

Investigation of the accumulation of strategic raw materials magnesium (Mg) and phosphorus (P) from various wastewaters using macroalgae (*Cladophora fracta*)

Mehmet Mustafa Deniz ¹, Murat Topal ²

ARTICLE INFO

Dates:

Received: 12.03.2026

Accepted: 22.07.2026

Doi:

10.65206/pajes.1908260

Corresponding author:

Mehmet Mustafa Deniz
(mehmetmustafadeniz@gmail.com)

Author addresses:

¹ Department of Strategic Raw Materials and Advanced Technology Applications, Graduate Education Institute, Munzur University, Tunceli, 62000, Türkiye
(mehmetmustafadeniz@gmail.com)

² Department of Machine and Metallic Technology, Tunceli Vocational School, Munzur University, Tunceli, 62000, Türkiye
(murattopal@munzur.edu.tr)

ABSTRACT

Context—Mining and processing activities for obtaining strategic raw materials bring with them many difficult problems to overcome, such as the destruction of natural areas, disruption of ecosystems, waste generation, and environmental pollution. Among these raw materials, magnesium (Mg) and phosphorus (P) have become the focus of more attention in recent years due to their widespread use in various industrial sectors and technological applications, and their essential role for the human body. When these strategic raw materials reach water bodies, phosphorus load increases, leading to environmental and economic impacts. Furthermore, high levels of Mg in wastewater discharges cause persistent hardness in water and various problems in water treatment.

Objective—Phycoremediation is a treatment technique that involves the use of algae as a viable and cost-effective solution in wastewater treatment. This technique also stands out for its ability to produce algal biomass with high recovery potential and that can be easily converted into valuable products. This technique using algae may be an effective solution for the accumulation of strategic raw materials from wastewater environments. In this study, the macroalgae *Cladophora fracta* (*C. fracta*) was used for the accumulation of Mg and P from wastewater.

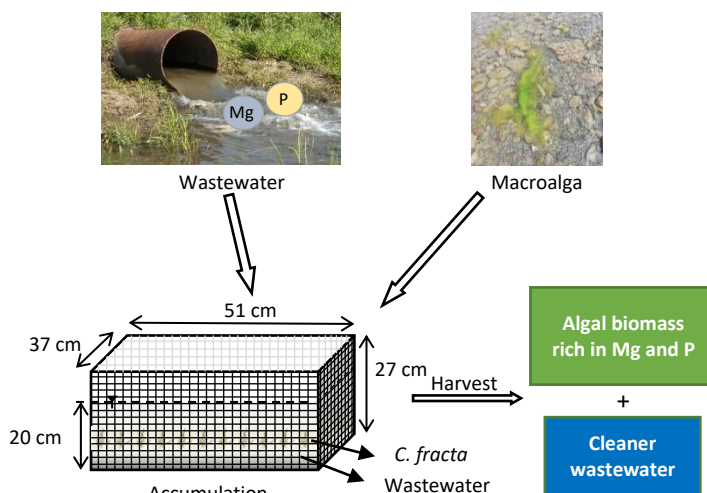
Method—*C. fracta* collected from its natural habitat was exposed to domestic wastewater, industrial wastewater, and landfill leachate and harvested daily. The harvested algae were dried and ground in a grinder. Mg and P concentrations in the powdered samples were determined using ICP-MS. Daily accumulations were calculated from the initial and final concentrations, and the

harvesting periods (the day with the highest accumulation) for Mg and P in *C. fracta* were determined.

Results—The highest Mg accumulation in *C. fracta* was ranked as follows: Domestic wastewater > Landfill leachate > Industrial wastewater, while the highest P accumulation was ranked as follows: Industrial wastewater > Domestic wastewater > Landfill leachate. In domestic and industrial wastewater, the highest accumulation was P > Mg, while in landfill leachate, the highest accumulation was Mg > P. As a result, Mg and P were accumulated in wastewater at high rates of $71.2 \pm 3.6\%$ and $783 \pm 39.2\%$ using *C. fracta*.

Conclusion—In this study, it was demonstrated that the accumulation process using *C. fracta* may be effective in minimizing or eliminating the environmental risks caused by Mg and P. The accumulation of strategic raw materials found in wastewater offers an extremely advantageous opportunity in terms of preventing these materials from dispersing and being lost through wastewater flows and preserving natural resources. Future studies could investigate techniques for recovering these strategic raw materials from algal biomass and their economic viability.

