

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİYANOBAKTERİ YOĞUNLUĞUNA ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esmâ ADANUR

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

EKİM 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİYANOBAKTERİ YOĞUNLUĞUNA ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esmâ ADANUR

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nurtaç ÖZ

EKİM 2023

Esmâ ADANUR tarafından hazırlanan “SİYANOBAKTERİ YOĞUNLUĞUNA ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması 04/10/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Tuğba ONGUN SEVİNDİK
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Nurtaç Öz (Danışman)
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Ömer Hulusi DEDE
	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “SİYANOBAKTERİ YOĞUNLUĞUNA ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

04/10/2023

Esma ADANUR



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ihtiyaç duyduğum her türlü bilgi ve deneyimi benimle paylaşan, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Nurtaç ÖZ'e ve diğer bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Deney çalışmalarımda, ihtiyacım olan her türlü desteği sağlayan arkadaşım Ayşe Gül TEKBABA'ya tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteklerinden güç aldığım sevgili annem Fatma ADANUR'a, babam Orhan ADANUR'a, hayatımda oldukları için kendimi şanslı saydığım kardeşlerime ve kıymetli dedem Hüseyin ADANUR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Esmâ ADANUR



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ixi
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Ağır Metaller	5
2.2. Bakır	6
2.3. Ağır Metallerin Sucul Ekosistem Üzerine Etkileri	6
2.4. Plastikler	8
2.5. Mikroplastikler	8
2.6. Polipropilen	9
2.7. Mikroplastiklerin Sucul Ekosistem Üzerine Etkileri	9
2.8. Siyanobakteriler	11
2.9. <i>Microcystis aeruginosa</i>	13
2.10. <i>Synechocystis sp.</i>	14
2.11. <i>Arthrospira platensis</i>	15
2.12. Serbest Radikaller	16
2.13. Malondialdehit (MDA)	16
2.14. Hidrojen peroksit (H ₂ O ₂)	17
2.15. İstatiksel Analizler	17
2.16. Literatür Çalışmaları	17
3. METERYAL VE METOD	21
3.1. Çalışmada Kullanılan Kültürlerin Eldesi	21
3.2. Hücre Kültürlerinin Hazırlanması	21
3.3. Uygulanan Ağır Metal Çözeltileri ve Mikroplastik Konsantrasyonları	22
3.4. Mikroorganizmaların Sayımı	23
3.5. Optik yoğunluk, Spektrofotometre Ölçümü	24
3.6. Klorofil- <i>a</i> Tayini	24
3.7. Askıda Katı Madde Tayini	24
3.8. Malondialdehit (MDA) Analizi	25
3.9. Hidrojen Peroksit (H ₂ O ₂) Analizi	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	27
4.1. Alglerin Kültür ve Gelişimi	27

4.1.1. <i>Microcystis aeruginosa</i> kültür ve gelişimi	27
4.1.2. <i>Synechocystis sp.</i> kültür ve gelişimi	27
4.1.3. <i>Arthrospira platensis</i> kültür ve gelişimi	28
4.2. Alg Kültürleri Üzerine Bakır Metalinin Etkileri	29
4.2.1. Bakır metalinin alg pH'ına etkisi	29
4.2.2. Bakır metalinin alglerin morfolojisine etkisi	30
4.2.3. Bakır metalinin alglerin hücre yoğunluğuna etkisi	31
4.2.4. Bakır metalinin alglerin optik yoğunluğuna etkisi	33
4.2.5. Bakır metalinin alglerin askıda katı madde miktarına etkisi	35
4.2.6. Bakır metalinin alglerin klorofil- <i>a</i> miktarına etkisi	37
4.2.7. Bakır metalinin alglerin MDA miktarına etkisi	39
4.2.8. Bakır metalinin alglerin H ₂ O ₂ miktarına etkisi	41
4.3. Alg Kültürleri Üzerine Bakır-Polipropilen Birleşik Etkileri	43
4.3.1. Bakır-Polipropilen karışımının alg pH'ına etkisi	43
4.3.2. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin hücre yoğunluğuna etkisi	43
4.3.3. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin optik yoğunluğuna etkisi	45
4.3.4. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin askıda katı madde miktarına etkisi	47
4.3.5. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin klorofil- <i>a</i> miktarına etkisi	49
4.3.6. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin MDA miktarına etkisi	51
4.3.7. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin H ₂ O ₂ miktarına etkisi	53
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	57
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

AKM	: Askıda Katı Madde
AÖF	: Anlamlı Önemli Fark
BG11	: Blue-Green Medium
DO	: Çözünmüş oksijen
EDTA	: Etilendiamintetraasetikası
L	: Litre
MDA	: Malondialdehit
mg	: Miligram
mL	: Mililitre
µm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
OD	: Optik Yoğunluk
pH	: Hidrojen konsantrasyonunun eksi logaritması
PP	: Polipropilen
ppm	: Milyonda bir birim
PVC	: Polivinilklorür
rpm	: Dakikadaki dönme hızı
SPSS	: Statistical Package for the Social Sciences
TBA	: Tiyoarbitürikasit
TCA	: Trikloroasetikasit
Tris	: Tris (Hidroksimetil) aminometan



SİMGELER

Cu	: Bakır
CuSO₄	: Bakır süfat
H₂O₂	: Hidrojen peroksit
HCl	: Hidrojen klorür
MgCO₃	: Magnezyum karbonat
NaOH	: Sodyum hidroksit



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. BG11 besiyeri içeriği	21
Tablo 3.2. Eser element karışımı.....	22
Tablo 3.3. Spirulina Medium besiyeri içeriği (Aiba ve Ogawa, 1977)	22
Tablo 3.4. Kültürlere uygulanan bakır ve mikroplastik konsantrasyonları.....	23
Tablo 4.1. Bakır metalinin alglerin hücre boyutuna etkisi.....	30





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. <i>Microcystis aeruginosa</i> mikroskop görüntüsü	13
Şekil 2.2. <i>Synechocysts sp.</i> mikroskop görüntüsü	14
Şekil 2.3. <i>Arthrospira platensis</i> mikroskop görüntüsü	16
Şekil 4.1. <i>Microcystis aeruginosa</i> kültürlerinin 30 günlük gelişim grafiği	27
Şekil 4.2. <i>Synechocysts sp.</i> kültürlerinin 30 günlük gelişim grafiği	28
Şekil 4.3. <i>Arthrospira platensis</i> kültürlerinin 30 günlük gelişim grafiği	29
Şekil 4.4. Bakır metalinin <i>Microcystis aeruginosa</i> hücre sayısına etkisi	31
Şekil 4.5. Bakır metalinin <i>Synechocysts sp.</i> hücre sayısına etkisi	32
Şekil 4.6. Bakır metalinin <i>Arthrospira platensis</i> hücre sayısına etkisi	32
Şekil 4.7. Bakır metalinin <i>Microcystis aeruginosa</i> OD 560 absorbansı üzerine etkisi	33
Şekil 4.8. Bakır metalinin <i>Synechocysts sp.</i> OD 560 absorbansı üzerine etkisi	34
Şekil 4.9. Bakır metalinin <i>Arthrospira platensis</i> OD 560 absorbansı üzerine etkisi	34
Şekil 4.10. Bakır metalinin <i>Microcystis aeruginosa</i> AKM miktarına etkisi	35
Şekil 4.11. Bakır metalinin <i>Synechocysts sp.</i> AKM miktarına etkisi	36
Şekil 4.12. Bakır metalinin <i>Arthrospira platensis</i> AKM miktarına etkisi	36
Şekil 4.13. Bakır metalinin <i>Microcystis aeruginosa</i> klorofil- <i>a</i> miktarına etkisi	37
Şekil 4.14. Bakır metalinin <i>Synechocysts sp.</i> klorofil- <i>a</i> miktarına etkisi	38
Şekil 4.15. Bakır metalinin <i>Arthrospira platensis</i> klorofil- <i>a</i> miktarına etkisi	38
Şekil 4.16. Bakır metalinin <i>Microcystis aeruginosa</i> MDA miktarına etkisi	39
Şekil 4.17. Bakır metalinin <i>Synechocysts sp.</i> MDA miktarına etkisi	40
Şekil 4.18. Bakır metalinin <i>Arthrospira platensis</i> MDA miktarına etkisi	40
Şekil 4.19. Bakır metalinin <i>Microcystis aeruginosa</i> H ₂ O ₂ miktarına etkisi	41
Şekil 4.20. Bakır metalinin <i>Synechocysts sp.</i> H ₂ O ₂ miktarına etkisi	42
Şekil 4.21. Bakır metalinin <i>Arthrospira platensis</i> H ₂ O ₂ miktarına etkisi	42
Şekil 4.22. Cu+PP karışımının <i>Microcystis aeruginosa</i> hücre yoğunluğuna etkisi	44
Şekil 4.23. Cu+PP karışımının <i>Synechocysts sp.</i> hücre yoğunluğuna etkisi	44
Şekil 4.24. Cu+PP karışımının <i>Arthrospira platensis</i> hücre yoğunluğuna etkisi	45
Şekil 4.25. Cu+PP karışımının <i>M. aeruginosa</i> OD560 absorbansı üzerine etkisi	46
Şekil 4.26. Cu+PP karışımının <i>Synechocysts sp.</i> OD560 absorbansına etkisi	46
Şekil 4.27. Cu+PP karışımının <i>Arthrospira platensis</i> OD560 absorbansına etkisi	47
Şekil 4.28. Cu+PP karışımının <i>Microcystis aeruginosa</i> AKM miktarına etkisi	48
Şekil 4.29. Cu+PP karışımının <i>Synechocysts sp.</i> AKM miktarına etkisi	48
Şekil 4.30. Cu+PP karışımının <i>Arthrospira platensis</i> AKM miktarına etkisi	49
Şekil 4.31. Cu+PP karışımının <i>Microcystis aeruginosa</i> klorofil- <i>a</i> miktarına etkisi	50

Şekil 4.32. Cu+PP karışımının <i>Synechocystis sp.</i> klorofil- <i>a</i> miktarına etkisi.....	50
Şekil 4.33. Cu+PP karışımının <i>Arthrospira platensis</i> klorofil- <i>a</i> miktarına etkisi .	51
Şekil 4.34. Cu+PP karışımının <i>Microcystis aeruginosa</i> MDA miktarına etkisi.....	52
Şekil 4.35. Cu+PP karışımının <i>Synechocystis sp.</i> MDA miktarına etkisi.....	52
Şekil 4.36. Cu+PP karışımının <i>Arthrospira platensis</i> MDA miktarına etkisi.....	53
Şekil 4.37. Cu+PP karışımının <i>Microcystis aeruginosa</i> H ₂ O ₂ miktarına etkisi.....	54
Şekil 4.38. Cu+PP karışımının <i>Synechocystis sp.</i> H ₂ O ₂ miktarına etkisi.....	54
Şekil 4.39. Cu+PP karışımının <i>Arthrospira platensis</i> H ₂ O ₂ miktarına etkisi	55



SİYANOBAKTERİ YOĞUNLUĞUNA ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Sucul ekosistemin ilk basamağı olan alglerin, ağır metal ve mikroplastik stresinden etkilenmesiyle ekosistemin tür kompozisyonu değişmektedir. Bu durum sonucunda besin zincirinin üst basamağındaki canlılar da etkilenmektedir. Bu çalışmada Polipropilen (PP) ve bakır metalinin farklı konsantrasyonlardaki (0.5, 1, 2.5, 5, 10 ppm) maruziyetin kültürlerin gelişimi üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla *Microcystis aeruginosa*, *Synechocystis sp.* ve *Arthospira platensis* kültürlerinden çalışma süresinde 15 gün boyunca 2 günde bir örnek alınarak hücre sayıları, hücre yoğunlukları, askıda katı madde miktarları, klorofil-*a* miktarları, malondialdehit ve hidrojen peroksit miktarları ölçülmüş; mikroskopik olarak hücre sayımları yapılmıştır.

Çalışma sonucunda, ağır metallerin incelenen alglere toksik etki ettiği ve alglerin büyüme ve gelişimini yavaşlattığı, hücre ölümlerine sebebiyet verdiği; düşük konsantrasyondaki (0.5 ppm) bakırın sonuçlar üzerinde fazla düşüş göstermediği fakat metal konsantrasyonu artışı ile tüm alg hücre sayılarında kontrole göre düşüş gözlemlendiği, özellikle *Synechocystis sp.* hücreleri boyutlarını sınırlandırdığı, *Microcystis aeruginosa* ve *Arthospira platensis*'te artan konsantrasyonla birlikte hücre çapının önemli ölçüde küçüldüğü tespit edilmiştir.

Sonuç olarak ağır metal ve mikroplastik maruziyetinde alglere uygulanan konsantrasyon miktarındaki artışa bağlı olarak klorofil-*a*, optik yoğunluk ve AKM miktarında kontrole göre azalmalar görülmüş; MDA ve H₂O₂ miktarında bakır ve polipropilen stresine bağlı artış gözlemlenmiştir.



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON CYANOBACTERIAL DENSITY

SUMMARY

With the rapid population growth, technology, development of agricultural and industrial activities, water quality deteriorates with the direct and indirect wastes of human origin reaching the aquatic ecosystem and as a result, it causes biological accumulation and eutrophication. Heavy metals and microplastics taken into the body with food and water accumulate in the tissues and affect the food chain by causing damage to vital activities.

The first of the activities that increase environmental pollution and cause deterioration of the ecological balance is the establishments containing heavy metals in their wastewater. Organizations that use various heavy metals such as lead, copper, cadmium, chromium, nickel, mercury, silver and arsenic in their processes are important for environmental health due to the permanent effects of these metals and are extremely toxic when exceeding a certain limit. Even low concentrations of copper, a metal used in various fields, have a toxic effect on the soil and aquatic ecosystem.

Metal pollution in aquatic environments is a major global environmental problem facing humanity today that is attracting a lot of attention. Copper (Cu) and zinc (Zn) are among the most important elements in the metabolic processes of living organisms. Copper is a cofactor in various redox reactions for many metalloenzymes in biological metabolic activities, but excess copper adversely affects the growth of microalgae, can lead to cell death while causing photosynthetic system damage, inhibition of cell growth, and tissue damage in organisms.

Plastics consist of a wide variety of long-chain polymeric materials obtained from different sources such as coal, oil and natural gas, which have various applications in everyday life and industry. Plastic waste adversely affects life on Earth through their unwanted accumulation in landfills, leaching into the soil, increasing greenhouse gas emissions, etc. Its ubiquitous presence and persistence in the aquatic environment is of concern as they pose a growing threat to marine organisms and ecosystems. Microplastics also cause decreased growth, inhibition of fertility, altered oxygen consumption, decreased life expectancy, limited nutritional capacity and increased activity of antioxidant-related enzymes. It is known that plastics, especially in the form of microplastics, interfere with the chemical interaction between marine organisms and cause intrinsic toxicity by absorbing persistent organic pollutants as well as pathogens. Since the complexity of the environmental environment plays an important role in the kinetics of biodegradation, biodegradation by microorganisms largely depends on the individual or synergistic energy of different environmental elements on the polymer.

Even if microalgae do not have a direct effect on the degradation of plastic, their presence may be important in determining the presence of bacteria that break down other hydrocarbons, and that diatoms can serve as an important habitat for such microorganisms, while at the same time biocontamination of large surfaces protects the plastic from UV radiation and processes photodegradation. It has been suggested that it may have the opposite effect by delaying

The aim of this study is; to contribute to the studies carried out to determine the effects of microplastic and heavy metal stress on the aquatic ecosystem. Therefore in order to observe the effects of exposure of polypropylene (PP) and copper metal at different concentrations (0.5, 1, 2.5, 5, 10 ppm) on the development of cultures, *Microcystis aeruginosa*, *Synechocystis sp.* and *Arthrospira platensis* cultures were sampled every 2 days during the study period and spectrophotometric cell densities, chlorophyll-*a* amounts, suspended solids, malondialdehyde and hydrogen peroxide amounts and microscopic cell counts were performed for 15 days.

At the beginning of the negative effects caused by heavy metals in algae, the vitality activities of the organism and the metal toxicity applied in the studies with algae; it has been reported to depend on the type of metal, the concentration of the metal in the environment, the chemical structure of the metal, the tolerance of the organism, its response to metal interaction, and the type of algae. In our study, it was observed that the amount of chlorophyll-*a*, cell density, optical density, MDA and H₂O₂ of all three algae species were affected to different degrees due to copper heavy metal.

In the literature, heavy metals inhibit the growth of algae, causing disruption of the lag phase of growth. That the growth in increased concentrations of heavy metals caused a decrease in the rate of photosynthesis and the amount of chlorophyll-*a*, and that this may be because the toxic effect of heavy metals had inhibited chlorophyll-*a*; For this reason, it is stated that growth stops by inhibiting cell division in the algae. The decrease in chlorophyll-*a* content can have two reasons: first, the accumulation of intracellular reactive oxygen species disrupts the cell structure and blocks the synthesis of chlorophyll; Secondly, microplastics have a large surface area and strong adsorption ability, and microalgae and microplastics are suitable for hetero-aggregates of different sizes, neutralizing algae. During the presented 15-day study, cell densities decreased with increased copper concentration in *Microcystis aeruginosa* and *Arthrospira platensis* algae, while no significant decrease in cell density of *Synechocystis sp.* was observed.

In polypropylene copper application, a further decrease in the number of cells was observed at the PP + 0.5 ppm Cu concentration, which is the lowest in *Microcystis aeruginosa* and *Arthrospira platensis* algae, and the cell numbers in *Synechocystis sp.* increased compared to the control.

Microplastics in culture can have shading effects that reduce light intensity and algal photosynthesis. Microplastics can also physically damage algae cells by increasing osmotic pressure and altering their biocomponent composition (including carbohydrate, lipid and protein levels). Polymer type and size also contribute to algae toxicity and can have a direct effect on its distribution across the water column, leading to sedimentation or buoyancy. A significant decrease was observed in OD560 and

chlorophyll-a measurements in three algae species exposed to copper and polypropylene copper dual applications with increasing concentration compared to the control group.

Microcystis aeruginosa, *Synechocystis sp.* and *Arthrospira platensis* algae, the decrease in chlorophyll-a due to copper and microplastic effects may be due to the failure of enzymes responsible for chlorophyll-a biosynthesis, disruption of the biosynthesis process or breakdown of chlorophyll.

In all cultures where copper was applied, the rapid decrease was at a concentration of 0.5 ppm, but the lowest value was measured at a concentration of 10 ppm. While there was a decrease in the amount of AKM of *Microcystis aeruginosa* treated with copper compared to the control, there was no significant decrease in *Synechocystis sp.* and *Arthrospira platensis* samples and the lowest amount of biomass was seen at a concentration of 5 ppm. In dual practice, a decrease in the amount of AKM was observed with increasing concentration in all algae cultures.

Malondialdehyde (MDA) is the effective end product of oxidative lipid peroxidation. It is used to understand the level of oxidative damage. An increase in the amount of MDA in the microorganism means an increase in the amount of free radicals. In our study, the amount of MDA of *Microcystis aeruginosa* and *Arthrospira platensis* cultures applied to copper metal was determined at concentrations of 1, 2.5, 5 and 10 ppm; A statistically significant increase in concentrations of 0.5, 1, 5 ppm was observed in *Synechocystis sp.* cultures. A positive relationship was observed between changes in the amount of MDA and the amount of hydrogen peroxide in all algae cultures and stress factors.

In the dual application of polypropylene and copper, the amount of MDA of *Microcystis aeruginosa* algae cultures increased with increasing concentration; In *Synechocystis sp.* and *Arthrospira platensis* algae, the highest amount of MDA was measured in application with polypropylene and 2.5 ppm copper, while the lowest amount was observed in polypropylene and 1 ppm concentration.

As a result of the study, it was determined that heavy metals had a toxic effect on the algae examined and slowed the growth and development of the algae and caused cell death. The presence of hydrogen peroxide and malondialdehyde products resulting from enzyme activities and their increase due to heavy metal concentration is also an indication that copper metal affects the metabolic balance within the cell.



1. GİRİŞ

Çevre; insanoğlu ve bütün canlıların yaşamı boyunca etkileşimde bulundukları, organizmaların davranış ve gelişimini etkileyen biyolojik, fiziksel ve sosyal bileşenlerin oluşturduğu doğal bir ortamdır.

Hızlı nüfus artışı, teknoloji, tarım ve sanayi faaliyetlerinin gelişmesiyle birlikte insan kaynaklı doğrudan ve dolaylı oluşan atıkların sucul ekosisteme ulaşmasıyla su kalitesi bozulmakta ve bunun sonucunda da, biyolojik birikim ve ötrofikasyona sebep olmaktadır. Besin ve su ile bünyeye alınan ağır metal ve mikroplastikler dokularda birikir ve yaşamsal aktivitelerde zarara sebep olarak besin zincirini etkiler.

Çevre kirliliğini artıran ve ekolojik dengenin bozulmasına sebep olan faaliyetlerin ilki, atıksularında ağır metal içeren kuruluşlardır. Süreçleri gereği kurşun, bakır, kadmiyum, krom, nikel, civa, gümüş ve arsenik gibi çeşitli ağır metaller kullanan kuruluşlar, bu metallerin kalıcı tesirlerinden dolayı çevre sağlığı için önem taşımaktadır ve belirli bir sınırı aşınca da son derece toksiktir (Özdemir, 2008). Çeşitli alanlarda kullanılan bir metal olan bakırın düşük konsantrasyonları dahi toprak ve su ekosistemi için toksik etki oluşturur.

Plastikler, kömür, petrol ve doğal gaz gibi farklı kaynaklardan elde edilen, günlük yaşamda ve endüstride çeşitli uygulamalara sahip çok çeşitli uzun zincirli polimerik maddelerden oluşur. Plastik atıklar, düzenli depolama alanlarında istenmeyen birikimleri, toprağa sızmaları, artan sera gazı emisyonları vb. yollarla dünyadaki yaşamı olumsuz yönde etkiler. Su ortamında her yerde bulunması ve kalıcılığı, deniz organizmaları ve ekosistemler için artan bir tehdit oluşturdıkları için endişe vericidir (Kamari ve ark., 2016). Özellikle mikroplastik formdaki plastiklerin deniz organizmaları arasındaki kimyasal etkileşime müdahale ettiği, patojenlerin anı sıra kalıcı organik kirleticileri emerek içsel toksisiteye neden olduğu bilinmektedir. Çevresel ortamın karmaşıklığı biyobozunma kinetiğinde önemli bir rol oynadığından, mikroorganizmalar tarafında biyolojik bozunma büyük ölçüde farklı çevresel elementlerin polimer üzerindeki bireysel veya sinerjistik enerjisine bağlıdır.

Her ortamın özellikleri önemli ölçüde farklılık gösterir; bu nedenle hücre üzerine etkinin hızı kuru bir ortamda, nemli bir havada, çöplükte, kompostta veya deniz ortamında yapısal homojenlikleri ve yeni fonksiyonel grup oluşumunu etkiler. Ortamdaki nemin varlığı plastik polimerinin çözünürlüğündeki artışa sebep olmakta ve bu sebeple su ortamında daha hızlı yayılmasına ve sucul ekosistem üzerine daha hızlı etki etmesine sebep olur (Amobonye ve ark., 2021). Mikroplastikler aynı zamanda, büyümenin azalmasına, doğurganlığın engellenmesine, oksijen tüketiminin değişmesine, yaşam süresinin azalmasına, sınırlı beslenme kapasitesi ve antioksidanla ilgili enzimlerin aktivitesinin artmasına neden olur.

Sucul ekosistemde primer üretici olan ve besin zincirinin ilk halkasını oluşturan algler, fitoplanktonik organizmalardır ve fotosentez yoluyla kendi besinini üreterek çözünmüş oksijen oranının ve sudaki besin değerinin yükselesini sağlamaktadırlar (Round, 1973). Algler, su yaşamının temel bileşenleridir; karbon ve diğer elementlerin döngüsünde, besin ağı üretiminde ve daha geniş ekosistem işlevlerinde oldukça önemli roller oynarlar. Alg büyüme dinamikleri karmaşıktır ve besin kaynağına (azot, fosfor vb.), abiyotik faktörlere ve güneş radyasyonu, su sıcaklığı, dikey su sütunu stabilitesi ve gelgitler ve akıntılar gibi hidro-meteorolojik koşullara bağlı olan fotosentetik üretimi içerir. Çözünmüş oksijen (DO) gibi temel su kalitesi göstergeleri alglerle yakından bağlantılıdır. Belirli çevresel koşullar altında, algler son derece yüksek konsantrasyonlara kadar büyüebilir (alg patlamaları) ve suyun birçok yararlı kullanımına müdahale edebilir. Zararlı alg patlamalarının etkisi, şiddetli DO azalması nedeniyle büyük balık ölümlerinden besin zincirini kirleten toksinlere kadar değişebilir. Alg çiçeklerinin oluşumunu belirleyen bir dizi etkileşimli fiziksel ve biyolojik faktör vardır. Son yıllarda, küresel iklim değişikliği ve insan faaliyetleri alg patlamalarını şiddetlendirmiştir (Lee ve ark., 2023).

Her yerde bulunan mikroplastik ve ağır metallerin, mikroalglerin hücre büyümesini inhibe etme ve hatta hücre hasarına neden olma potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir (Hamed ve ark., 2017; Prata ve ark.,2018). Özellikle bakır, fotosentetik türlerin gelişimi için gerekli bir eser elementtir. Bununla birlikte, yüksek bakır konsantrasyonu hücre büyümesini desteklemek yerine farklı derecelerde metale duyarlılık gösterebilen çoğu mikroalg türü için toksiktir.

Bakır metali ve Polipropilen mikroplastığının; *Microcystis aeruginosa*, *Arthrospira platensis* ve *Synechocystis sp.* gibi çeşitli siyanobakteri türleri üzerine tek ve birleşik olarak uygulanması sonucu etkileri araştırılacaktır. Bu tez çalışmasında siyanobakterilerin spektrofotometrik hücre yoğunlukları, klorofil-*a* ve biyokütle miktarları ve mikroskobik olarak hücre sayımları yapılacak; malondealdehit (MDA) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) analiz edilecektir.





2. GENEL BİLGİLER

2.1. Ağır Metaller

Ağır metaller, genellikle bakır (Cu), demir (Fe), arsenik (As), krom (Cr), kadmiyum (Cd), cıva (Hg), çinko (Zn), kurşun (Pb), gümüş (Ag) içeren, yoğunluğu 5 g/cm³'ten fazla metaller ve metaloidler için kullanılan terimdir. Fosil yakıt yakma, madencilik, galvanik kaplama, boya ve pigment üretimi, gübreler ve diğer endüstriyel faaliyetler gibi insan faaliyetlerinde yaygın olarak yer alırlar ve daha sonra günlük olarak atık su veya diğer yollarla çevreye büyük miktarlarda salınır. Biyolojik olarak parçalanamayan özellikleri nedeniyle, ağır metaller doğada kalıcı olma eğilimindedir ve besin zincirinde ciddi çevre ve sağlık sorunlarına neden olan biyolojik birikime yol açar (Chang ve Leong, 2020).

