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.6' da verildi.

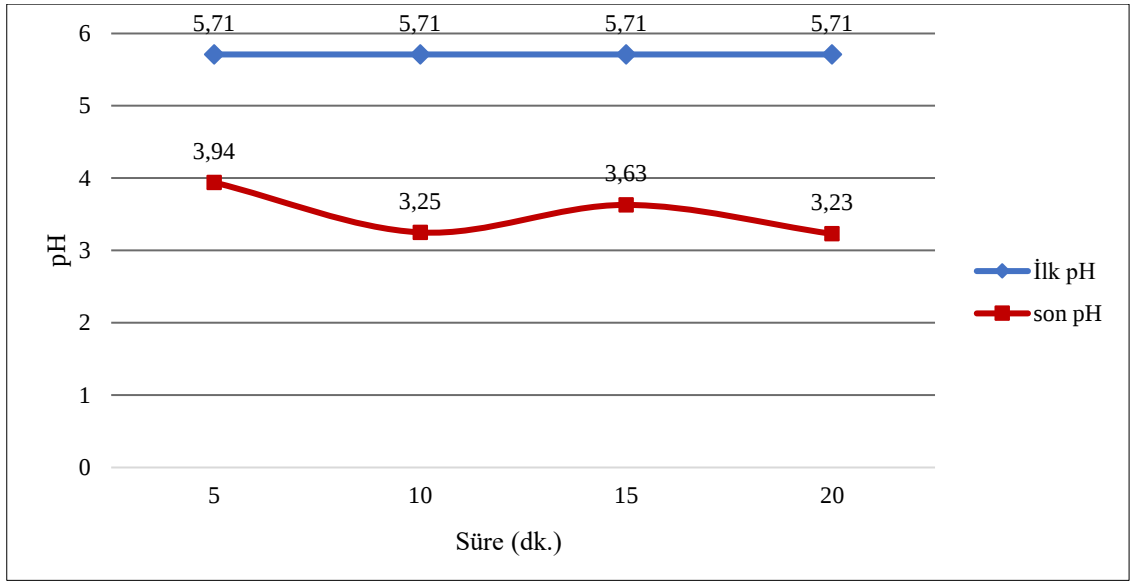
Çizelge 4.2. Farklı plazma temas sürelerinin giderim verimine etkisi

Süre	Başlangıç UV	Plazma Sonrası UV	Giderim Verimi
dk.	abs.	abs.	%
5	0,715	0,067	98,5
10	0,715	0,041	99,3
15	0,715	0,033	99,5
20	0,715	0,045	99,2

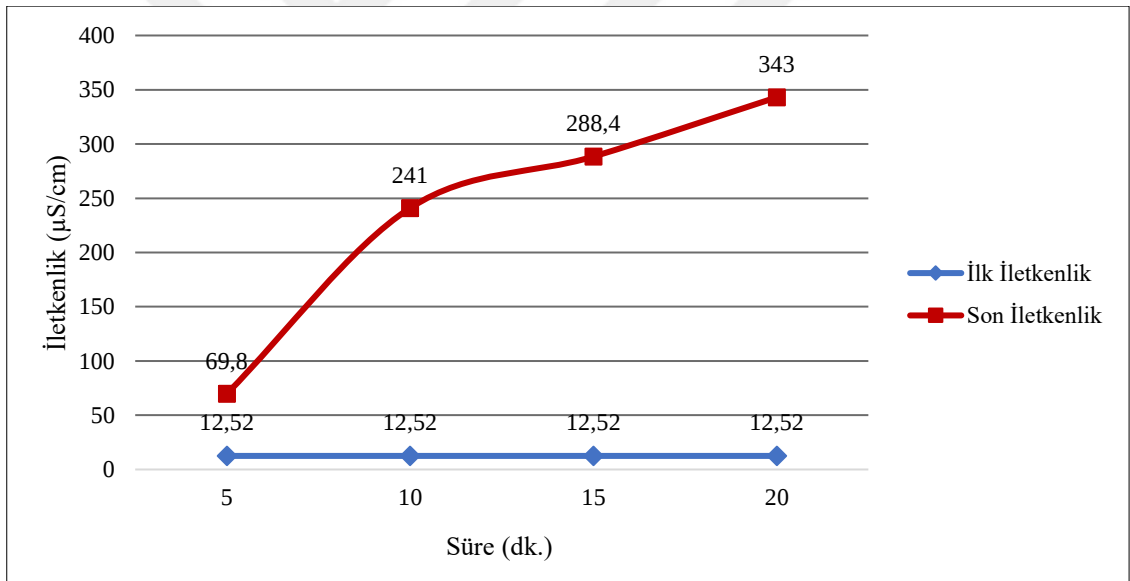


Şekil 4.6. Farklı plazma temas süreleri ile çalışılan numunelerin absorbans grafiği

Şekil 4.7. ve Şekil 4.8’ te farklı plazma süreleri ile yapılan çalışmaların sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH’ larının plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü.



Şekil 4.7. Farklı sürelerde çalışılan numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) pH değerleri



Şekil 4.8. Farklı sürelerde çalışılan numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

4.3. Plazma ile Sıvı Arasındaki Mesafenin Etkisi

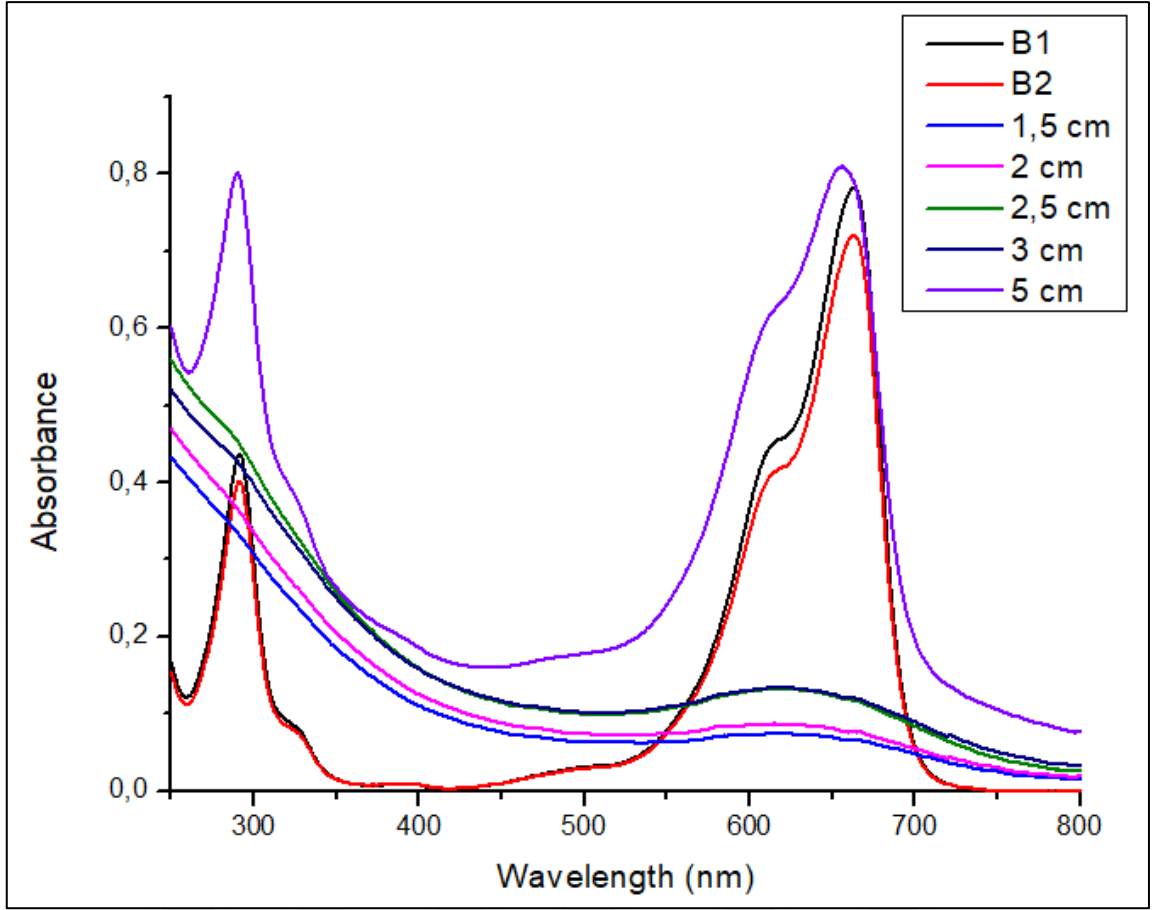
Çalışmada plazma ışınının numune ile arasındaki mesafenin giderim verimine olan etkisinin araştırılması için plazma farklı uzaklıklarda metilen mavisi sentetik numunelerine tutuldu.

Metilen mavisi çözeltileri optimum konsantrasyonda saf su ile (20 mg/L) hazırlandı. Bunun için plazma ışını ile numune arası uzaklıklar 1.5, 2, 2.5, 3, 5 cm olacak şekilde 5 set çalışıldı. Karıştırıcı her numune için plazma çalışma süresi boyunca ve plazma kapatıldıktan sonra da 5 er dk. numuneyi karıştırmaya devam etti. Çalışmanın absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.9' da verildi.

Farklı mesafelerin % giderim verimleri Çizelge 4.3' te verildi. Çizelge 4.3' te görüldüğü gibi plazma ışını ile numune arasındaki mesafe arttıkça renk giderim verimi azaldı. Çalışmada 1,5 mesafede %98.7 en yüksek giderim verimine ulaşıldığı için optimum uzaklık 1.5 cm olarak seçildi.

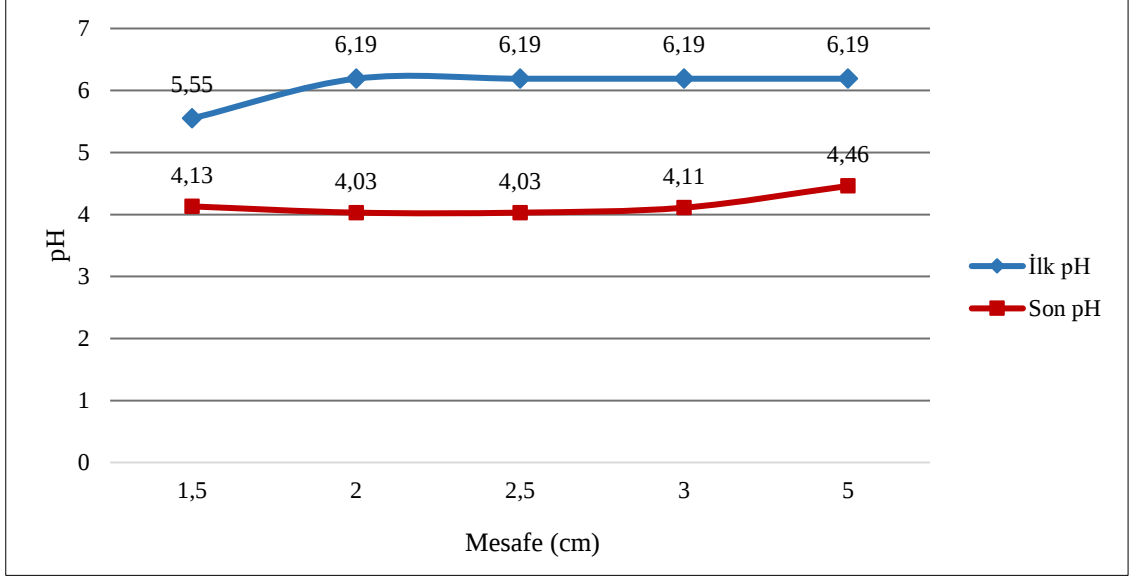
Çizelge 4.3. Plazma ışını ile numune arasındaki uzaklığın giderim verimine etkisi

Mesafe	Başlangıç UV	Plazma Sonrası UV	Giderim
cm	abs.	abs.	%
1,5	0,777	0,066	98,7
2	0,777	0,077	98,4
2,5	0,777	0,118	97,3
3	0,777	0,12	97,3
5	0,777	0,803	79,3

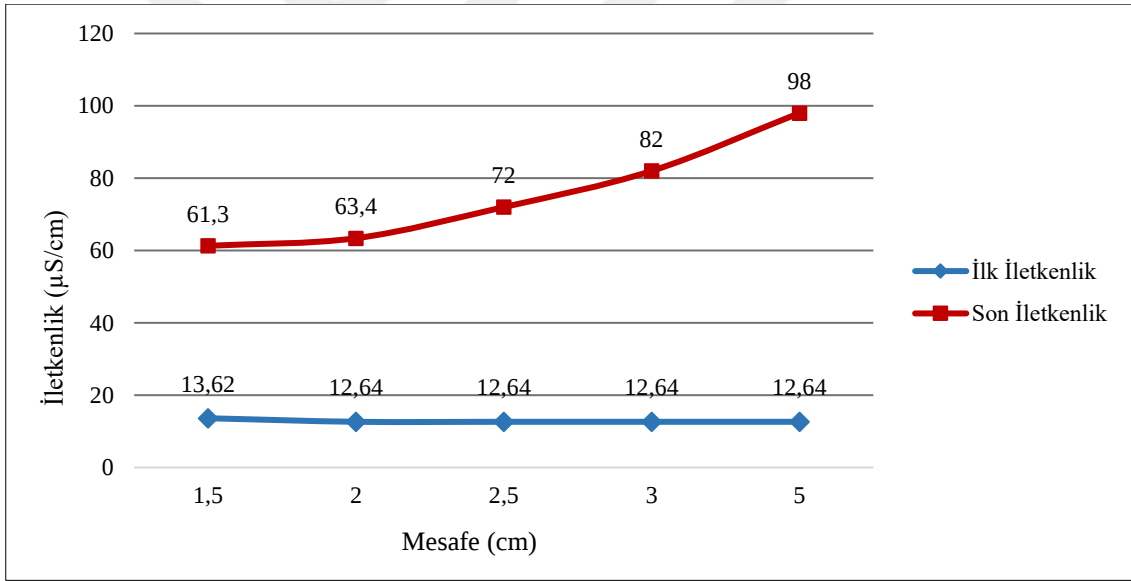


Şekil 4.9. Farklı mesafelerde plazma uygulanan numunelerin absorbans grafiği (B1: 1,5 cm mesafe çalışması başlangıç numunesi, B2: diğer mesafe çalışmalarının başlangıç numunesi)

Şekil 4.10. ve Şekil 4.11' de farklı mesafelerden yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH' nın plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü. 2.5 cm mesafeden sonra plazma etkisi azaldığı için iletkenlik artışı diğerlerine göre daha az oldu.



Şekil 4.10. Farklı mesafelerde plazma uygulanan numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) pH değerleri



Şekil 4.11. Farklı mesafelerde plazma uygulanan numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

4.4. Manyetik Karıştırıcının Reaksiyon Hızına Etkisi

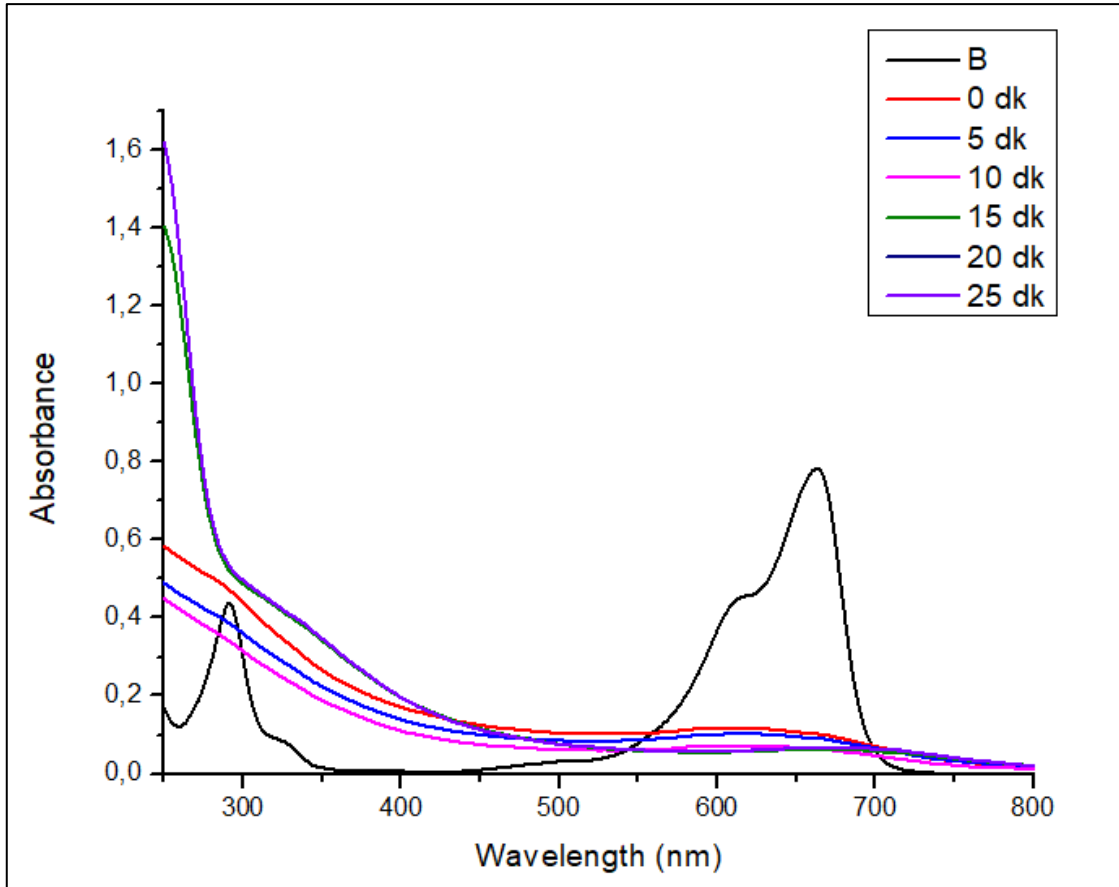
Metilen mavisi sentetik çözeltisi ile optimum konsantrasyon, plazma süresi ve mesafe değerlerinde çalışıldı. Çalışmada oluşturulan plazma sistem düzeneğine manyetik karıştırıcı eklenerek plazma işlemi sırasında numunenin içerisindeki reaksiyon hızına etkisi araştırıldı.

Manyetik karıştırıcı plazma işlem süresi boyunca ve işlem süresi bittikten sonra karıştırmaya devam etti. Plazma kapatıldıktan sonra numune farklı sürelerde (0, 5, 10, 15, 20, 25 dk) karıştırıcıda tutuldu ve her bir çalışmanın 660 nm’ de absorbans değerleri okunarak giderim verimleri hesaplandı. Çalışmanın absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.12’ de verildi.

Çizelge 4.4’ te verilen sonuçlara bakıldığında 5. dakikadaki giderimin 0. dakikadaki giderime kıyasla arttığı gözlemlendi. Diğer giderim verimleri arasında ciddi bir fark olmaması ve 5 dakikalık karıştırma süresinin zaman tasarrufu sağlaması nedeni ile optimum karıştırıcı süresi 5 dk seçildi. Çizelge 4.4’ te farklı karıştırıcı sürelerinin giderim verimi üzerine etkileri verilmiştir.