Key Words—S Accumulation, Industrial wastewater, Domestic wastewater, Phycoremediation, Landfill leachate, Strategic raw materials.



Stratejik hammaddelerden magnezyum (Mg) ve fosfor (P)'un çeşitli atıksulardan makroalg (*Cladophora fracta*) ile akümülyasyonunun araştırılması

Mehmet Mustafa Deniz ¹, Murat Topal ²

MAKALE BİLGİLERİ

Tarihler:

Geliş: 12.03.2026

Kabul: 22.07.2026

Doi:

10.65206/pajes.1908260

Sorumlu yazar:

Mehmet Mustafa Deniz
(mehmetmustafadeniz@gmail.com)

Yazar adresleri:

¹Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları A.B.D., Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Munzur Üniversitesi, Tunceli, 62000, Türkiye (mehmetmustafadeniz@gmail.com)

² Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Tunceli Meslek Yüksekokulu, Munzur Üniversitesi, Tunceli, 62000, Türkiye (murattopal@munzur.edu.tr)

ÖZ

Arka Plan—Stratejik hammaddelerin elde edilmesi için maden çıkarma ve işleme gibi faaliyetler doğal alanların tahribi, ekosistemin bozulması, atık oluşumu ve çevre kirlilikleri gibi üstesinden gelinmesi zor olan birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Bu hammaddelerden magnezyum (Mg) ve fosfor (P) çeşitli endüstriyel sektörler ile teknolojik uygulamalarda yaygın kullanımları ve insan vücudu için temel element olmaları nedeniyle son yıllarda daha fazla ilgi odağı haline gelmiştir. Bu stratejik hammaddelerden P, söz konusu su kütlelerine ulaştıklarında P yükünün artmasına ve bunun bir sonucu olarak çevresel ve ekonomik etkilere yol açmaktadır. Ayrıca, atıksu deşarjlarındaki yüksek Mg seviyeleri ise suda kalıcı sertliğe ve su arıtımında çeşitli sorunlara neden olmaktadır.

Amaç—Fikoremediasyon, atıksu arıtımında uygun ve ucuz bir çözüm olarak alglerin kullanımını içeren bir arıtım tekniğidir. Bu teknik aynı zamanda geri kazanım potansiyeli yüksek ve nitelikli ürünlere kolayca dönüştürülebilen alg biyokütlesi elde edebilme özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Alglerin kullanıldığı bu teknik atıksu ortamlarından stratejik hammaddelerin akümülyasyonunda etkili bir çözüm olabilir. Bu amaçla bu çalışmada, atıksulardan Mg ve P'un akümülyasyonu için makroalg *Cladophora fracta* (*C. fracta*) kullanılmıştır.

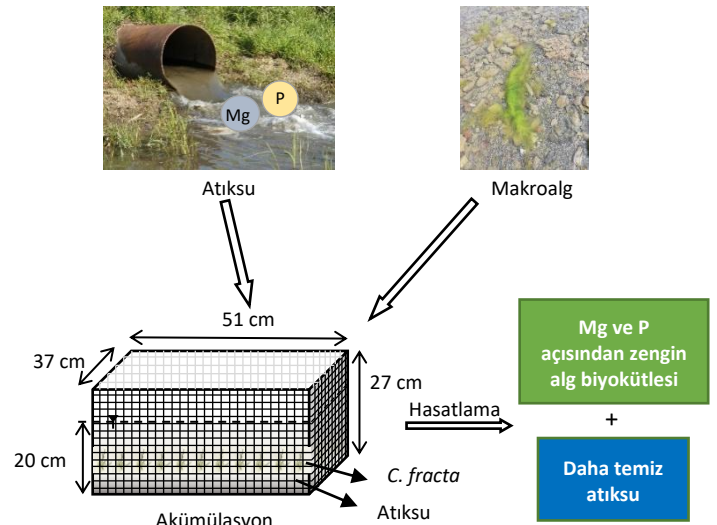
Method—Doğal ortamından toplanan *C. fracta* evsel atıksu, endüstriyel atıksu ve çöp sızıntı suyuna maruz bırakılmış ve günlük olarak hasatlanmıştır. Hasatlanan algler kurutulmuş ve bir öğütücüde öğütülmüştür. Partikül boyutu azaltılarak homojen hale getirilen örneklerdeki Mg ve P konsantrasyonları ICP-MS kullanılarak tespit edilmiştir. İlk ve son konsantrasyonlardan günlük akümülyasyonlar hesaplanmış ve Mg ve P için *C. fracta*'nın

hasatlama süreleri (akümülyasyonun en yüksek olduğu gün) belirlenmiştir.