Ağır metaller, çamur kullanımı, belediye kompostu, pestisit kullanımı, gübreler, endüstriyel atık yakma fırınlarından kaynaklanan emisyonlar, araç egzozları, metalli kayaların veya madenlerin kalıntıları ve farklı endüstrilerdeki diğer eritme işlemleri nedeniyle ortamda birikmektedir (Pandey ve ark., 2016).

Ağır metaller bitkilere su alımı yoluyla verilir ve daha sonra hayvanlar tarafından alınır. Bu bitki ve hayvan bazlı ürünlerin yutulması, zar zor metabolize oldukları için insanlarda ağır metal birikiminin ana kaynağıdır. Ağır metaller, tüketici ve endüstriyel atıklardan sızarak su kaynaklarını (göller, nehirler, akarsular ve yer altı suları) kirletebilir; asit yağmuru, toprakta hapsolmuş ağır metalleri serbest bırakarak bu süreci yoğunlaştırır. Böylece, farklı noktasal ve noktasal olmayan kaynaklardan gelen çeşitli ağır metallerin birikimi sadece organizma düzeyinde (biyotik) değil; ama aynı zamanda bu metal kirleticiler için nihai olarak lavabo görevi gören toprak ve suda da bulunur.

Ağır metaller ve bileşikleri, çok düşük konsantrasyonlarda bile oldukça toksik, kanserojen, mutajenik ve teratojeniktir. Bu ağır metallerin doğrudan teması, solunması ve yutulması, insan fiziksel ve zihinsel sağlığı için ciddi tehditler oluşturmakta, mutasyonlara ve genetik hasara neden olmakta, merkezi sinir sistemine zarar vermenin yanı sıra kanser riskini artırmaktadır.

2.2. Bakır

Evsel ve endüstriyel faaliyetlerden kıyı ortamlarına atılan atıksularda bol miktarda bulunan bakır, en çok çalışılan metallerden biri olmuştur (Moenne ve ark., 2016). Bakır, metal temizleme ve kaplama banyoları, kağıt karton fabrikaları, odun hamuru, boyalar ve pigmentler, gübre endüstrisi ve baskılı devre kartı vb. birçok endüstride yaygın kullanımı mevcuttur. Bakır birikimi insan vücudunda karaciğer ve beyin hasarına, mide rahatsızlığı ve ülser, deri ve kalp hastalıklarına neden olabilir (Gao ve ark., 2014).

Bakır temel bir mikro besindir ve temel olarak elektron akışına katılan ve redoks reaksiyonlarını katalize eden birkaç enzimin bir bileşenidir (Hou ve ark., 2007).

Serbest Cu^{+2} veya hidratlı formlar ($\text{Cu}^{+2} \cdot \text{H}_2\text{O}$), yüksek birikim mevcudiyetlerinden dolayı deniz organizmaları için en zehirli Cu türleri olarak kabul edilir. Deniz suyundaki metalik iyonların fizikokimyasal özellikleri, pH, sıcaklık, tuzluluk, redoks potansiyeli, biyolojik aktivitelerden elde edilen ürünler ve çözünmüş organik madde gibi çevresel özelliklerden etkilenir. Serbest Cu^{+2} türleri, organik madde ile kompleks oluşturma kapasitelerinin bir sonucu olarak, kıyı sularında çok düşük konsantrasyonlarda bulunurlar (Farina ve ark., 2004).

2.3. Ağır Metallerin Sucul Ekosistem Üzerine Etkileri

Ağır metaller doğal olarak yer kabuğunda çeşitli seviyelerde bulunur. Belediye alanlarının atıkları, aşırı böcek ilacı, gübre kullanımı, fosil yakıtların yakılması, elektro kaplama fabrikaları, metalli cevherlerin madenciliği, deri üretim endüstrileri gibi endüstriler tatlı su ve deniz ekosistemlerine ithal edilen ağır metal iyonları en önemli kirli kaynaklar arasındadır; metallerin ve metaloidlerin ekosistemlerin çeşitli bileşenlerine daha hızlı salınmasına yol açar.

Su ortamlarındaki metal kirliliği, günümüzde insanlığın karşı karşıya olduğu ve çok dikkat çeken önemli bir küresel çevre sorunudur. Bakır (Cu) ve çinko (Zn), canlı organizmaların metabolik süreçlerindeki en önemli elementler arasındadır. Cu, biyolojik metabolik aktivitelerdeki birçok metaloenzim için çeşitli redoks reaksiyonlarında bir kofaktördür, ancak aşırı Cu, mikroalglerin büyümesini olumsuz

etkiler, fotosentetik sistem hasarına, hücre büyümesinin inhibisyonuna ve organizmalarda doku hasarlarına sebep olurken hücre ölümüne yol açabilir (Zarei ve ark., 2022, Li ve ark.,2023).

Bakır (Cu), manganez (Mn), demir (Fe), çinko (Zn) ve nikel (Ni) gibi birçok metal hücreler için gerekli olmasına rağmen, yüksek konsantrasyonlarda toksiktirler. İster doğal kökenli ister antropojenik aktivite olsun, daha yüksek konsantrasyonlardaki metaller toprak mikroflorası için toksik hale gelebilir. Ağır metal toksisitesinin derecesi, metalik elemente ve topraktaki biyoyararlanımına bağlıdır. Ağır metal biyoyararlanımı, metal konsantrasyonu, nem ve toprak pH'ı gibi abiyotik faktörlerin ve metal serbest bırakan mikrofloranın varlığı gibi biyotik faktörlerin bir fonksiyonudur. Zn, Cu ve Mn gibi çeşitli metaller bitkiler için düşük konsantrasyonlarda gereklidir, ancak artan konsantrasyonlarda toksik hale gelir, ancak diğer metallerin canlı organizmaların gelişimi için gerekli olduğu hiçbir zaman gösterilmemiştir ve çok düşük konsantrasyonlarda bile toksiktir (Pandey ve ark., 2016).

Bakır, çinko, demir, molibden ve vanadyum gibi metaller, süperoksit dismutaz, sitokrom c, sitokrom c oksidaz, plastosiyanin, askorbatoksidaz, lakkaz ve diğer redüktazlar gibi önemli enzimlerin ve proteinlerin kofaktörleri olarak eser miktarlarda elzemdir ancak, belirli eşik konsantrasyonlarının ötesinde, temel metaller toksik hale gelebilir ve hayatta kalmayı tehdit edebilir (Moenne ve ark., 2016).

Algler, enzimatik süreç ve hücre metabolizması için eser elementler olarak bakır (Cu), bor (B), demir (Fe), molibden (Mo), kobalt (Co), manganez (Mn) ve çinko (Zn) gibi ağır metalleri tüketir. As, Cd, Cr, Pb ve Hg gibi diğer ağır metaller algler için toksik olsa da düşük toksik ağır metal konsantrasyonları alglerin büyümesini ve metabolizmasını uyarabilir (Chang ve Leong, 2020). Bazı siyanobakteriyel türler, ağır metal stresine karşı toleransları nedeniyle ağır metallerle kirlenmiş suda doğal olarak büyüyebilirler. Ağır metaller dışında mikroalgler, atık sudaki kirleticilerle kompleksler oluşturabilen aktif bağlanma bölgelerine sahip reaktif gruplara sahiptir. Bu topaklaşmaya yol açar ve ardından hem toplam çözünmüş katıların (TDS) hem de toplam askıda katıların (TSS) içeriğini azaltır.

2.4. Plastikler

Plastikler, plastisite özelliği sergileyen sentetik organik polimerlerin çoğunu kapsayan genel bir isimdir. Bu ürünler birçok avantaj sunar: ucuzdurlar, suya ve korozyona dayanıklıdırlar, kimyasal olarak inerttirler, kolayca kalıplanırlar ve iyi termal ve elektrik yalıtım özellikleri sergilerler. Plastikler kararlı bir kimyasal yapıya ve özelliklere sahip olmalarına rağmen, büyük plastikler dalgalara, hava koşullarına ve ultraviyole ışınlarına maruz kaldıklarında küçük parçalara ayrılırlar.

Polietilen tereftalat (PET), polipropilen (PP), polistiren (PS), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polivinil klorür (PVC), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), poliamid (PA) ve poliüretan (PUR) küresel plastik üretiminin %90'ını oluşturan plastiklerdir (Ansari ve ark., 2021). Bu polimerler çeşitli elementler (karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen, silikon ve klorür vb.) içerir ve istenen özellikleri elde etmek için diğer kimyasal katkı maddeleri uygulanır.

Genellikle, plastik döküntülerin üç ana sınıfa ayrılabilceği kabul edilmektedir: (a) makroplastikler, 5 mm'den büyük parçalar; (b) mikroplastikler, 5 mm ile 100 nm arasındaki parçalar ve (c) nanoplastikler 100 nm'den küçük plastik parçalar (Karalija, ve ark., 2022).

2.5. Mikroplastikler

5 mm'den küçük boyut veya aerodinamik çaplara sahip mikroplastikler iki kategoriye ayrılır (Zhang ve ark., 2021). Birincil mikroplastikler, küçük olacak şekilde tasarlanmış plastik parçalardır ve kişisel bakım ürünlerinde veya kozmetiklerde kullanılan halkalar (parıltı ve mikroboncuklar dahil) olarak üretilir. İkincil mikroplastikler, endüstriyel hammadde olarak kullanılan reçine parçacıkları, büyük plastiklerin mekanik parçalanması ve foto oksidatif süreçleri (yol aşınması, lastik aşınması ve filmler vb.) yoluyla türetilen plastik parçacıklardır (Salama ve ark., 2022; Lewis ve ark., 2020).

Mikroplastiklerin toprak-bitki sistemi ile etkileşimleri, gıda kirliliği ve insan sağlığı ile yakından ilgili önemli konulardan biridir. Mikroplastikler ya doğrudan üretilir ya da daha büyük plastiklerin zaman içinde parçalanmasından kaynaklanır. Her yıl su ekosistemlerine salınan toplam mikroplastiklerin %21'i birincil mikroplastikleri oluştururken, geri kalan %79'u ikincil mikroplastikleri oluşturur

Genel olarak, mikroplastiklerin şekil türleri lifler, parçalar, filmler, tabakalar, köpükler, küreler, çizgiler, peletler vb. olarak ayrılabilir. Ancak, farklı araştırmacıların gözlemlenen şekil türleri hakkında farklı görüşleri vardır. Mikroplastiklerin renkleri; renkli, şeffaf, kırmızı, sarı, mavi, yeşil, beyaz ve siyah olarak renk sınıflandırmalarına ayrılmıştır. Ek olarak, mikroplastiklerin çeşitli ve düzensiz şekillerinden dolayı, mikroplastik boyutu genellikle ölçüm hattının toplam uzunluğu ve enkazın maksimum çapı gibi plastik parçacıkların maksimum boyutuna göre tanımlanmıştır (Fan ve ark, 2022).

2.6. Polipropilen

Polipropilen, propilen gazının polimerizasyonu yoluyla oluşturulur. Petrol hidrokarbonlarının ve propanın yüksek sıcaklıkta parçalanması sonucu elde edilir. Yüksek gaz ve su geçirgenliği direnci, mekanik özellikler, alev direnci, yüksek ısı bozulma sıcaklığı ve diğerleri dahil olmak üzere mükemmel özelliklere sahip yaygın bir termoplastik polimerdir (Koerner ve ark.,2018; Lee ve Bee, 2023).

Polipropilen, ev eşyaları, etiketleme, paketlenme, tekstil ve akü gibi otomobil parçaları vb. gibi çok sayıda uygulamada kullanılır. Kimyasal formülü C_nH_{2n} dir. Propilen monomerinden elde edilen çoğu solvent, asit ve baza karşı dayanıklı ve dirençli bir polimerdir (Rani ve ark., 2023).

Kendine özgü moleküler özellikleri ve üretiminde kullanılan katkı maddeleriyle düzeyin ayarlanabilme olanağı polipropilenin birçok alanda uygulanabilmesini sağlar. Örneğin statik olmayan katkı maddelerinin ilavesi polipropilen yüzeylerin kir ve toza karşı dayanabilmesini sağlar. Polipropilende, birçok boyama tekniği kullanılabilir. Polipropilen parçalara yüzey kaplama yapılarak boyaların tutunması kolaylaştırılabilir.

2.7. Mikroplastiklerin Sucul Ekosistem Üzerine Etkileri

Mikroplastikler hava, su ve toprak gibi farklı çevresel ortamlarda dağılır, küçük parçacık boyutuna, geniş özgül yüzey alanına ve geniş dağılıma sahiptir ve doğal ortamda uzun süre varlığını sürdürür. Bu nedenle mikroplastikler, kalıcı organik kirleticiler ve ağır metaller gibi diğer kirleticilerin önemli taşıyıcıları olarak bilinir. Deniz ekosistemlerinde bitki yaşamı üzerindeki etkileri bağlamında plastik kirliliğinin en büyük etkisi fitoplankton içeren alglerde gözlemlenebilmektedir (Karaliya, ve

diğerleri, 2022). Midye, zooplankton ve balık gibi organizmalar tarafından kolayca yutulmakta ve bu tür hayvanların boğulmasına ve hatta ölümüne neden olabilmektedir. Bu sebeple mikroplastiklerin gıda zincirindeki biriken etkileri, sonunda insan sağlığına öngörülemeyen zararlara ve ekosistem için potansiyel risklere neden olacaktır

Su ekosistemlerinde mikroplastik konsantrasyonlarının artması beklenmekte ve bu da bunların toksik etkilerini anlamak için artan bir çabaya yol açmaktadır. Organizmalardaki toksisite deneyleri, mikroplastiklerin oksidatif strese, bağışıklık sisteminin bozulmasına ve zindelikte genel düşüşe (örn. hayatta kalma ve doğurganlığın azalması) neden olma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Mikroplastikler ilk olarak deniz ortamında bulunmasına rağmen daha önceki çalışmalar okyanuslardaki mikroplastiklerin esas olarak karadan türetildiğini ifade etmiştir. Ayrıca nehirler de mikroplastiklerin iç bölgelerden nehir ağızlarına ve okyanuslara taşınmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle birçok bilim insanı iç suların mikroplastiklerin çevrede taşınması ve birikmesi için çok önemlidir (Fan ve ark., 2022).

Mikroplastiklerin küçük boyutu, daha büyük boyutlu plastik parçacıklara kıyasla alg hücrelerinin hayatta kalmasını daha fazla tehlikeye atar çünkü küçük boyutlu parçacıklar, aynı tip mikroplastiklerin daha büyük boyutlu parçacıklarına kıyasla daha yüksek düzeyde toksik kimyasallara maruz kalır (Sjollema ve ark., 2016).

Mikroplastikler doğrudan fiziksel hasara, besinlerin tükenmesine, artan ozmotik basınca ve toksik kimyasalların salınmasına ve mikroalglerde morfolojik değişikliklere (belirsiz pirenoid, hücre duvarından ayrılmış plazma, deforme olmuş tilakoidler, hücre duvarı kalınlaşması) neden olabilir (Prata ve ark., 2019).

Çevredeki konsantrasyonları, polimer tipi, boyutu, katkı maddelerinin varlığı, yüzey kimyası ve yükü dahil olmak üzere mikroplastiklerin toksisitesini etkileyen birkaç faktör vardır. Mevcut literatürde test edilen konsantrasyonların çoğu, çevrede bulunanları büyük ölçüde aşmaktadır. Düşük ppm aralığındaki konsantrasyonlardaki mikroplastikler büyümeyi engelleyerek, klorofil ve fotosentezi azaltarak, oksidatif stresi tetikleyerek, morfolojide değişikliklere neden olarak ve heteroagregatların üretimini teşvik ederek mikroalgler üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bununla birlikte, mikroalgler adaptif tepkiler yoluyla bu değişikliklerden kurtuluyor gibi görünmektedir ve mevcut çevresel konsantrasyonların zarar vermesi pek olası değildir.

Bununla birlikte, mikroplastikler, mevcut besinleri azaltarak, birincil tüketicileri engelleyerek veya bir substrat görevi görerek mikroalg popülasyonlarını rahatsız edebilir. Tüm bu değişiklikler, mikroplastiklerin polimer tipi, boyutu ve yüzey yükü gibi hala iyi anlaşılmayan ve bu nedenle daha fazla araştırma gerektiren spesifik özelliklerine bağlıdır.

Mikroplastikler, hidrofobiklikleri, geniş spesifik yüzey alanları ve inorganik ve organik kirleticileri ve zararlı mikroorganizmaları biriktirme eğilimleri nedeniyle dikkat çekmiştir. Mikroplastikler, toksik maddeleri tutar ve taşır ve bu nedenle organizmalar tarafından alındığında yaşam üzerinde olumsuz etkileri vardır. Mikroplastiklerin uzaklaştırılması zordur, çünkü geri dönüşüm için toplanamazlar veya tatlı su veya deniz ekosistemlerine girdikten sonra çıkarılamazlar (Salama ve ark., 2022).

Mikroplastikler ağır metaller ve diğer organik kirleticileri taşıyabilir; çevredeki kirleticilerin vektörleri olsalar bile, algler mikroplastiklere bağlı kirleticileri iyileştirebilir çünkü algler sulu habitatlarda farklı ağır metalleri ve kirleticileri azaltır.

Mikroalglerin plastiğin parçalanması üzerinde doğrudan bir etkisi olmasa bile, bunların varlığı diğer hidrokarbonları parçalayan bakterilerin varlığının belirlenmesinde önemli olabilir ve diyatomların bu tür mikroorganizmalar için önemli bir yaşam alanı işlevi görebileceği, aynı zamanda, geniş yüzeylerin biyolojik olarak kirlenmesi, plastiği UV radyasyonundan koruyarak foto-bozunma süreçlerini geciktirerek ters bir etkiye sahip olabileceği ileri sürülmüştür (Dudek, 2020; Andrady, 2011).

2.8. Siyanobakteriler

Mavi-yeşil algler, prokaryotik hücre yapısı sebebiyle 'siyanobakteriler' olarak isimlendirilirler. Siyanobakteriler fotosentez özellikli Cyanobacteria'dır. "Cyano" öneki mavi anlamına gelir. Bulunan ve halen var olan en eski fosildir. Dünya oluşumunda belki de ilk canlı organizmalardır. Milyarlarca yıl boyunca dünyanın atmosferinde karmaşık organizmalarla uyumsuz, zehirli ve oksijen bulunmamasına karşı siyanobakteriler, oksijenli atmosferi üretmenin yanı sıra troposferin nötralizasyonuna katkıda bulunmuştur. Mavi-yeşil algler günümüzde de pek çok açıdan hayat vericidir.

Hücrelerinde çekirdeğe eşdeğer DNA iplikçikleri bulunur. Siyanobakterilerde çekirdek, mitokondri, golgi aygıtı, plastid ve endoplazmik retikulum bulunmamaktadır. Hücre dışında hücre duvarı ve hücre çeperine yapışık kolloidal musilaj kın ile kaplıdır. Hücre duvarları peptidoglikan ve amino asitten oluşmaktadır (Demirel, 2008).

Oksijen üreterek fotosentez yapabilmelerine ve ökaryotik alglerle aynı ortamlarda yaşamalarına rağmen, siyanobakteriler gram negatif bakterilerdir ve bu nedenle prokaryotlardır. Ayrıca, atmosferik nitrojeni amonyak gibi elementin kullanılabilir formlarına dönüştürme işlemi olan nitrojen fiksasyonunu bağımsız olarak yürütme yeteneğine de sahiptirler. Tuzlu ve tatlı suların yüzeyinde bulunurlar. Koyu yeşilimsi-mavi pigmentlerinden dolayı bu isimle adlandırılırlar. (Yılmaz ve Duru, 2011).

Siyanobakteriler tatlı su ve denizden karasal ekosistemlere kadar çok çeşitli ortamlarda yaşayan mikroorganizmalardır.

Siyanobakterilerin üremesi eşeysiz gerçekleşir; bölünerek ürerler. Üreme bazı türlerde çoklu hücre bölünmeleri (Dermocarpa), bazılarında ise ikiye bölünme (Synechocystis, Microcystis) ile gerçekleşmektedir. Optimal siyanobakteriyel yetiştirme, hem besin mevcudiyetine (CO₂, nitrojen ve fosfor) hem de yetiştirme koşullarına (ışık ışıması, sıcaklık, pH, vb.) bağlıdır.

Siyanobakteri türlerinin sayısı halen tartışma konusudur ve 8000'e ulaştığı tahmin edilmektedir. Morfolojik karakterlere ve moleküler analizlere göre şimdiye kadar 5185 tür tanımlanmış; Chroococcales, Gloeobacterales, Nostocales, Oscillatoriales, Pleurocapsales, Spirulinales ve Synechococcales olarak sınıflandırılmıştır: Chroococcales, müsilaçlı bir zarf içinde kolloid, tek hücreli siyanobakteriler içerir. Bu sıradaki ünlü tür, tatlı suda çiçek oluşturan tür Microcystis aeruginosa 'dır (Komárek ve ark., 2003). Gloeobacterales, tek hücreli veya tilakoidleri olmayan düzensiz gruplar halinde çubuk şeklindeki tatlı su siyanobakterileridir. En çok tanımlanan siyanobakteriler, Nostocales takımına ait ipliksi türlerdir ve bu takımın bazı türleri nitrojeni sabitleme yeteneğine sahiptir. Bentik lineer ipliksi türlerin en yüksek sayısı Salınımlılarla ilişkilidir ve kolloid hücreler olabilen veya filamentlere (psödo-filamentler) benzeyen Pleurocapsales, karmaşık koloni oluşumları oluşturabilir.

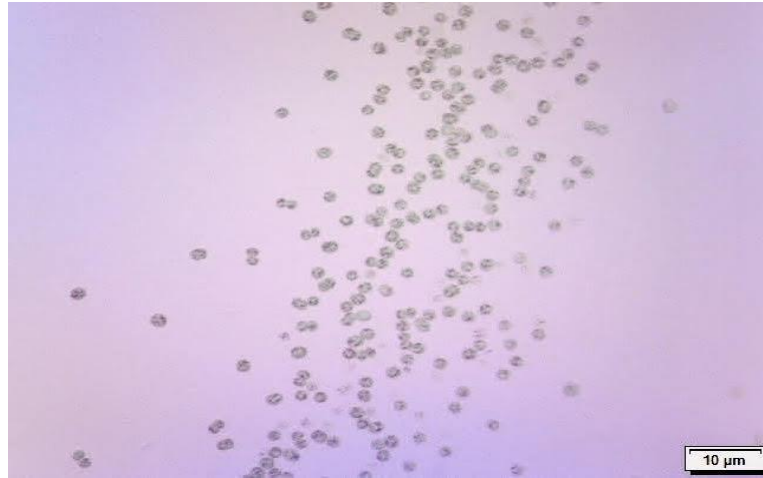
Spirulinales üyeleri sarmal filamentlere sahipken, Synechococcales düzeninde kategorize edilen türler hem tek hücreli hem de filamentli türleri içerir. Synechococcales 70'den fazla cinse sahiptir ve en bol, ekolojik olarak önemli ve en eski siyanobakteri olarak kabul edilir. Synechocystis sp. Synechococcales'in bir üyesidir (Allaf ve Peerhosssaini, 2022).

2.9. *Microcystis aeruginosa*

Aşırı alg artışlarında en önemli tür olan *Microcystis* genellikle toksiktir. *Microcystis* spp., heterosist ve akinet oluşturmaz. İzole edilerek çalışılan, kültüre alınan ve tanımlanan ilk toksik türü *Microcystis aeruginosa*'dır.

Microcystis aeruginosa, tatlı su ortamlarında bulunan yaygın bir tek hücreli siyanobakteridir. *Microcystis aeruginosa*'nın çiçek açtığı kontamine alanlarda yaşayan ve hasat yapan popülasyonlar için sağlık riskleri oluşturan zararlı toksinler üretir. Su ortamlarında besin seviyeleri yükseldiğinde veya besin seviyeleri *Microcystis aeruginosa*'ya karşı seçici olduğunda çiçeklenme meydana gelir.

Hücre içi yapıların varlığı, gaz kesecikleri, hücrelere kaldırma kuvveti sağlar. Bu içi boş, gazla dolu yapılar, *Microcystis* hücrelerini, büyüme için en uygun ışık ve oksijenin olduğu su kütlelerinin yüzeyine yakın tutabilir. Böylece, su sütunu sabit olduğunda, koloniler su yüzeyinde birikebilir ve yüzey suyu çiçeklerini oluşturabilir (Mlouka ve ark., 2004). Hücrelerin çapı 2,61 ila 5,40 µm arasında değişir ve oval veya küre şeklinde olabilir.



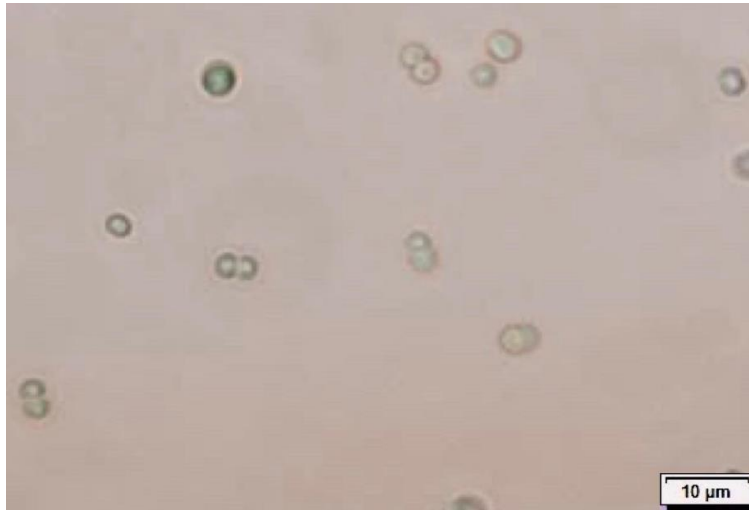
Şekil 2.1. *Microcystis aeruginosa* mikroskop görüntüsü

Microcystis aeruginosa ışığa bağımlı ve oksijenlidir, ancak hücreler karanlık anaerobik koşullar altında ötrofik göllerde uzun süre yaşayabilirler. *Microcystis aeruginosa* genellikle ötrofik göllerde ve rezervuarlarda çiçek açar. Yüzey suyu patlamaları, su yüzeyinin altında anaerobik koşullara neden olabilir ve böylece *Microcystis aeruginosa* da dahil olmak üzere diğer fitoplanktonların elverişsiz bir ortamda yaşamasına neden olabilir.