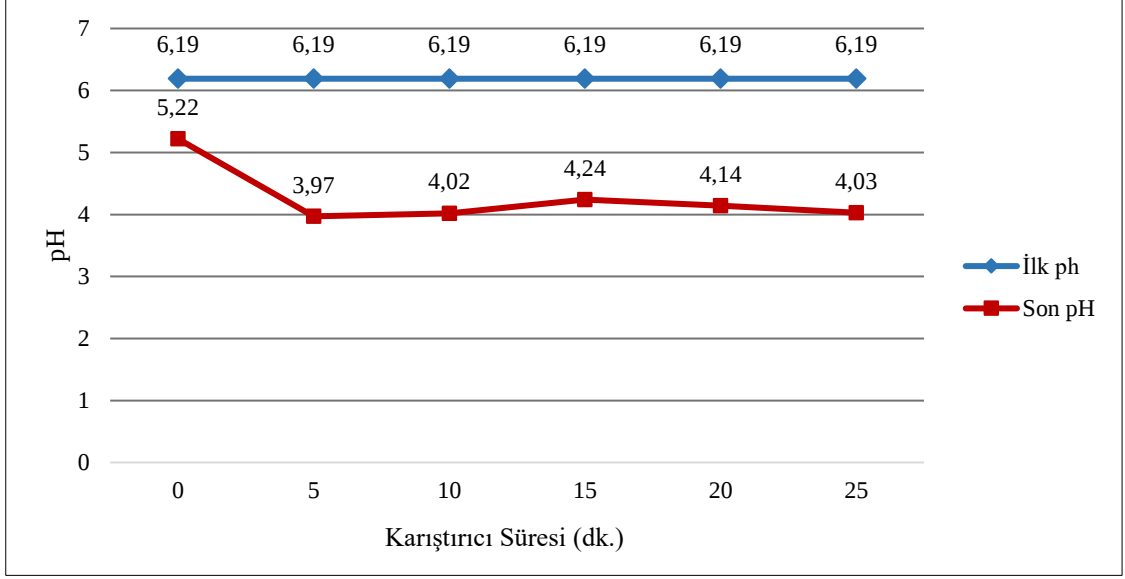
Çizelge 4.4. Farklı karıştırıcı sürelerinin giderim verimine etkisi

Karıştırıcı Süresi	Başlangıç UV	Plazma Sonrası UV	Giderim Verimi
dk.	abs.	abs.	%
0	0,777	0,102	97,7
5	0,777	0,091	98,02
10	0,777	0,064	98,7
15	0,777	0,055	98,9
20	0,777	0,084	98,2
25	0,777	0,061	98,8

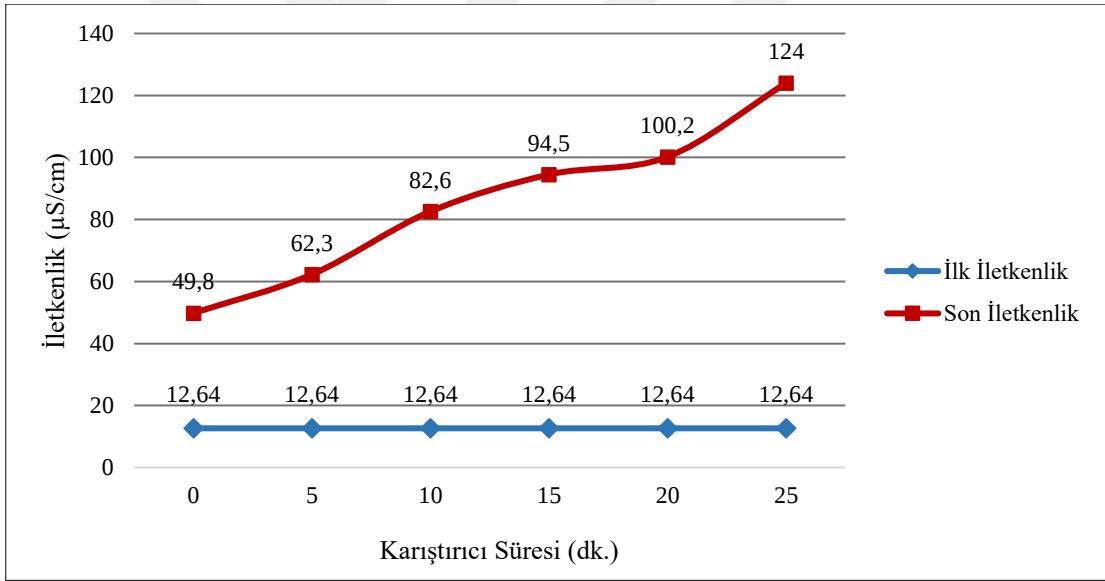


Şekil 4.12. Plazma ile farklı karıştırıcı sürelerinde çalışılan numunelerin absorbans grafiği (B: Başlangıç numunesi)

Şekil 4.13. ve Şekil 4.14' te farklı karıştırıcı süreleri ile yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH' nın plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü. En yüksek iletkenlik değeri 10. dk' da, sonrasında ise iletkenlikte azalma görüldü.



Şekil 4.13. Farklı karıştırıcı süreleri ile çalışılan numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) pH değerleri

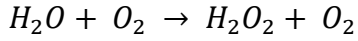
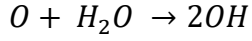
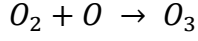
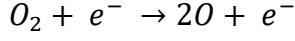


Şekil 4.14. Farklı karıştırıcı süreleri ile çalışılan numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

4.5. Oksijen Gaz Akış Hızının Etkisi

Sistemin besleme gazı olarak tercihen oksijen (O_2) gazı kullanıldı. Yamada ve ark. (2020), atmosferik basınçlı plazma sistemi ile yapmış olduğu çalışmada metilen mavisi renk giderimi için oksijen, argon ve helyum besleme gazlarını kullanmış ve en yüksek giderim verimini oksijen gazında elde etmiştir. Çalışmalarında ozon , oksijen radikalleri gibi oksijen bazlı oksitleyici reaktif türlerin su molekülleri ile reaksiyona

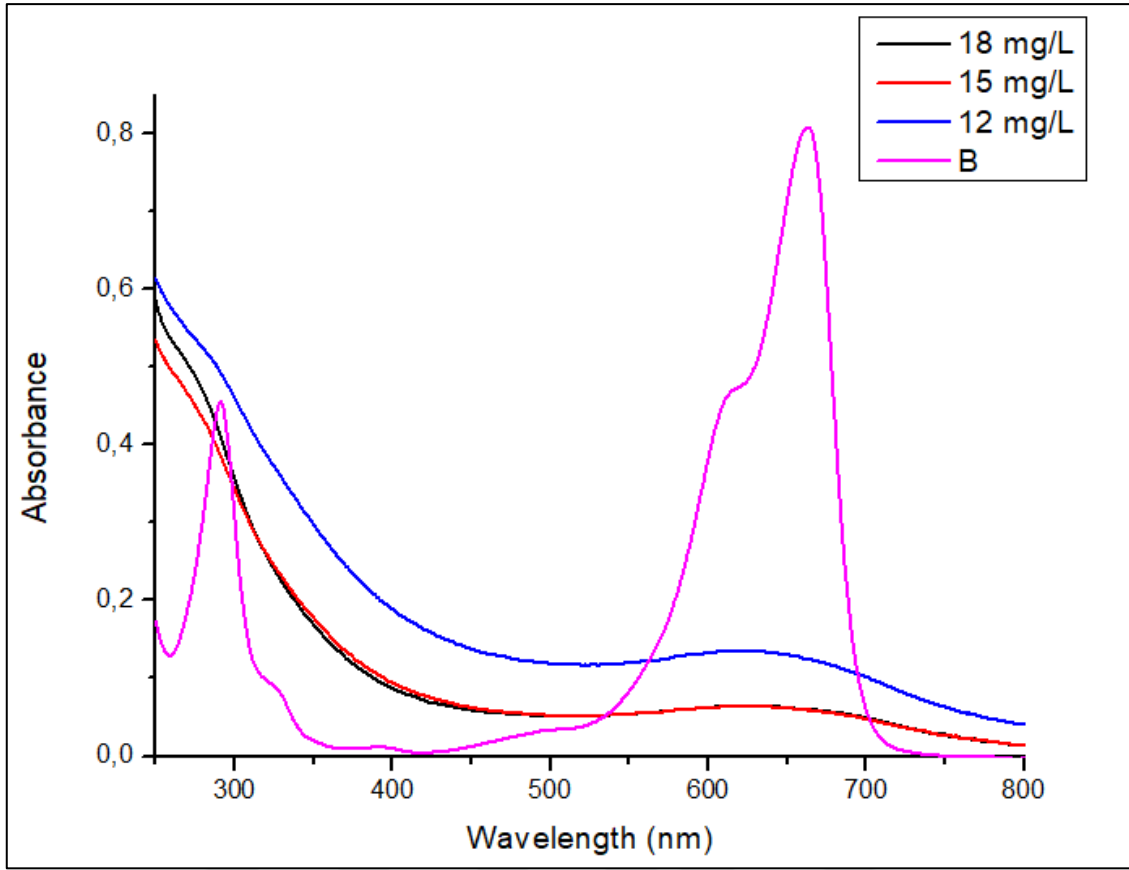
girerek içerisindeki boya moleküllerinin parçalanmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca oksijen radikallerinin boya fonksiyonları arasında doğrudan reaksiyon gerçekleştirebileceğini de belirtmişlerdir. Oksijen plazma yolu ile oluşan reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



Daha önce yapılan çalışmalara göre deşarj işlemi sırasında gaz fazında reaktif türlerin üretildiği kanıtlanmıştır. Bu türler daha sonra sıvı faza aktarılacak ve renk molekülleri ile reaksiyona girecektir. Çalışmada farklı gaz akış hızlarının giderim verimine etkisinin araştırılması için akış ölçer kullanıldı. Çalışmada 3 farklı akış hızı ile yapılan çalışmalarda MM giderim verimleri Çizelge 4.5’ te, absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.15’ te verildi.

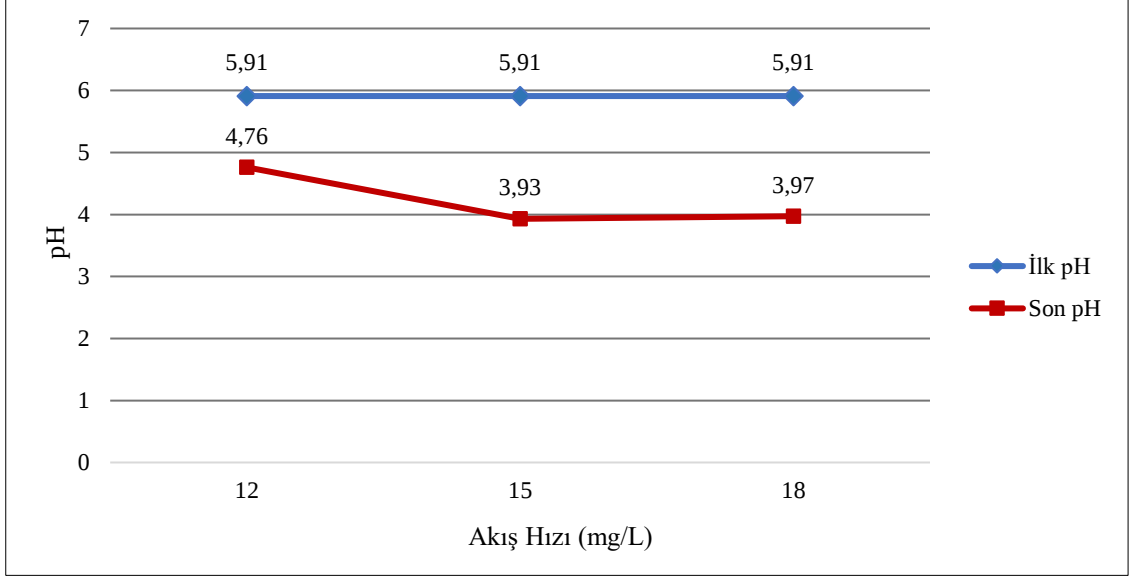
Çizelge 4.5. Farklı akış hızlarının MM giderim verimine etkisi

Akış Hızı mg/L	UV Başlangıç abs.	UV Plazma Sonrası abs.	Giderim Verimi %
12	0,714	0,022	98,5
15	0,803	0,06	98,8
18	0,803	0,06	98,8

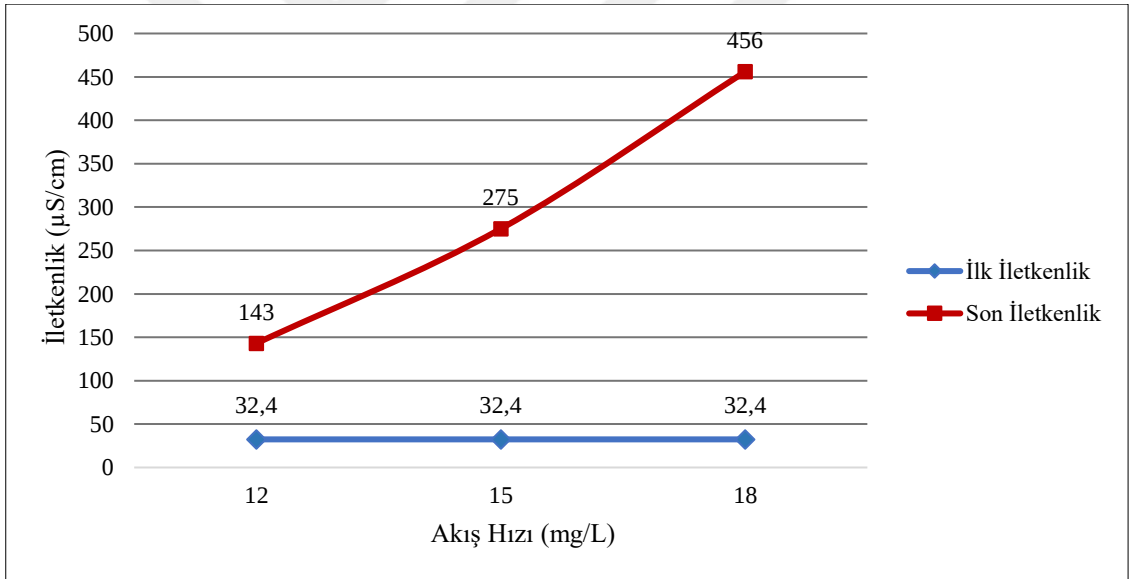


Şekil 4.15. Plazma ile farklı akış hızlarında çalışılan numunelerin absorbans grafiği (B: Başlangıç numunesi)

Şekil 4.16. ve Şekil 4.17’ de farklı akış hızları ile yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH’ nın plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü.



Şekil 4.16. Farklı akış hızları ile çalışılan numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) pH değerleri

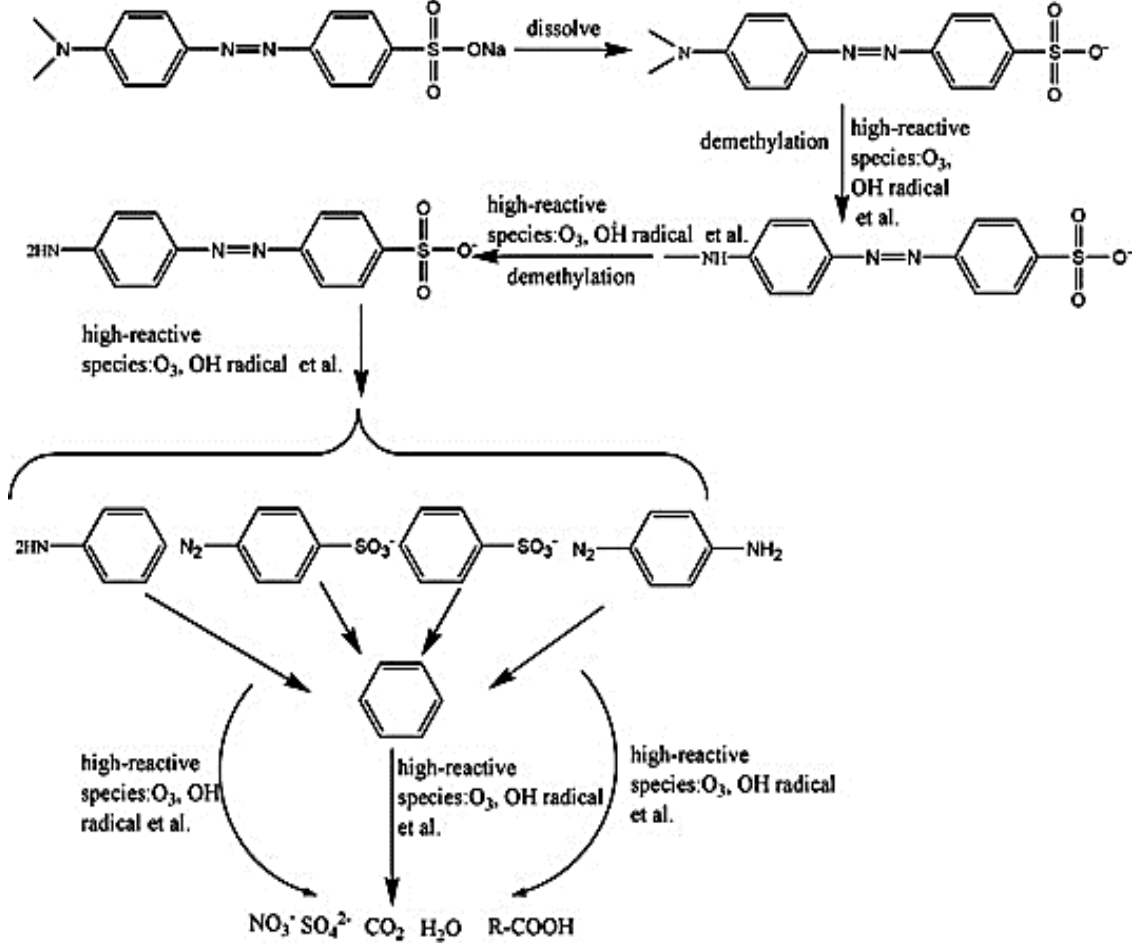


Şekil 4.17. Farklı akış hızları ile çalışılan numunelerin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

4.6. Plazmanın Metil Oranj Renk Giderimine Etkisi

Jiang ve ark. (2012), yaptıkları bir çalışmada oksijen beslemeli Atmosferik Basıncılı Plazma sistemi kullanmışlar ve 20 dk. plazma işleminden sonra 40mg/L konsantrasyonunda 300mL hacminde hazırlanan metil oranjın (MO) %92 giderim verimini sağlamışlardır. Absorbans ölçümlerini 465 nm’ de okumuşlardır. Yüksek oksidasyon potansiyeline sahip hidroksil radikalleri ve O₃’ ün kirletici renk

moleküllerinin bozulması için etkili olduğunu söylemişler ve bağ ayrışma enerjileri teorisine dayanarak hidroksil ve ozon radikalleri ile MO' nun oksidasyonu için önerilen yolları araştırmalarında vermişlerdir. MO molekülleri ve ara ürünlerinin plazma işlem sürecinde oksidasyon yolları Şekil 4.18' de verildi.