Bulgular—*C. fracta*'da elde edilen en yüksek Mg akümülyasyonu, Evsel atıksu > Sızıntı suyu > Endüstriyel atıksu şeklinde, en yüksek P akümülyasyonu ise Endüstriyel atıksu > Evsel atıksu > Sızıntı suyu şeklinde sıralanmıştır. Evsel atıksu ve endüstriyel atıksuda en yüksek akümülyasyon P > Mg olarak, sızıntı suyunda ise en yüksek akümülyasyon Mg > P olarak sıralanmıştır. Sonuç olarak Mg ve P, *C. fracta* kullanılarak atıksulardan Mg için %71.2 ± 3.6, P için %78.3 ± 39.2 gibi yüksek oranlarda akümüle edilmiştir.

Sonuç—Bu çalışmada Mg ve P'un sebep olacağı çevresel risklerinin en aza indirilmesi veya ortadan kaldırılmasında *C. fracta* kullanılarak gerçekleştirilen akümülyasyon ile mümkün olabileceği gösterilmiştir. Atıksularda bulunan stratejik hammaddelerin akümülyasyonu bu hammaddelerin atıksu akışlarıyla dağılıp kaybolmaması ve doğal kaynakların korunması açısından son derece iyi bir avantaj sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda alg biyokütlesinden bu stratejik hammaddelerin geri kazanımı teknikleri ve ekonomik kazanımı araştırılabilir.

Anahtar Kelimeler—Akümülyasyon, Endüstriyel atıksular, Evsel atıksular, Fikoremediasyon, Sızıntı suları, Stratejik hammaddeler.



I. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir ulus için bazı hammaddeler, teknolojik ilerlemeyi sağlamanın yanında, ulusal güvenlik, ekonomik refah, piyasa dengesini oluşturma ve sürdürülebilir bir hammadde tedariki için stratejik önem taşımaktadır [1]. Ancak, bu hammaddelere ulaşmadaki zorluk önemli bir sorun oluşturmakta ve bu malzemeleri çıkarmak için gereken kapsamlı madencilik, 'Net Sıfır Emisyon' hedeflerine ulaşma yönündeki küresel çabalar için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Birincil kaynaklardan elde edilen bu hammaddeler için yüksek çevresel maliyetler ve zorlu üretim süreçleri çevresel sürdürülebilirlik üzerine kurulu stratejilerini ön plana çıkarmaktadır. Teknolojik durgunluğun önlenmesi ve ilerlemenin sürdürülebilmesi için bol, kolay ulaşılabilir ve daha çevre dostu kaynakların kullanılması gerekmektedir [2]. Stratejik hammaddelerden Mg ve P, birçok endüstriyel sektörde ve teknolojik ilerlemelerde yaygın kullanımları ve insan vücudu için temel önemleri nedeniyle araştırmacılar için son yıllarda fazlaca ilgi odağı oluşturmaktadır.