Microcystis aeruginosa, göller ve nehirler gibi su habitatlarında meydana gelen ve farklı coğrafi konumlara göre değişen, siyanotoksin üreten bir türdür. Mikrosistin (Hepatotoksin) insanlarda, hayvanlarda ve suda yaşayan canlı organizmalarda ciddi sağlık tehlikelerine neden olur. Mikrosistin'in kanser hücre dizilerinin büyümesini engelleme yeteneği, etkili antikanser ilaçların, *Microcystis* siyanobakteriyel cinsinin farmakolojik ve toksikolojik öneminin keşfedilmesine yol açabilir (Gothalwal ve ark., 2022).

2.10. *Synechocystis* sp.

Synechocystis sp. nitrojen sabitleyici olmayan tek hücreli bir mezofilik siyanobakteridir (Johnson ve Lecomte, 2013). Aydınlik ortamda fotosentez yoluyla fototrofik büyüme sergilerken karanlık dönemlerde glikoliz ve oksidatif fosforilasyon yoluyla heterotrofik olarak büyüeyebilirler.



Şekil 2.2. *Synechocysts* sp. mikroskop görüntüsü

Synechocystis'in, ortamda inorganik karbon (CO_2 veya HCO_3^-) yetersiz olduğunda farklı organik asitleri (piruvat, asetat ve süksinat dahil) birlikte metabolize edebilir.

Organik asitlerin siyanobakteriyel hammadde olarak kullanılması, ölçekli biyokütle üretimi için uygun maliyetli olmasa da, organik substrat kullanım kapasitesi, erken yaşamda ototrofikten heterotrofik metabolizmalara evrimsel geçiş hakkında fikir verebilir.

Çoğu siyanobakteri nitrojen kaynağı olarak nitrat ve amonyumu kullanabilir. *Synechocystis*, N₂'yi doğal olarak sabitleyemez (nitrojenaz yokluğu), ancak çoklu arginin ve aspartat kalıntıları içeren bir polipeptit olan siyanofisin üreterek amonyum nitrojeni hücre içinde depolayabilir. Bu polimer, nitrojen sınırlama koşulu altında bir hidrolitik enzim siyanofisinaz tarafından parçalanabilir (Richter ve ark., 1999). *Synechocystis*'in bu tür nitrojen depolama kapasitesi, atık sudan nitrojenin uzaklaştırılması için potansiyel olarak kullanılabilir ve ortaya çıkan siyanofisin, bir biyo-gübre olarak kullanılabilir.

İlk olarak 1968'de bir tatlı su gölünden izole edildiğinden beri üzerinde en çok çalışılan türlerden biridir. *Synechocystis*, fotoototrofik, miksotrofik ve heterotrofik koşullar altında büyüyen çok yönlü karbon metabolizmaları gösterir. Ek olarak, bitki kloroplastları ve *Synechocystis* arasındaki biyokimyasal benzerlikler, *Synechocystis*'i daha yüksek bitkilerde stres tepkilerinin ve stres adaptasyonunun altında yatan moleküler mekanizmaları incelemek için ideal bir sistem haline getirir. Sentetik biyolojideki son gelişmeler, *Synechocystis*'in çeşitli kimyasal türlerinin üretimi için fotosentetik bir konakçı olarak tasarlamak için çok sayıda moleküler biyoloji aracı sağlamıştır (Yu ve ark., 2013).

2.11. *Arthrospira platensis*

Arthrospira platensis, en fazla kültürü yapılan; kozmetik, tıp, gıda maddesi olarak birçok alanda kullanılan siyanobakteri sınıfından ipliksi bir prokaryotik organizmadır (Koru ve Cirik, 2002). Gıda ve biyoyakıt üretimi gibi farklı endüstriyel amaçlar için çok önemlidir. Bu, karbonhidrat (polisakarit) protein profili, yağ asidi içeriği ve bir glikojen deposu işleviyle ilişkilidir (Salman ve ark., 2023).



Şekil 2.3. *Arthrospira platensis* mikroskop görüntüsü

Arthrospira platensis'in besin özelliklerinin yanı sıra farmakolojik etkileri de bulunmaktadır. *Arthrospira*'nın antidiyabetik, antiviral, antibiyotik, antikanser, antioksidan, bağışıklık sistemi güçlendirici, probiyotik, prebiyotik, hipokolesterolomik, antialerjik etkileri bulunmuş ve bu etkilerin sebebi olarak da içerdiği biyoaktif maddeler gösterilmiştir. *Arthrospira*'nın ayrıca sindirim sistemi fonksiyonlarını da düzenlediği araştırılmıştır (Badawi ve ark., 2022).

2.12. Serbest Radikaller

Oksijenden türetilen serbest radikaller, mitokondriyal solunumlar, enzim katalizli oksidasyonlar ve radyoliz gibi çeşitli biyolojik süreçler sırasında canlı organizmalarda, kısmen indirgenmiş oksijen reaktif ara maddelerdir (Liu ve ark., 2021). Serbest radikaller hücre metabolizmasına olumsuz etki gösterebilecek tepkimeleri başlatmaktadır. Bu sebeple oksijen yaşam için önemli bir molekül olmasının yanı sıra serbest radikal oluşturması nedeniyle metabolizmaya dolaylı yoldan zarar vermektedir (Cho ve ark 2000). Serbest radikaller bağışıklık ve sinyal iletimi gibi olaylarda önemli roller üstlenirler. Aerobik metabolizmanın toksik yan ürünleri olarak da işlev görmektedir (Foyer ve Nochor, 2003; Vaahtera ve ark., 2014; Özcan, 2011).

2.13. Malondialdehit (MDA)

Malondialdehit (MDA), oksidatif lipid peroksidasyonunun etkili son ürünüdür. Oksidatif hasar seviyesini anlamak için kullanılmaktadır (Urso ve Clarkson, 2003). Mikroorganizmadaki MDA miktarının artması demek serbest radikal miktarının

artması anlamına gelmektedir (Choudhary ve ark., 2007). Reaktif oksijen türleri hücre içerisinde biriktikçe hücre zarındaki hasara sebebiyet vermektedir. Zarda gerçekleşen bu hasar, lipidleri etkileyerek peroksidasyonu başlatır ve malondialdehit oluşur. Malondialdehit radikaller tarafından hücre membranındaki yağ asitlerinin farklı ürünlere yıkılması durumudur. Bu yıkım sonucunda oluşan ürünler hücreye ciddi zararlar vermektedir (Tekbaba, 2019).

2.14. Hidrojen peroksit (H₂O₂)

Süperoksitin bir elektron alması sonucu ya da oksijenin diğer moleküllerden iki elektron alması sonucu peroksit molekülü oluşur (Denklem 2.1). Hidrojen peroksit yüksek stabilitesi sebebiyle ciddi oksidatif hasar gücüne sahiptir (Sharma ve ark., 2012). Biyolojik sistemlerdeki oluşumu süperoksit dismutasyonu ile meydana gelmektedir. Dokulardaki yarı ömrü uzun olan bu radikal, oluştuğu yerden difüzyon ile başka bölgelere kolayca yayılım göstermektedir (Tekbaba, 2019).



2.15. İstatiksel Analizler

İstatistikler için, verilere SPSS 20.0 paket programında yer alan tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yapılmış ve değişkenler arasındaki farklılığın belirlenmesi için LSD testi uygulanmıştır. Anlamlı Önemli Fark (AÖF) olan her bir bağımsız değişken için uygulama ve çeşitler arasındaki farkın önem kontrolü %5 düzeyinde hesaplanmıştır.

2.16. Literatür Çalışmaları

Serbest Cu +2 veya hidratlı formlar (Cu⁺² ·H₂O), yüksek birikim mevcudiyetlerinden dolayı deniz organizmaları için en zehirli Cu türleri olarak kabul edilir (Lobban ve ark., 1985; Sunda ve Guillard, 1996).

Qian ve ark. (2010), *Microcystis aeruginosa* üzerine CuSO₄ ve hidrojen peroksit uygulamış, 48 ve 96. saatlerde farklı parametrelerdeki değişimini araştırmışlardır. Sonuç olarak klorofil-*a* değişiminin bakır sülfat etkisinde arttığını fakat 48saatten sonra azaldığını; hidrojen peroksit etkisiyle giderek arttığını bildirmişlerdir.

Nalimova ve ark. (2005), yaptıkları çalışmada çinko ve bakır metallerinin *Arthrospira platensis* üzerine etkilerini araştırmış ve *Arthrospira platensis*'in ağır metallere toleransının kültür gelişim fazıyla ilişkili olduğu gözlemlenmiştir.

Cepoi ve ark. (2020), *Arthrospira platensis* bünyesinde sentetik atıksulardan ağır metallerin birikimini araştırmış; bunun sonucunda *Arthrospira platensis*'in metal biriktirme kapasitesinin yüksek olduğunu ve yenilenebilir birçok sorbent görevi gördüğü saptanmıştır. Bu sebeple *Arthrospira platensis*'in biyokimyasal bileşenleri arasında bir denge olduğu, özellikle protein içeriğinde bir azalma olduğu vurgulanmıştır.

Zeng ve Wang (2011), yaptıkları çalışmada tatlı su mikroalg 'i olan *Microcystis aeruginosa* 'nın kadmiyum ve çinko alımı ve toksisitesine ışık ve sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Çalışma ötrofik tatlı su ekosistemlerinde mikrobiyal çiçeklenme sırasında sıcaklık ve ışık değişiminin biyokimyasal döngülerini etkileyebileceğini öne sürmektedir. Ayrıca araştırmacılar bu çalışmada mikrobiyal hücre içerisindeki çinko ve kadmiyumu da analiz etmişlerdir. Sonuç olarak düşük metal konsantrasyonların ve daha yüksek sıcaklık ve ışığın mikrobiyal gelişimi desteklediği vurgulanmıştır.

Mamboya (2001), *Padina boegesenni* algine bakır metali uygulamış, artan konsantrasyon ile *Padina boegesenni* gelişiminde önemli oranda bir yavaşlama olduğu bildirilmiştir.

Sabatini ve ark. (2008), *Chlorella kessleri* ve *Scenedesmus vacuolatus* üzerine bakır metali etkisini araştırmışlar; klorofil-a, biyokütle ve MDA üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak klorofil-a ve biyokütle miktarında azalma ve MDA miktarında artış görülmüştür.

Surosz ve Palinska (2004), yaptıkları çalışmada 0.35 ppm bakır uygulanmasının *Anabaena flosaquae* alginin gelişimini yavaşlattığını ve artan metal konsantrasyonu ile birlikte klorofil-a miktarının azaldığını belirtmişlerdir.

Rai ve ark. (1992), krom stresinin *Chlorella vulgaris* üzerinde değişimini araştırmışlardır. Algin biyokütle miktarının artan Cr (IV) ağır metal konsantrasyonlarında düştüğünü bildirmişlerdir.

Bajuz (2010), *Chlorella vulgaris* üzerine bakır, kadmiyum ve kurşun metallerinin etkisini araştırmış, metal stresinin konsantrasyonlardaki artışla hücre sayısında azalmaya sebep olduğunu gözlemlemiştir.

Wong ve Chang (1991), krom, bakır ve nikel metallerinin farklı dozlarda uygulamasıyla *Chlorella pyrenoidosa* alginde büyüme, klorofil-*a* ve fotosentetik aktivite parametrelerinde gerçekleşen değişimleri incelemiş ve uygulanan metallerin toksisite derecesine göre Cu > Cr > Ni şeklinde olduğunu bildirmişlerdir.

Pempkowiak ve Kosakowska (1998), çalışmalarında kadmiyumun *Chlorella vulgaris* üzerinde etkisini incelemiş; biyokütle, klorofil-*a* miktarı ve hücre sayısındaki değişimi araştırmışlardır. Kadmiyum konsantrasyonundaki artışla birlikte biyokütle, klorofil-*a* ve hücre sayısı miktarında azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Choudhary ve ark. (2007), *Arthrospira platensis* S5 suşuna Cu, Zn ve Pb metallerinin etkileri üzerinde çalışmışlardır. Sonuçta metal konsantrasyonlarının artışıyla birlikte alg gelişimi azalmış ve MDA miktarı artmıştır. Metal konsantrasyonlarındaki artışla, metal stresine karşı toleransın arttığını ve MDA artışıyla birlikte serbest radikallerin oluştuğunu bildirmişlerdir.

Xiao ve ark. (2023), yaptıkları çalışmada alglerin ağır metal kirliliğine karşı tepki mekanizmalarını araştırmışlardır. Alglerin ağır metal kirliliğini nasıl absorbe ettiğini ve metal kirliliğinin yüksek konsantrasyonlarda kimyasal ve fizyolojik süreçleri olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir.

Sotol ve ark. (2001), çalışmasında *Pseudokirchneriella subcapitata* üzerinde çinko ve bakırın klorofil-*a*, biyokütle, malondialdehit miktarındaki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçta uygulanan ağır metallerin artan konsantrasyonlarla klorofil-*a* miktarı ve biyokütlerde azalış; MDA miktarında ise artış gözlenmiştir.

Li ve ark. (2005), çalışmasında *Pavlova viridis* üzerine çinko ve bakır metallerinin büyüme hızı, klorofil-*a* ve MDA miktarındaki etkilerini araştırmışlardır. Bakır ve çinkonun artan konsantrasyonlarla klorofil-*a*, hücre yoğunluğu ve protein miktarlarında azalmalara; MDA miktarında yükselen konsantrasyonla artmaya sebep olduğunu gözlemlemişlerdir.

Dalvand ve Hamidian (2023), sulak alanlarda mikroplastiklerin oluşumu ve dağılımını araştırmışlardır. Çalışmada, sulak alan ekosistemlerinin mikroplastik kirliliğine eğilimli olduğunu ve liflerin sulak alan biyotasındaki mikroplastik parçacıklarının baskın biçimi olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, sulak alanlardaki mikroplastik kirliliğinin diğer su ekosistemlerine göre daha az çalışıldığı vurgulanmıştır.

Conti ve ark. (2021), artan plastik ve mikroplastik kirliliği sorununu ve bu kirliliğin canlılar üzerindeki zararlı etkisi üzerinde araştırmalar yapmıştır. Plastik kirliliğinin önüne geçmek için yasal mevzuatların düzenlenmesi gerektiğinin ve hatta deniz ürünleri tüketimi için yönergelerin düzenlenmesi gerektiğini belirtmiştir.

Sjolemma ve ark. (2016), Polistrenin(PS), küçük boyutlu PS ile yüksek konsantrasyonlara maruziyetinde *Dunaliella tertiolecta*'nın büyümesi üzerine bariz bir etkiye sahip olduğunu ve azalan boyutla birlikte bu etkinin arttığını bildirmişlerdir.

Manzi ve ark. (2022) tarafından yapılan mikroplastiklerin algler üzerindeki stres etkisine ilişkin çalışmalar farklı sonuçlar göstermiştir. Mikroplastiklerin *Chlorella* üzerindeki etkisi, şiddetli oksidatif gözlem sonuçları göstermediği, buna karşılık, mikroplastikler, *Chlorella*'da oksidatif strese yanıtını arttırmıştır ve PVC ile etkileşimleri sırasında *Chlamydomonas reinhardtii*'nin MDA ve SOD seviyeleri artmıştır.

Wu ve ark. (2019), mikroplastiklere polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC) maruz kalmanın, logaritmik büyüme süresi boyunca *Chlorella (C.) pyrenoidosa* ve *Microcystis flos-aquae* alglerinin fotosentetik sistemi üzerindeki etkisini araştırmış; PVC ve PP'nin klorofil- *a*'yı önemli ölçüde azalttığını, ayrıca iki mikroplastik karşılaştırıldığında, PVC'nin tatlı su alglerinin fotosentez sistemini büyük ölçüde engellediğini belirtmişlerdir.

Murphy ve Quinn (2018) mikroplastığe maruz kalmanın tatlı su *H. attenuata*'nın beslenmesini önemli ölçüde azaltabileceğini ve beslenmenin mikroplastik konsantrasyonu ile önemli ölçüde negatif bir korelasyona sahip olduğunu göstermektedir. *H. attenuata* morfolojisinde önemli değişiklikler gözlenmiş olup bunlar öldürücü olmamış ve üremede herhangi bir değişikliğin olmadığını belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. (2020) PP, PVC, PS ve PE mikroplastiklerinin *Microcystis aeruginosa* algi üzerindeki etkilerini araştırmış; 96 saat maruziyet sonucunda büyümeyi inhibe ederek klorofil-*a* içeriğini önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir.

3. METERYAL VE METOD

3.1. Çalışmada Kullanılan Kültürlerin Eldesi

Çalışmada kullanılan *Microcystis aeruginosa* (PCC7806) kültürü Trakya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Hidrobiyoloji Anabilim Dalı, Plankton Kültürü Laboratuvarından; *Arthrospira platensis* kültürü Sakarya Üniversitesi, Bitki Fizyolojisi ve Alg Ekolojisi Laboratuvarından; *Synechocystis sp.* kültürü Gazi Üniversitesi, Dr. Tahir ATICI Gazi MACC Laboratuvarı alg koleksiyonlarından temin edilmiştir. Deneyler Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mikrobiyolojisi Laboratuvarında yapılmıştır.

3.2. Hücre Kültürlerinin Hazırlanması

Alglerden *Arthrospira platensis* Spirulina Medium'da (Tablo 3.3); *Microcystis aeruginosa* ve *Synechocystis sp.* BG11 ortamında (Tablo 3.1) aksenik koşullar altında büyütüldü. Algler, 180 mL besiyerine, 20 mL alg kültürü ekimi yapılarak 250 mL'lik erlenlerde, 25 ± 2 °C'de çalkalayıcı üzerinde 60 mikromolphoton/m²s sürekli aydınlatma altında 12 saat aydınlık ve 12 saat karanlık döngüsü ile inkübe edilmiştir.

Tablo 3.1. BG11 besiyeri içeriği.

Bileşen	Konsantrasyon
NaNO ₃	15 g 1000 mL ⁻¹
K ₂ HPO ₄	2 g 500 mL ⁻¹
MgSO ₄ .7H ₂ O	3.75 g 500 mL ⁻¹
CaCl ₂ .2H ₂ O	1.8 g 500 mL ⁻¹
Citric acid	0.3 g 500 mL ⁻¹
Ammonium ferric citrate green	0.3 g 500 mL ⁻¹
EDTANa ₂	0.05 g 500 mL ⁻¹
Na ₂ CO ₃	1 g 500 mL ⁻¹
Eser element karışımı	250 mL ⁻¹

Tablo 3.2. Eser element karışımı.

Bileşen	Konsantrasyon
H ₃ BO ₃	0.143 g 50 mL ⁻¹
MnCl ₂ .4H ₂ O	0.0905 g 50 mL ⁻¹
ZnSO ₄ .7H ₂ O	0.011 g 50 mL ⁻¹
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0.0195 g 50 mL ⁻¹
CuSO ₄ .5H ₂ O	0.004 g 50 mL ⁻¹

Tablo 3.3. Spirulina Medium besiyeri içeriği (Aiba ve Ogawa, 1977).

Solüsyon (SL)	Hacim (mL)	Bileşik	SL Konsantrasyon
SL- A	1000 mL	NaHCO ₃	18 g L ⁻¹
		Na ₂ CO ₃	1 g L ⁻¹
		K ₂ HPO ₄ 1	g L ⁻¹
		NaNO ₃ 2	g L ⁻¹
SL- B	1000 mL	KNO ₃	1 g L ⁻¹
		NaCl	1 g L ⁻¹
		MgSO ₄ .7H ₂ O	0.4 g L ⁻¹
		CaCl ₂ .2H ₂ O	0.02 g L ⁻¹
		FeSO ₄ .7H ₂ O	0.02 g L ⁻¹

3.3. Uygulanan Ağır Metal Çözeltileri ve Mikroplastik Konsantrasyonları

Çalışmada bakır ağır metali için stok çözeltiler hazırlanmıştır. Bu çözeltilerden belirli konsantrasyonlarda kullanılmıştır. Kullanılan bakır konsantrasyonları ve ikili uygulamada kullanılan ağır metal ve mikroplastik konsantrasyonları Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Kùltùrlere uygulanan bakır ve mikroplastik konsantrasyonları.

CuSO ₄ .5H ₂ O	Polipropilen (<100µm)	İkili uygulama
0.5 mg/L		0.5 mg/L Cu + 0.7 g PP
1 mg/L	0.7 g	1 mg/L Cu + 0.7 g PP
2.5 mg/L		2.5 mg/L Cu + 0.7 g PP
5 mg/L		5 mg/L Cu + 0.7 g PP
10 mg/L		10 mg/L Cu + 0.7 g PP

0.3929 g CuSO₄.5H₂O (Bakır II sùlfat pentahidrat) 1 L saf suda çözdürùlmüş ve elde edilen bu çözeltinin konsantrasyonu 100 ppm olarak hesaplanmıştır. Sonrasında bu çözelti seyreltilerek 0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm bakır çözeltileri hazırlanmıştır.

3.4. Mikroorganizmaların Sayımı

Farklı konsantrasyonlarda bakır polipropilene maruz bırakılan her bir siyanobakteri kùltüründen mikropipet yardımıyla örnekler alınıp Olympus CX31 marka mikroskopta çukur lamda sayım yapılmış; sayımda koloni ve ipliksi halinde bulunan organizmaların hücre sayıları dikkate alınmıştır. Hücre sayımları 15 gün boyunca 48 saatlik periyotlarla yapılarak alg hücrelerinin gelişimi takip edilmiştir. Sayılan hücrelerin mL'deki yoğunluğunun hesaplanmasında aşağıdaki matematiksel formül (Denklem 3.1) kullanılmıştır.

$$\text{Hücre sayısı.mL}^{-1} = [(C) \times (TA)] / [(A) \times (V) \times (F)] \quad (3.2)$$

C = Sayılan hücre sayısı

TA= Sayım hücresi dip alanı

A = Sayım yapılan bölgenin mm² olarak alanı

V = Çöktürülen hacim

F = Sayım bölgesinin kaç birim olduğu

3.5. Optik yoğunluk, Spektrofotometre Ölçümü

PP ve Cu maruziyetleri sonucunda alglerin optik yoğunluk ve büyüme oranlarını hesaplamak için deney süresi boyunca spektrofotometrede 560 nm dalga boyunda ölçümler yapılmış ve kör çözelti olarak saf su kullanılmıştır.

Tüm spektrofotometrik ölçümler “Spectroquant Pharo 300” spektrofotometresi kullanılarak yapılmıştır.

3.6. Klorofil-a Tayini

Klorofil-a tayini için kurulan deney numune sayısı kadar kapaklı cam tüp içine MgCO₃ ve 5 mL aseton ilave edilmiştir. 5 mL numune suyu, Whatman filtre kâğıdı kullanılarak vakum filtrasyon cihazında süzildükten sonra pens kullanılarak el değmeden kıvrılıp katlanarak kapaklı cam tüplere yerleştirilmiştir. 25 ± 1 oC karanlık ortamda 24 saat bırakılarak pigment ekstraksiyonu tamamlanmıştır. 24 saat sonra numuneler süzme işleminden geçirilip spektrofotometrede 630, 645, 665 ve 750 nm dalga boylarında ölçülmüştür. Ölçülen değerler Parsons, 1963 tarafından geliştirilen aşağıdaki denklemlere yerleştirilmiş ve klorofil a değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Klorofil-a} = 11.6 \times D_{665} - 0.14 \times D_{630} - 1.31 \times D_{645} \quad (3.2)$$

$$\mu\text{g klorofil-a} / \text{L} = \text{klorofil-a} \times v / l \times V \quad (3.3)$$

V (L) = Filtre edilen su örneği

v (mL) = Kullanılan aseton hacmi

l (cm) = Küvetten geçen ışık yolu

3.7. Askıda Katı Madde Tayini

Kültür ortamlarında gelişen *Synechocystis sp.*, *Arthrospira platensis* ve *Microcystis aeruginosa* alglerinin biyokütlesinin tespiti için askıda katı madde (AKM) tayinlerinden faydalanılmıştır. Askıda katı madde tayini 48 saat ara ile 15 gün boyunca izlenmiştir. Biyokütle tayini için yapılan askıda katı madde ölçümleri standart yöntem (Apha,1998) ile belirlenmiştir. Sabit tartım durumuna getirilmiş hassas bir terazi kullanılarak cam elyaf 0,45 µm gözeneklere sahip filtre kağıtları tartılıp mikroalg

kültürleri filtre kağıdından süzildükten sonra 103-105 °C de kurutulur. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra hassas terazide tekrar tartılarak (denklem 3.4) biyokütle tespiti yapılmıştır.

$$AKM (mg/l) = (C-D) \times 1000/V \quad (3.4)$$

C= Filtre kağıdı + kuru kalıntının tartımı (mg),

D= Filtre kağıdının tartımı (mg),

V= Numune hacmi (ml).

3.8. Malondialdehit (MDA) Analizi

Malondialdehit miktarının belirlenmesi Heath ve Packer, 1968'e göre yapılmıştır. 15 mL kültür ortamı 4000 rpm ve +4°C'de 15 dk. santrifüjlendikten sonra pellet elde edilmiştir. Elde edilen bu pellet 5 mL 0.1%, triklorikasit (TCA) (4°C) ile homojenize edilmiş, sonra 4100 rpm'de 10 dk santrifüj edilmiştir. 0.5 mL süpernatant, 0.5 mL 0.1 M Tris-HCl (pH 7.6) ve 1 ml TCA-TBA çözeltisi (15% w/v) (trikloroasetik asit-0.375% w/v tiyobarbitürikasit) ile karıştırılmıştır ve 30 dk sıcak su banyosunda (95 °C) bekletilmiştir. Reaksiyon karışımlarının absorbensları 532 ve 600 nm dalga boyunda ölçülmüş ve MDA miktarı ekstinksiyon katsayısı kullanılarak hesaplanmıştır.