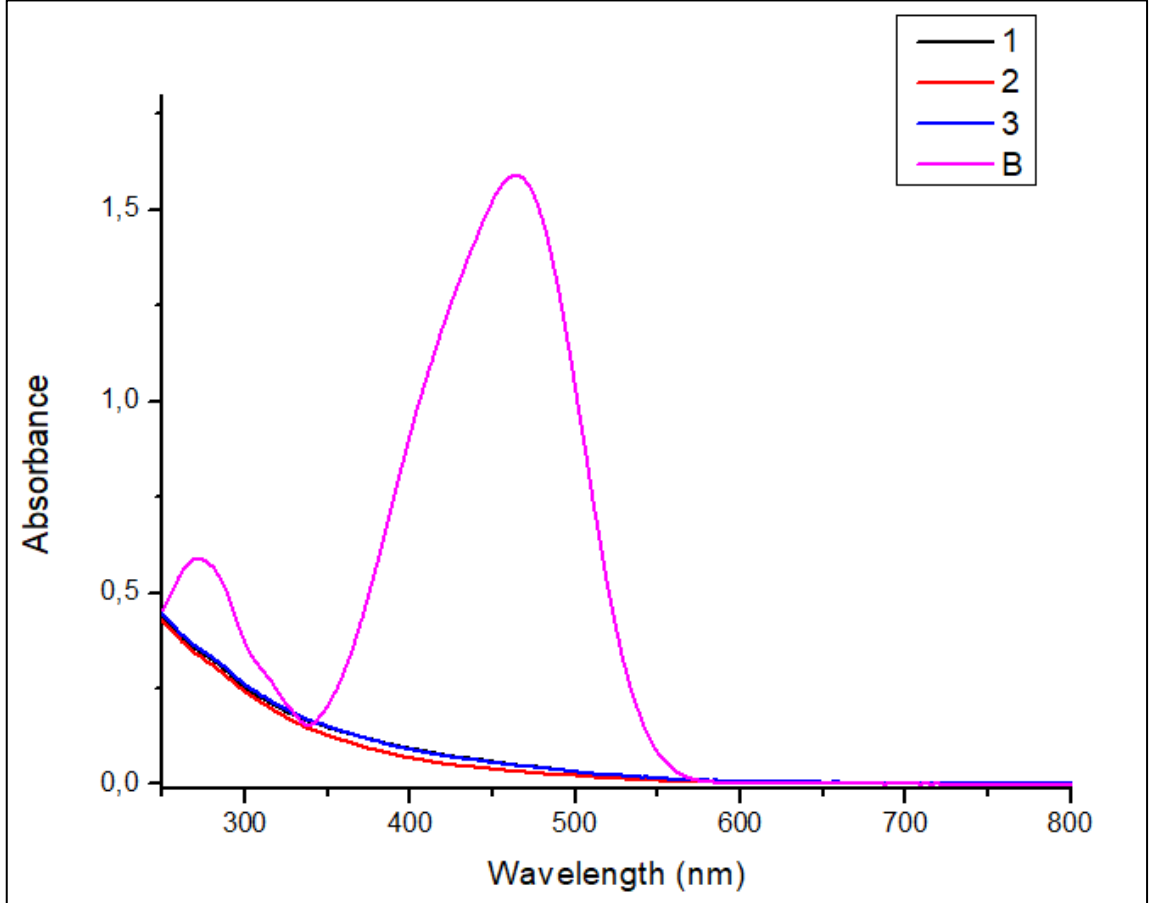


Şekil 4.18. Atmosferik Basıncılı Plazma Sistemi ile metil oranj moleküllerinin mineralizasyonu için önerilen yollar (Jiang, Zheng, Liu, & Wu, 2012)

Bu çalışmada Atmosferik Basıncılı Sistemin metil oranj gideriminin üzerindeki etkisinin test edilmesi için 20 mg/L konsantrasyonunda 50 mL' lik metil oranj çözeltisi ile aynı koşullarda 3 tekrar çalışma yapıldı. Absorbans ölçümleri UV-Vis Spektrofotometre' de 465 nm' de okundu. Çalışma için optimum koşullar sağlandı ve giderim verimi Çizelge 4.6' da, absorban eğrisi grafiği Şekil 4.19' da verildi.

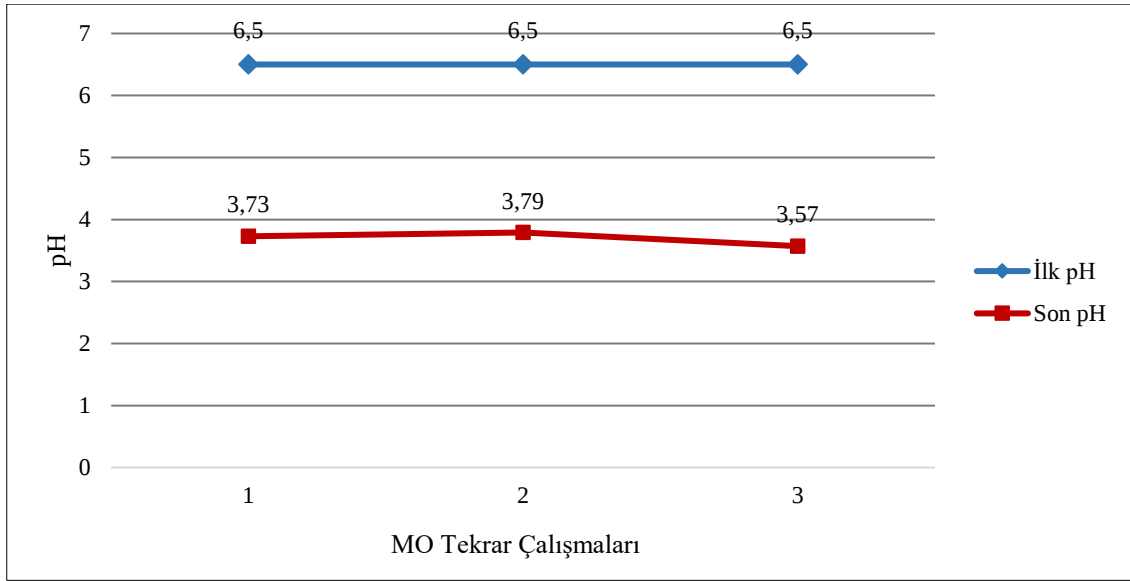
Çizelge 4.6. Plazmanın Metil Oranj giderim verimi üzerine etkisi

Konsantrasyon mg/L	UV Başlangıç abs.	UV Plazma Sonrası abs.	Giderim Verimi %
20	1,586	0,05	97
20	1,586	0,034	98
20	1,586	0,049	97

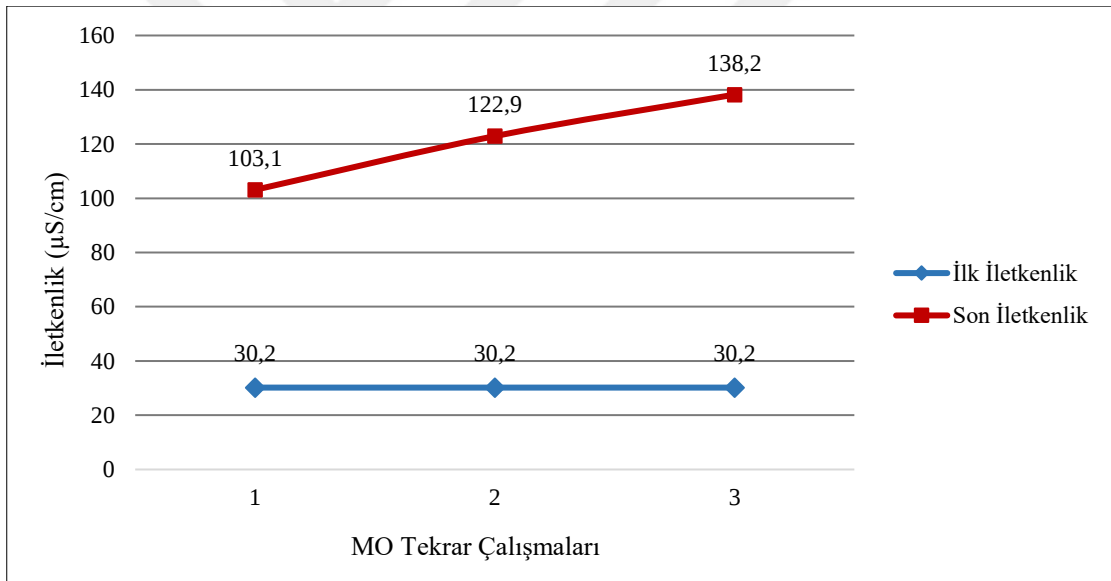


Şekil 4.19. Plazma ile aynı şartlarda çalışılan metil oranj çalışmalarının absorbans grafiği (B: Başlangıç numunesi)

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’ de aynı şartlarda hazırlanan MO çözeltileri ile yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH’ nın plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü.



Şekil 4.20. Aynı şartlarda çalışılan 3 numunenin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) pH değerleri

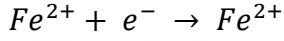
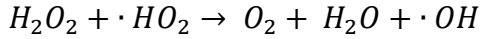
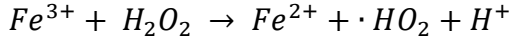
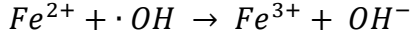
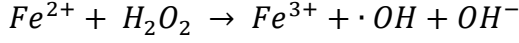


Şekil 4.21. Aynı şartlarda çalışılan 3 numunenin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

4.7. Katalizörün Etkisi

Chandana ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada farklı konsantrasyonlardaki (30, 40, 50 ppm) metilen mavisi çözeltilerine sabit miktarda (20 mg/L) demir sülfat katalizörü eklemişler ve yaklaşık 10 dakikadan daha kısa sürede plazma işlemi sonucunda 30 ppm ile yapılan çalışmada neredeyse tamamen giderim verimine ulaşmışlardır. Çalışmalarında plazma ile oksidasyon sonucu oluşan H_2O_2 (hidrojen peroksit) ile demir katalizörünün

OH ve HO₂ radikallerini oluşturmak için demirin fenton reaksiyonlarına girdiğini belirtmişlerdir. OH ve HO₂ radikalleri H₂O₂' ye kıyasla daha yüksek oksidasyon potansiyeline sahip olduğu için katalizör ilavesinin verimi arttırdığını gözlemlemişlerdir. Demirin hidrojen peroksitle oluşturduğu fenton reaksiyonları aşağıdaki denklemde verilmiştir.



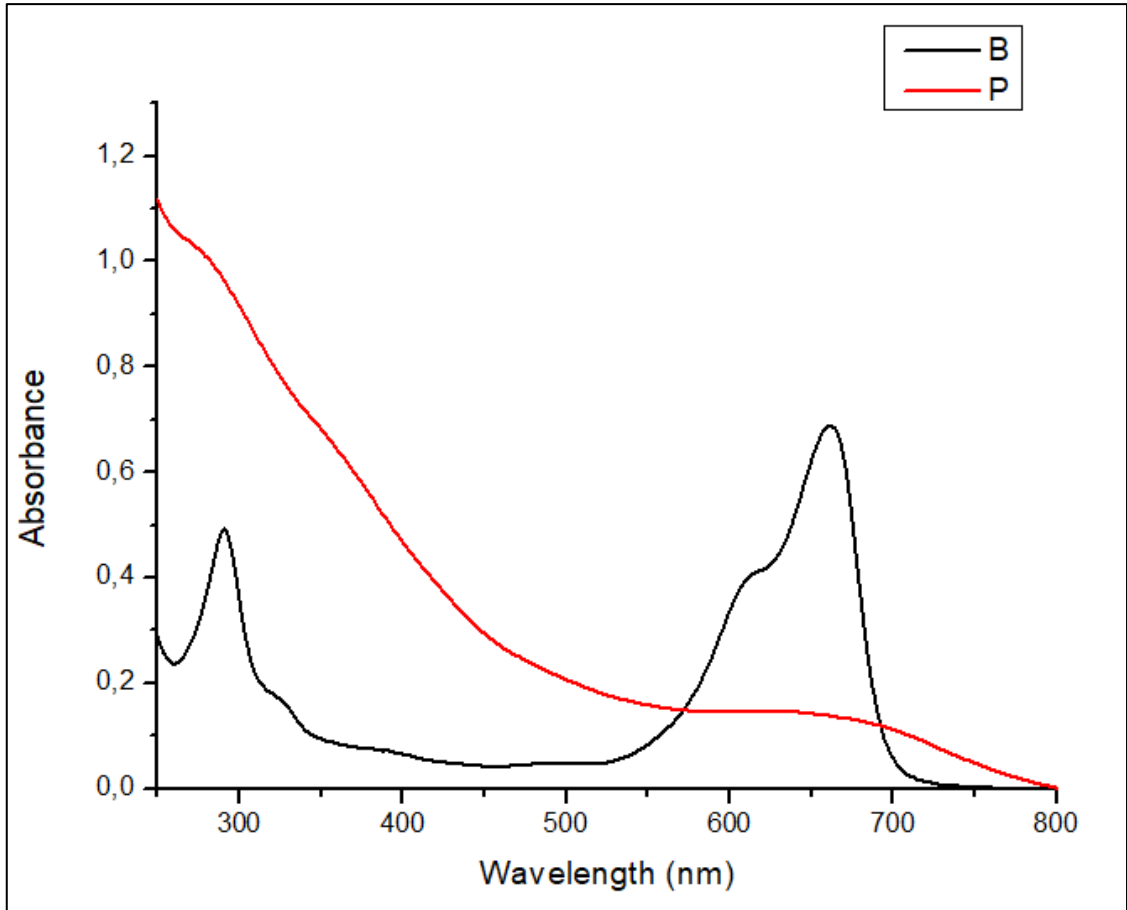
Chandana ve ark. (2015) yaptıkları çalışmaya göre sülfat iyonunun MM gideriminde olumlu etki oluşturabildiğini belirtmişler. Reaktif persülfat iyonu ile OH'ın MM ile reaktivitesinin farklı olduğunu, çünkü sülfatın daha radikal türler üretmek için elektron transferi reaksiyonlarında seçici olduğunu belirtmişler. Öte yandan OH'ın reaktivitesi hidrojen soyutlama, çoklu bağlara ekleme ve daha az ölçüde elektron transfer reaksiyonlarını içerir. Böylelikle persülfat OH radikaline göre daha iyi bozunma sağladığını çalışmalarında belirtmişlerdir.

Bu çalışmada katalizör ilavesinin giderim verimine etkisinin incelenmesi için demir 2 sülfat ($FeSO_4$) tercih edildi. Bunun için 20 mg/L konsantrasyonlarda hazırlanan metilen mavisi ve metil oranj sentetik çözeltilerine sabit 20 mg/L konsantrasyonunda katalizör ilavesi yapıldı. Çalışmanın absorbans okumaları metilen mavisi için 660 nm' de, metil oranj için 465 nm' de yapıldı. MM absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.22' de MO absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.23' te verildi.

Katalizör ilavesinin metilen mavisi ve metil oranj giderim verimlerine olan etkisi Çizelge 4.7. ve Çizelge 4.8' de verildi.

Çizelge 4.7. $FeSO_4$ ilavesinin MM giderim verimine etkisi

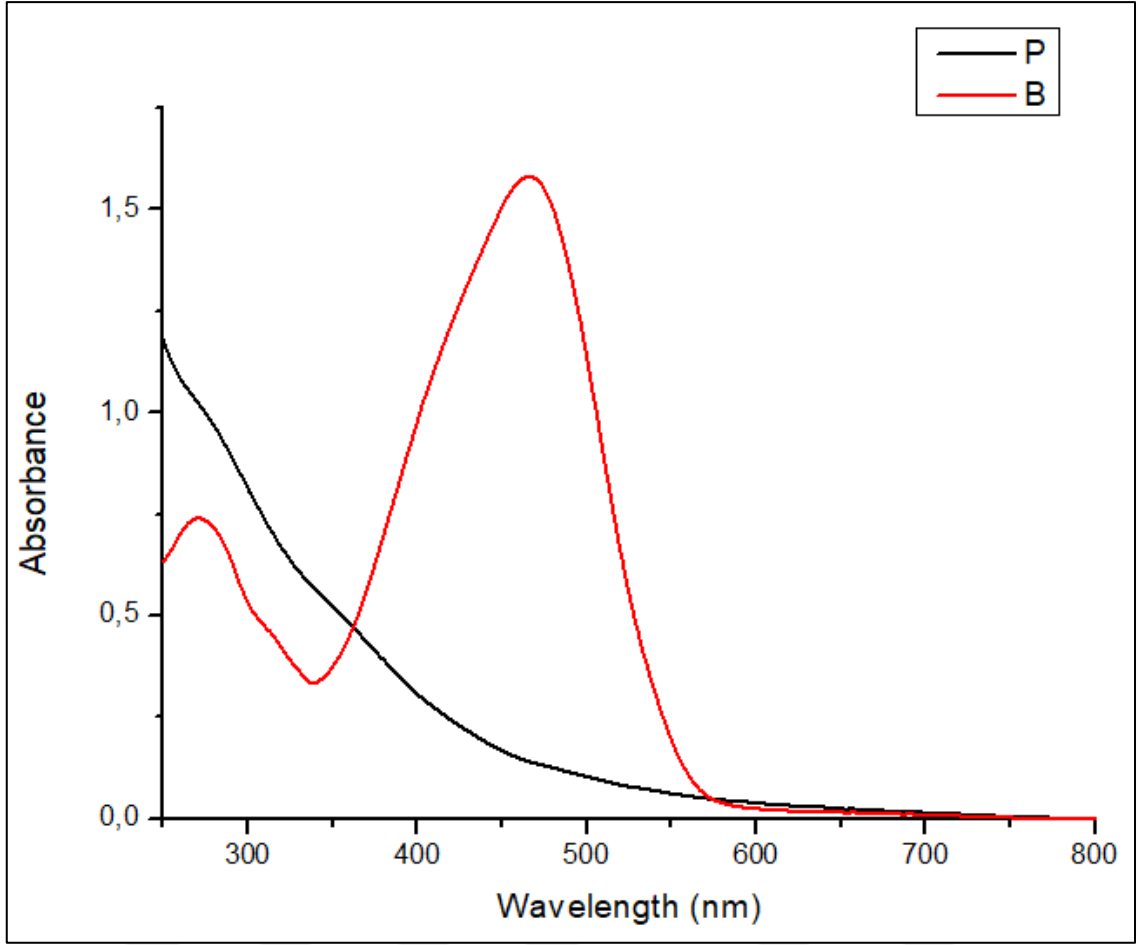
Konsantrasyon	Başlangıç UV	Plazma Sonrası UV	Giderim Verimi
mg/L	abs.	abs.	%
20	0,686	0,139	89,3



Şekil 4.22. Katalizör ilaveli MM çözeltisinin plazma işlemi öncesi (B) ve sonrası (P) numunelerinin absorbanans grafiği

Çizelge 4.8. FeSO_4 ilavesinin MO giderim verimine etkisi

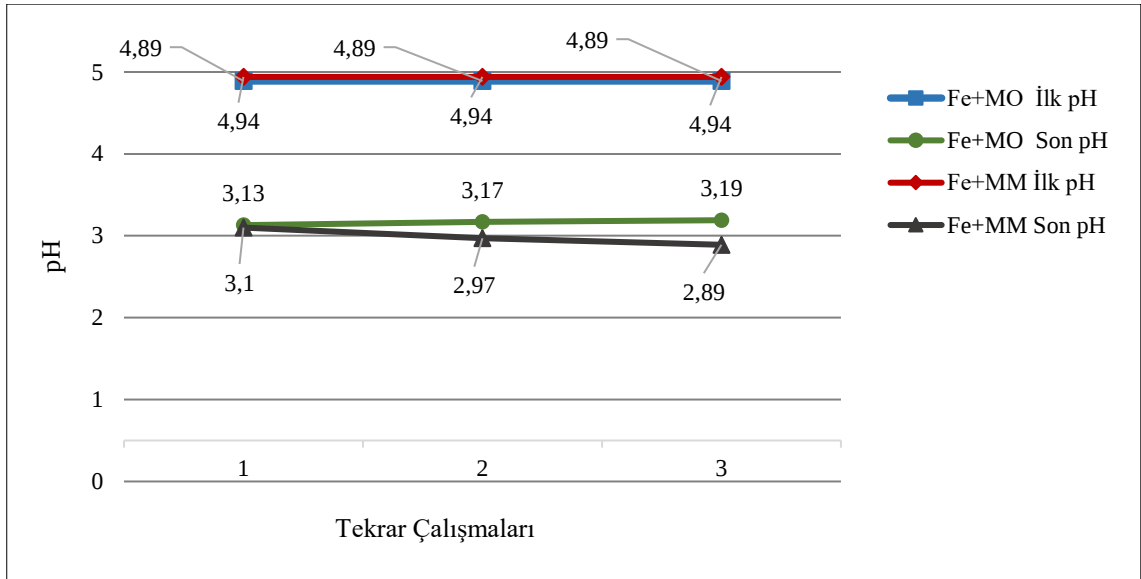
Konsantrasyon	Başlangıç UV	Plazma Sonrası	Giderim Verimi
mg/L	abs.	UV abs.	%
20	1,582	0,142	91



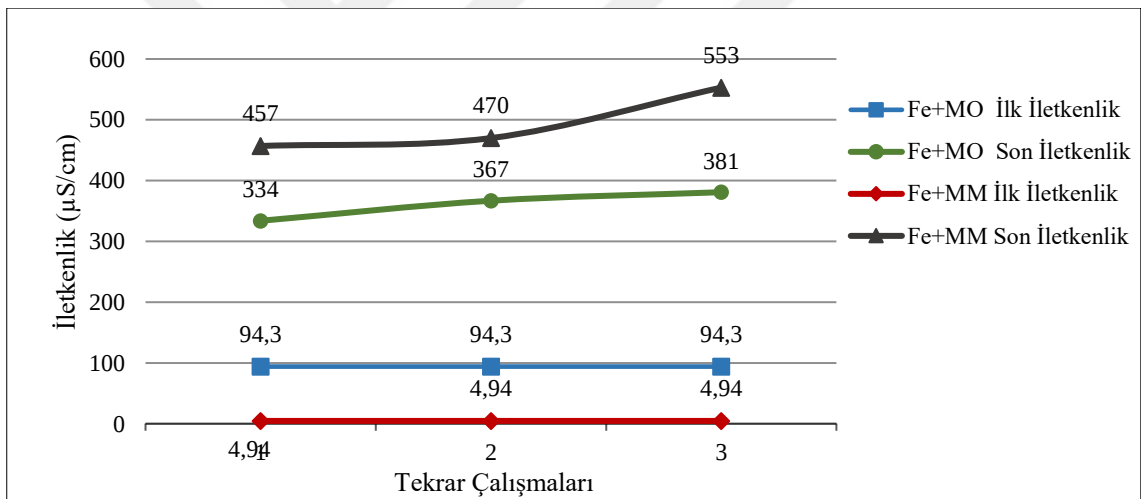
Şekil 4.23. Katalizör ilaveli MO çözeltisinin plazma işlemi öncesi (B) ve sonrası (P) numunelerinin absorbans grafiği

Çalışmada Atmosferik Basıncılı Plazma sisteminin metilen mavisi ve metil oranj giderimi için reaksiyon hızı yüksektir. Katalizör ilavesine gerek duyulmayabilir.