3.9. Hidrojen Peroksit (H₂O₂) Analizi

H₂O₂ miktarının belirlenmesi Heath ve Packer, 1968'e göre yapılmıştır. 15 mL hacimde alınan kültürlerden 4000 rpm ve +4°C'de 15 dk. santrifüjlendikten sonra yaklaşık 0.2 g olan pellet elde edilmiştir. Elde edilen bu pellet 5 mL 0.1% TCA (4°C) ile homojen edilmiş sonra 4100 rpm'de 10 dk. santrifüj edilmiştir. 0.5 mL süpernatanta, 0.5 mL 0.1 M Tris-HCl (pH = 7.6) ve 1 mL 1 M KI (potasyum iyodür) eklenmiş ve 390 nm dalga boyundaki absorbens değerleri belirlenmiştir. H₂O₂ miktarı daha önce hazırlanmış olan standart grafik yardımıyla hesaplanmıştır.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

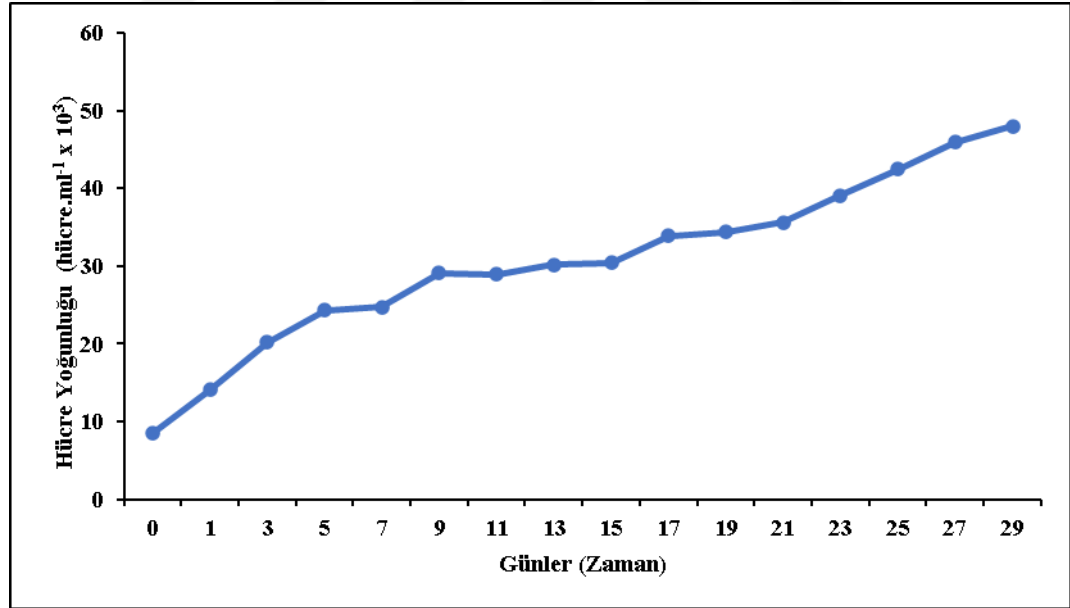
4.1. Alglerin Kùltür ve Gelişimi

Ekim yapılan kùltürlerin hücre yoğunlukları 30 gün inkübasyon süresi boyunca takip edilmiştir.

4.1.1. *Microcystis aeruginosa* kùltür ve gelişimi

Çalışmada kullanılan *Microcystis aeruginosa* (PCC7806) kùltürleri Trakya Üniversitesi Plankton Kùltürü Laboratuvarından temin edilmiştir.

Ekim yapılan *Microcystis aeruginosa* kùltürü başlangıçta 8,5 x10³ hücre.ml⁻¹ yoğunluğuna sahipken, 30 gün inkübasyon sonunda 48x10³ hücre.ml⁻¹ hücre sayısına ulaşmıştır. *Microcystis aeruginosa* kùltürünün hücre sayıları değişim grafiğı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

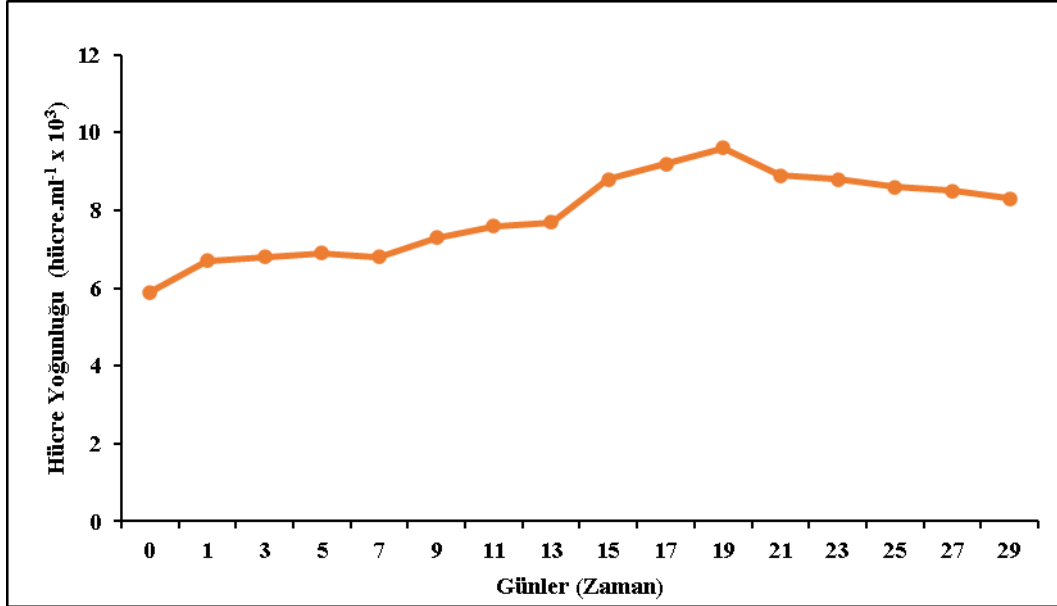


Şekil 4.1. *Microcystis aeruginosa* kùltürlerinin 30 günlük gelişim grafiğı

4.1.2. *Synechocystis sp.* kùltür ve gelişimi

Bu çalışmada kullanılan *Synechocystis sp.* kùltürleri Gazi Üniversitesi, Dr. Tahir ATICI Gazi MACC Laboratuvarından temin edilmiştir.

Ekim yapılan *Synechocystis sp.* kültürü başlangıçta $5,9 \times 10^3$ hücre.ml⁻¹ hücre yoğunluğuna sahipken, 21.günde en yüksek $9,6 \times 10^3$ hücre.ml⁻¹ yoğunluğuna ulaşmış, daha sonrasında azalış göstererek 31.gün sonunda $8,3 \times 10^3$ hücre.ml⁻¹ hücre yoğunluğu gözlemlenmiştir. *Synechocystis sp.* kültürlerinin hücre sayıları değişim grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

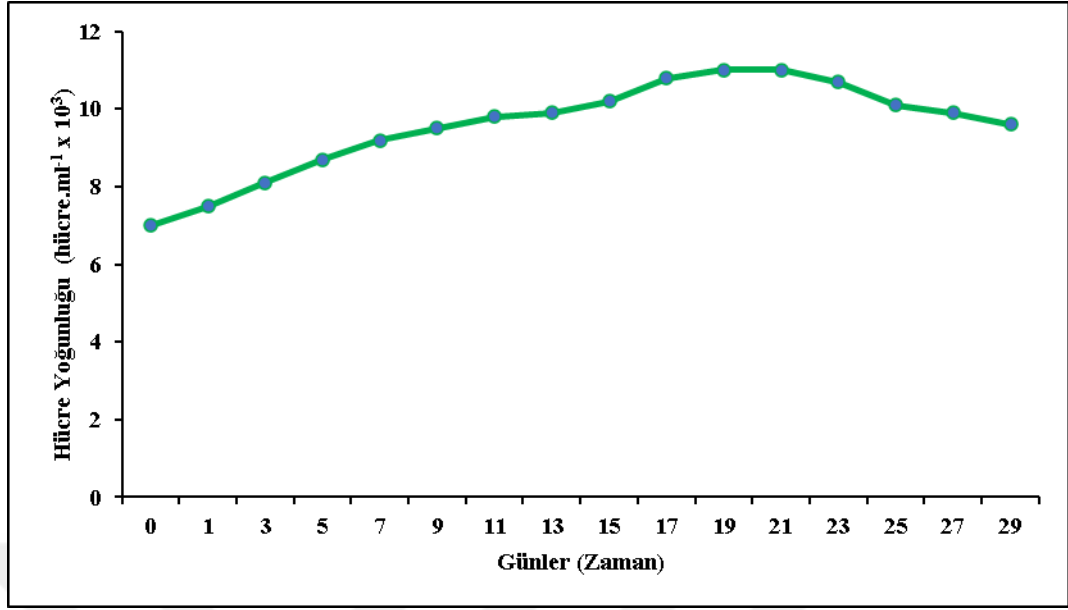


Şekil 4.2. *Synechocystis sp.* kültürlerinin 30 günlük gelişim grafiği

4.1.3. *Arthrospira platensis* kültür ve gelişimi

Bu çalışmada kullanılan *Arthrospira platenis* kültürleri Sakarya Üniversitesi, Bitki Fizyolojisi ve Alg Ekolojisi Laboratuvarından temin edilmiştir.

Ekim yapılan *Arthrospira platensis* kültürü başlangıçta 7×10^3 hücre.ml⁻¹ hücre yoğunluğuna sahipken, 21.günde en yüksek 11×10^3 hücre.ml⁻¹ yoğunluğuna ulaşmış, daha sonrasında azalış göstererek 31.gün sonunda $9,6 \times 10^3$ hücre.ml⁻¹ hücre yoğunluğu gözlemlenmiştir. *Arthrospira platensis* kültürleri hücre sayısı değişim grafiği Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. *Arthrospira platensis* kültürlerinin 30 günlük gelişim grafiği

4.2. Alg Kültürleri Üzerine Bakır Metalinin Etkileri

Seçilen her üç alg türü için deneyler 3 tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır. Belirlenen beş farklı konsantrasyondaki (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) bakır metalinin Siyanobakteriler üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla 15 günlük çalışma süresince 2 günde bir (48 saat aralıklı) alınan örneklerde spektrofotometrik olarak 560 nm dalga boyunda optik yoğunluk, klorofil-a miktarına bakılmış; MDA ve H₂O₂ analizleri yapılmış ve mikroskopik olarak hücre sayımları yapıp hücre boyutları takip edilmiştir.

4.2.1. Bakır metalinin alg pH'ına etkisi

Bakırın çözünürlüğü pH yaklaşık 6'dan, 8.8'e kadar azalmakta, pH 8.8'den sonra ise artmaktadır. pH 12'de bakırın çözünürlüğü kabaca yaklaşık 0.1 ppm'in üzerine kadar çıkabilmektedir.

Deneyde bakır metalinin çökmemesi için tüm numunelerde başlangıçta pH 8.8 değerinin altında ayarlanmıştır. pH ayarlaması sırasında numuneler 0.1 M HCl ve 0.1M NaOH ile muamele edilmiştir.

Microcystis aeruginosa alginin başlangıç pH'ı tüm numunelerde 7'ye ayarlanmış, deney sonunda hücre yoğunluğuna bağlı olarak tüm bakır konsantrasyonlarında artış göstermiş ve tüm konsantrasyonlarda pH 10'a kadar yükselmiştir.

Synechocystis sp. alginin başlangıç pH'ı tüm numunelerde 7'ye ayarlanmış, deney sonunda hücre yoğunluğuna bağlı olarak tüm bakır konsantrasyonlarında artış göstermiş ve tüm konsantrasyonlarda pH 10'a kadar yükselmiştir.

Arthrospira platensis alginde ise başlangıç pH'ı tüm numunelerde 8'ye ayarlanmış, deney sonunda hücre yoğunluğuna bağlı olarak tüm bakır konsantrasyonlarında artış göstermiş ve kontrol dahil tüm konsantrasyonlarda pH 11'e kadar yükselmiştir.

Çalışmada, başlangıç pH değeri alglerde strese sebep olmayacak şekilde ayarlanmaya çalışılmış ve alg büyümesinde olumsuz etki görülmemiştir. 15 gün deney süresince pH değerinin yükselmesi bakır çökmesine sebep olmamıştır.

4.2.2. Bakır metalinin alglerin morfolojisine etkisi

Deney süresince bakır metalinin hücre morfolojisi üzerine etkileri mikroskopik olarak takip edilmiştir (Tablo 4.1).

Microcystis aeruginosa ve *Synechocystis sp.* hücre yapıları oval yapıdadır. Kirletici konsantrasyonu arttıkça hücre çapı küçülmüştür. *Arthrospira platensis* uzun ipliksi yapıya sahip bir alg türüdür. Kirletici konsantrasyonu hücre uzunluğunda yaklaşık yarı oranda küçülmeye sebep olurken hücre eni sabit kalmıştır (2 µm).

Hücrelerin maruz kaldığı kirletici konsantrasyonunun hücre boyutlarını olumsuz yönde etkileyerek tüm kültürlerde büyümeyi sınırlandırdığı gözlemlenmiştir.

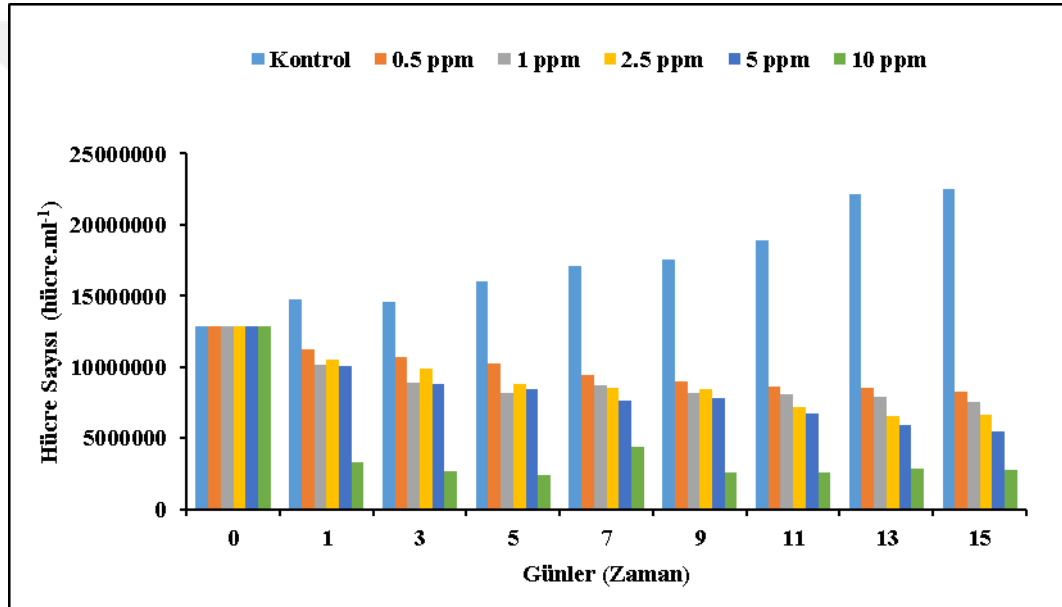
Tablo 4.1. Bakır metalinin alglerin hücre boyutuna etkisi.

	Başlangıç	15 gün sonunda					
		Kontrol	0,5mg/L	1 mg/L	2,5 mg/L	5 mg/L	10 mg/L
<i>M. aeruginosa</i>	2 µm	4,4 µm	3,9 µm	2,5 µm	2 µm	1,1 µm	0,6 µm
<i>Synechocystis sp.</i>	3 µm	7 µm	6 µm	4,8 µm	4 µm	3 µm	2,3 µm
<i>A. platensis</i>	2 µm x 150 µm	2 µm x 220 µm	2 µm x 140 µm	2 µm x 120 µm	2 µm x 105 µm	2 µm x 80 µm	2 µm x 60 µm

4.2.3. Bakır metalinin alglerin hücre yoğunluğuna etkisi

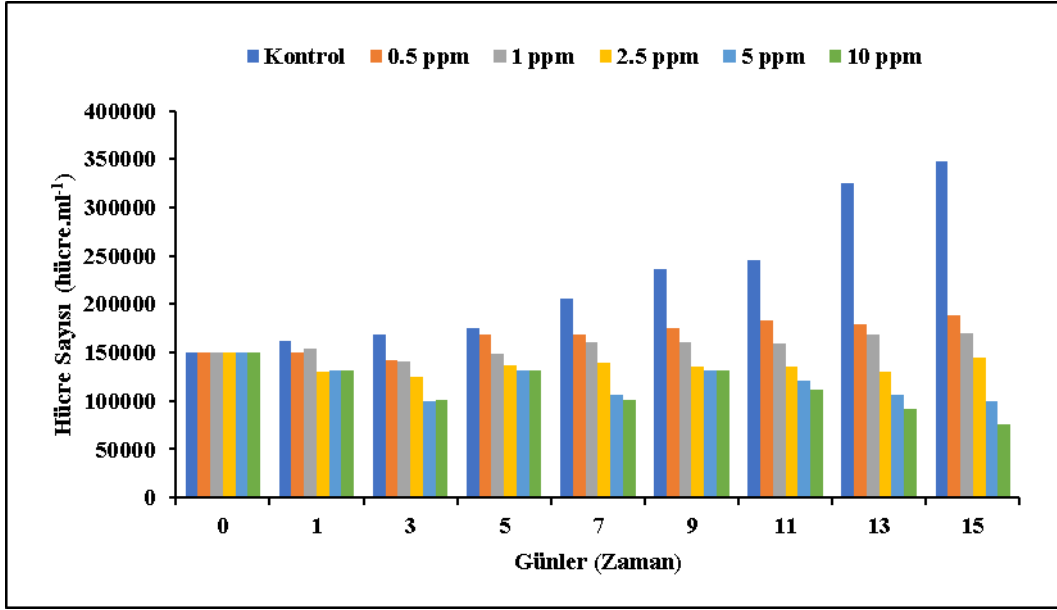
Mikroskop üzerinde yapılan sayımlarda bakır metaline maruz bırakılan algler için hücre sayıları hesaplanmıştır.

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır ağır metalinin hücre yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 4.4’de verilmiştir. Hücre sayıları bakır metalinin eklendiği gün tüm dozlarda 12×10^6 hücre.ml⁻¹ hesaplanmıştır. Hücre sayıları klorofil-*a* ve AKM değerlerinde görüldüğü gibi tüm uygulama gruplarında çalışma boyunca benzer değişim göstermiştir. Kontrol grubunda denemelerin sonunda 22×10^6 hücre.ml⁻¹ olarak ölçülürken en düşük olarak ise 10 ppm bakır uygulanan kültürde 2×10^6 hücre.ml⁻¹ olarak hesaplanmıştır.



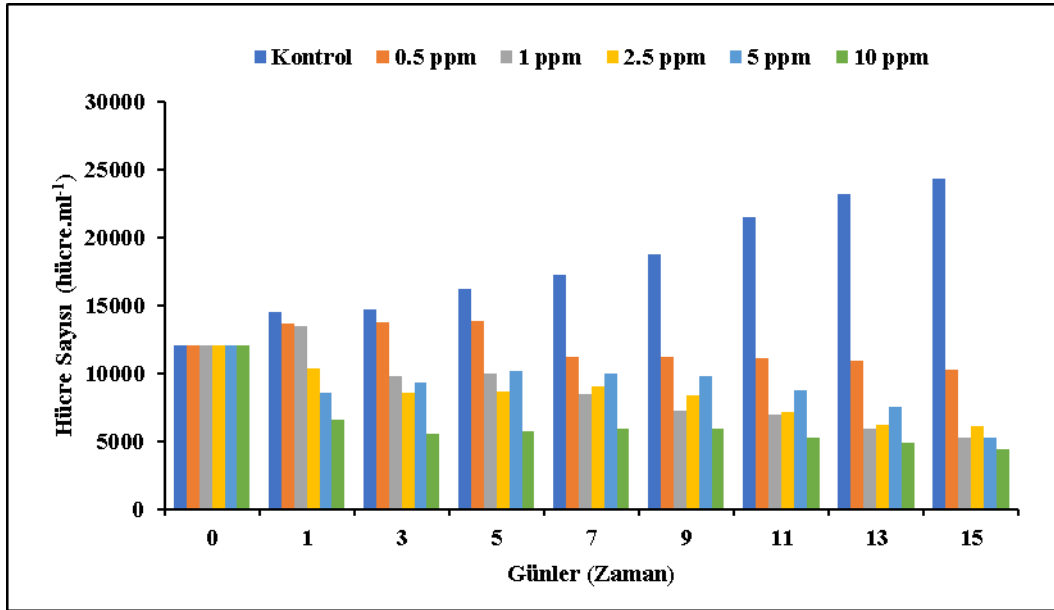
Şekil 4.4. Bakır metalinin *Microcystis aeruginosa* hücre sayısına etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır ağır metalinin hücre yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 4.5’de verilmiştir. Hücre sayıları, bakır metalinin eklendiği gün tüm dozlarda 15×10^4 hücre.ml⁻¹ hesaplanmıştır. Hücre sayıları klorofil-*a* ve AKM değerlerinde görüldüğü gibi tüm uygulama gruplarında çalışma boyunca benzer değişim göstermiştir. Kontrol grubunda denemelerin sonunda 34×10^4 hücre.ml⁻¹ olarak ölçülürken en düşük olarak ise 10 ppm bakır uygulanan kültürde 7×10^4 hücre.ml⁻¹ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Bakır metalinin *Synechocystis sp.* hücre sayısına etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır ağır metalinin hücre yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 4.6’de verilmiştir. Hücre sayıları, bakır metalinin eklendiği gün tüm dozlarda 12×10^3 hücre.ml⁻¹ hesaplanmıştır. Hücre sayıları ve klorofil-*a* değerlerinde olduğu gibi tüm uygulama gruplarında deneme süresince benzer değişim göstermiştir. Kontrol grubunda denemelerin sonunda 24×10^3 hücre.ml⁻¹ olarak ölçülürken en düşük olarak ise 10 ppm bakır uygulanan kültürde 4×10^3 hücre.ml⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

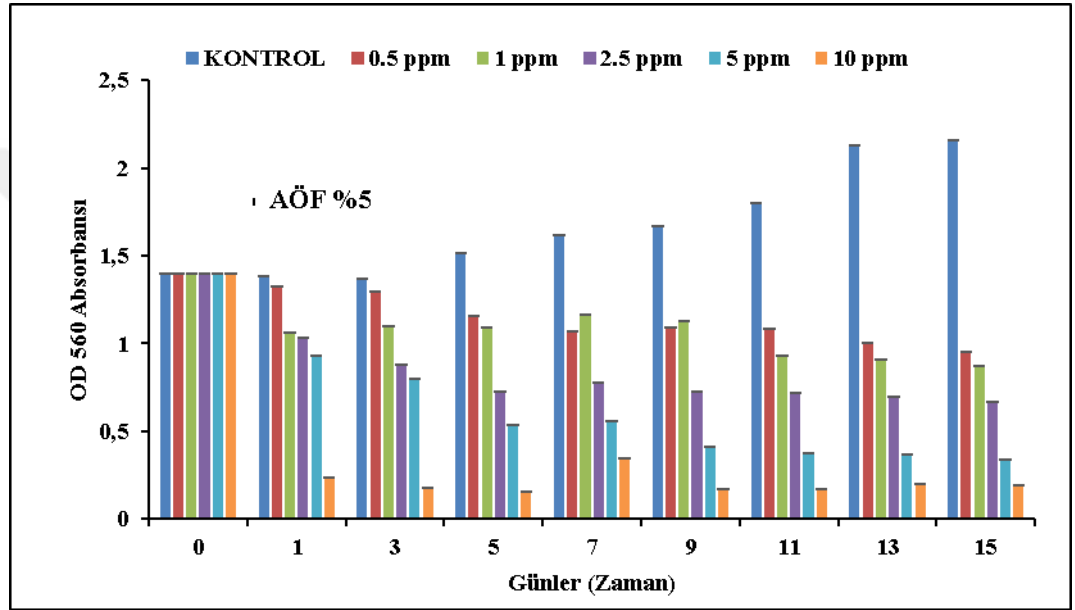


Şekil 4.6. Bakır metalinin *Arthrospira platensis* hücre sayısına etkisi

4.2.4. Bakır metalinin alglerin optik yoğunluğuna etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır ağır metalinin OD 560 absorbansı üzerine etkisi Şekil 4.7’de verilmiştir.

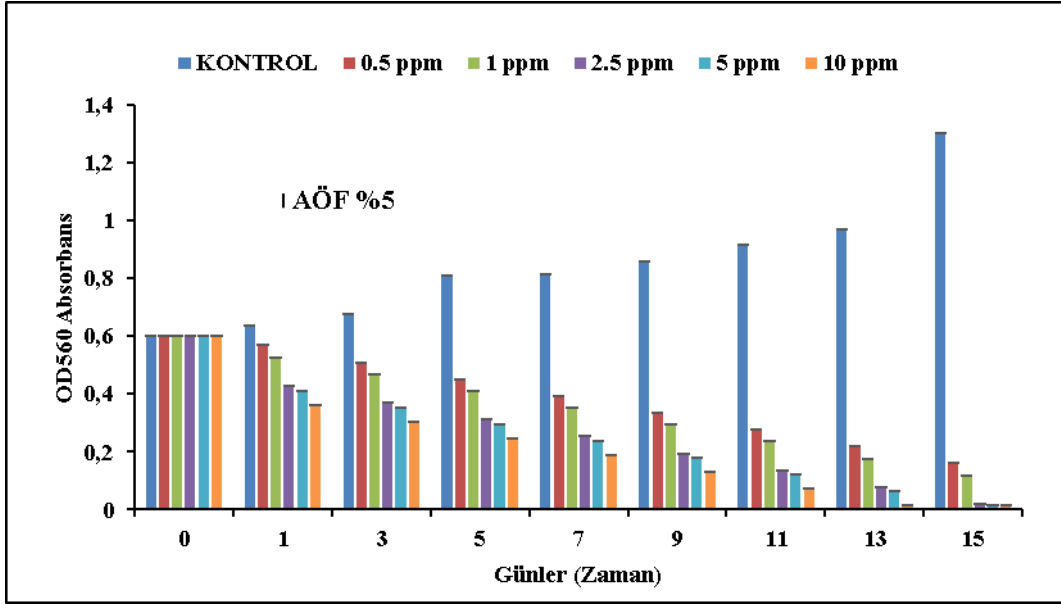
Çalışma süresince bakır etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa* alginde 1. ve 3. günde 5 ppm konsantrasyonunda OD 560 absorbansında istatistiksel olarak anlamlı artış olmuştur ($p>0.05$). 1. ve 3. gün 0.5, 1, 2.5 ve 10 ppm konsantrasyonlarında; 5, 7, 11, 13 ve 15. günlerde tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) OD 560 absorbansında kontrole göre istatistiksel olarak anlamlı azalma görülmüştür ($p<0.05$).



Şekil 4.7. Bakır metalinin *Microcystis aeruginosa* OD 560 absorbansı üzerine etkisi

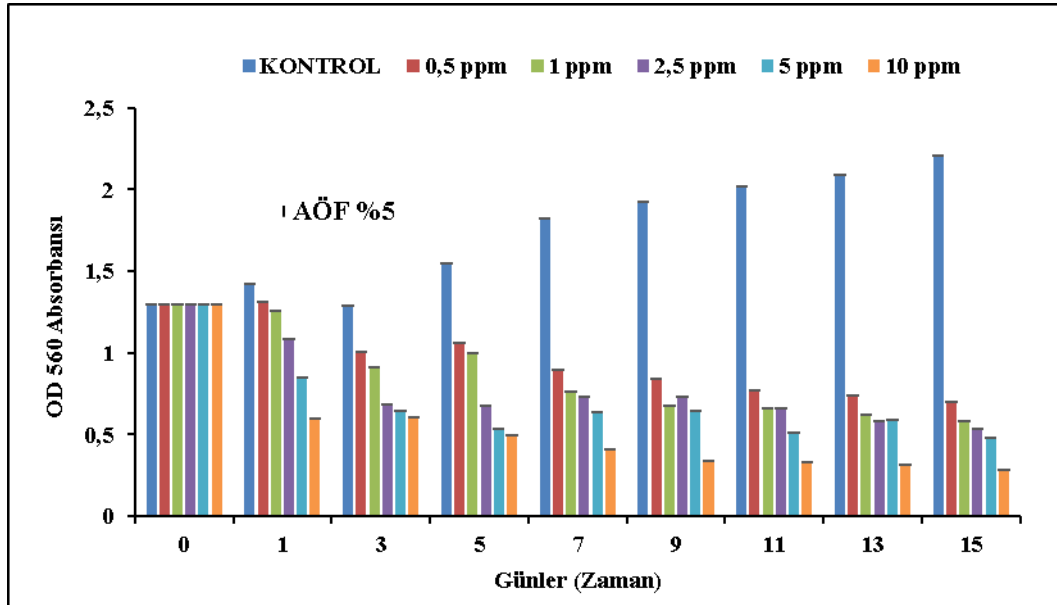
Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır ağır metalinin OD 560 absorbansı üzerine etkisi Şekil 4.8’de verilmiştir.

Çalışma süresince bakır etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.* alginde tüm gün ve konsantrasyonlarda OD 560 absorbansında istatistiksel olarak anlamlı azalış gözlemlenmiştir ($p<0.05$).



Şekil 4.8. Bakır metalinin *Synechocystis sp.* OD 560 absorbansı üzerine etkisi

Çalışma süresince bakır etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platensis* kültürlerinde (Şekil 4.9) 1. ve 3. günde 0.5 ppm konsantrasyonunda OD 560 absorbansında istatistiksel olarak anlamlı artış olmuştur ($p>0.05$). 1. ve 3. gün 1, 2.5, 5 ve 10 ppm konsantrasyonlarında; 5, 7, 9, 11, 13 ve 15. günlerde tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) OD 560 absorbansında kontrole göre istatistiksel olarak anlamlı azalma görülmüştür ($p<0.05$).

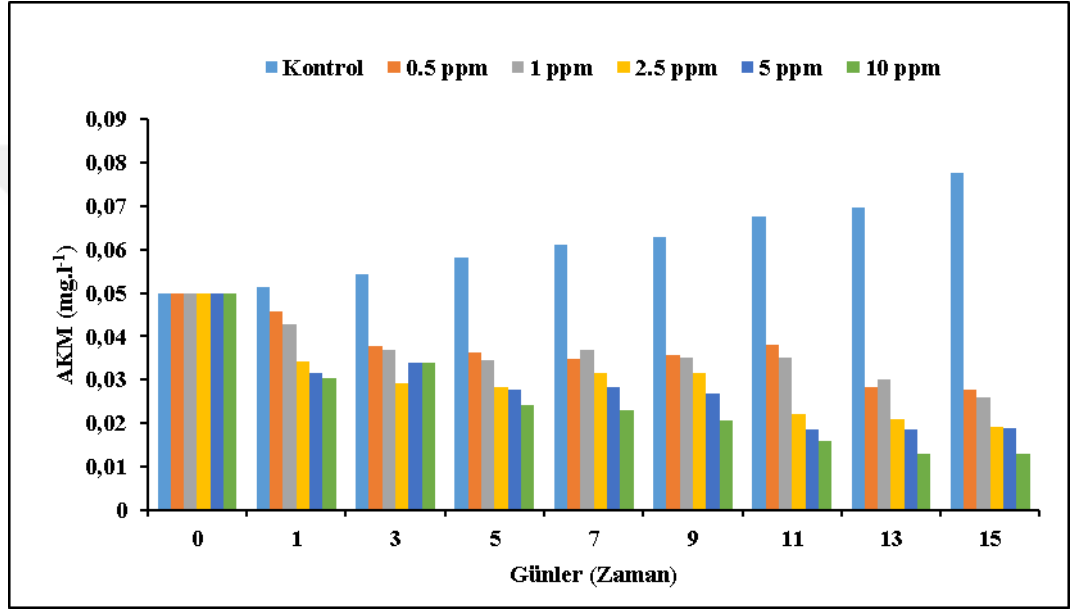


Şekil 4.9. Bakır metalinin *Arthrospira platensis* OD 560 absorbansı üzerine etkisi

4.2.5. Bakır metalinin alglerin askıda katı madde miktarına etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan 5 farklı konsantrasyondaki bakır metalinin AKM miktarı üzerine etkisi Şekil 4.10’da verilmiştir.

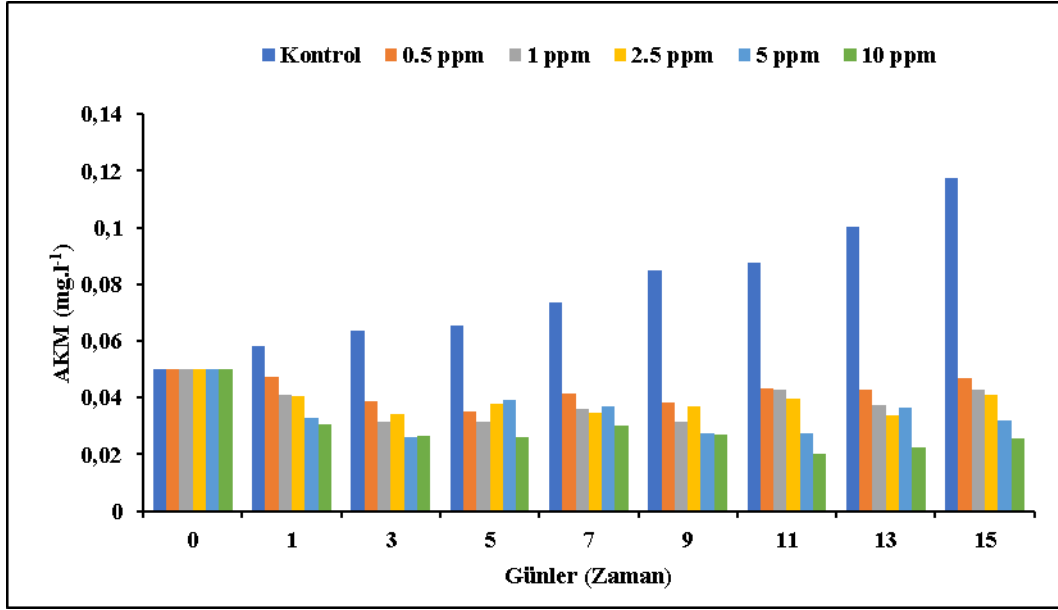
On beş günlük çalışma süresince günler kıyaslandığında, bakır etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa*’nın artan bakır konsantrasyonu ile askıda katı madde miktarlarında önemli bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Konsantrasyonlar arasında AKM miktarındaki en fazla düşüş 10 ppm ’lik bakır uygulamasında meydana gelmiştir.



Şekil 4.10. Bakır metalinin *Microcystis aeruginosa* AKM miktarına etkisi

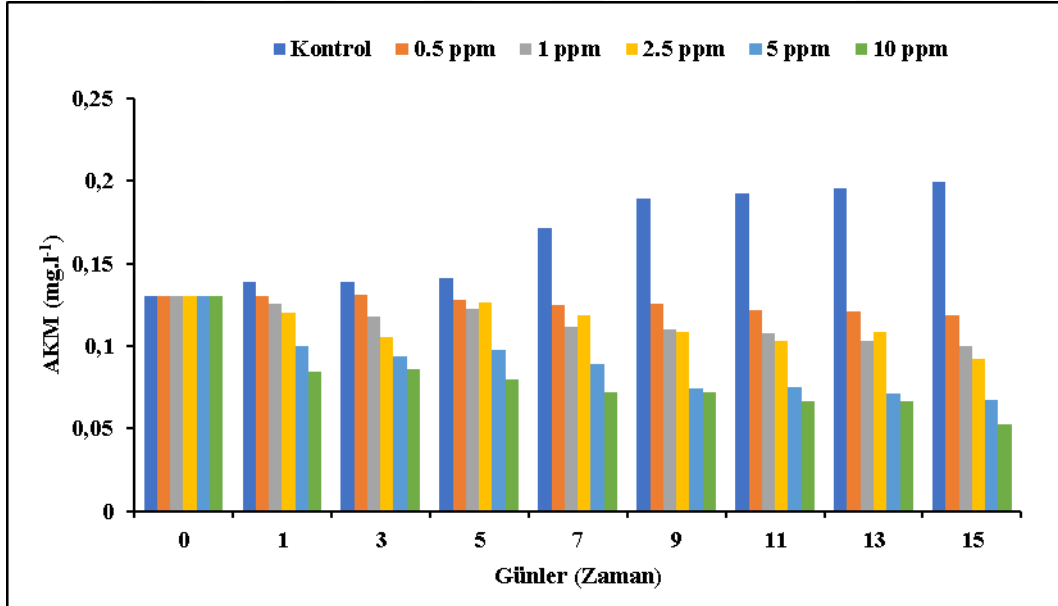
Synechocystis sp. algine uygulanan 5 farklı konsantrasyonlardaki bakır ağır metalinin AKM miktarı üzerine etkisi Şekil 4.11’de verilmiştir.

On beş günlük çalışma süresince günler kıyaslandığında, bakır etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.*’nin artan bakır konsantrasyonu ile askıda katı madde miktarlarında önemli bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Konsantrasyonlar arasında AKM miktarındaki en fazla düşüş 10 ppm ’lik bakır uygulamasında meydana gelmiştir.



Şekil 4.11. Bakır metalinin *Synechocystis sp.* AKM miktarına etkisi

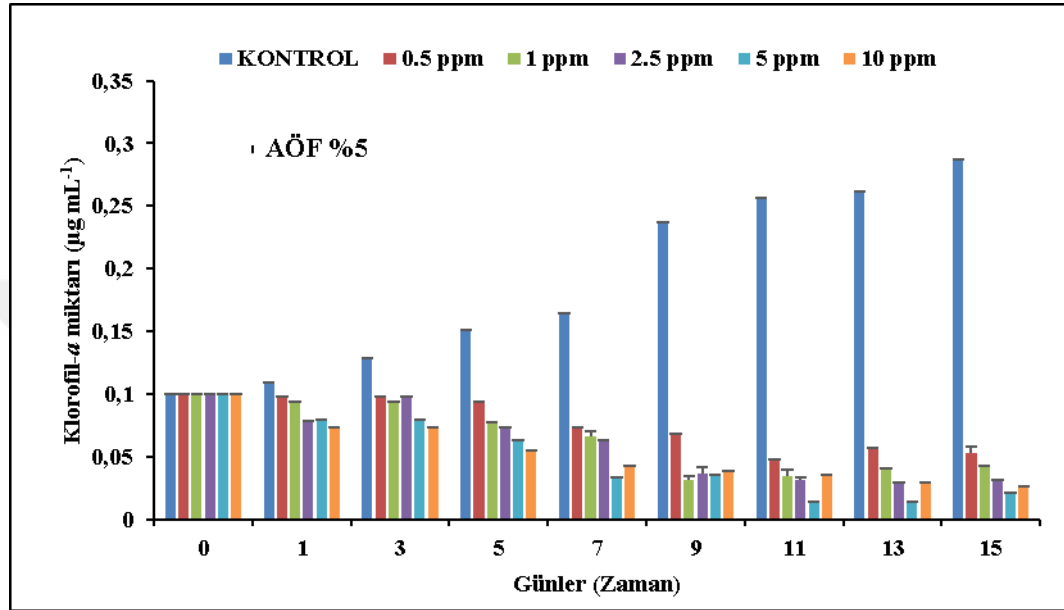
On beş günlük çalışma süresince günler kıyaslandığında, bakır metaline maruz bırakılan *Arthrospira platensis*'in artan bakır konsantrasyonu ile askıda katı madde miktarlarında önemli bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.12). Konsantrasyonlar arasında AKM miktarındaki en fazla düşüş 10 ppm 'lik bakır uygulamasında meydana gelmiştir.



Şekil 4.12. Bakır metalinin *Arthrospira platensis* AKM miktarına etkisi

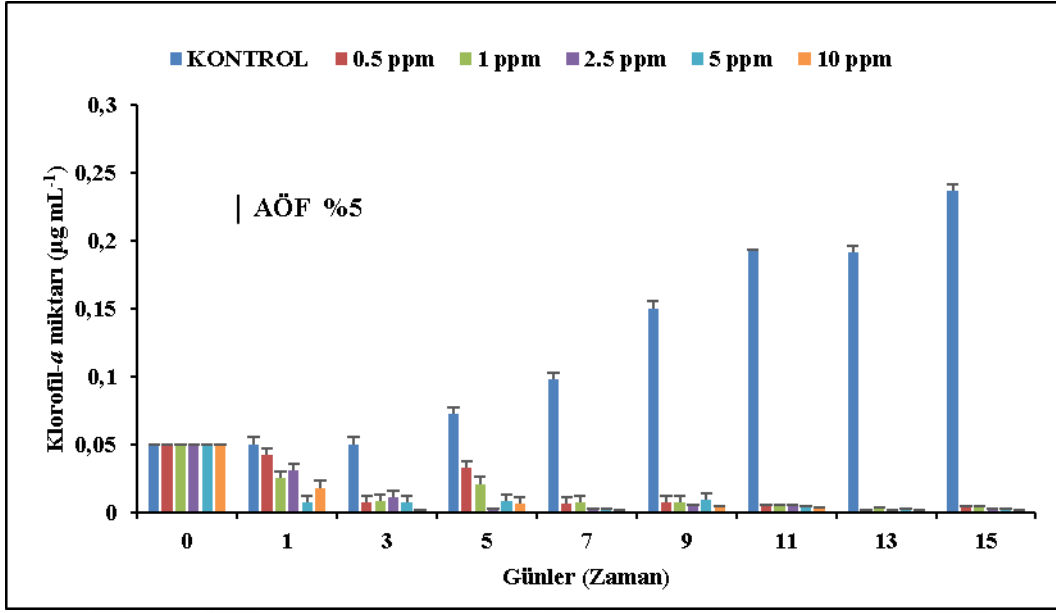
4.2.6. Bakır metalinin alglerin klorofil-a miktarına etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan 5 farklı konsantrasyondaki bakır metalinin klorofil-a üzerine etkisi Şekil 4.13.'de verilmiştir. On beş günlük çalışma süresince tüm gün ve tüm konsantrasyonlarda istatistiksel olarak anlamlı azalma görülmüştür ($p<0.05$).



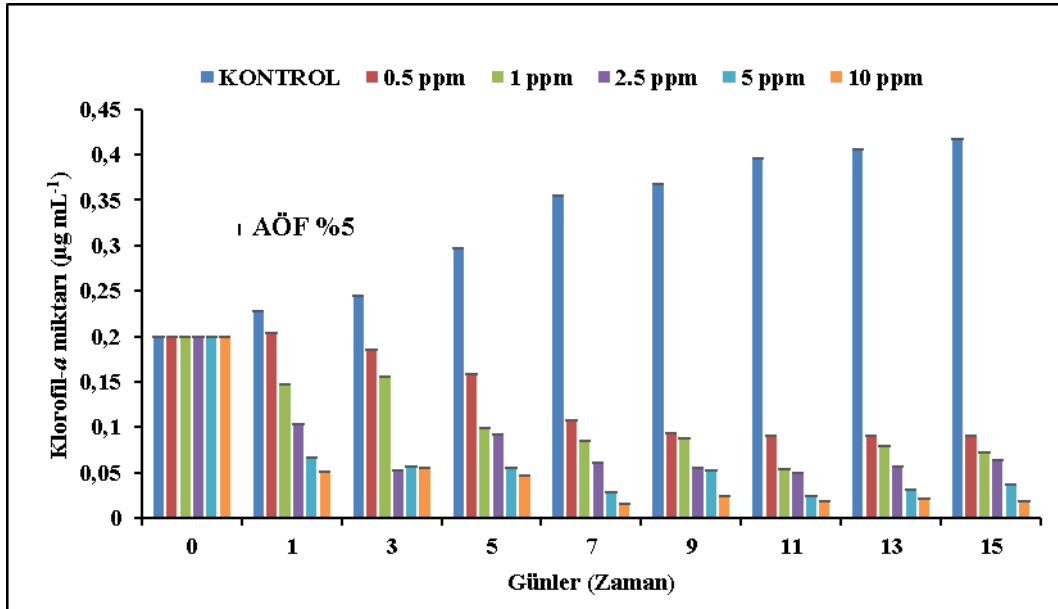
Şekil 4.13. Bakır metalinin *Microcystis aeruginosa* klorofil-a miktarına etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan 5 farklı konsantrasyondaki bakır metalinin klorofil-a üzerine etkisi Şekil 4.14'de verilmiştir. On beş günlük çalışma süresince günler kıyaslandığında, bakır etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.* kültürlerinde 1. günde 0.5, 1, 2.5 ve 10 ppm konsantrasyonlarında istatistiksel olarak bir fark görülmemiştir. 1. Gün 5 ppm konsantrasyonunda; 3. 5. 7. 9. 11. 13. ve 15. Günlerde tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) klorofil-a miktarında istatistiksel olarak anlamlı azalma görülmüştür ($p<0.05$).



Şekil 4.14. Bakır metalinin *Synechocystis sp.* klorofil-*a* miktarına etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan 5 farklı konsantrasyondaki bakır metalinin klorofil-*a* üzerine etkisi Şekil 4.15.'de verilmiştir. On beş günlük çalışma süresince, bakır etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platensis* kültürlerinde deney yapılan tüm gün ve tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) klorofil-*a* miktarında istatistiksel olarak anlamlı azalma görülmüştür ($p < 0.05$).

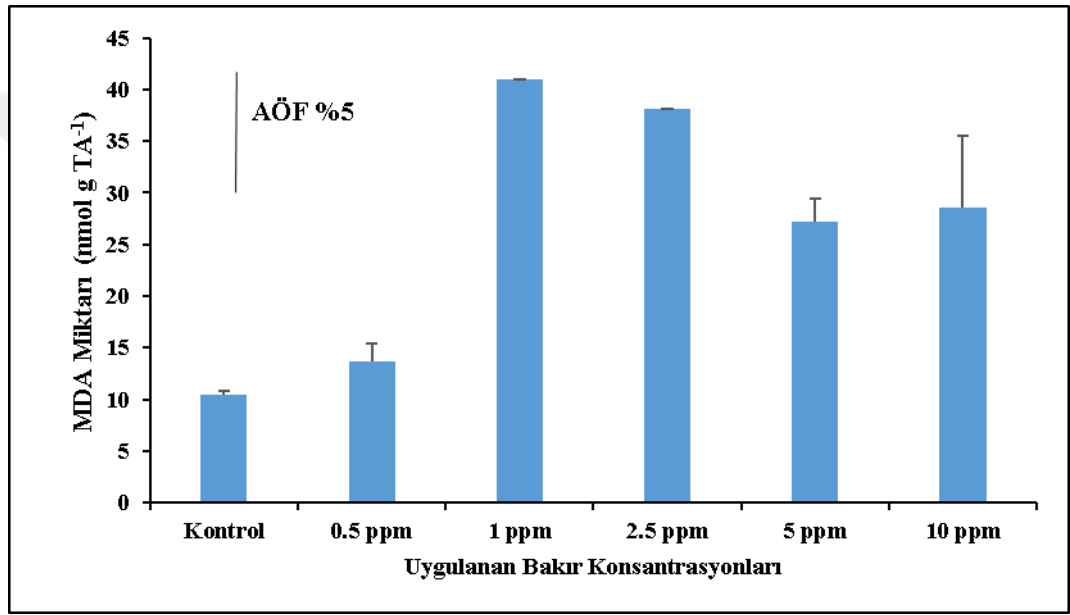


Şekil 4.15. Bakır metalinin *Arthrospira platensis* klorofil-*a* miktarına etkisi

4.2.7. Bakır metalinin alglerin MDA miktarına etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metalinin MDA miktarına etkisi Şekil 4.16’da verilmiştir.

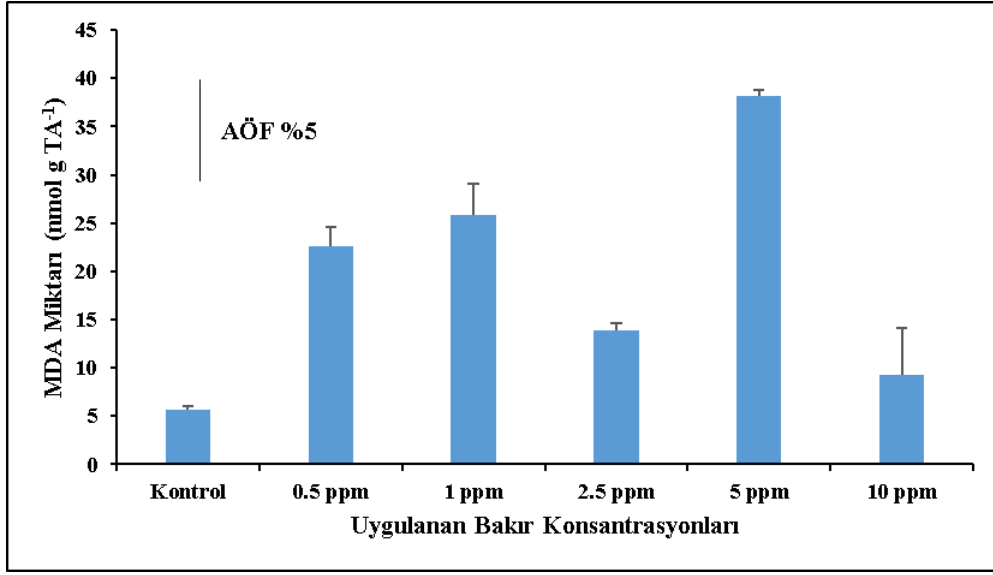
Bakır etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa*’nın MDA miktarı 0.5 ppm bakır konsantrasyonunda anlamlı değişim göstermemiştir. MDA miktarı 1 ppm, 2.5 ppm, 5 ppm ve 10 ppm konsantrasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artmıştır ($p>0.5$). MDA miktarının en yüksek (30,60 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (3,20 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 1 ppm ve 0.5 ppm bakır konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.16. Bakır metalinin *Microcystis aeruginosa* MDA miktarına etkisi

*Synechocystis sp.*algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metalinin MDA miktarına etkisi Şekil 4.17’de verilmiştir.

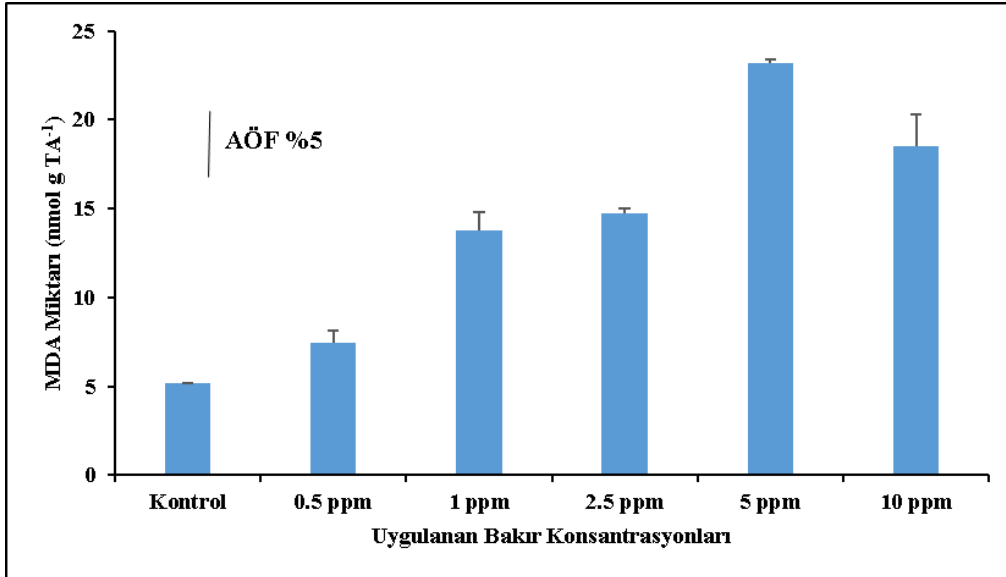
Bakır etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.*’nin MDA miktarı 2.5 ppm ve 10 ppm bakır konsantrasyonunda anlamlı değişim göstermemiştir. MDA miktarı 0.5 ppm, 1 ppm ve 5 ppm konsantrasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artmıştır ($p>0.5$). MDA miktarının en yüksek (38,14 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (9,26 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 5 ppm ve 10 ppm bakır konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. Bakır metalinin *Synechocystis sp.* MDA miktarına etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metalinin MDA miktarına etkisi Şekil 4.18’de verilmiştir.

Bakır etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platensis*’ in MDA miktarı 0.5 ppm bakır konsantrasyonunda anlamlı değişim göstermemiştir. MDA miktarı 1 ppm, 2.5 ppm, 5 ppm ve 10 ppm konsantrasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artmıştır ($p>0.5$). MDA miktarının en yüksek (23,18 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (7,43 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 5 ppm ve 0.5 ppm bakır konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.