Şekil 4.24. ve Şekil 4.25' te katalizör ilaveli MM çözeltisi ve katalizör ilaveli MO çözeltisi ile yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH' nın plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü.



Şekil 4.24. Katalizör ilaveli MM ve MO numunelerinin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) pH değerleri



Şekil 4.25. Katalizör ilaveli MM ve MO numunelerinin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

4.8. Başlangıç pH'nın Giderim Verimine Etkisi

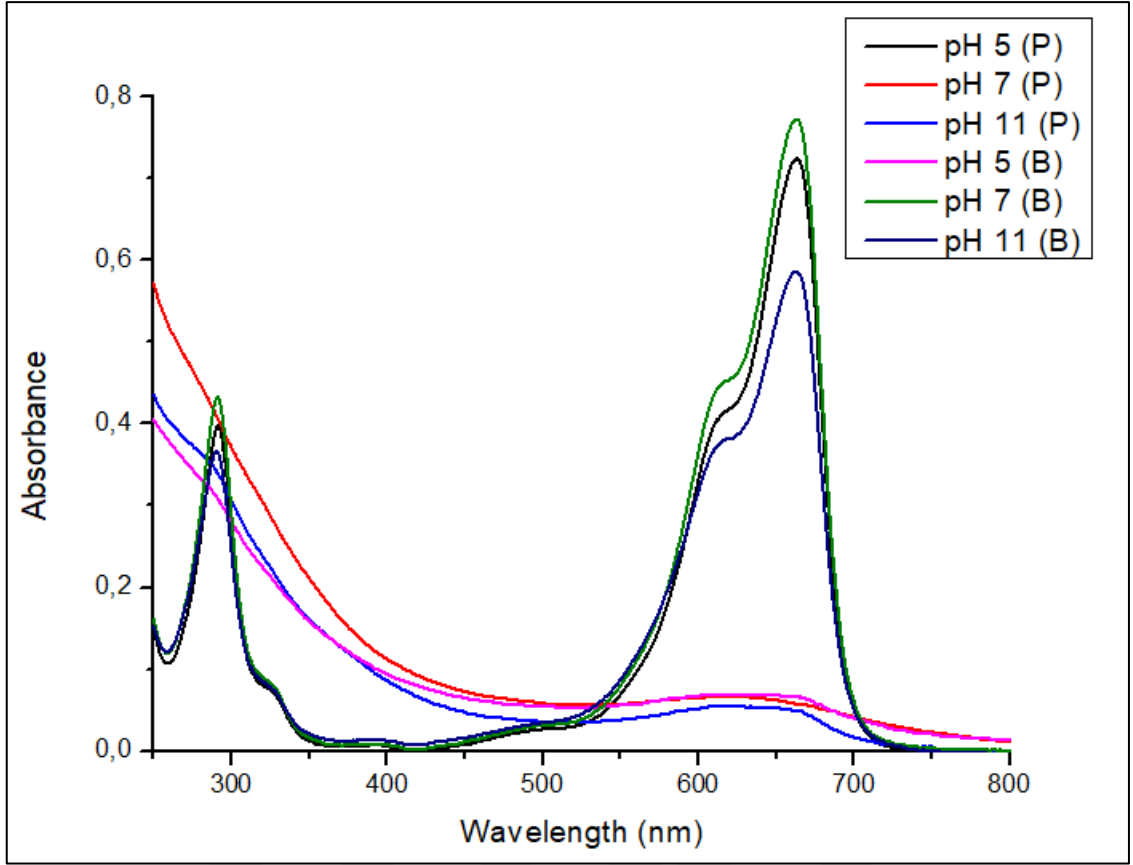
Çalışmada farklı pH aralıklarının plazmanın renk giderimi üzerindeki etkisi araştırıldı. pH çalışması metilen mavisi ve metil oranj sentetik çözeltileri için ayrı ayrı yapıldı. Optimum şartlarda hazırlanan çözeltiler için pH 11, 7 ve 5 değerlerine getirilerek alkali, nötr ve asidik numuneler hazırlandı ve optimum şartlarda plazmaya tutuldu.

Huang ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada asidik nötr ve alkali çözeltilerde metilen mavisinin bozulma oranlarını araştırmışlardır. Bozunma oranlarının asidik, alkali ve nötr çözeltilerde sırası ile azalan bir eğim gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmalarında asidik çözeltideki oksidanların yoğunluğu, alkali çözeltidekinden daha yüksektir. Bunun sebebini oksidanların miktarının, bozunma hızı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve oksitleyicilerin varlığı ne kadar yüksek olursa, asidik çözeltideki bozunma hızının da o kadar yüksek olacağına bağlamışlardır . Ayrıca nötr çözeltilerdeki bozunma hızının, bu tür çözeltilerdeki düşük oksidan konsantrasyonu nedeniyle en düşük olacağını söylemişlerdir.

Çalışmada başlangıç ve plazma ile çalışılan numunelerin 660 nm’ deki absorbans okumaları ve %giderim’ leri metilen mavisi için Çizelge 4.8’ de, metil oranj için Çizelge 4.9’ da verildi. Farklı pH değerleri ile çalışılan MM ve MO %giderim karşılaştırması Şekil 4.32’ de verildi. MM absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.26’ da MO absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.29’ da verildi.

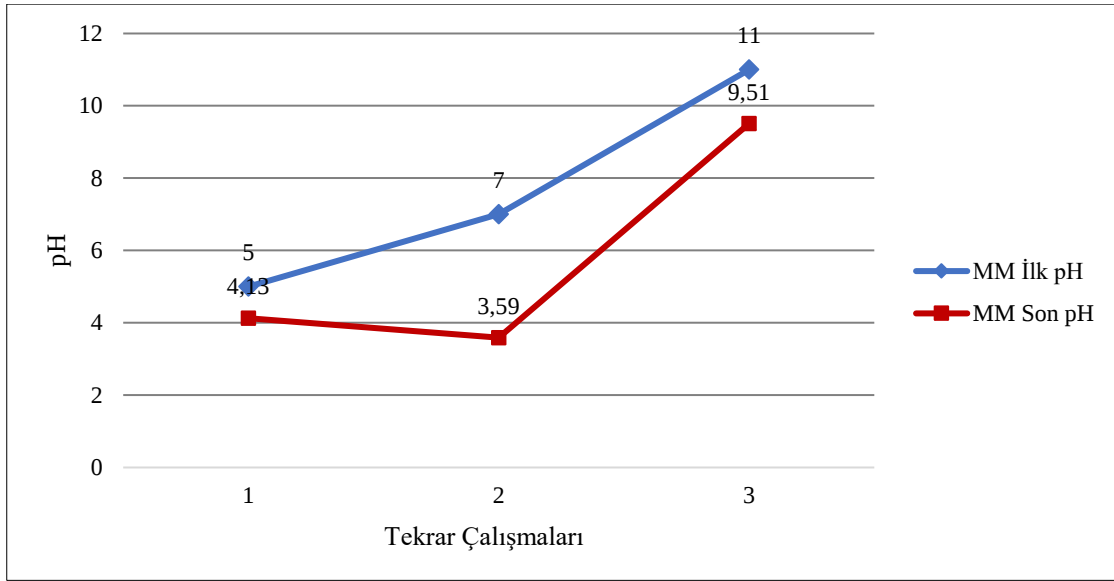
Çizelge 4.8. Farklı pH aralıklarının plazma ile metilen mavisi giderimine etkisi

pH	Başlangıç UV abs.	Plazma Sonrası UV abs.	Giderim Verimi %
5	0,718	0,066	98,5
7	0,767	0,06	98,8
11	0,583	0,05	98,7

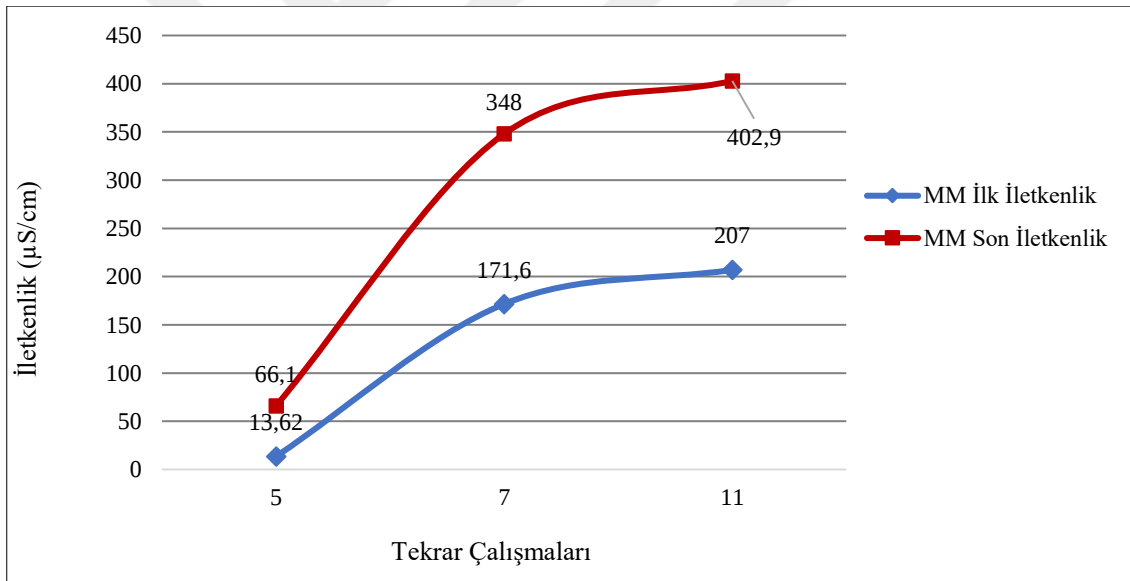


Şekil 4.26. Farklı pH aralıkları ile çalışılan MM çözeltilerinin plazma işlemi öncesi (B) ve sonrası (P) absorbans değerleri

Şekil 4.27. ve Şekil 4.28’ de farklı pH aralıkları ile hazırlanan MM çözeltisi ile yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH’ ının plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü. Fakat pH 11 ile yapılan çalışmada iletkenlikte artış gözlenmedi.



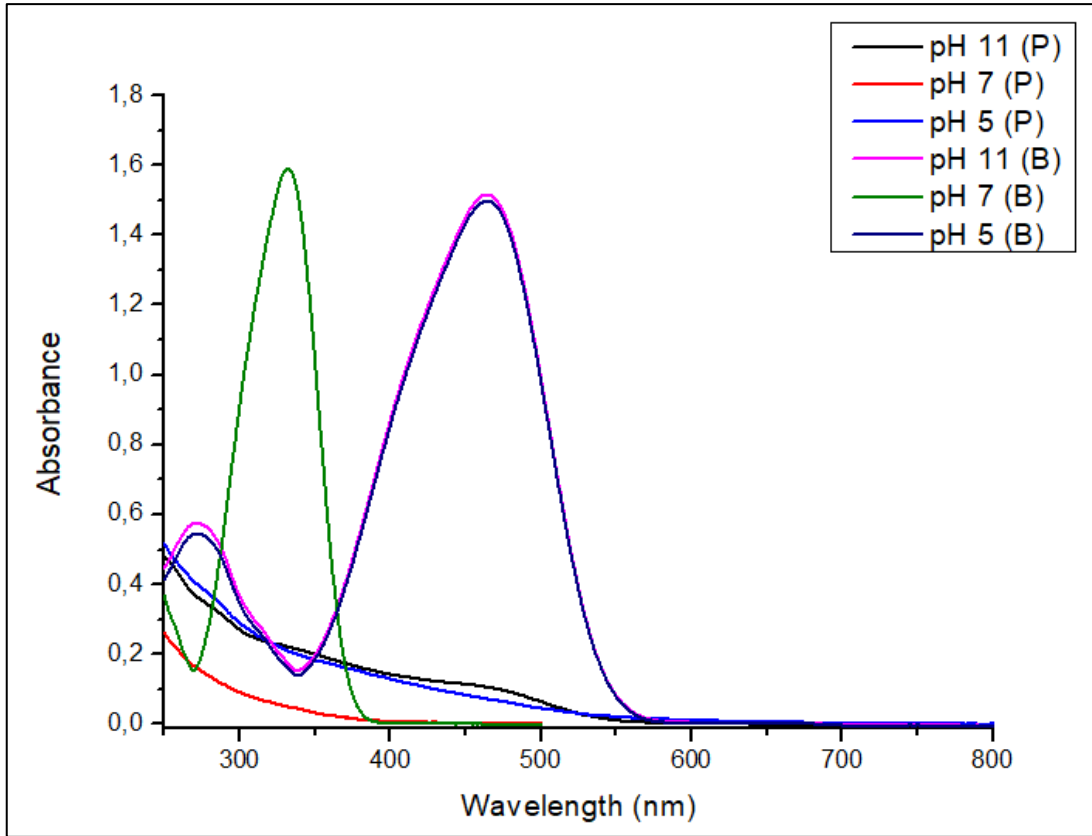
Şekil 4.27. Farklı ilk (plazma öncesi) pH aralıkları ile çalışılan 3 tekrar MM numunelerinin son (plazma sonrası) pH değerleri



Şekil 4.28. Farklı pH aralıkları ile çalışılan 3 tekrar MM numunelerinin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

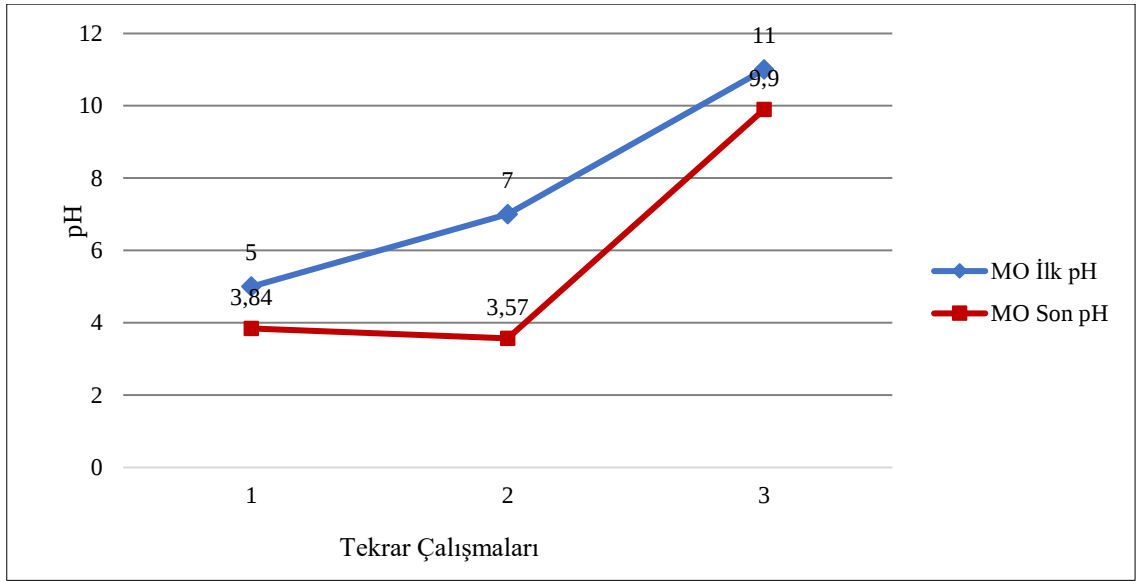
Çizelge 4.9. Farklı pH aralıklarının plazmanın metil oranj giderimine etkisi.

pH	Başlangıç UV abs.	Plazma Sonrası UV abs.	Giderim Verimi %
11	1,516	0,106	93
7	1,586	0,049	97
5	1,498	0,072	95

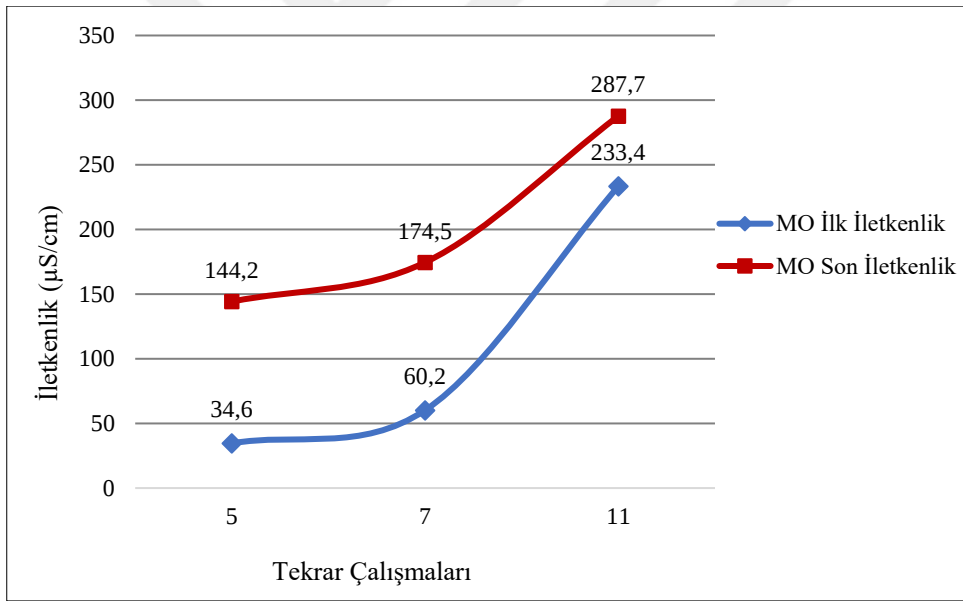


Şekil 4.29. Farklı pH aralıkları ile çalışılan MO çözeltilerinin plazma işlemi öncesi (B) ve sonrası (P) absorbans değerleri

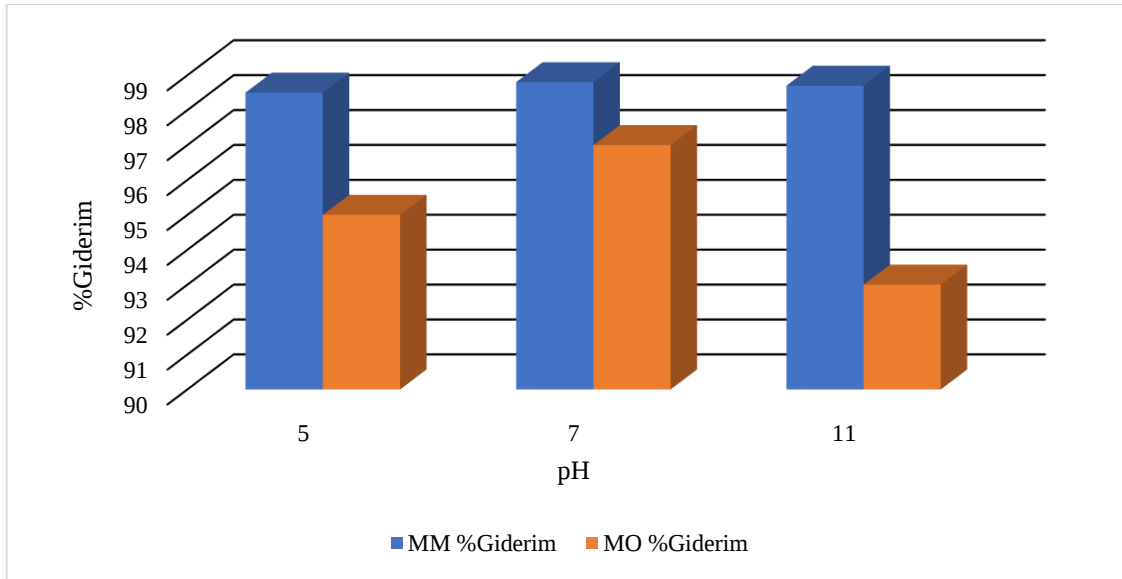
Şekil 4.30. ve Şekil 4.31’ de farklı pH aralıkları ile hazırlanan MO çözeltisi ile yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH’ ının plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü. Fakat pH 11 ile yapılan çalışmada tersi bir durum görüldü.