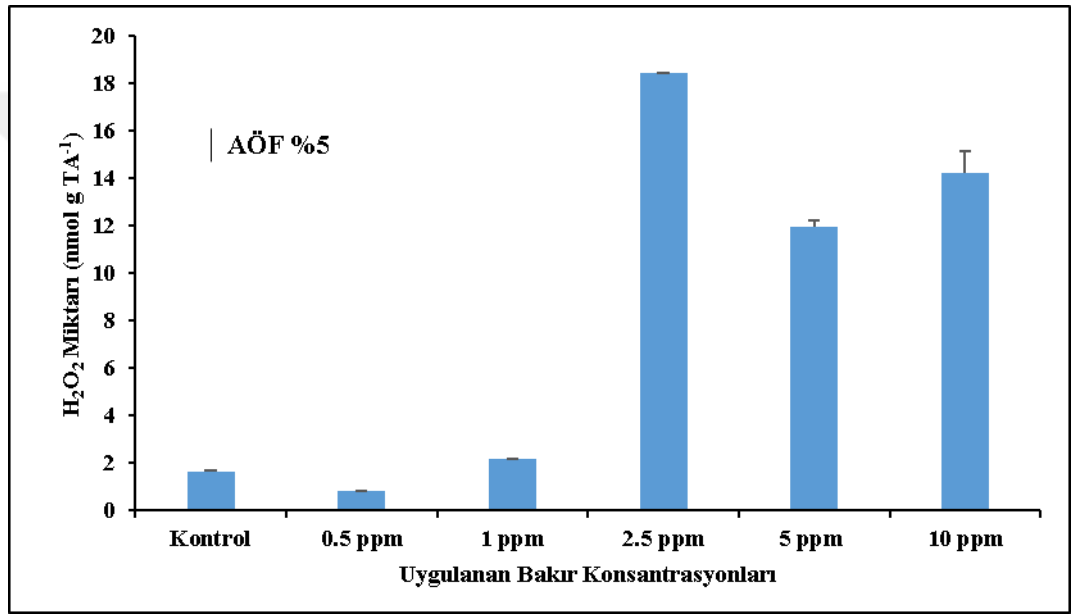


Şekil 4.18. Bakır metalinin *Arthrospira platensis* MDA miktarına etkisi

4.2.8. Bakır metalinin alglerin H₂O₂ miktarına etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki metalinin H₂O₂ miktarına etkisi Şekil 4.19’da verilmiştir.

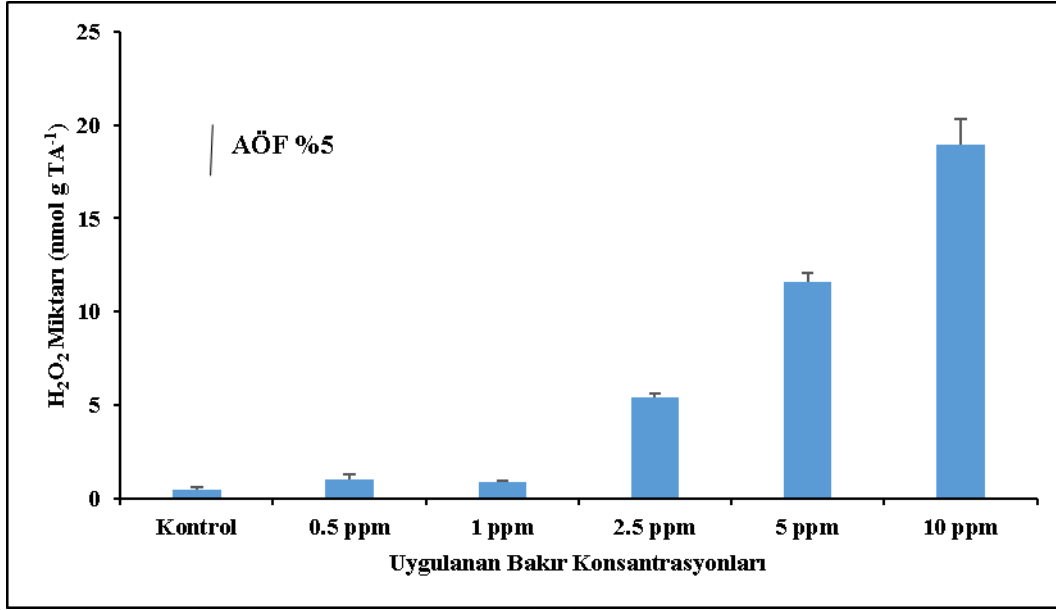
Bakır etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa*’nın H₂O₂ miktarı 0.5 ppm bakır konsantrasyonunda anlamlı değişim göstermemiştir. H₂O₂ miktarı 1 ppm, 2.5 ppm, 5 ppm ve 10 ppm konsantrasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artmıştır (p>0.5). Hidrojen peroksit miktarının en yüksek (17,93 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (0,86 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 2.5 ppm ve 0.5 ppm bakır konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.19. Bakır metalinin *Microcystis aeruginosa* H₂O₂ miktarına etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki metalinin H₂O₂ miktarına etkisi Şekil 4.20’de verilmiştir.

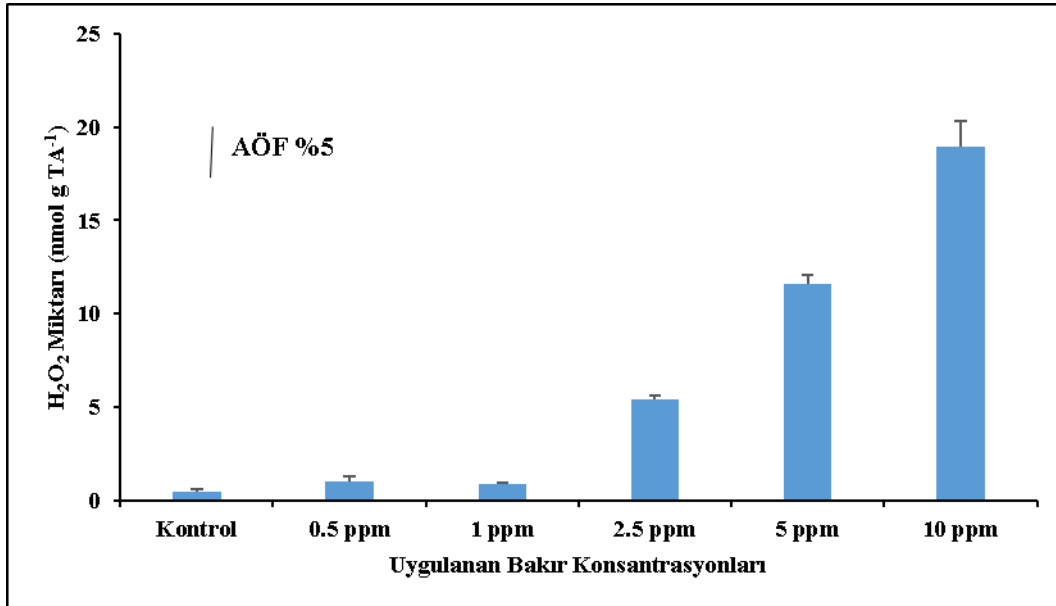
Bakır etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.*’nin H₂O₂ miktarı 0.5 ppm ve 1 ppm bakır konsantrasyonunda anlamlı değişim göstermemiştir. H₂O₂ miktarı 2.5 ppm, 5 ppm ve 10 ppm konsantrasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artmıştır (p>0.5). Hidrojen peroksit miktarının en yüksek (18,91 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (0,85 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 2.5 ppm ve 0.5 ppm bakır konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.20. Bakır metalinin *Synechocystis sp.* H₂O₂ miktarına etkisi

Arthrospira platenis algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki metalinin H₂O₂ miktarına etkisi Şekil 4.21’de verilmiştir.

Çalışma süresince bakır etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platenis*’in H₂O₂ miktarı tüm konsantrasyonlarda (0.5 ppm, 1 ppm, 2.5 ppm, 5 ppm ve 10 ppm) kontrole göre anlamlı değişim göstermemiştir.



Şekil 4.21. Bakır metalinin *Arthrospira platenis* H₂O₂ miktarına etkisi

4.3. Alg Kùltürleri Üzerine Bakır-Polipropilen Birleşik Etkileri

Seçilen her üç alg türü için deneyler 3 tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır. 100 µm'den küçük boyutlu polipropilen plastiğı ve beş farklı konsantrasyondaki (0.5, 1 ve 2.5, 5 ppm) bakır metalinin birleşik uygulamasının Siyanobakteri kùltürlerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla çalışma süresi boyunca 2 günde bir (48 saat aralıklı) alınan örneklerde spektrofotometrik olarak 560 nm dalga boyunda optik yoğunluk, klorofil-*a* miktarına bakılmış; mikroskobik hücre sayımları yapıp hücre boyutları takip edilmiş; MDA ve H₂O₂ analizleri yapılmıştır.

4.3.1. Bakır-Polipropilen karışımının Alg pH'ına etkisi

Microcystis aeruginosa alginin başlangıç pH'ı tüm numunelerde 7'ye ayarlanmış, deney sonunda hücre yoğunluğuna bağılı olarak tüm bakır konsantrasyonlarında artış göstermiş ve en yüksek pH 9.5'a ölçülmüştür.

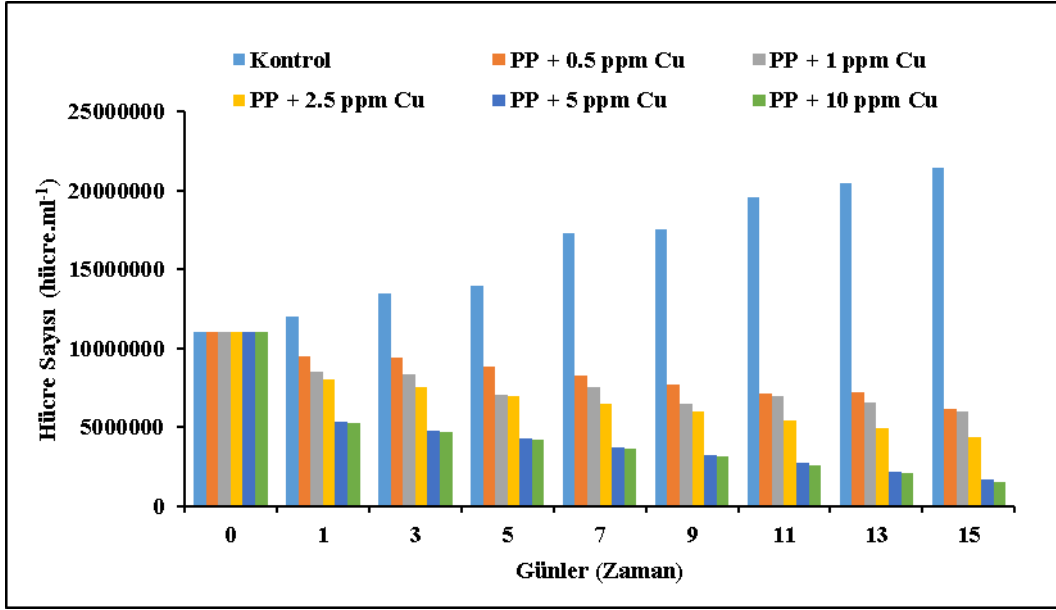
Synechocystis sp. alginin başlangıç pH'ı tüm numunelerde 7'ye ayarlanmış, deney sonunda hücre yoğunluğuna bağılı olarak tüm bakır konsantrasyonlarında artış göstermiş ve tüm konsantrasyonlarda pH 10'a kadar yükselmiştir.

Arthrospira platensis alginde ise başlangıç pH'ı tüm numunelerde 8'ye ayarlanmış, deney sonunda hücre yoğunluğuna bağılı olarak tüm bakır konsantrasyonlarında artış göstermiş ve kontrol dahil tüm konsantrasyonlarda pH 11'e kadar yükselmiştir.

4.3.2. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin hücre yoğunluğuna etkisi

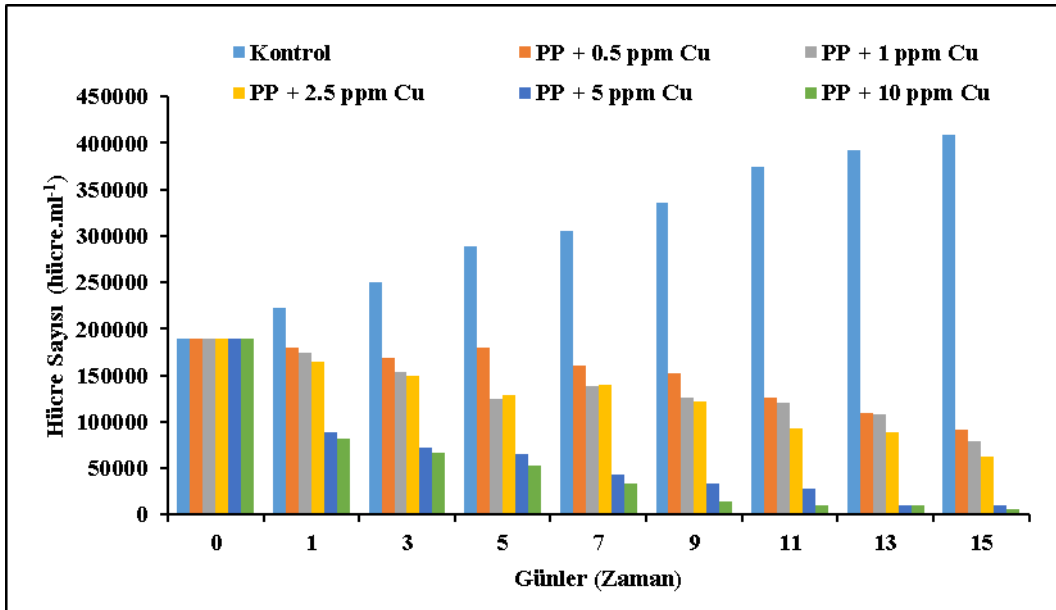
Mikroskop ile yapılan sayımlarda bakır- polipropilen ikili uygulamasına maruz bırakılan algler için hücre sayıları hesaplanmıştır.

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır-polipropilen uygulamasının hücre yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 4.22'de verilmiştir. Hücre sayıları bakır- polipropilen eklendiğı gün tüm dozlarda 11×10^6 hücre.ml⁻¹ hesaplanmıştır. Hücre sayıları AKM ve klorofil-*a* değerlerinde olduğı gibi tüm uygulama gruplarında çalışma süresi boyunca benzer değışim görölmektedir. Kontrol grubunda denemelerin sonunda 21×10^6 hücre.ml⁻¹ olarak ölçölürken en düşük olarak ise PP + 10 ppm Cu uygulanan kùltürde 15×10^6 hücre.ml⁻¹ olarak hesaplanmıştır.



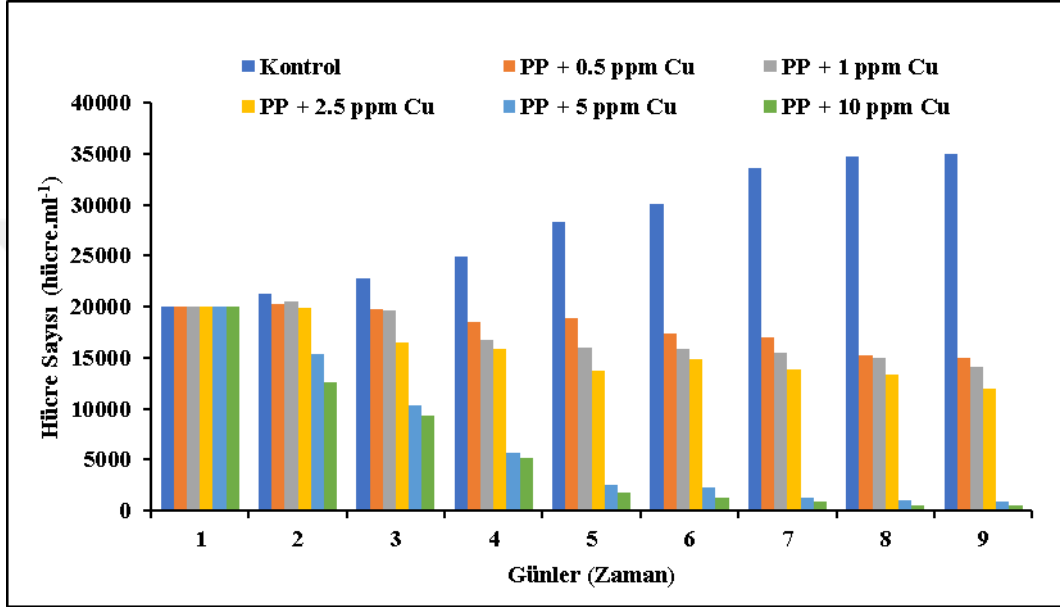
Şekil 4.22. Cu+PP karışımının *Microcystis aeruginosa* hücre yoğunluğuna etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır- polipropilen uygulamasının hücre yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 4.23’de verilmiştir. Hücre sayıları bakır- polipropilen eklendiği gün tüm dozlarda 19×10^4 hücre.ml⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Hücre sayıları OD, AKM ve klorofil-*a* değerlerinde olduğu gibi tüm uygulama gruplarında çalışma süresi boyunca benzer bir değişim görülmektedir. Kontrol grubunda denemelerin sonunda 40×10^4 hücre.ml⁻¹ ölçülürken en düşük olarak ise PP + 10 ppm Cu uygulanan kültürde $0,6 \times 10^4$ hücre.ml⁻¹ hesaplanmıştır.



Şekil 4.23. Cu+PP karışımının *Synechocystis sp.* hücre yoğunluğuna etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır- polipropilen uygulamasının hücre yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 4.24’de verilmiştir. Hücre sayıları bakır- polipropilen eklendiği gün tüm dozlarda 20×10^3 hücre.ml⁻¹ hesaplanmıştır. Hücre sayıları OD, AKM ve klorofil-*a* değerlerinde olduğu gibi tüm uygulama gruplarında çalışma süresi boyunca benzer bir değişim görülmektedir. Kontrol grubunda denemelerin sonunda 34×10^3 hücre.ml⁻¹ olarak ölçülürken en düşük olarak ise PP + 10 ppm Cu uygulanan kültürde 512 hücre.ml⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

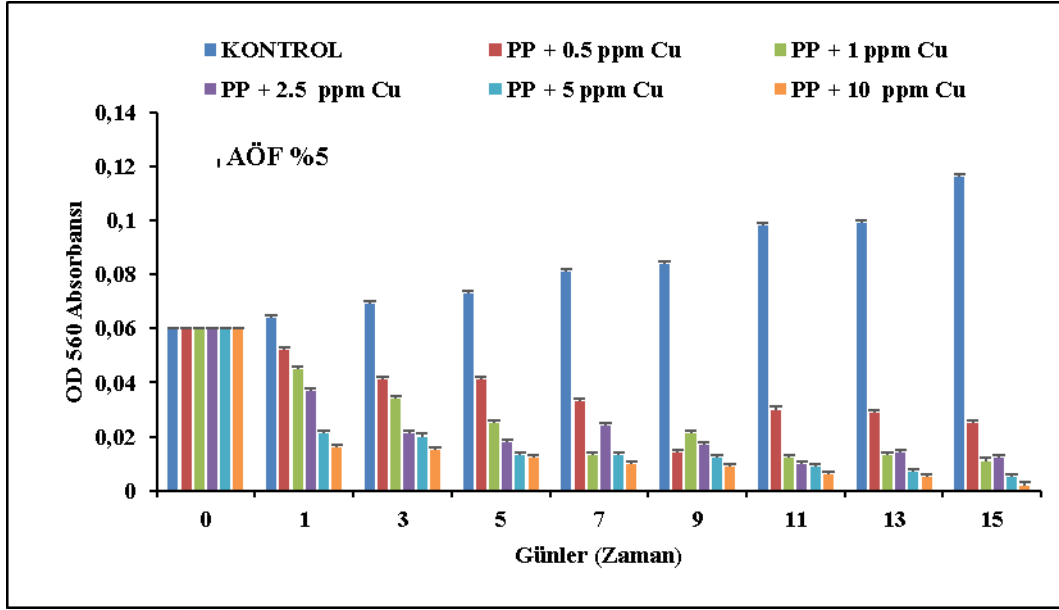


Şekil 4.24. Cu+PP karışımının *Arthrospira platensis* hücre yoğunluğuna etkisi

4.3.3. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin optik yoğunluğuna etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının OD 560 absorbansına etkisi Şekil 4.25’de verilmiştir.

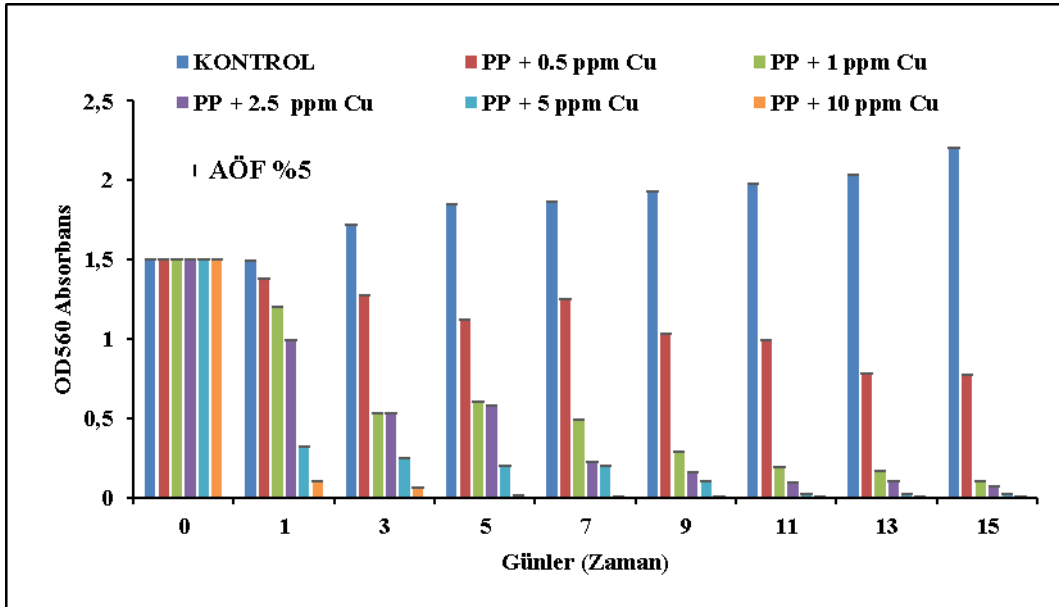
Çalışma süresince günler kendi aralarında kıyaslandığında, polipropilen ve bakırın ikili etkisine etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa* kültürlerinde deney yapılan her gün tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) OD 560 absorbansı üzerinde anlamlı azalma görülmüştür ($p < 0.05$).



Şekil 4.25. Cu+PP karışımının *M. aeruginosa* OD560 absorbansı üzerine etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikropластиğinin OD 560 absorbansı üzerine birleşik etkisi Şekil 4.26'da verilmiştir.

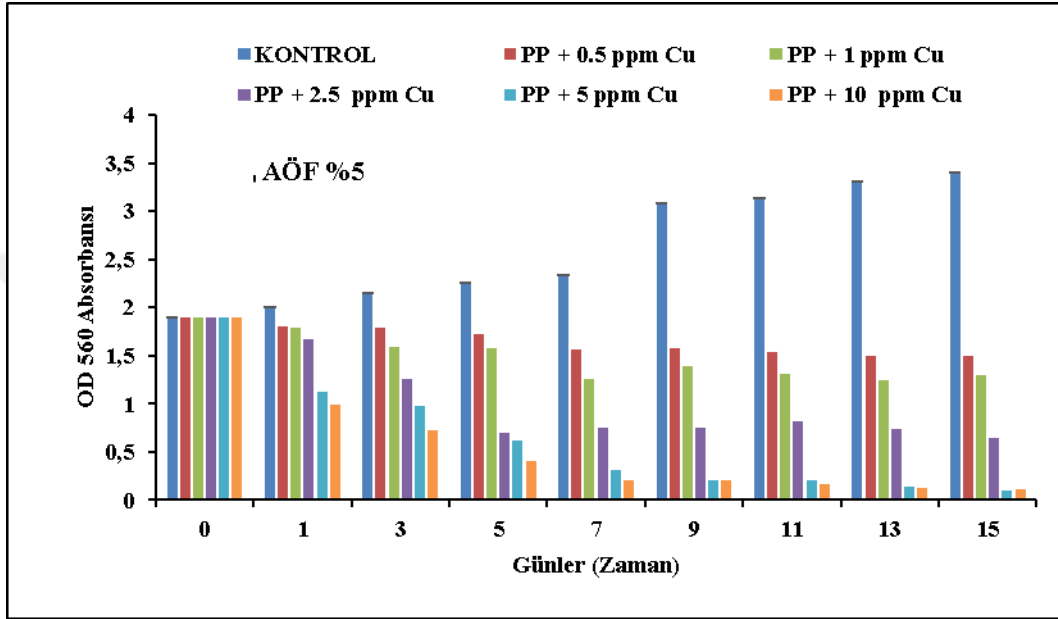
Çalışma süresince, polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Synechocystis* sp. kültürlerinde deney yapılan her gün tüm konsantrasyonlarda (0,5, 1, 2,5, 5 ve 10 ppm) OD 560 absorbansı üzerinde anlamlı azalma görülmüştür ($p < 0.05$).



Şekil 4.26. Cu+PP karışımının *Synechocystis* sp. OD560 absorbansına etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan 3 farklı konsantrasyondaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının OD 560 absorbansı üzerine etkisi Şekil 4.27’de verilmiştir.

Çalışma süresince, polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platensis* kültürlerinde deney yapılan her gün tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) OD 560 absorbansı üzerinde anlamlı azalma görülmüştür ($p<0.05$).

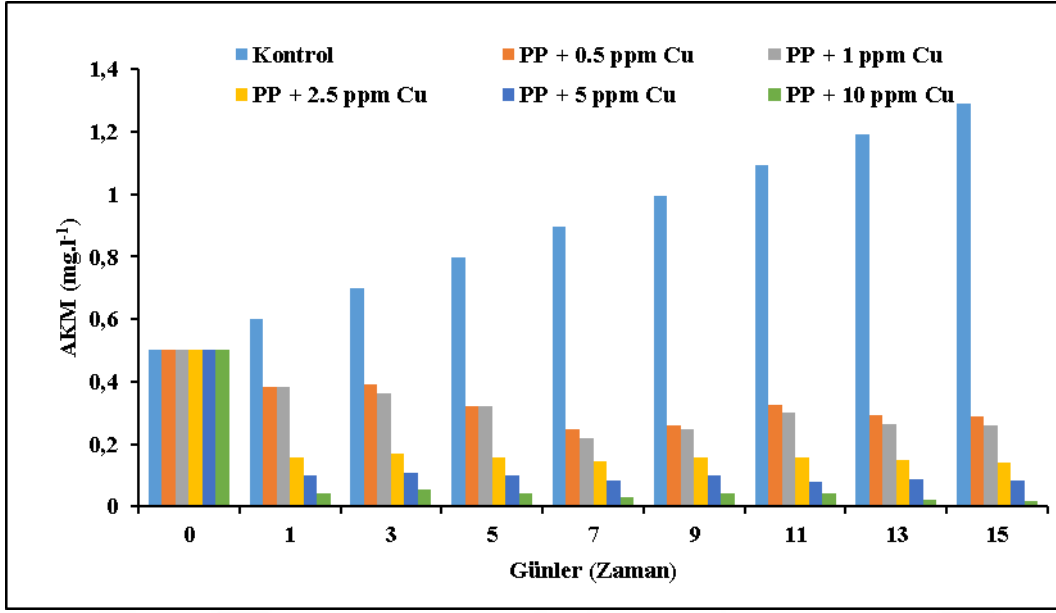


Şekil 4.27. Cu+PP karışımının *Arthrospira platensis* OD560 absorbansına etkisi

4.3.4. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin askıda katı madde miktarına etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının AKM miktarı üzerine etkisi Şekil 4.28’de verilmiştir.