Şekil 4.30. Farklı ilk (plazma öncesi) pH aralıkları ile çalışılan 3 tekrar MO numunelerinin son (plazma sonrası) pH değerleri



Şekil 4.31. Farklı pH aralıkları ile çalışılan 3 tekrar MO numunelerinin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri



Şekil 4.32. Farklı pH değerleri ile çalışılan MM ve MO çözeltilerinin %Giderim karşılaştırması

4.9. Plazmanın Renkli Atıksu Numunesine Etkisi

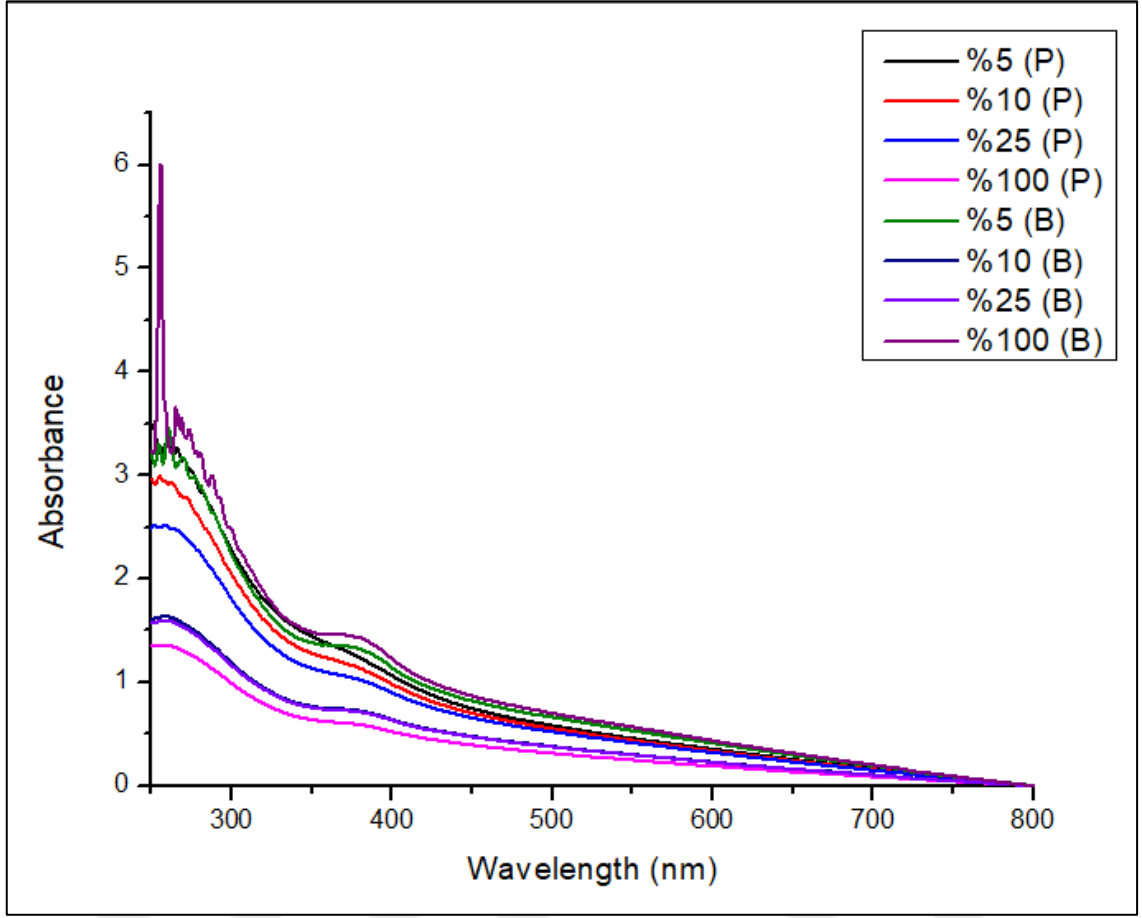
Çalışmada bir Meyve İşleme Tesisinden temin edilen nar atıksu numunesinin oksijen gazı beslemeli plazma çalışması optimum şartlarda yapıldı. Belirli oranlarda seyreltilen numunelerin 660 nm’ de abs. okumaları yapıldı. Absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.33’ te, pH ve iletkenlik değerleri grafikleri ise sırası ile Şekil 4.34. ve Şekil 4.35’ te verildi.

Kovačević ve ark. (2016), atmosferik basınçlı plazma ile nar suyu renk giderimini araştırmışlardır. Plazma işlemi için 3, 5, 7 dakika sürelerde, 3, 4, 5 hacimlerde çalışmışlar ve plazma işleminden sonra renk giderimi elde etmişlerdir. En iyi renk giderimini 7. dakikada sağlamışlardır.

Çizelge 4.10’ da verilen plazma öncesi ve sonrası absorbans değerlerine bakıldığında renk gideriminde bir azalma görüldü.

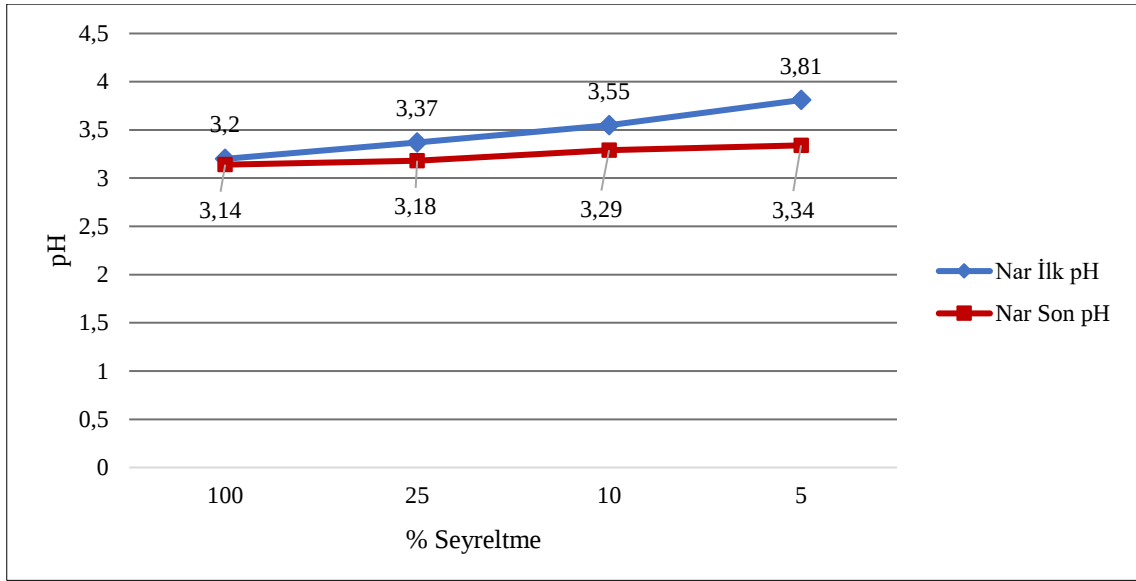
Çizelge 4.10. Plazma sisteminin nar atıksu numunesinin renk giderimine etkisi

Seyreltme Oranı %	Başlangıç UV abs.	Plazma Sonrası UV abs.
100	0,395	0,916
25	0,284	0,299
10	0,271	0,332
5	0,152	0,238

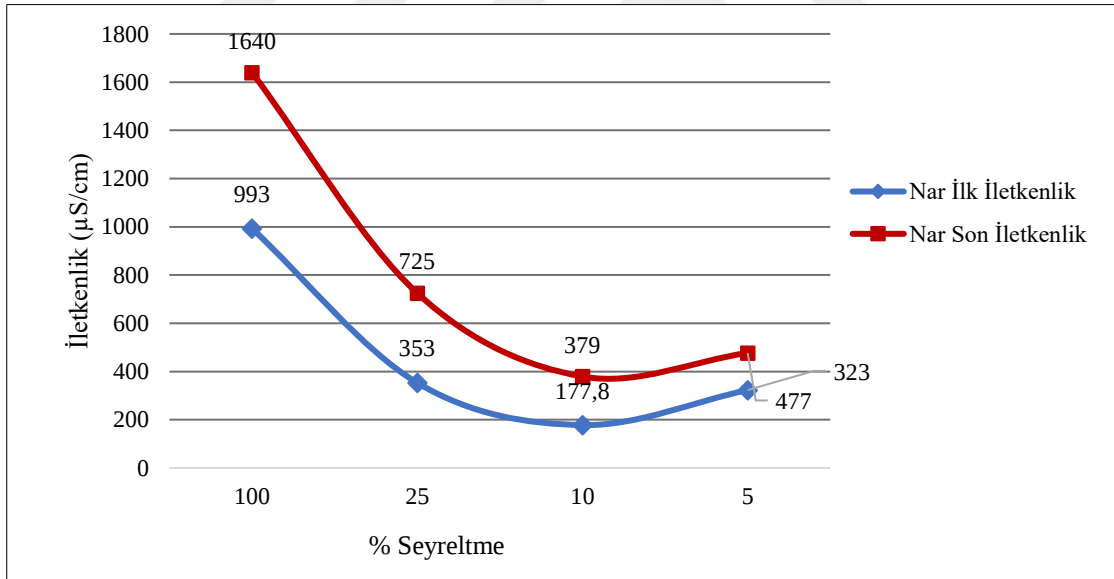


Şekil 4.33. Farklı seyreltmeler ile çalışılan nar atıksu numunesinin plazma işlemi öncesi (B) ve sonrası (P) absorbans değerleri

Şekil 4.34. ve Şekil 4.35’ te farklı seyreltmeler ile hazırlanan nar numunesi ile yapılan plazma çalışmalarının sırası ile pH ve iletkenlik sonuçlarının artış-azalış eğimleri verildi. Çalışmaların başlangıç pH’ ın plazma sonrasında azaldığı görüldü. İletkenlik eğrisine bakıldığında ise plazma işlemi sonrası iletkenlik artışı görüldü. %5 seyreltme çalışmasında ise azalma görüldü.



Şekil 4.34. Farklı %seyreltmeler ile çalışılan nar atıksu numunesinin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) pH değerleri



Şekil 4.35. Farklı %seyreltmeler ile çalışılan nar atıksu numunesinin ilk (plazma öncesi) ve son (plazma sonrası) iletkenlik değerleri

4.10. Plazmanın KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) Etkisi

Namal (2017), yaptığı bir çalışmada tekstil endüstrisi atıksularının yüksek konsantrasyonlarda KOİ içerdiğini belirtmiştir.

Erkuş ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada su bazlı boya üretimi yapan bir tesisin aylara göre alınan numunelerinde ölçülen KOİ (1116-1340 mg/L) değerinin standart değerlerin üzerinde olduğunu belirtmişlerdir.

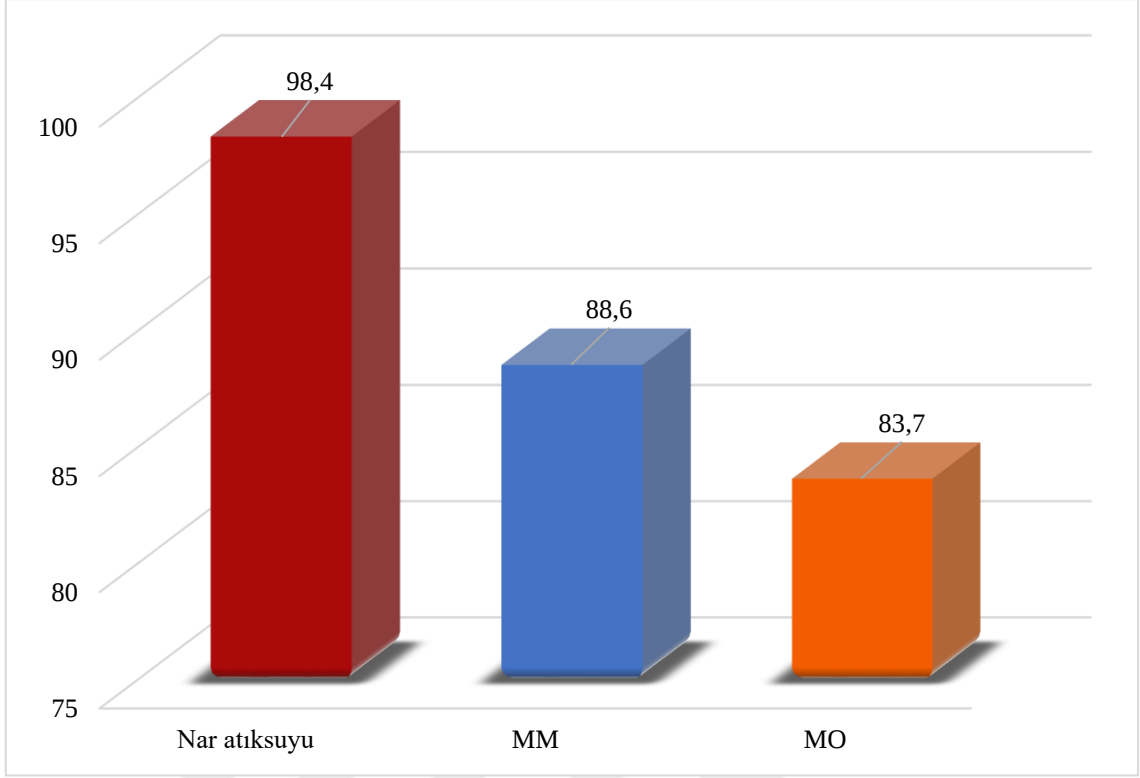
Jiang ve ark. (2012), oksijen gazı ile çalışan Atmosferik Basıncılı Plazma Sistemi kullanmışlar ve metil oranj giderimi için 20 dakikalık plazma işlem sonucunda % 67 KOİ giderim verimi ile plazmanın organik kirliliği verimli bir şekilde azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Çalışmada optimum şartlarda hazırlanan metilen mavisi, metil oranj sentetik çözeltilerinin ve meyve işleme tesisinden alınan nar atıksu numunesinin plazma öncesi ve plazma işlemi sonrasının KOİ kirlilik parametrelerine bakılmıştır.

Numunelerin başlangıç KOİ değerleri, plazma sonrası KOİ değerleri ve % giderim değerleri Çizelge 4.11’ de, %giderim verimleri karşılaştırması Şekil 4.36’ da verilmiştir.

Çizelge 4.11. Nar atıksu numunesi, MM ve MO çözeltilerinin KOİ giderim verimleri

Numuneler	Başlangıç KOİ mg/L	Plazma Sonrası KOİ mg/L
Nar atıksuyu	65600	1024
MM	352	<40
MO	256	41,6



Şekil 4.36. KOİ % giderim verimleri karşılaştırması

4.11. Argon Gazının Etkisi

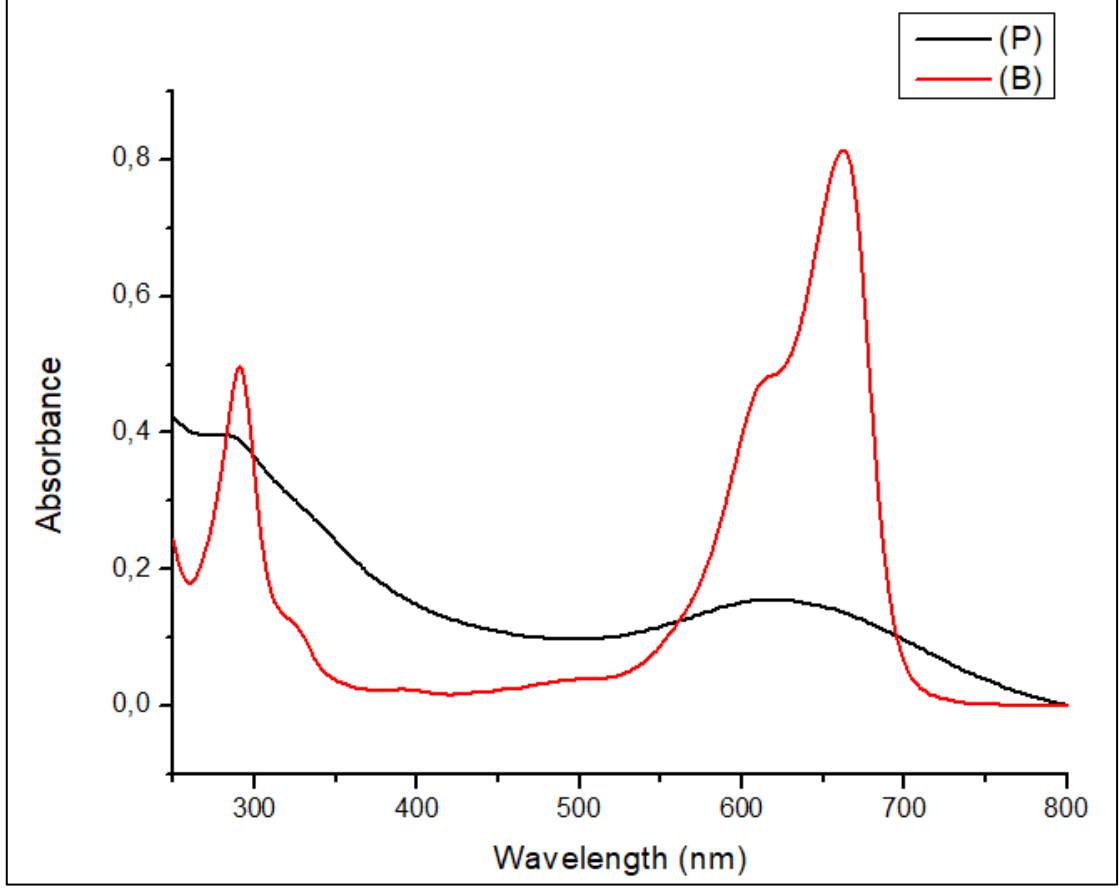
Çalışmada Plazma Sistemine besleme gazı olarak argon gazı verildi. Metilen mavisi model boyası ile optimum şartlarda hazırlanan sentetik çözeltinin argon gazı ile tek seferlik denemesi yapıldı. Plazma işlemi sonrası argon gazının metilen mavisi giderim verimi araştırılmıştır.

Chandana ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada Atmosferik Basıncılı Plazma Sistemi ile argon gazı kullanarak metilen mavisi giderimini araştırmışlardır. 40 dakikalık plazma işlem süresi ile 20 mg/L konsantrasyonda hazırlanan metilen mavisi sentetik çözeltisinde yaklaşık %100 renk giderim verimine ulaşmışlardır.

Çizelge 4.12' de argon gazının metilen mavisi giderim verimi verilmiştir. Bu verilere göre argon gazı metilen mavisi boya moleküllerinin 5 dakikada yaklaşık %97 verimle giderimini sağlamıştır. Absorbans eğrisi grafiği Şekil 4.37' de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Argon besleme gazının MM boya giderim verimi

Konsantrasyon mg/L	Başlangıç UV abs.	Plazma Sonrası UV abs.	Giderim Verimi %
20	0,81	0,139	96,9



Şekil 4.37. Argon gazı ile çalışılan MM çözeltisinin plazma öncesi (B) ve plazma sonrası (P) absorban değerleri

4.12. *Lepidium Sativum* Toksisite Test Sonuçları

Test popülasyonunda toksisiteye sebep olan bileşiklerin toksiklik derecesi akut toksisite testleri ile belirlenir. Bu testlerden biri de *Lepidium Sativum* Toksisite Testi' dir.

Lepidium Sativum, Crucifare familyasından gelmektedir. Başlangıçta kazık kök meydana gelmektedir. Kazık kök 4-6 cm boy aldığıında yan kökler oluşmaktadır. Zamanla kazık kök görünümü kaybolmakta ve saçak köklü bir durum almaktadır. Gövde dallanmış otsu bir yapıya sahiptir. Tohumları açık kırmızı kahverengi, kahverengi kırmızı renktedir. Yaklaşık 2 mm uzunlukta 1 mm genişliğinde 0.6-1.0 mm kalınlıktadır. Tohumların

minimum çimlenme gücü %80 civarındadır. Çimlenme toprakta 4 °C sıcaklıkta başlamaktadır. *Lepidium Sativum* ılımlı, nemli iklimlerden hoşlanmaktadır. Yetiştirilme sıcaklığının 10-15 °C arasında olması yeterlidir. Sıcaklık arttıkça yapraklar küçülmektedir. pH seviyesi 6.0-6.5 düzeyinde olmalıdır. *Lepidium Sativum* fazla ışığı sevmemektedir.

Çalışmada optimum şartlarda hazırlanan ve plazma deşarjına tutulan Metilen Mavisi ve Metil Oranj sentetik çözeltileri için *Lepidium Sativum* toksisite test sonuçları belirlenmiştir. Çalışmada %3.125, %6.25, %12.5, %25, %50 ve %100 seyreltme oranları ile çalışılmıştır.

4.12.1. Toksik Birim (TB) Değerlerinin Hesaplanması

EC₅₀ değeri bir gruptaki deney hayvanlarının % 50' sinin ölümüne sebep olan zehirli madde konsantrasyonudur.

“Toksik Birim” (TB) ifadesi yapılan testin sonuçlarının toksikliğinin değerlendirilmesi için hesaplanır. “Toksik Birim” (TB) değeri, test sonuçlarından hesaplanan EC₅₀ değerleri veya hesaplanan %inhibisyon değerleri ile hesaplanır.

EC₅₀ değerleri, yapılan toksisite testleri sonunda her bir seyreltme oranı için hesaplanan %inhibisyon değerlerinin kalibrasyon eğrisi oluşturularak hesaplanmıştır. (EK-1, EK-2, EK-3, EK-4). %inhibisyon kalibrasyon eğrileri MM başlangıç ve plazma işlemi sonrası için sırası ile Şekil 4.38. ve Şekil 4.39 'da, MO başlangıç ve plazma sonrası için sırası ile Şekil 4.40. ve Şekil 4.41' de verilmiştir. Toksik birim sınıflandırması ise hesaplanan EC₅₀ değerleri ile yapılmıştır.

EC₅₀ değerlerine göre toksik birim değerlendirmesi, aşağıda belirtilen formüle göre hesaplanmaktadır.

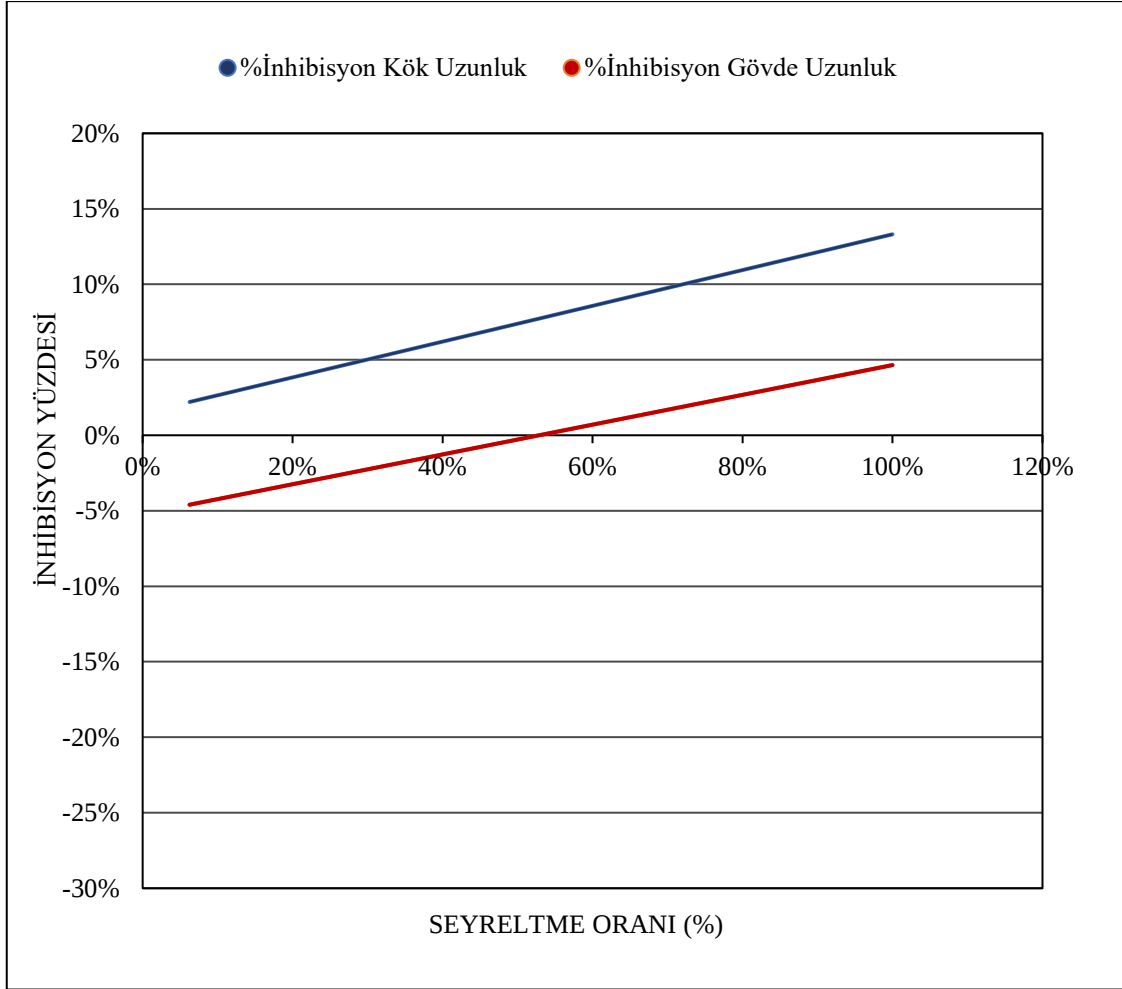
$$TB = \{1/L(E)C_{50}\} \times 100$$

Persoone ve Janssen (1993), yapmış oldukları çalışmada, toksik birim değerlendirmesi; TB=0 ise “toksik değil”, 0<TB<1 aralığında ise “hafif toksik”,

1<TB<10 aralığında “toksik” ve 11<TB<100 aralığında “çok toksik” şeklinde belirledikleri sınıflandırma ile toksisite seviye değerlendirmesi yapmışlardır.

Bu çalışmada yapılan *Lepidium Sativum* testi için hesaplanan EC₅₀ değerleri ve toksik birim sınıflandırması MM başlangıç ve plazma işlemi sonrası için sırası ile Çizelge 4.13. ve Çizelge 4.14’te, MO başlangıç ve plazma sonrası için sırası ile Çizelge 4.15. ve 4.16’ da verilmiştir.

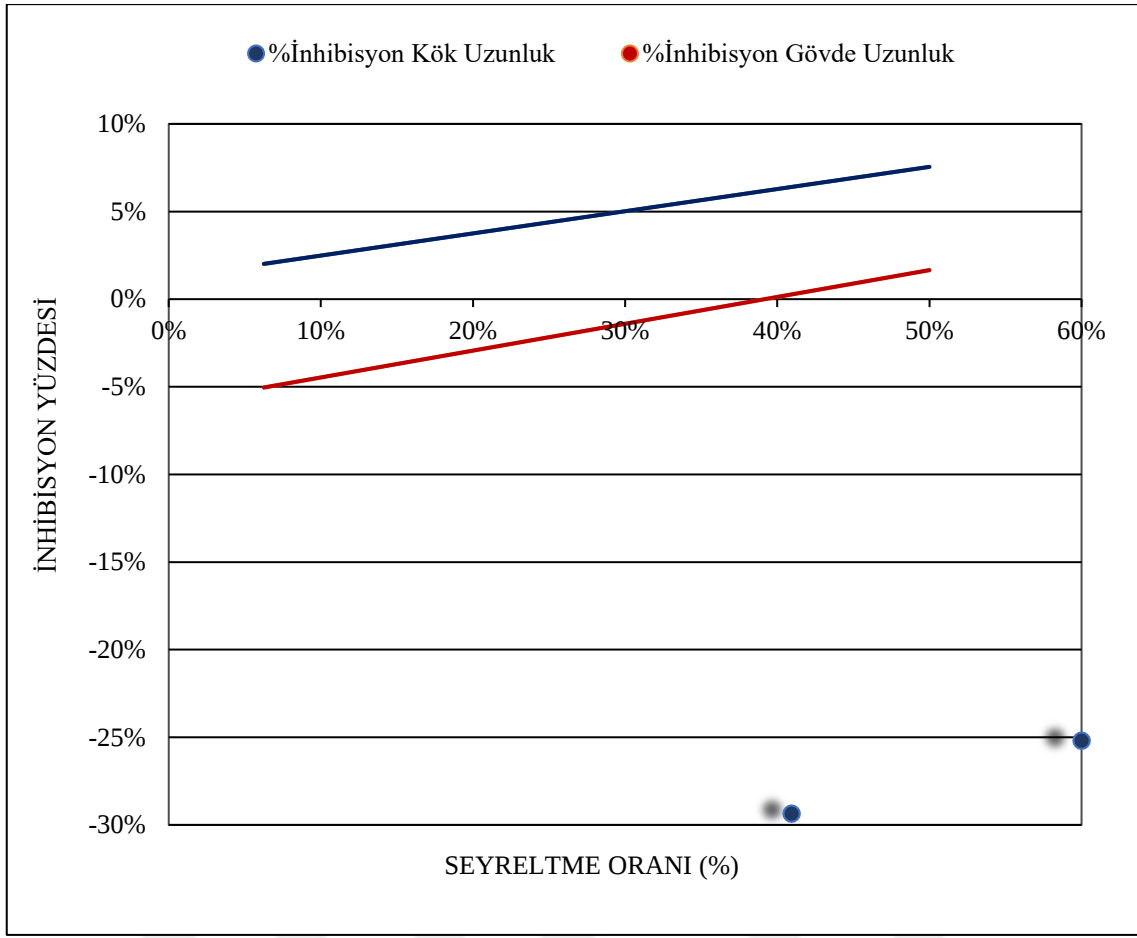




Şekil 4.38. Metilen mavisi başlangıç çözeltisi için % ortalama kök ve gövde inhibisyonuna karşılık seyreltme oranı

Çizelge 4.13. Metilen mavisi başlangıç çözeltisi için hesaplanan EC_{50} değeri ve toksik birim değeri

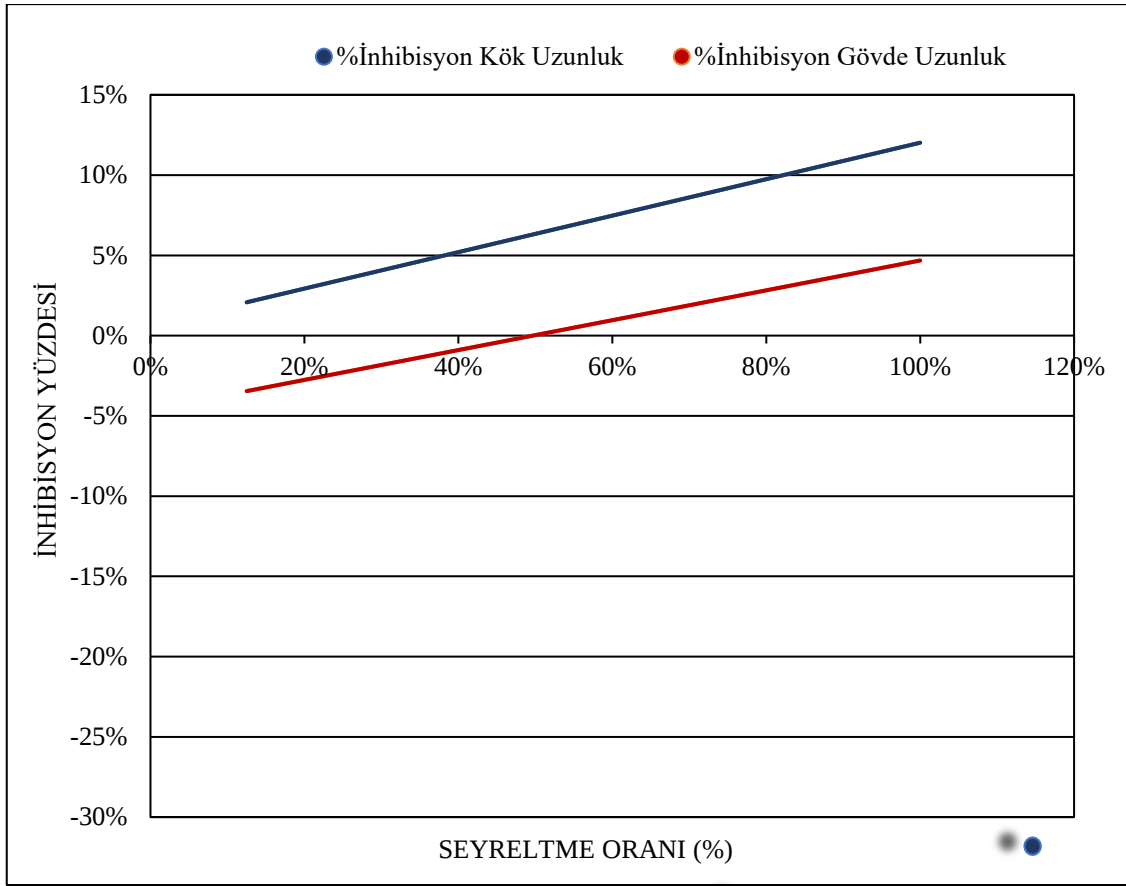
Etken Madde	EC_{50}	Toksik Birim	Sınıflandırma
Kök Uzunluğu	421,817	0,237	Hafif Toksik
Gövde Uzunluğu	516,055	0,1938	Hafif Toksik



Şekil 4.39. Plazmaya tutulan metilen mavisi çözeltisi için % ortalama kök ve gövde inhibisyonuna karşılık seyreltme oranı

Çizelge 4.14. Plazmaya tutulan metilen mavisi çözeltisi için hesaplanan EC_{50} değeri ve toksik birim değeri

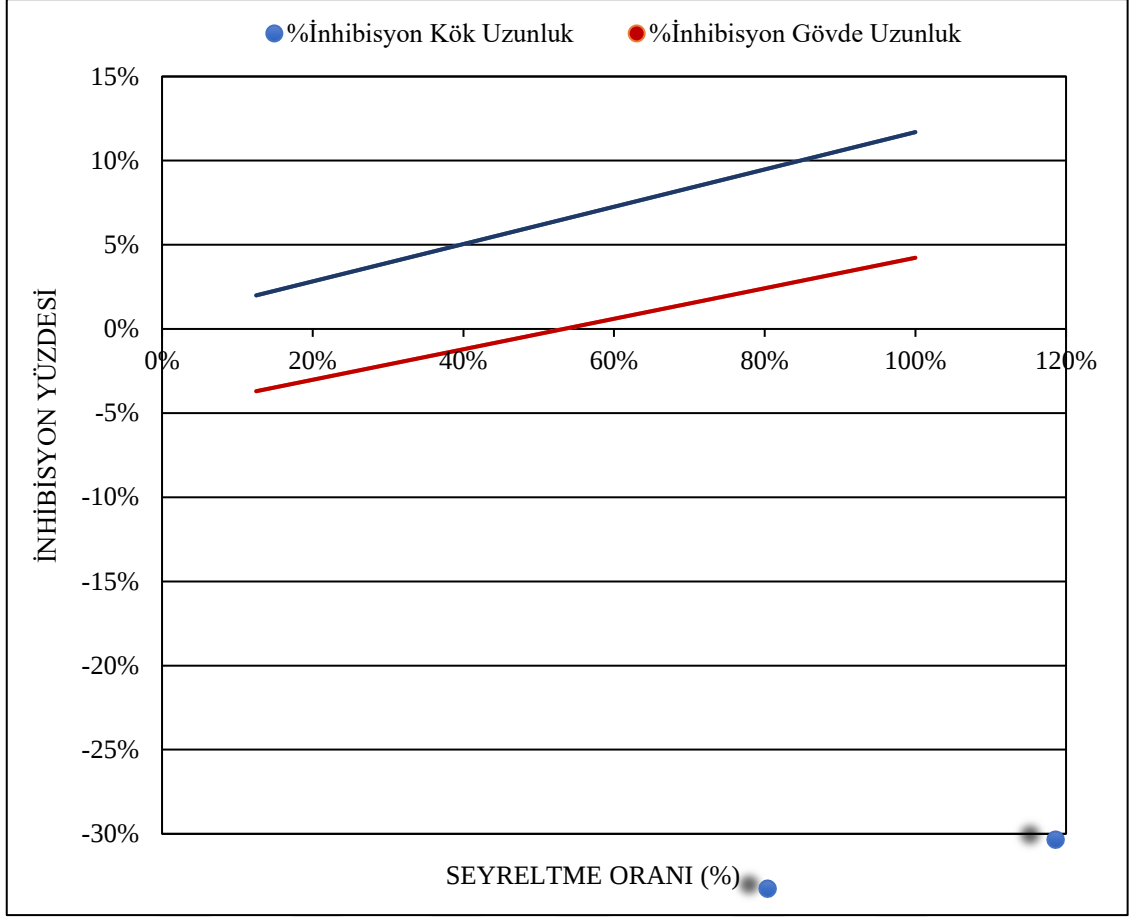
Etken Madde	EC_{50}	Toksik Birim	Sınıflandırma
Kök Uzunluğu	395,160	0,253	Hafif Toksik
Gövde Uzunluğu	326,976	0,306	Hafif Toksik