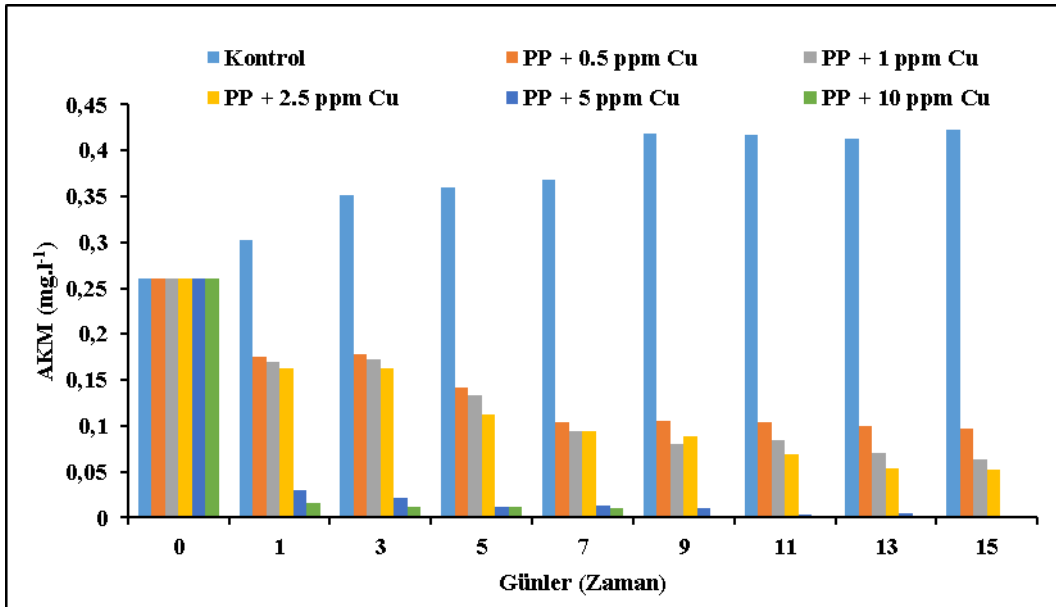
Çalışma süresince, bakır etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa*’nın artan bakır konsantrasyonlarına bağlı olarak askıda katı madde miktarlarında azalma gözlemlenmiştir. Konsantrasyonlar arasında AKM miktarındaki en fazla düşüş PP + 10 ppm uygulamasında meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.28. Cu+PP karışımının *Microcystis aeruginosa* AKM miktarına etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının AKM miktarı üzerine etkisi Şekil 4.29’da verilmiştir.

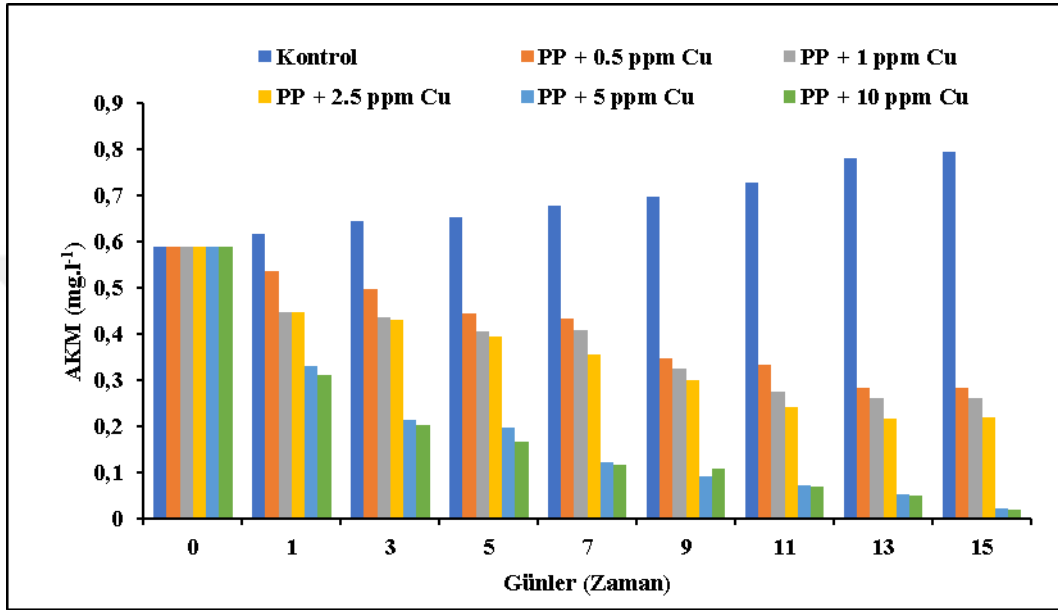
Çalışma süresince, bakır etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.* ‘nin artan bakır konsantrasyonlarına bağlı olarak askıda katı madde miktarlarında azalma gözlemlenmiştir. Konsantrasyonlar arasında AKM miktarındaki en fazla düşüş PP + 10 ppm uygulamasında meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.29. Cu+PP karışımının *Synechocystis sp.* AKM miktarına etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan 3 farklı konsantrasyondaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının AKM miktarı üzerine etkisi Şekil 4.30’da verilmiştir.

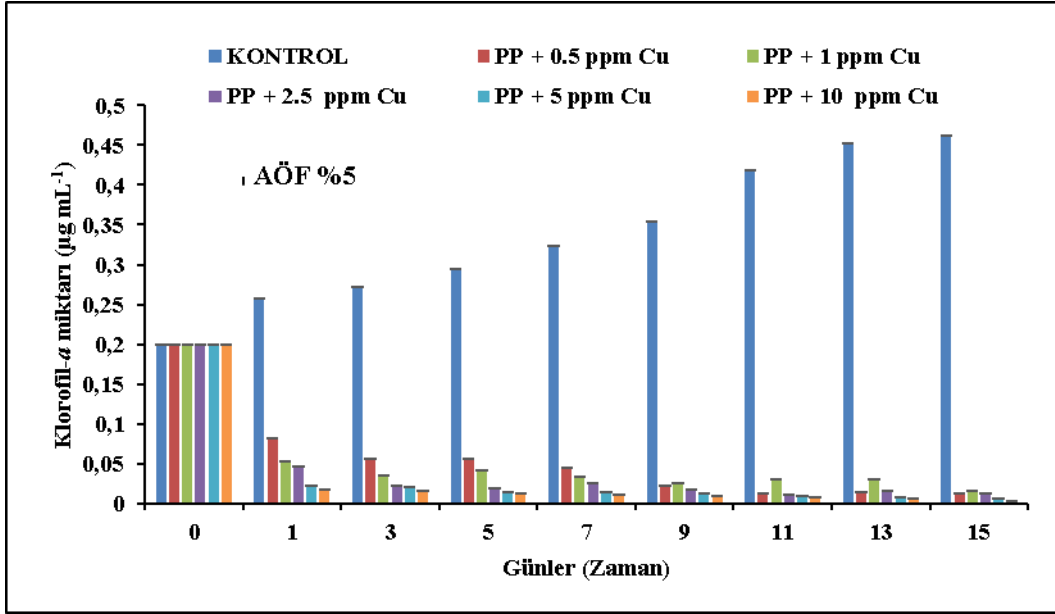
Çalışma süresince, bakır etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platensis* ‘in bakır konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak askıda katı madde miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Konsantrasyonlar arasında AKM miktarındaki en fazla düşüş PP + 10 ppm uygulamasında meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.30. Cu+PP karışımının *Arthrospira platensis* AKM miktarına etkisi

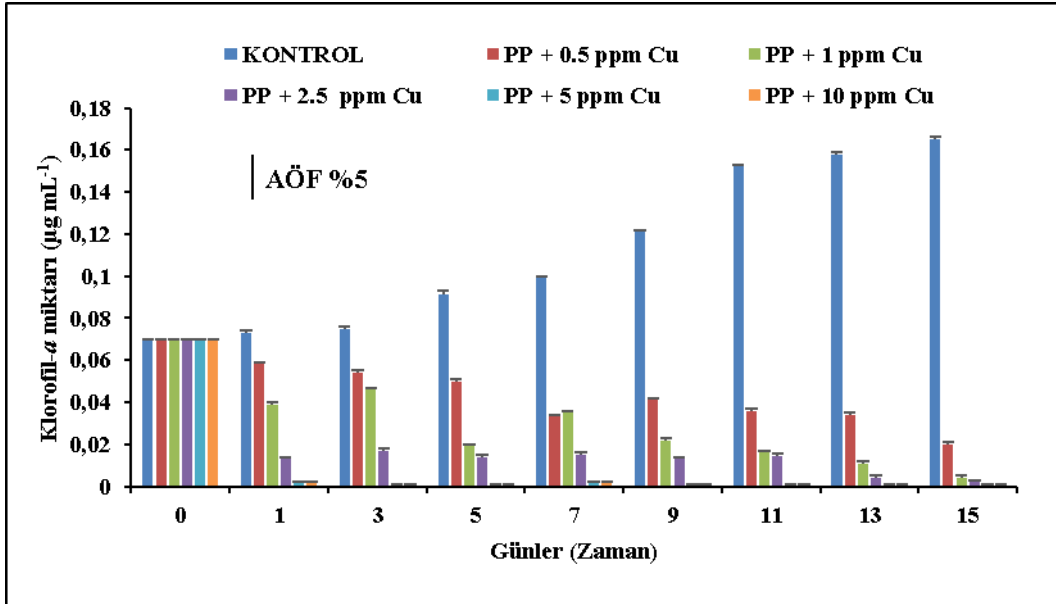
4.3.5. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin klorofil-a miktarına etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının klorofil-a miktarına birleşik etkisi Şekil 4.31’de verilmiştir. Çalışma süresince günler kendi aralarında kıyaslandığında, polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa* kültürlerinde deney yapılan her gün tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) klorofil-a miktarında istatistiksel olarak anlamlı azalma görülmüştür ($p < 0.05$).



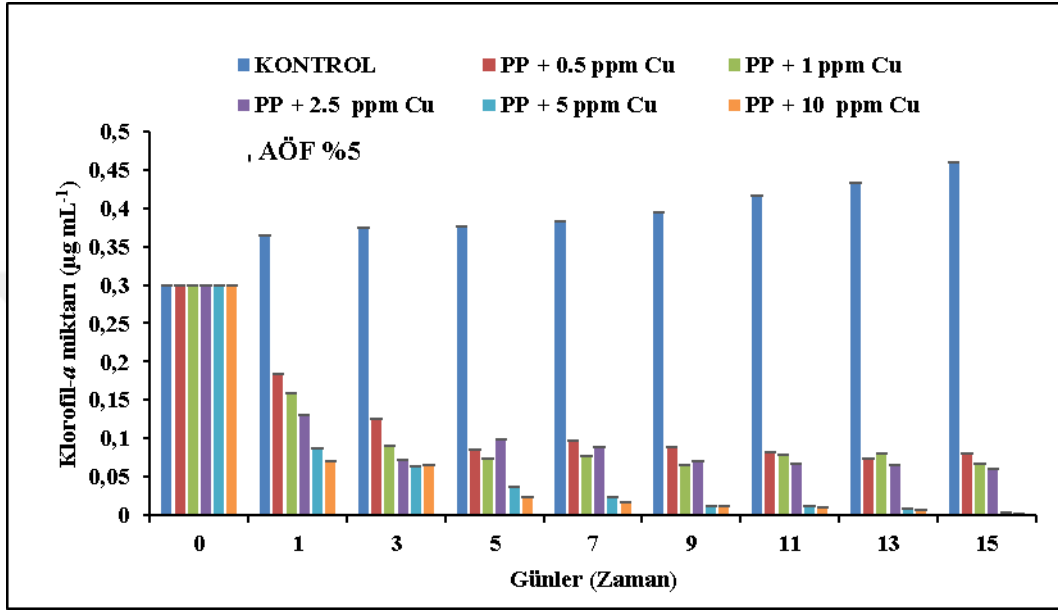
Şekil 4.31. Cu+PP karışımının *Microcystis aeruginosa* klorofil-*a* miktarına etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının klorofil-*a* miktarına birleşik etkisi Şekil 4.32’de verilmiştir. Çalışma süresince günler kendi aralarında kıyaslandığında, polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.* kültürlerinde deney yapılan her gün tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) klorofil-*a* miktarında istatistiksel olarak anlamlı azalma görülmüştür ($p < 0.05$).



Şekil 4.32. Cu+PP karışımının *Synechocystis sp.* klorofil-*a* miktarına etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan 3 farklı konsantrasyondaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının klorofil-a miktarına birleşik etkisi Şekil 4.33’de verilmiştir. Çalışma süresince günler kendi aralarında kıyaslandığında, polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platensis* kültürlerinde deney yapılan her gün tüm konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) klorofil-a miktarında istatistiksel olarak anlamlı azalma görülmüştür ($p < 0.05$).

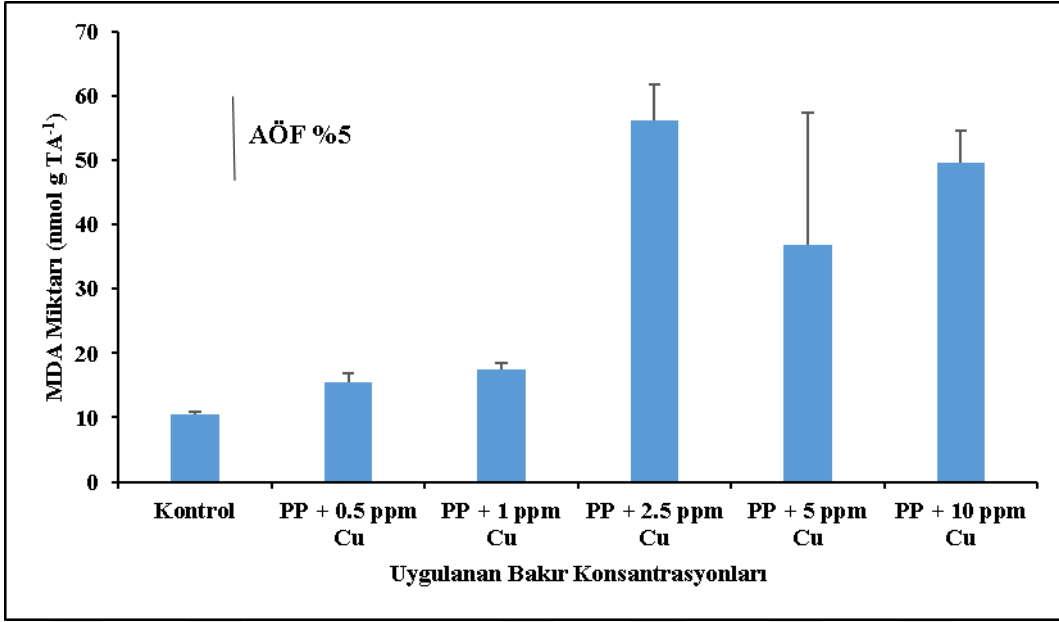


Şekil 4.33. Cu+PP karışımının *Arthrospira platensis* klorofil-a miktarına etkisi

4.3.6. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin MDA miktarına etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının MDA miktarına birleşik etkisi Şekil 4.34’de verilmiştir.

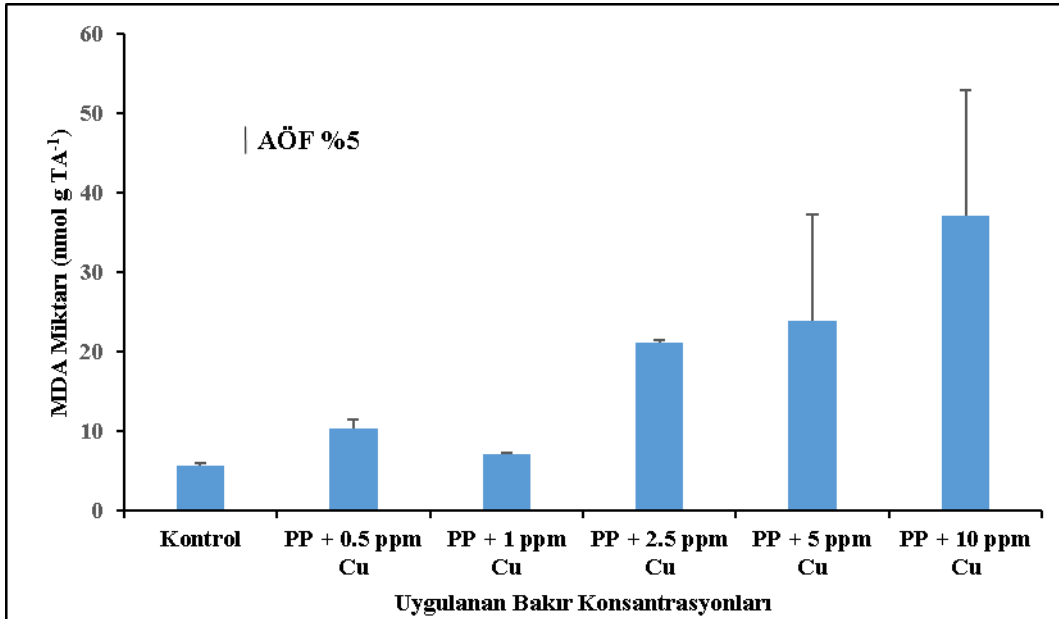
Polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa*’nın MDA miktarı 0.5 ppm ve 1 ppm bakır ve polipropilen konsantrasyonunda kontrole kıyasla anlamlı değişim gözlemlenmemiştir. MDA miktarı 2.5, 5 ve 10 ppm bakır ve polipropilen konsantrasyonunda istatistiksel olarak anlamlı artmıştır ($p > 0.5$). MDA miktarının en yüksek (56,28 nmol g TA-1) ve en düşük (15,49 nmol g TA-1) olduğu değerler sırasıyla 2.5 ppm ve 0.5 ppm bakır ve PP konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.34. Cu+PP karışımının *Microcystis aeruginosa* MDA miktarına etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının MDA miktarına birleşik etkisi Şekil 4.35’de verilmiştir.

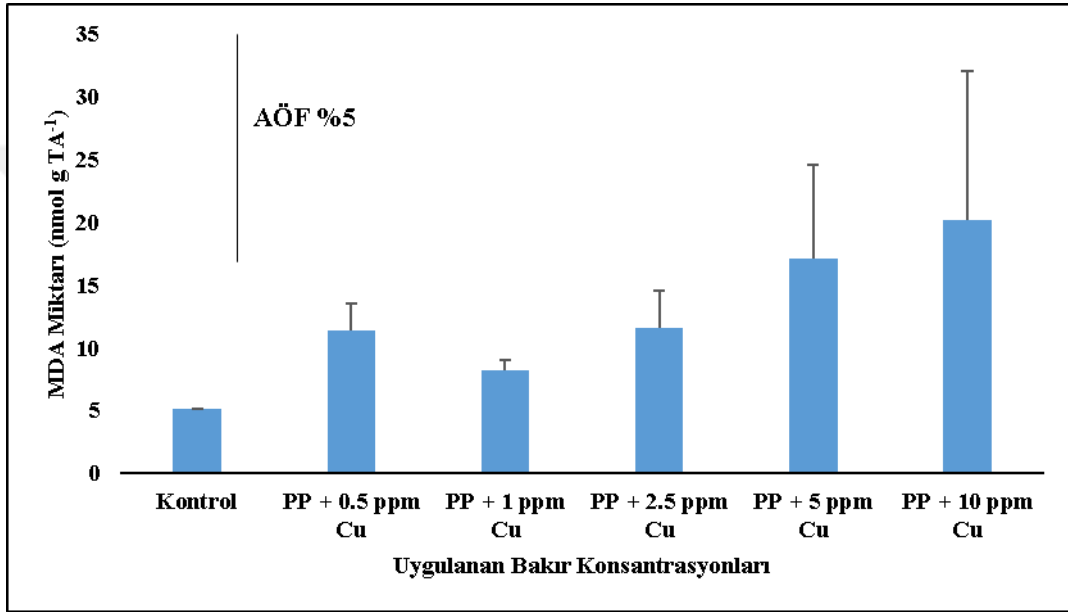
Polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.*’nin MDA miktarı tüm ikili konsantrasyonlarda (0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 ppm) istatistiksel olarak anlamlı artmıştır ($p>0.5$). MDA miktarının en yüksek (37,16 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (7,16 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 10 ppm ve 1 ppm bakır ve PP konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.35. Cu+PP karışımının *Synechocystis sp.* MDA miktarına etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan 3 farklı konsantrasyondaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının MDA miktarına birleşik etkisi Şekil 4.36’da verilmiştir.

Polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platensis*’in MDA miktarı 0.5, 1 ve 2.5 ppm Cu + PP konsantrasyonlu ikili uygulamada kontrole göre anlamlı değişim göstermemiştir. 5 ve 10 ppm Cu +PP uygulamasında kontrole göre istatistiksel olarak anlamlı artış gözlemlenmiştir ($p>0.5$). Malondialdehit miktarının en yüksek (20,18 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (8,25 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 10 ppm ve 1 ppm bakır ve PP konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.

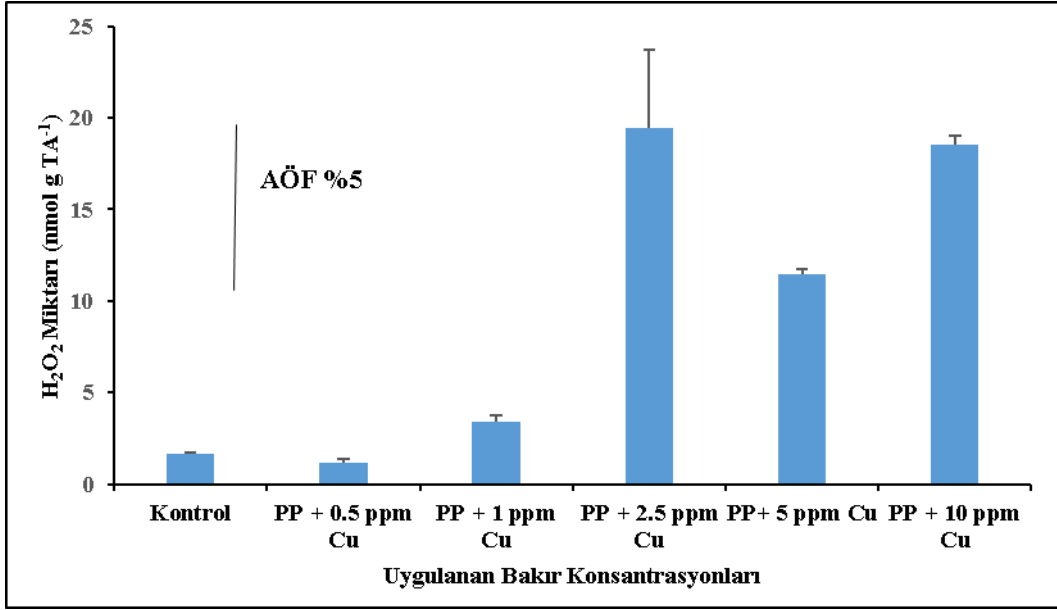


Şekil 4.36. Cu+PP karışımının *Arthrospira platensis* MDA miktarına etkisi

4.3.7. Bakır-Polipropilen karışımının alglerin H₂O₂ miktarına etkisi

Microcystis aeruginosa algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının H₂O₂ miktarına birleşik etkisi Şekil 4.37’de verilmiştir.

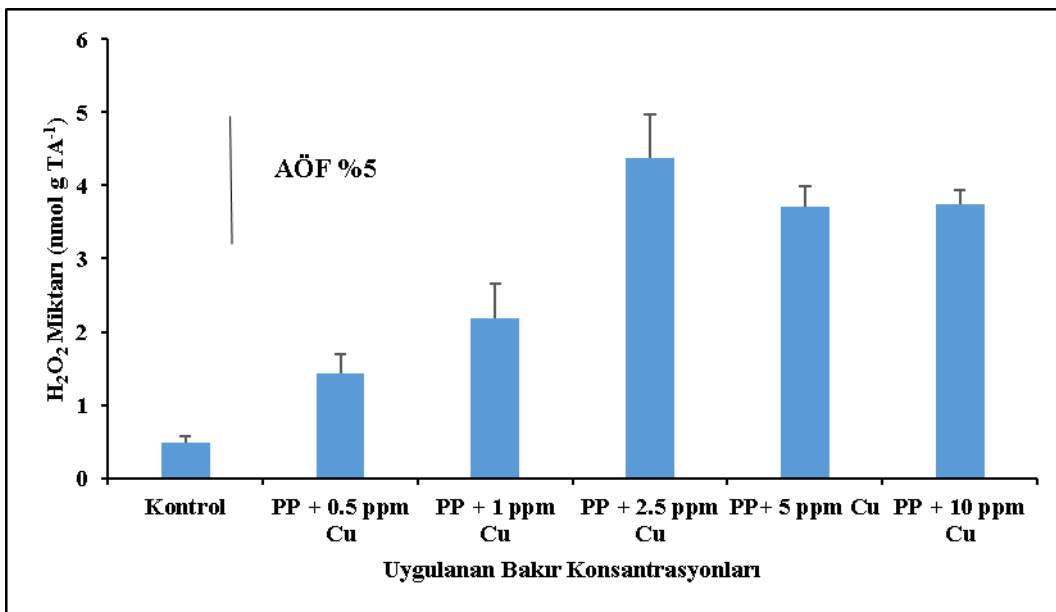
Polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Microcystis aeruginosa*’nın H₂O₂ miktarı 0.5 ppm ve 1 ppm bakır ve polipropilen konsantrasyonunda anlamlı değişim olmamıştır. H₂O₂ miktarı 2.5, 5 ve 10 ppm bakır ve polipropilen konsantrasyonunda istatistiksel olarak anlamlı artmıştır ($p>0.5$). Hidrojen peroksit miktarının en yüksek (19,43 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (1,15 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 2.5 ppm ve 0.5 ppm bakır ve PP konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.37. Cu+PP karışımının *Microcystis aeruginosa* H₂O₂ miktarına etkisi

Synechocystis sp. algine uygulanan farklı konsantrasyonlardaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının H₂O₂ miktarına birleşik etkisi Şekil 4.38’de verilmiştir.