Şekil 4.40. Metilen oranj başlangıç çözeltisi için % ortalama kök ve gövde inhibisyonuna karşılık seyreltme oranı

Çizelge 4.15. Metilen oranj başlangıç çözeltisi için hesaplanan EC_{50} değeri ve toksik birim değeri

Etken Madde	EC_{50}	Toksik Birim	Sınıflandırma
Kök Uzunluğu	440,084	0,227	Hafif Toksik
Gövde Uzunluğu	538,131	0,186	Hafif Toksik

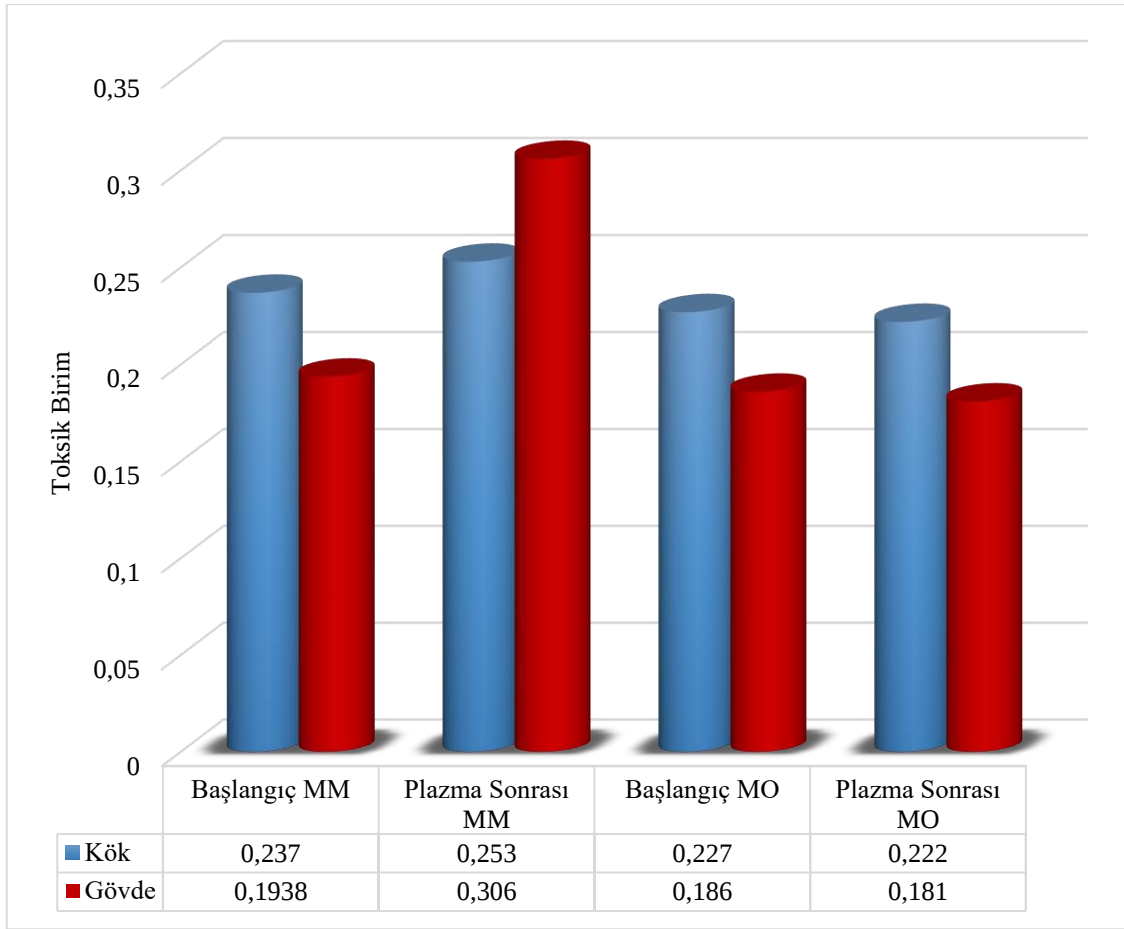


Şekil 4.41. Plazmaya tutulan metilen oranj çözeltisi için % ortalama kök ve gövde inhibisyonuna karşılık seyreltme oranı

Çizelge 4.16. Plazmaya tutulan metilen oranj çözeltisi için hesaplanan EC_{50} değeri ve toksik birim değeri

Etken Madde	EC_{50}	Toksik Birim	Sınıflandırma
Kök Uzunluğu	450,802	0,222	Hafif Toksik
Gövde Uzunluğu	552,409	0,181	Hafif Toksik

Lepidium sativum toksisite testleri sonucunda toksik birim sınıflandırmasına göre çalışılan başlangıç ve plazma sonrası çözelti numuneleri Şekil 4.42’ de kıyaslanmıştır. Çalışma sonucuna göre metilen mavisi ve metil oranj çözeltilerinin Toksik Birimleri plazma öncesi ve sonrasında kök ve gövde değerlerine göre “Hafif Toksik” çıkmıştır.



Şekil 4.42. Lepidium Sativum testi toksik birim değerleri

4.13. H₂O₂ Oluşumunun Etkisi

Chandana ve ark. (2015) çalışmalarında hidrojen peroksit (H₂O₂) Atmosferik Basıncılı Plazma Sisteminde üretilen en önemli oksidanlardan biri olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında titanyum sülfat kullanmışlar ve H₂O₂ ile reaksiyona girmesiyle oluşan pertitanik asit yoğunluğundan H₂O₂ miktarını belirlemişlerdir.

Sanito ve ark. (2022) çalışmalarında plazma deşarjı ile hidroksil radikali, hidrojen peroksit gibi uzun ömürlü reaktif türlerin oluştuğundan söz etmişlerdir. Oluşan reaktiflerin plazma uygulamasında temas ettirilen sıvıdaki kirleticilerin parçalanmasında önemli rol oynadığını, bu radikallerin sıvı-gaz ara yüzeyinde ya da doğrudan sıvı içerisinde oluşabileceğinden bahsetmişlerdir. Ayrıca gaz moleküllerinin gazın atomu olarak başka bir forma ayrıştığını ve elektronlar, reaktif türler (radikaller, peroksitler, süper oksitler, hidroksil radikali, tekli oksijen, alfa oksijen) ve pozitif iyonlar dahil olmak üzere serbest yüklü parçacıklara serbestçe hareket ettiğinden söz etmişlerdir.

Yamada ve ark. (2020) oksijen gazı beslemeli plazma çalışmalarında hidrojen peroksitin önemli bir oksitleyici madde olduğunu (1.78V oksidasyon potansiyeli), ürünün diğer radikallere göre daha uzun ömürlü olduğunu bu sebeple de kirletici gideriminde etkili olduğunu söylemişlerdir. Sulu fazda, aktarılan reaktif türler, uzun bir süre boyunca etrafındaki moleküllerle etkileşime girer, bu nedenle, özelliklerine göre kimyasal reaksiyonlara katılmalarını sağlayan yeni reaktif türlerin üretildiğinden de bahsetmişlerdir.

Literatür çalışmalarında plazma teması ile oluşan reaktif türlerin en önemlisi hidrojen peroksitin ömrünün uzun olması, plazma uygulamasında deşarj durdurulduktan sonra da bir süre oksidasyonun devam ettiğinden, diğer bir deyişle arıtımın devam ettiğinden bahsedilmektedir.

Bu çalışmada yapılan her bir deneyin plazma sonrası hidrojen peroksit oluşumu hidrojen peroksit kitleri ile belirlenmiştir. Aynı zamanda saf su plazmaya tutularak saf suda oluşan hidrojen peroksit miktarına da bakılmıştır. En yüksek giderim verimleri için MM, MO, nar numunesi ve saf su için plazma sonrası oluşan hidrojen peroksit miktarları Çizelge 4.17’ de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Plazmanın H_2O_2 oluşumuna etkisi

Çalışma	H_2O_2 miktarı (mg/L)
MM	25
MO	25
Nar	25
Saf su	25

4.14. Enerji Verimi Hesaplaması

Çalışmada metilen mavisi gideriminde elde edilen en iyi sonuç (%98.6 boya giderimi) için enerji verimi hesabı yapılmıştır.

Enerji verimliliği, plazma işlemi sırasında tüketilen birim enerji başına giderilen kirletici miktarı olarak tanımlanabilir. (Rahimpour, Taghvaei, Zafarnak, Rahimpour, & Raeissi, 2019)

Yamada ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada enerji verim hesaplamasını ve hız sabiti hesaplamasını aşağıdaki formül ile hesaplamışlar. Enerji verimi 24.1 mg/kWs, hız sabiti 0.66 1/dk sonuçlarını elde etmişler ve deneylerinin en yüksek reaksiyon hızını gösterdiğini belirtmişlerdir.

Aşağıda verilen denklemlerde C_0 (mg/L), MM boyasının ilk konsantrasyonu, C_t (mg/L) MM boyasının t plazma işlem süresindeki konsantrasyonunu ifade eder. Burada V(L) MM çözeltisinin hacmini, P (kW) tüketilen elektrik gücünü, t ise plazma işlem süresini temsil eder. Güç (P) hesaplaması için $P = A \times V$ denklemi kullanılmıştır. Plazma sisteminde sabit amper (3.3A) ve sabit voltajda (220V) çalışılmıştır. Çizelge 4.18' de verilen veriler ile enerji verimi ve birinci dereceden hız sabiti hesaplanmıştır.

Çizelge 4.18. Enerji verimi ve reaksiyon hız sabiti hesabı için gerekli veriler.

R	C_0	C	P	V	t
%	mg/L	mg/L	kW	ml	dk
98.6	18.8	0.27	0.726	50	5

$$\text{Enerji Verimi } \left(\frac{mg}{kW_s}\right) = \frac{C_0\left(\frac{mg}{L}\right) \times V(L) \times \frac{1}{100} \times R(\%)}{P(kW) \times t(s)}$$

$$\text{Enerji Verimi } \left(\frac{mg}{kW_s}\right) = 15.32 \text{ mg/kWs.}$$

$$\text{Reaksiyon Hız Sabiti (1/dk)} = \frac{-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)}{t(dk)}$$

$$\text{Reaksiyon Hız Sabiti (1/dk)} = 0.85 \text{ (1/dk)}$$

Çalışmada %98.6 optimum MM renk giderim veriminden 15.32 mg/kWs enerji verimi elde edilmiştir ve 0.85 (1/dk) reaksiyon hız sabiti belirlenmiştir. Yamada ve ark. (2020) yaptıkları çalışmadan kıyasla bu çalışmanın deneylerinin yüksek reaksiyon hızlarında gerçekleştiği söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Çalışma kapsamında, hedef kirleticiler için, umut veren bir teknoloji olan, Atmosferik Basıncılı Plazma sistemi tercih edilmiştir. Atmosferik basınçlı plazmanın renk giderim veriminin araştırılması için iki farklı renk (metilen mavisi, metil oranj) ve bir renkli atıksu numunesi (nar atıksuyu) denenmiştir. Çalışmada besleme gazı olarak oksijen gazı kullanılmıştır. Bunun dışında argon gazı denemesi de yapılmıştır. Öncelikli model boya olarak metilen mavisi seçilmiştir.

Metilen mavisi renk giderimi için optimum değerlerin belirlenmesi amacı ile konsantrasyon, plazma süresi, karıştırıcı süresi, plazma ışını mesafesi ve gaz akış hızı çalışmaları yapılmıştır. Metilen mavisi için optimum çalışma koşulları en iyi giderim verimleri baz alınarak 20 mg/L konsantrasyonda, 5 dakika plazma temas süresinde, 5 dakika karıştırıcı süresinde, 1.5 cm mesafede, 12 mg/L akış hızında belirlenmiştir. Çalışmada metilen mavisi için en iyi giderim optimum koşullarda %98.6 verimle sağlanmıştır. Farklı konsantrasyonlarda (20, 30, 40, 50 mg/L) yapılan çalışmada en iyi verimler 20 ve 30 mg/L' de sırası ile %98.6 ve %98.7 olarak elde edilmiştir. Farklı sürelerde yapılan çalışmada 5 dakikalık plazma temas süresinde %98.5 verim, 10, 15 ve 20 dakikalık temas sürelerinde yaklaşık %99 verim elde edilmiştir. Çalışmanın reaksiyon hızı 0.85 1/dk olarak hesaplanmıştır. Enerji verimi optimum koşullarda metilen mavisi için 15.32 mg/kWs olarak hesaplanmıştır.

Metil oranj renk giderim çalışması aynı koşullarda (20 mg/L konsantrasyonda, 5 dakika plazma temas süresinde, 5 dakika karıştırıcı süresinde, 1.5 cm mesafede, 12 mg/L akış hızında) üç tekrar çalışması şeklinde yapılmıştır. En iyi renk giderimi %98 (diğer tekrar çalışmaları %97) olarak elde edilmiştir.

Katalizör ilavesi için FeSO_4 kullanılmıştır. Metilen mavisi ve metil oranj renkleri için optimum şartlarda iki ayrı katalizör çalışması yapılmıştır. Metilen mavisi için, katalizör ilavesi ile plazma teması sonrasında %89.3 renk giderim verimi elde edilmiştir.. Metil oranj için, katalizör ilavesi ile plazma teması sonrasında %91 renk giderim verim

elde edilmiştir. Çalışmada sonucunda, katalizör ilave edilmeden de plazmanın yüksek verimler ile renk giderimi gerçekleştirdiği sonucuna varılmıştır.

Çalışmada farklı pH değerlerinin giderim verimine etkisinin araştırılması için metilen mavisi ve metil oranj renkleri için asidik, nötr ve alkali (sırası ile 5, 7 ve 11 pH' larda) koşullar çalışılmıştır. pH ayarlamaları için NaOH ve HCl çözeltileri kullanılmıştır. Metilen mavisi için 5, 7 ve 11 pH' larda sırası ile %98.5, %98.8, %98.7 verimler elde edilmiştir. Metil oranj için ise 5, 7 ve 11 pH' larda sırası ile %95, %97, %93 verimler elde edilmiştir. pH değişiminin, verimler açısından çok önemli bir fark oluşturmadığı gözlemlenmiştir. en yüksek verimin pH 7 değerinde olduğu gözlenmiştir.

Yapılan çalışmaların plazma temas öncesi ve sonrasında pH ve iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan tüm ölçümler için başlangıç pH' sına göre plazma sonrasındaki pH değerlerinin düştüğü görülmüştür. Yapılan literatür araştırmalarına göre, üretilen oksidan yoğunluğunun pH değerlerine bağlı olarak değiştiği ve bu nedenle deneyler sırasında devam eden reaksiyonların türünü gösterebileceğinden, plazma sonrası çözeltinin pH değişimini izlemenin önemli olduğu söylenebilir. Çalışmada yapılan tüm ölçümler için plazma sonrası iletkenlik değerleri başlangıç iletkenlik değerlerine göre daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Yapılan literatür araştırmalarına göre plazma deşarjının suda inorganik iyonları arttırdığını, bunun sonucunda da plazmanın sudaki iletkenliği arttırdığını söyleyebiliriz.

Çalışmada renkli atıksu denemesi için nar atıksu numunesi ile çalışılmıştır. Nar atıksuyu %100, %25, %10 ve %5 seyreltmelerde hazırlanmıştır ve plazma öncesi ve sonrası absorbans ölçümü yapılmıştır. Ham hali ile (%100) 660 nm' de plazma öncesi abs. değeri 0.395 iken plazma sonrasında 0.916 abs. olarak okunmuştur. Bu verilere bakarak plazmanın renkli meyve atıksularının rengini gidermede de etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışma kapsamında, plazmanın metilen mavisi, metil oranj çözeltileri ve nar atıksuyu için KOİ giderimine etkisi incelenmiştir. Sırası ile %98.4, %88.6, %83.7 KOİ giderim verimleri elde edilmiştir. Verimlere bakıldığında plazmanın özellikle meyve atıksularında, KOİ giderimi için oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Yapılan argon gazı denemesinde metilen mavisinde optimum şartlarda %97 giderim verimi sağlanmıştır. Argon gazına kıyasla oksijen gazı (%98.5) bu çalışmada daha iyi giderim verimlerine ulaşılmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarında, hidrojen peroksitin plazma deşarjı ile oluşan diğer radikallere göre daha uzun ömürlü olduğundan ve kirleticileri oksitlemede önemli rol oynadığından bahsedilmektedir. Bundan yola çıkılarak, çalışmada hidrojen peroksit oluşumu kitler ile incelenmiştir. Plazma teması ile yapılan deneylerde en iyi giderim verimleri için skaladaki en yüksek değer yani 25 mg/L hidrojen peroksit oluşumu görülmüştür.

Çalışma ile plazma teknolojisi kullanılarak renk arıtımının yanı sıra, oluşabilecek yan ürünlerin toksisitesi belirlenmiş, metilen mavisi ve metil oranj için toksisite araştırılması yapılmıştır. Yapılan test sonuçlarında metilen mavisi başlangıç çözeltisi için toksik birim değeri kök uzunluğu için 0.237, gövde uzunluğu için 0.194 olarak, metilen mavisi plazma sonrası numunesi için kök uzunluğu 0.253, gövde uzunluğu 0.306 olarak hesaplanmıştır. Metil oranj başlangıç çözeltisi için kök ve gövde uzunlukları sırası ile 0.227, 0.186 iken plazma sonrası için sırası ile 0.222 ve 0.181 olarak hesaplanmıştır. Toksik birim sınıflandırmasına göre bütün sonuçlar “Hafif Toksik” olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında plazmanın yüksek reaksiyon hızı ve enerji verimi ile sıvılarda renk ve KOİ gideriminde başarılı olduğu görülmüştür.

5.2 Öneriler

Günümüzde atmosferik basınçta üretilen plazmaların uygulamalarda etkin sonuçlar vermesi ve kurulumunun vakum plazması sistemlerinden daha kolay ve ekonomik olması, bu sistemlere olan ilgiyi büyük bir hızla arttırmaktadır. Bu nedenle atmosferik plazma sisteminin kurularak minimum kimyasal kullanımına imkân verecek şekilde kolay uygulanabilir, yeşil kimya çalışmalarına katkı sağlayacak, atık çamur sorunu oluşturmeyen bir sistemin kurulması sağlanmıştır. Laboratuvar ölçekli oluşturduğumuz plazma teknolojisinin ileriye yönelik olarak çevre mühendisliği ile alakalı alanlarda (membran filtrelerin temizlenmesi, adsorpsiyon ve desorpsiyon vb.) uygulanabilirliği ile literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının gerçekleştirilmesi ile yeni bir teknoloji olan plazmanın, arıtmada kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Çalışma, literatür araştırmalarına göre ülkemizde atmosferik plazmanın, su arıtımında kullanıldığı ilk çalışmadır.

Bu tez çalışması, son yıllarda gün geçtikçe artan yeşil kimya alanındaki uygulamalara, ileri oksidasyon (İOP) proseslerinde kullanılan kimyasalların azaltılması ve buna bağlı olarak çamur oluşumunun engellenmesi yönünde alternatif olması açısından katkıda bulunacaktır. Ayrıca kalıcı organik kirleticilerin giderimine yönelik plazma teknolojisi geliştirme çalışmalarının çevre mühendisliği alanında kimyasal kullanılmadan tek bir yöntemle arıtılabilirliğinin belirlenmesi açısından bu çalışma daha sonra geliştirilecek teknolojilere ışık tutmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdel-Fattah, E. (2019). Atmospheric Pressure Helium Plasma Jet And Its Applications To Methylene Blue Degradation. *Journal of Electrostatics*.
- Açıkel, S. M., & Kaygusuz, M. (2018, Kasım 01-03). Plazma Yüzey Modifikasyonu İle Tekstil Ve Derideki Uygulamalar. 6. *Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu*. İstanbul.
- Askarova, A. S., Karpenko, E. I., Messerle, V. E., & Ustimenko, A. B. (2005). Plasma Enhancement of Combustion of Solid Fuels. *Plenary Reports From The 4th International Symposium On Theoretical And Applied Plasma Chemistry*. Ivanovo, Russia.
- Attri, P., Yusupov, M., Park, J. H., Lingamdinne, L. P., Koduru, J. R., Shiratani, M., . . . Bogaerts, A. (2016). Mechanism And Comparison Of Needle-Type Non-Thermal Direct And İndirect Atmospheric Pressure Plasma Jets On The Degradation Of Dyes. *Scientific Reports*.
- Barrera-Diaz, C., Urena-Nunez, F., Campos, E., Palomar-Pardave, M., & Romero-Romo, M. (2003). A Combined Electrochemical-İrradiation Treatment Of Highly Colored And Polluted İndustrial Wastewater. *Radiation Physics and Chemistry*.
- Bozduman, F. (2012). Atmosferik Basınç Mikrodalga Plazmasının . *Yüksek Lisans Tezi*. Isparta.
- Bromberg, L., Cohn, D. R., & Rabinovich, A. (1995). Plasma Reformer-Fuel Cell System For Decentralized Power Applications. *International Association for Hydrogen Energy*.
- Chandana, L., Reddy, P. K., & Subrahmanyam, C. (2015). Atmospheric Pressure Non-Thermal Plasma Jet For The Degradationof Methylene Blue İn Aqueous Medium. *Chemical Engineering Journal*, 116-122.
- Chen, J., Du, Y., Shen, Z., Lu, S., Su, K., Yuan, S., . . . Feng, J. (2017). Non-Thermal Plasma And BiPO₄ İnduced Degradation Of Aqueous Crystal Violet. *Separation and Purification Technology*, 135-144.
- Chen, J., Feng, J., Lu, S., Shen, Z., Du, Y., Peng, L., . . . Zhang, A. (2018). Non-Thermal Plasma And Fe²⁺ Activated Persulfate İgnited Degradation Of Aqueous Crystal Violet: Degradation Mechanism And Artificial Neural Network Modeling. *Separation and Purification Technology*, 75-85.
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Miino, M. C., & Damiani, S. (2019). Treatments For Color Removal From Wastewater: State Of The Art. *Journal of Environmental Management*.
- Dojčinović, B., Roglic, G. M., Obradovic, B. M., Kuraica, M. M., Kostic, M. M., Nesic, J., & Manojlovic, D. D. (2011). Decolorization Of Reactive Textile Dyes Using Water Falling Film Dielectric Barrier Discharge. *Journal of Hazardous Materials*, 763-771.
- Erkuş, A., Oygün, E., Türkmenoğlu, M., & Aldemir, A. (2018). Boya Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- García, M. C., Mora, M., Esquivel, D., Foster, J. E., Rodero, A., Jimenez-Sanchidrian, C., & Romero-Salguero, F. J. (2017). Microwave Atmospheric Pressure Plasma Jets For Wastewater Treatment: Degradation Of Methylene Blue As A Model Dye. *Chemosphere*, 239-246.

- Gökkuş , Ö., & Çiner, F. (2010). Dispers Sarı 119 Ve Dispers Kırmızı 167 İçeren Atıksuların Fenton Oksidasyon Prosesi İle Renk Ve Koı Giderimlerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*.
- Güleç, A. (2011). Yüksek Frekans Atmosferik Basınç Plazma Sisteminin İncelenmesi. *Doktora Tezi*. Isparta.
- Huang, F., Chen, L., Wang, H., & Yan, Z. (2010). Analysis Of The Degradation Mechanism Of Methylene Blue By Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma. *Chemical Engineering Journal*, 250-256.
- Iervolino, G., Vaiano, V., & Palma, V. (2019). Enhanced Removal Of Water Pollutants By Dielectric Barrier Discharge Non-Thermal Plasma Reactor. *Separation and Purification Technology*, 155-162.
- Jiang, B., Zheng, J., Liu, Q., & Wu, M. (2012). Degradation Of Azo Dye Using Non-Thermal Plasma Advanced Oxidation Process In A Circulatory Airtight Reactor System. *Chemical Engineering Journal*.
- Kazemi, M., & Taghvaei, H. (2021). A Novel Multi Array Dielectric Barrier Discharge Plasma Gas Diffuser For Wastewater Treatment: The Role Of Reactive Species. *Separation and Purification Technology*.
- Keskin, O. (2017, Mayıs). Argon Plazma Jet Üretimi. *YÜKSEK LİSANS TEZİ*. Eskişehir.
- Kovac̆evic, D. B., Putnik, P., Dragovic´ -Uzelac, V., Pedisic, S., Jambrak, A. R., & Herceg, Z. (2016, January). Effects of cold atmospheric gas phase plasma on anthocyanins and color in pomegranate juice. *Food Chemistry*.
- Kumar, A., Skoro, N., Gernjak, W., & Puac, N. (2021). Cold Atmospheric Plasma Technology For Removal Of Organic Micropollutants From Wastewater—A Review. *THE EUROPEAN*.
- Liu, W., zhao, Q., Wang, T., Duan, X., Li, C., & Xiao , L. (2016). Degradation of Organic Pollutants Using Atmospheric Pressure Glow Discharge Plasma. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1011-1020.
- Magureanu, M., Bradu, C., Piroi, D., Mandache, N. B., & Parvulescu , V. (2013). Pulsed Corona Discharge for Degradation of Methylene Blue in Water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 51-64.
- Matinzadeh, Z., Shahgoli, F., Abbasi, H., Ghoranneviss, M., & Salem, M. K. (2017). Degradation Of Bromophenol Blue Molecule During Argon Plasma Jet Irradiation. *J Theor Appl Phys*, 97-102.
- Namal, O. Ö. (2017). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Proseslerin Araştırılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*.
- Pankaj, S. K., Wan, Z., Colonna, W., & Keener, K. M. (2017). Degradation Kinetics Of Organic Dyes İn Water By High Voltage Atmospheric Air And Modified Air Cold Plasma. *Water Science & Technology*, 567–574.
- Persoone, G., & Janssen, C. R. (1993). Freshwater Invertebrate Toxicity Test. *Handbook of Ecotoxicology*.
- Petasch, W., Kegel, B., Schmid, H., Lendenmann, K., & Keller, H. U. (1997). Low-Pressure Plasma Cleaning: A Process For Precision Cleaning Applications. *Surface and Coatings Technology*.
- Rahimpour, M., Taghvaei, H., Zafarnak, S., Rahimpour, M. R., & Raeissi, S. (2019). Post-Discharge DBD Plasma Treatment For Degradation Of Organic Dye İn Water: A Comparison With Different Plasma Operation Methods. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

- Rashid, M. M., Chowdhury, M., & Talukder, M. R. (2020). Textile Wastewater Treatment By Underwater Parallel-Multi-Tube Air Discharge Plasma Jet. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Reddy, P. K., & Subrahmanyam, C. (2012). Green Approach for Wastewater Treatment—Degradation and Mineralization of Aqueous Organic Pollutants by Discharge Plasma. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 11097–11103.
- Sanito, R. C., You, S.-J., & Wang, Y.-F. (2022, Şubat 15). Degradation of contaminants in plasma technology: An overview. *Journal of Hazardous Materials*.
- Sun, B., Aye, N. N., Gao, Z., Lv, D., Zhu, X., & Sato, M. (2012). Characteristics of gas-liquid pulsed discharge plasma reactor and dye decoloration efficiency. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 840-845.
- Taghvaei, H., Kondeti, V., & Bruggeman, P. J. (2019). Decomposition of Crystal Violet by an Atmospheric Pressure RF Plasma Jet: The Role of Radicals, Ozone, Near-Interfacial Reactions and Convective Transport. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 729-749.
- Teker, S. (2013). ORGANİZE SANAYİ BÖLGELERİ ATIKSULARINDAN RENK GİDERMEDE KULLANILAN METOTLARIN KARŞILAŞTIRILMASI. *ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS TEZİ*.
- Yamada, M., Wahyudiono, Machmudah, S., Kanda, H., & Goto, M. (2020). Nonthermal Atmospheric Pressure Plasma for Methylene Blue Dye Decolorization by Using Slug Flow Reactor System. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 985-1000.
- Zhou, R., Zhang, T., Zhou, R., Mai-Prochnow, A., Ponraj, S. B., Fang, Z., . . . Cullen, P. J. (2021). Underwater Microplasma Bubbles For Efficient And Simultaneous Degradation Of Mixed Dye Pollutants. *Science of the Total Environment*.

EK-5 MM başlangıç çözeltisi KOİ raporu.

	AB-0542-T
	RS2317701
	18.01.2023

NUMUNE BİLGİLERİ

Numune Numarası	SA2317893
Numune Alınma Tarihi	Müşteri tarafından
Numune Alınış Şekli	Müşteri Tarafından
Numune Geliş Şekli	Müşteri tarafından teslim edildi.
Numunenin Fiziksel Özelliği/Miktarı	CAM 300 ML
Numunenin Alındığı Yer	METİLEN MAVİSİ
Numuneyi Alma Metodu	Müşteri tarafından
Numuneyi Alan	Müşteri tarafından

NUMUNE ANALİZ SONUÇLARI

Parametreler	Birim	Analiz Sonuçları	Metot
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	352	SM 5220 C

(Numuneler laboratuvarımız tarafından alınmadığı için, numune almadan gelen ölçüm belirsizliği hesaplama dahil edilmemiştir. Analizi gerçekleştirilen parametreler için standartlara uygun koruma koşulları yapılmaması nedeniyle şartlı kabul yapılmış ve numune alındığı şekli ile deneye tabii tutulmuştur. Müşteri Tarafından beyan edilen bilgilerden kaynaklı oluşabilecek olumsuz durumlardan laboratuvarımız feragat eder.)

Çevre Koşulları

Hava Durumu	X	Açık		Yağış		Var	Hava Sıcaklığı -°C	Koordinatlar	E	
		Kapalı			X	Yok			N	



Bu rapor, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mührsüz raporlar geçersizdir. Sonuçlar sadece deneyi yapılan numunelere aittir. (This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid. The results belong to the tested sample.)

Bu rapor çevre mevzuatına ilişkin resmi işlemlerde kullanılamaz.

EK-6 MM plazma sonrası KOİ raporu.

	AB-0542-T
	RS2318181
	31.03.2023

NUMUNE BİLGİLERİ

Numune Numarası	SA2318340
Numune Alınma Tarihi	Müşteri tarafından
Numune Alınış Şekli	Müşteri Tarafından
Numune Gelış Şekli	Müşteri tarafından teslim edildi.
Numunenin Fiziksel Özelliği/Miktarı	CAM 200 ml
Numunenin Alındığı Yer	METİLEN MAVİSİ PLAZMA
Numuneyi Alma Metodu	Müşteri tarafından
Numuneyi Alan	Müşteri tarafından

NUMUNE ANALİZ SONUÇLARI

Parametreler	Birim	Analiz Sonuçları	Metot
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	<40	SM 5220 C

(Numuneler laboratuvarımız tarafından alınmadığı için, numune almadan gelen ölçüm belirsizliği hesaplamaaya dahil edilmemiştir. Analizi gerçekleştirilen parametreler için standartlara uygun koruma koşulları yapılmaması nedeniyle şartlı kabul yapılmış ve numune alındığı şekli ile deneye tabii tutulmuştur. Müşteri Tarafından beyan edilen bilgilerden kaynaklı oluşabilecek olumsuz durumlardan laboratuvarımız feragat eder.)

Çevre Koşulları

Hava Durumu	X	Açık	Yağış	Var	Hava Sıcaklığı -°C	Koordinatlar	E	
		Kapalı		X Yok			N	

Bu rapor, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz raporlar geçersizdir. Sonuçlar sadece deneyi yapılan numunelere aittir. (This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid. The results belong to the tested sample.)

Bu rapor çevre mevzuatına ilişkin resmi işlemlerde kullanılamaz.



EK-7 MO başlangıç çözeltisi KOİ raporu.

AB-0542-T	
RS2317700	
18.01.2023	

NUMUNE BİLGİLERİ	
Numune Numarası	SA2317892
Numune Alınma Tarihi	Müşteri tarafından
Numune Alınış Şekli	Müşteri Tarafından
Numune Geliş Şekli	Müşteri tarafından teslim edildi.
Numunenin Fiziksel Özelliği/Miktarı	CAM 300 ML
Numunenin Alındığı Yer	METİL ORANJ
Numuneyi Alma Metodu	Müşteri tarafından
Numuneyi Alan	Müşteri tarafından

NUMUNE ANALİZ SONUÇLARI			
Parametreler	Birim	Analiz Sonuçları	Metot
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	256	SM 5220 C

(Numuneler laboratuvarımız tarafından alınmadığı için, numune almadan gelen ölçüm belirsizliği hesaplamaya dahil edilmemiştir. Analizi gerçekleştirilen parametreler için standartlara uygun koruma koşulları yapılmaması nedeniyle şartlı kabul yapılmış ve numune alındığı şekli ile deneye tabii tutulmuştur. Müşteri Tarafından beyan edilen bilgilerden kaynaklı oluşabilecek olumsuz durumlardan laboratuvarımız feragat eder.)

Çevre Koşulları								
Hava Durumu	X	Açık	Yağış		Var	Hava Sıcaklığı -°C	Koordinatlar	E
		Kapalı						X

Bu rapor, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü raporlar geçersizdir. Sonuçlar sadece deneyi yapılan numunelere aittir. (This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid. The results belong to the tested sample.)

Bu rapor çevre mevzuatına ilişkin resmi işlemlerde kullanılamaz.

EK-8 MO plazma sonrası KOİ raporu.

	AB-0542-T
	RS2318183
	31.03.2023

NUMUNE BİLGİLERİ

Numune Numarası	SA2318338
Numune Alınma Tarihi	Müşteri tarafından
Numune Alınış Şekli	Müşteri Tarafından
Numune Geliş Şekli	Müşteri tarafından teslim edildi.
Numunenin Fiziksel Özelliği/Miktarı	CAM 200 ML
Numunenin Alındığı Yer	METİL ORANJ PLAZMA
Numuneyi Alma Metodu	Müşteri tarafından
Numuneyi Alan	Müşteri tarafından

NUMUNE ANALİZ SONUÇLARI

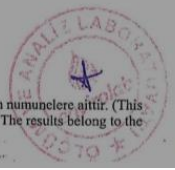
Parametreler	Birim	Analiz Sonuçları	Metot
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	41,6	SM 5220 C

(Numuneler laboratuvarımız tarafından alınmadığı için, numune almadan gelen ölçüm belirsizliği hesaplama dahil edilmemiştir. Analizi gerçekleştirilen parametreler için standartlara uygun koruma koşulları yapılmaması nedeniyle şartlı kabul yapılmış ve numune alındığı şekli ile deneye tabii tutulmuştur. Müşteri Tarafından beyan edilen bilgilerden kaynaklı oluşabilecek olumsuz durumlardan laboratuvarımız feragat eder.)

Çevre Koşulları

Hava Durumu	X	Açık	Yağış	Var	Hava Sıcaklığı -°C	Koordinatlar	E	
		Kapalı		X Yok			N	

Bu rapor, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü raporlar geçersizdir. Sonuçlar sadece deneyi yapılan numunelere aittir. (This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid. The results belong to the tested sample.)
 'Bu rapor çevre mevzuatına ilişkin resmi işlemlerde kullanılamaz.'



EK-9 Nar atıksuyu başlangıç numunesi KOİ raporu.

	AB-0542-T
	RS2317699
	18.01.2023

NUMUNE BİLGİLERİ

Numune Numarası	SA2317891
Numune Alınma Tarihi	Müşteri tarafından
Numune Alınış Şekli	Müşteri Tarafından
Numune Geliş Şekli	Müşteri tarafından teslim edildi.
Numunenin Fiziksel Özelliği/Miktarı	CAM 300 ML
Numunenin Alındığı Yer	NAR
Numuneyi Alma Metodu	Müşteri tarafından
Numuneyi Alan	Müşteri tarafından

NUMUNE ANALİZ SONUÇLARI

Parametreler	Birim	Analiz Sonuçları	Metot
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	65600	SM 5220 C

(Numuneler laboratuvarımız tarafından alınmadığı için, numune almadan gelen ölçüm belirsizliği hesaplama dahil edilmemiştir. Analizi gerçekleştirilen parametreler için standartlara uygun koruma koşulları yapılmaması nedeniyle şartlı kabul yapılmış ve numune alındığı şekli ile deneye tabii tutulmuştur. Müşteri Tarafından beyan edilen bilgilerden kaynaklı oluşabilecek olumsuz durumlardan laboratuvarımız feragat eder.)

Çevre Koşulları

Hava Durumu	X	Açık		Yağış		Var	Hava Sıcaklığı -°C	Koordinatlar	E	
		Kapalı			X	Yok			N	

Bu rapor; laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz raporlar geçersizdir. Sonuçlar sadece deneyi yapılan numunelere aittir. (This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid. The results belong to the tested sample.)

"Bu rapor çevre mevzuatına ilişkin resmi işlemlerde kullanılamaz."



EK-10 Nar atıksuyu plazma sonrası KOİ raporu.

	AB-0542-T
	RS2318182
	31.03.2023

NUMUNE BİLGİLERİ

Numune Numarası	SA2318339
Numune Alınma Tarihi	Müşteri tarafından
Numune Alınış Şekli	Müşteri Tarafından
Numune Geliş Şekli	Müşteri tarafından teslim edildi.
Numunenin Fiziksel Özelliği/Miktarı	CAM 200 ML
Numunenin Alındığı Yer	NAR NUMUNESİ PLAZMA
Numuneyi Alma Metodu	Müşteri tarafından
Numuneyi Alan	Müşteri tarafından

NUMUNE ANALİZ SONUÇLARI

Parametreler	Birim	Analiz Sonuçları	Metot
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	1024	SM 5220 C

(Numuneler laboratuvarımız tarafından alınmadığı için, numune almadan gelen ölçüm belirsizliği hesaplama dahil edilmemiştir. Analizi gerçekleştirilen parametreler için standartlara uygun koruma koşulları yapılmaması nedeniyle şartlı kabul yapılmış ve numune alındığı şekli ile deneye tabii tutulmuştur. Müşteri Tarafından beyan edilen bilgilerden kaynaklı oluşabilecek olumsuz durumlardan laboratuvarımız feragat eder.)

Çevre Koşulları

Hava Durumu	X	Açık	Yağış	Var	Hava Sıcaklığı -°C	Koordinatlar	E	
		Kapalı		X Yok			N	

Bu rapor, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü raporlar geçersizdir. Sonuçlar sadece deneyi yapılan numunelere aittir. (This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid. The results belong to the tested sample.)

Bu rapor çevre mevzuatına ilişkin resmi işlemlerde kullanılamaz.



EK-11 Atmosferik Basınçlı Plazma Sistemi deney düzeneği.



EK-12 UV-Vis Spektrofotometre cihazı.



EK-13 Metil Oranj plazma çalışması.



EK-14 Nar atıksu numunesi ile örnek plazma çalışması.