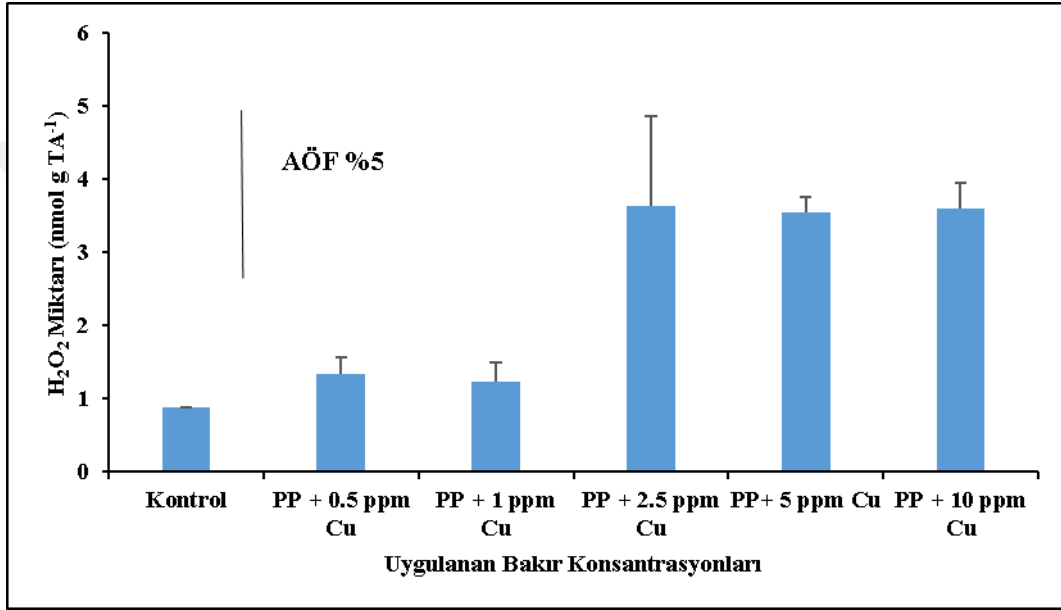
Polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Synechocystis sp.*’nin H₂O₂ miktarı 0.5 ppm bakır ve polipropilen konsantrasyonunda anlamlı değişim olmamıştır. Hidrojen peroksit miktarı 1, 2.5, 5 ve 10 ppm bakır ve polipropilen konsantrasyonunda istatistiksel olarak anlamlı artmıştır ($p > 0.5$). H₂O₂ miktarının en yüksek (4,37 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (1,42 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 2.5 ppm ve 0.5 ppm bakır ve PP konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.38. Cu+PP karışımının *Synechocystis sp.* H₂O₂ miktarına etkisi

Arthrospira platensis algine uygulanan 3 farklı konsantrasyondaki bakır metali ve polipropilen mikroplastığının H₂O₂ miktarına birleşik etkisi Şekil 4.39’da verilmiştir.

Polipropilen ve bakırın ikili etkisine maruz bırakılan *Arthrospira platensis*’in H₂O₂ miktarı 0.5 ppm ve 1 ppm bakır ve polipropilen konsantrasyonunda anlamlı değişim göstermemiştir. H₂O₂ miktarı 2.5, 5 ve 10 ppm bakır ve polipropilen konsantrasyonunda istatistiksel olarak anlamlı artmıştır (p>0.5). H₂O₂ miktarının en yüksek (3,63 nmol g TA⁻¹) ve en düşük (1,23 nmol g TA⁻¹) olduğu değerler sırasıyla 2.5 ppm ve 0.5 ppm bakır ve PP konsantrasyonlarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.39. Cu+PP karışımının *Arthrospira platensis* H₂O₂ miktarına etkisi



5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada *Microcystis aeruginosa*, *Synechocystis* sp. ve *Arthrospira platensis* algleri üzerine bakır ve bakır-polipropilen ikili uygulamasının farklı konsantrasyonlarda etki etmesi sonucu alglerin pH, hücre sayısı, OD560 absorbansı, askıda katı madde, klorofil-a, hidrojen peroksit ve malondialdehit miktarı değerlerinde görülen değişimler araştırılmıştır.

Alglerde ağır metalin sebep olduğu olumsuz etkilerin başında organizmanın canlılık faaliyetleri gelmektedir ve algler ile yapılan çalışmalarda uygulanan metal toksisitesinin; metal türlerine, ortamdaki metal derişimine, metalin kimyasal yapısına, organizmanın toleransına, metal etkileşimine vereceği yanıt ve alg türüne bağlı olduğu bildirilmiştir (Gupta ve ark., 2001; Champbell, 1995; Aksu, 1998). Çalışmamızda bakır ağır metale bağlı olarak üç alg türünün de klorofil-a miktarının, hücre yoğunluğunun, optik yoğunluğunun, MDA ve H₂O₂ miktarının farklı derecelerde etkilendiği gözlenmiştir.

Literatürde, ağır metaller, alglerin büyümelerini inhibe ederek büyümenin lag fazının bozulmasına neden olmaktadır. Artan ağır metal konsantrasyonlarında büyüme, fotosentez hızı ve klorofil-a miktarında azalmaya neden olduğu ve bunun sebebinin ağır metallerin toksik etkisinin klorofil-a'yı inhibe etmiş olabileceği; bu sebeple algde hücre bölünmesi engellenmesiyle büyümenin durduğu belirtilmektedir. (De Filippis ve ark., 1981; Elbaz ve ark., 2010; Stevenson ve ark., 1996). Sunulan 15 günlük çalışma süresince, hücre yoğunlukları *Microcystis aeruginosa* ve *Arthrospira platensis* alglerinde artan bakır konsantrasyonu ile azalma gerçekleşmiş, *Synechocystis* sp. hücre yoğunluğunda ise ciddi bir azalma gözlemlenmemiştir.

Manzi ve ark. (2022) Mikroplastik konsantrasyonunun *Spirulina* sp.'nin büyümesi üzerindeki etkisinin daha yüksek mikroplastik konsantrasyonunun alglerin büyüme oranını azalttığını belirtmiştir. Kültürdeki mikroplastikler, ışık yoğunluğunu ve alg fotosentezini azaltan gölgeleme etkilerine sahip olabilir. Mikroplastikler ayrıca ozmotik basıncı artırarak ve biyobileşen kompozisyonlarını (karbonhidrat, lipid ve protein seviyeleri dahil) değiştirerek alg hücrelerine fiziksel olarak zarar verebilir.

Polimer tipi ve boyutu da alg toksisitesine katkıda bulunur ve su sütunu boyunca dağılımı üzerinde doğrudan etki ederek tortulaşmaya veya kaldırma kuvvetine yol açabilir. Sjollema ve ark. (2016) mikroplastik konsantrasyonu ne kadar yüksekse klorofil-a içeriği üzerindeki olumsuz etkinin o kadar büyük olduğunu belirtmiştir. Qian ve ark. (2010), çalışmasında *Microcystis aeruginosa* üzerine CuSO₄ ve hidrojen peroksit uygulamış, 48 ve 96. saatlerde farklı parametrelerdeki değişimini araştırmışlardır. Sonuç olarak klorofil-a değişiminin bakır sülfat etkisinde arttığını fakat 48saatten sonra azaldığını; hidrojen peroksit etkisiyle giderek arttığını bildirmişlerdir. Klorofil-a içeriğindeki azalmanın iki nedeni olabilir: birincisi, hücre içi reaktif oksijen türlerinin birikmesi hücre yapısını bozar ve klorofil sentezini bloke eder; ikincisi, mikroplastikler geniş bir yüzey alanına ve güçlü adsorpsiyon kabiliyetine sahiptir ve mikroalgler ve mikroplastikler, farklı boyutlardaki hetero-agregalar için uygundur ve algi etkisiz hale getirir. Polipropilenli bakır uygulamasında *Microcystis aeruginosa* ve *Arthrospira platensis* alglerinde en düşük olan PP + 0.5 ppm Cu konsantrasyonunda hücre sayısında daha fazla azalma görülmüş, *Synechocystis* sp. de hücre sayıları kontrole oranla yükselmiştir. Bakır ve polipropilenli bakır ikili uygulamalarında maruz kalan üç alg türünde de OD560 ve klorofil-a ölçümlerinde ise artan konsantrasyonla birlikte kontrol grubuna göre anlamlı azalma gözlenmiştir. *Microcystis aeruginosa*, *Synechocystis* sp. ve *Arthrospira platensis* alglerinde bakır ve mikroplastik etkisiyle klorofil-a'da görülen azalış klorofil-a biyosentezinden sorumlu enzimlerin çalışamamasının, biyosentez sürecinin bozulmasının ya da klorofilin parçalanmasından kaynaklanabilir.

Bakır uygulanan tüm kültürlerde hızlı azalış 0.5 ppm konsantrasyonda olmakla birlikte en düşük değer 10 ppm konsantrasyonunda ölçülmüştür. Bakır uygulanan *Microcystis aeruginosa* nın AKM miktarında kontrole göre azalma görülürken *Synechocystis* sp. ve *Arthrospira platensis* örneklerinde önemli oranda bir azalma olmamakta ve en düşük biyokütle miktarı 10 ppm konsantrasyonda görülmektedir. İkili uygulamada ise tüm alg kültürlerinde artan konsantrasyonla AKM miktarında azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Malondialdehit (MDA), oksidatif lipid peroksidasyonunun etkili son ürünüdür. Oksidatif hasar seviyesini anlamak için kullanılmaktadır (Urso ve Clarkson, 2003). Mikroorganizmadaki MDA miktarının artması serbest radikal miktarının artması anlamına gelmektedir.

Choudhary ve ark. (2007), *A. platensis* S5 suşuna Cu, Zn ve Pb metallerinin etkileri üzerinde çalışmışlardır. Sonuçta metal konsantrasyonlarının artışıyla birlikte alg gelişimi azalmış ve MDA miktarı artmıştır. Artan metal konsantrasyonuna bağlı olarak, kullanılan algin metal stresine toleransının yüksek olduğunu ve MDA artışıyla serbest radikallerin meydana geldiğini bildirmişlerdir. Metalin yüksek konsantrasyonlarda MDA miktarını artırması, hücre zarında lipid peroksidasyonunun arttığını gösterir. Maleva ve ark. (2009), yaptıkları çalışmada *Elodea canadensis*'e farklı konsantrasyonlarda (1, 10 ve 50 μ M) nikel sülfat uygulamış ve artan konsantrasyonla MDA miktarında da paralel olarak artma gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Çalışmamızda, bakır metali uygulanan *Microcystis aeruginosa* ve *Arthrospira platensis* kültürlerinin MDA miktarı 1, 2.5, 5 ve 10 ppm konsantrasyonlarında; *Synechocystis* sp. kültürlerinde 0.5, 1, 5 ppm konsantrasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artış gözlenmiştir. Tüm alg kültürlerinde ve stres faktörlerinde MDA miktarı ve hidrojen peroksit miktarındaki değişimler arasında pozitif bir ilişki gözlemlenmiştir. Polipropilen ve bakır ikili uygulamasında ise *Microcystis aeruginosa* algi kültürlerinin MDA miktarının artan konsantrasyon ile arttığı; *Synechocystis* sp. ve *Arthrospira platensis* alglerinde polipropilen ve 10 ppm bakırlı uygulamada en yüksek MDA miktarı ölçülürken, en düşük miktar polipropilen ve 1 ppm konsantrasyonda gerçekleştiği gözlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı; su ekosistemi üzerine mikroplastik ve ağır metal stresinin etkilerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalara katkı sağlamaktır. Bu nedenle mikroplastik ve ağır metallerin etkisi altında hücre sayısı, optik yoğunluk, biyokütle ve klorofil-a miktarlarındaki değişimler ile malondialdehit ve hidrojen peroksit miktarındaki değişimler araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, ağır metallerin incelenen alglere toksik etki ettiği ve alglerin büyüme ve gelişimini yavaşlattığı, hücre ölümlerine sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Enzim aktiviteleri sonucu ortaya çıkan hidrojen peroksit ve malondialdehit ürünlerinin varlığı ve ağır metal konsantrasyonuna bağlı olarak artış göstermesi de bakır metalinin hücre içindeki metabolik dengeyi etkilediğinin bir göstergesidir. İlerleyen periyotlarda *Microcystis aeruginosa*, *Synechocystis* sp. ve *Arthrospira platensis* algleri üzerinde ağır metal ve mikroplastiklerin birikim mekanizması ve antioksidan parametrelerin oluşturduğu yanıtlar ve bunların genetik temeli ile ilgili çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Aiba, S., & Ogawa, T. (1977). Assessment of Growth Yield of a Bluegreen Alga, *Spirulina platensis*, in Axenic and Continuous Culture,. *Microbiology*, 102, 179-182.
- Ak, İ., & Cirik, S. (2017). Blue-green algae (Cyanobacteria) and thermalism. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 34(2) 227-233. <https://doi.org/10.12714/egejfas.2017.34.2.15>.
- Aksu, Z. (1998). *Biosorption of the heavy metals by microalgae in batch and continuous systems*. In algae for wastewater treatment Springer-Verlag and Landes Bioscience, 2 (1): 37-53.
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2021). Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of The Total Environment*, 143536,ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>.
- Andrady, A. (2011). Mcroplastics in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 1596-1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>.
- Ansari, F., Ratha, S., Renuka, N., Ramanna, L., Gupta, S., Rawat, I., & Bux, F. (2021). Effect of microplastics on growth and biochemical composition of microalga *Acutodesmus obliquus*. *Algal Research*, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102296>.
- Asada, K. (1994). Production and action of active oxygen species in photosynthesis tissues, Causes of photooxidative stress and amelioration of defense systems in plants. 77-104.
- Champbell, P. (1995). Interaction Between Trace Metals ve Aquatic Organism: A Critique of The Free- Ion Activity Model. Metal Speciation ve Bioavailability in Aquatic Systems. 45-102.
- Chang, J.-S., & Leong, Y. (2020). Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms. *Bioresource Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122886>.
- Cho, D., Lee, S., Park, S., & Chung, A. (1994). Studies on the Biosorption of Heavy Metals on to *Chlorella vulgaris*. *J. Environment Science Health*, 389-409. <https://doi.org/10.1080/10934529409376043>.
- Choudhary, M., Jetley, U., Abash, M., Zutshi , S., & Tasneem, F. (2007). Effect of heavy metal stress on proline, malondialdehyde, and superoxide dismutase activity in the cyanobacterium *Arthrospira platensis*-S5. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 204-209.
- Çağatay Özpinar, S. (2019). *Sülfonat Grupları le Substitue Edilmiş Suda Çözünür Fitalosiyanınların Arthrospira platensis'in Gelişimi ve Antioksidan Parametreleri Üzerine Etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.

- De Filippis, L., Hampp, R., & Ziegler, H. (1981). The effect of sub-lethal concentration of zinc, cadmium ve mercury on Euglena. *Zeit schrift für Pflanzen physiologie*, 407-411. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)80958-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80958-2).
- Dudek, K. (2020). Microbial colonization of microplastics in the Caribbean Sea. *Limnology and Oceanography Letters*, 5-17. <https://doi.org/10.1002/lol2.10141>.
- Fan, J., Lan, Z., Duan, T., Qi, Z., & Sun, J. (2022). Occurrence and distribution of microplastics in surface water and sediments in China's inland water systems: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 129968, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129968>.
- Farina, M., Andrade, L., & Gilberto M Amado Filho. (2004). Effects of copper on *Enteromorpha flexuosa* (Chlorophyta) in vitro. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 117-125, ISSN 0147-6513. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00106-4](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00106-4).
- Foyer, C., & Nochor, G. (2003). . Redox sensing and signalling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria. *Physiologia Plantarum*, 355-364. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00223.x>.
- Gao, B.-Y., Qian-Qian, Z., Yue, Q.-Y., Li, Q., & Xu, X. (2014). Removal of Cu(II) and Cr(VI) from wastewater by an amphoteric sorbent based on cellulose-rich biomass. *Carbohydrate Polymers*, 788-796. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.043>.
- Gupta, V., Shrivastava, A., & Jain, N. (2001). Biosorption of chromium (VI) from aqueous solution by green algae *Spirogyra* species. *Water research*, 4079-4085. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00138-5).
- Güçlü, D. (2019). *Ağır Metallerin Pseudomonas aeruginosa'da Dirençlilik, Pigment Üretimi ve Antioksidan Sistem Üzerine Etkisinin Araştırılması*. [Doktora Tezi]. İnönü Üniversitesi.
- Halliwell, B., Gutteridge, J., & Cross, C. (1992). Free Radicals, Antioxidants ve Human Disease: Where Are We Now? *Lab Clin Med* 119, 598-620. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(94\)92211-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(94)92211-X).
- Hamed, S., Selim, S., Klöck, G., & Abd Elgawad, H. (2017). Sensitivity of two green microalgae to copper stress: growth, oxidative and antioxidants analyses *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 144. 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.048>.
- Heath, R., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics. *Archives of Biochemistry and*, 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).
- Hou, W., Chen, X., Guanling, S., Qunhui, W., & Chein, C. (2007). Effects of copper and cadmium on heavy metal polluted waterbody restoration by duckweed (*Lemna minor*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.12.005>

- Kamari, A., Nam Ngoc Phuong, Aurore, Z.-V., Poirier, L., Châtel, A., Mouneyrac, C., & Lagarde, F. (2016). Is there any consistency between the microplastics found in the field and those used in laboratory experiments? *Environmental Pollution*, 111-123, ISSN 0269-7491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.035>.
- Karalija, E., Carbó, M., Coppi, A., Colzi, I., Dainelli, M., Gašparović, M., . . . Martinelli, F. (2022). Interplay of plastic pollution with algae and plants: hidden danger or a blessing? *Journal of Hazardous Materials*, 129450, ISSN 0304-3894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129450>.
- Khoironi, A., Sutrisno, A., & Sudarno. (2019). Evaluation of the interaction among microalgae *Spirulina* sp, plastics polyethylene terephthalate and polypropylene in freshwater environment. *Journal of Ecological Engineering*, 161-173.
- Komárek, J., Kling, H., & Komarkova, J. (2003). Coccoid and colonial cyanobacteria. Freshwater Algae of North America, Ecology and Classification. *Aquat Ecol. Elsevier*, 117-196.
- Kraak, H., & Vethaak, A. (2016). Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth? *Aquat. Toxicol.* 170, 259e261.
- Lee, H., Yuan, A., Wang, B., Joseph, & Li, J. (2023). A low-cost edge AI-chip-based system for real-time algae species classification and HAB prediction. *Water Research*.
- Lewis, C., Lindeque, P., Cole, M., Coppock, R., Miller, R., Watts, A., . . . Galloway, T. (2020). Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size. *Environmental Pollution*, ISSN 0269-7491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114721>.
- Liu, J., Wu, M., & Zhang, R. (2021). Oxygen-derived free radicals: Production, biological importance, bioimaging, and analytical detection with responsive luminescent nanoprobe. *Wiley*, <https://doi.org/10.1002/VIW.20200139>.
- Mamnoya, F., Pratap, H., Mtolera, M., & Bjork, M. (2001). The effect of copper on the daily growth rate ve photosynthetic efficiency of the brown macroalgae *Padina boergesenii* in: Richmond. *Marine Science. Tanzania.*, 185-192.
- Manavoğlu, D. (2021). *Microcystis aeruginosa* (KÜTZİNG) Kützing 1846 Gelişimi Üzerine Ampisilin, Gentamisin ve Siprofloksasin Antibiyotiklerinin Etkileri. [Yüksek Lisans Tezi]. Trakya Üniversitesi.
- Moenne, A., González, A., & Sáez, C. (2016). Mechanisms of metal tolerance in marine macroalgae, with emphasis on copper tolerance in Chlorophyta and Rhodophyta. *Aquatic Toxicology*, 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.04.015>.
- Murphy, F., & Quinn, B. (2018). The effects of microplastic on freshwater *Hydra attenuata* feeding, morphology & reproduction. *Environmental Pollution*, 487-494, ISSN 0269-7491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.029>.

- Nalimova, A., Popoya, V., Tsoglin, L., & Pronina, N. (2005). The Effects of copper and zinc on *Spirulina platensis* growth and heavy metal accumulation in its cells. *Russian Journal Of Plant Physiology*, <https://doi.org/10.1007/s11183-005-0035-4>.
- Önem, B. (2016). *Çinko, Civa ve Kalay Toksisitesinin Arthrospira platensis gomont Alginin Gelişimi ve Antioksidan Enzimlerinin Üzerine Etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Özdemir, S. (2008). *Ağır Metallerin Değişik Termofilik Bakterilerdeki Akümüasyonu, Biyosorbsiyonu ve Çevre Biyoteknolojisinde Kullanımı Üzerine Çalışmalar*. [Doktora Tezi]. Dicle Üniversitesi.
- Pandey, A., Kumar, R., Vani, M., Rohit, K., Qidwai, A., Sukla, S., . . . Dikshit, A. (2016). Detoxification and Tolerance of Heavy Metals in Plants. *Plant Metal Interaction*, 335-359. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00013-8>.
- Piotrowska, A., Bajguz, A., Zambrzycka, E., & Beata, G. (2012). Phytohormones as regulators of heavy metal biosorption and toxicity in green alga *Chlorella vulgaris* (Chlorophyceae). *Plant Physiology and Biochemistry*, 52-65. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.11.009>.
- Prata, J., Costa, J., Lopes, I., Duarte, A., & Teresa, R. (2019). Effects of microplastics on microalgae populations: A critical review. *Science of The Total Environment*, 400-405. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.132>.
- Prata, J., Lavorante, B., Montenegro, M., & Guilhermino, L. (2018). Influence of microplastics on the toxicity of the pharmaceuticals procainamide and doxycycline on the marine microalgae *Tetraselmis chuii* Aquat. Toxicol., 197. 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.02.015>.
- Qian, H., Yu, S., Sun, Z., Xie, X., Liu, W., & Fu, Z. (2010). Effects of copper sulfate, hydrogen peroxide and N-phenyl-2-naphthylamine on oxidative stress and the expression of genes involved photosynthesis and microcystin disposition in *Microcystis aeruginosa*. *Aquatic Toxicology*, 405-412. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.05.018>.
- Rai, U., Tripathi, R., & Kumar, N. (1992). Bioaccumulation of chromium and toxicity on growth, photosynthetic pigments, photosynthesis, in vivo nitrate reductase activity and protein content in a chlorococcalean green alga *Glaucozystis*. *Chemosphere*, 1721-1732.
- Salama, E.-S., Manzi, H. P., Abou-Shanab, R. A., Jeon, B., & Wang, J. (2022). Algae: a frontline photosynthetic organism in the microplastic catastrophe. *Trends in Plant Science*, 1159-1172. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.06.005>.
- Salman, J., Majrashi, N., Hasan, F., Sabri, A., Jabar, E.-A., & Emin, F. (2023, 139107,ISSN 0045-6535,). Cultivation of blue green algae (*Arthrospira platensis* Gomont, 1892) in wastewater for biodiesel production. *Chemosphere*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139107>.
- Sjollema, S. B., Redondo-Hasselerharm, P., Leslie, H. A., Kraak, M. H., Kraak, M. H., & Vethaak, A. D. (2016). Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth? *Aquatic Toxicology*, 259-261. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.12.002>.

- Stevenson, R., Bothwell, L., & Lowe, L. (1996). Algal Ecology, Freshwater Benthic Ecosystems. 3-30.
- Sunda, W., & Guillard, R. (1996). The relationship between cupric ion activity and the toxicity to phytoplankton, *J. Mar. Res.*, 34, 511-529.
- Surosz, W., & Palinska, K. (2004). Effects of heavy metal stress on cyanobacterium *Anabaena flos-aquae*. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 40-48. <https://doi.org/10.1007/s00244-004-0163-4>.
- Şentürk, T. (2017). *Bazı Ağır Metal ve Nutrientler Üzerinde Chlorella vulgaris ve Scenedesmus sp. (Chlorophyta)'nin Adsorban Etkisinin Araştırılması*. [Doktora Tezi]. Manisa Celal Bayar Üniversitesi.
- Tekbaba, A. (2019). *Sülfonat Grupları ile Substitue Edilmiş Suda Çözünür Fitalosiyanın Chlorella vulgaris Gelişimi ve Antioksidan Parametreleri Üzerine Etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Türkan, İ. (2004). Comparative Lipid Peroxidation, Antioxidant Defence System and Proline Content in Roots of Two Rice Cultivars Differing in Salt Tolerance., 247-257. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.03.017>.
- Türkan, İ., Bor, M., & Özdemir, F. (2004). Differential Responses of Lipid Peroxidation and Antioxidants in the Leaves of Drought-Tolerant *P. acutifolius* Gray and Drought-Sensitive *P. vulgaris* L. Subjected to Polyethylene Glycol Mediated Water Stress. *Plant Sci.*, 168, 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.032>.
- Vaahtera, L., Brosche, M., Wrzaczek, M., & Kangasjarvi, J. (2014). Specificity in ROS signaling and transcript signatures. *Antioxidants and Redox Signaling*, 21(9). 1422-1441. <https://doi.org/10.1089/ars.2013.5662>.
- Valko, M., Leibfritz, D., Moncol, J., Cronin, M., Mazur, M., & Telser, J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 44-84. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2006.07.001>.
- Valko, M., Rhodes, C., Moncol, J., Izakovic, M., & Mazur, M. (2006). Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer. *Chemico-Biological Interactions*, 1-40. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2005.12.009>.
- Wong, P., & Chang, L. (1991). Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials*, 127-139.
- Wu, Y., Guo, P., Zhang, X., Zhang, Y., Xie, S., & Jun Deng. (2019). Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials*, 219-227, ISSN 0304-3894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>.
- Yuan, A., Wang, B., Li, J., & Lee, H. (2023). A low-cost edge AI-chip-based system for real-time algae species classification and HAB prediction. *Water Research*, ISSN 0043-1354. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119727>.
- Zhang, W., Zheng, X., Yuan, Y., Li, Y., Liu, X., Wang, X., & Fan, Z. (2021). Growth inhibition, toxin production and oxidative stress caused by three microplastics in *Microcystis aeruginosa*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 111575, ISSN 0147-6513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111575>.

Zhao, T., Wang, J., Tan, L., & Huang, W. (2019). between micro polyvinyl chloride (mPVC) and marine dinoflagellate *Karenia mikimotoi*: The inhibition of growth, chlorophyll and photosynthetic efficiency. *Environmental Pollution*, 883-889. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.114>.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Esmâ ADANUR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER^[S2]:

- 2022 yılı itibarıyla Çevre Danışmanlık sektöründe Çevre Mühendisi olarak çalışmaktayım.