Mg, bir alkali toprak metali olup, yeryüzünde en bol bulunan sekizinci elementtir. Diğer elementlerle birleşik halde bulunması nedeniyle ekstraksiyonu zor ve maliyetlidir [3]. Mg, 2023 yılında Avrupa Birliği tarafından 34 kritik hammaddeden biri olarak listelenmiştir [4]. Mg elde etmenin geleneksel yöntemleri arasında mineral madenciligi ve deniz suyu ekstraksiyonu yer alır. Endüstriyel atıksu ve tuzlu sular gibi alternatif kaynaklara olan ilgi ise her geçen gün artmaktadır. Böylece araştırmacılar Mg'u elde etmenin sürdürülebilir yollarını aramaktadır. Ayrıca Mg'un geri kazanımı çevresel etkilerinin azaltılmasını sağlar [5]. Yüksek ekonomik önemi ve tedarik riskleri nedeniyle Avrupa Birliği tarafından kritik hammaddeler listesine dahil edilen Mg, stratejik bir endüstriyel hammadde olma özelliğini sürdürmektedir. Mg ve alaşımlarının, sağlık, enerji, ulaşım, havacılık, bilgisayarlar, iletişim ve tüketici elektroniği gibi dünya çapında çeşitli endüstrilerde kullanımı bulunmaktadır. Mg alaşımları piller için yüksek teorik özgül kapasite, yüksek özgül mukavemet ve sertlik, üstün sönümlenme performansı, güçlü biyouyumluluk ve yüksek hidrojen depolama kapasitesi gibi özelliklere sahiptir [6], [7]. Havacılık araçlarının motor, şanzıman sistemleri ve iniş takımlarında kullanılır ve Mg bu bileşenlere dökülür. Helikopterlerde özellikle dişli kutuları ve diğer yapısal olmayan bileşenlerin üretiminde geniş bir uygulama yelpazesi vardır. Otomotiv endüstrisinde ise düşük yoğunluğu nedeniyle kullanımı için muazzam miktarda potansiyel vardır. Bu endüstride yakıt tüketimini azaltmak için daha hafif otomobillerin üretimi en önemli konulardan biridir. Geleneksel otomobil malzemelerinin Mg ve kompozitleriyle değiştirilmesi %22-70'lik bir ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. Otomotiv sektöründe ağırlığın %10 oranında azaltılması yakıt kullanımında %7'lik bir azalma anlamına gelmektedir. Bu nedenle Mg ve alaşımları artan sera gazı emisyonları ve karbon ayak izlerini düşürme amacına ulaşmak için son derece önemli bir elementtir [8]. Mg ve alaşımlarının büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda kullanımı için üstesinden gelinmesi gereken birçok zorluk bulunmaktadır. Bu malzemelere artan ilgi sayesinde son yıllarda bilim insanları tarafından çok sayıda çalışma yapılmış, malzeme özelliklerinin iyileştirilmesinde başarılı sonuçlar elde edilmiş ve yeni Mg alaşımları geliştirilmiştir [7], [9]. Diğer taraftan tüm bu iyi gelişmelerle beraber malzeme kullanımı arttıkça, oluşan atıklar da çevresel ortamlara yayılmakta ve artan atıksu deşarjları nedeniyle su kirlilikleriyle başa çıkmak her geçen gün daha da karmaşık bir hale gelmektedir. Endüstriyel deşarjlardaki yüksek Mg seviyeleri suda kalıcı sertliğe ve nihayetinde geri dönüşümde sorunlara neden olabilir. Mg, suda doğal olarak bulunan bir metal olmasına rağmen atık tuzlu su ve atıksuda yoğun miktarlarda deşarj edildiğinde çevresel sorunlara neden olabilmektedir [5].

P ise tüm organizmalar tarafından enerji taşınması ve büyüme için kullanılan temel bir besin maddesidir. Yeryüzünde en bol

bulunan on birinci elementtir. P'un kararlı bir gaz formu olmadığından, denizlerden uzaklaştırılması sadece %1 oranında tortul gömülme yoluyla olmaktadır [10]. Atıksularda bol miktarda bulunan fosfat besinleri, alglerde nükleik asitlerin, fosfolipitlerin ve fosfat esterlerinin sentezi için kullanılır [11]. P, fitoplankton büyümesi için en önemli sınırlayıcı bir besin maddesidir. Sucul sistemlere aşırı P girişi ötrofikasyona ve zararlı alg patlamalarına neden olmaktadır [12]. Ülkelerin, tarım verimini korumak ve gıda güvenliğini sağlamak için fosfat kayasından elde edilen P'lu gübrelerle ihtiyaçları vardır. Ancak fosfat kayası rezervlerinin sınırlı olması ve tedarik zincirindeki karmaşıklıklar birçok ülkede çiftçilerin bu kritik besin maddesine erişiminde riskler oluşturur. P kıtlığı, gıda güvenliğini tehdit ederken fazlalığı (kötü ya da optimal olmayan gübre kullanımı ve yetersiz atıksu arıtımı gibi) tatlı su kaynaklarının ve kıyıların kirlenmesine yol açmaktadır. Küresel rezerv tahminleri mevcut madencilik oranlarıyla 300 yıl yetebileceğini gösterse de Çin, ABD ve Rusya'nın rezervleri 40 yıl içinde tükenecek ve bu durum piyasayı daha da daraltacaktır. Tarımda P talebinin 2050 yılına kadar 2006 seviyelerinden iki katına çıkacağı ve atıksudan tatlı su kaynaklarına doğru yaşanan P kayıplarının 2050 yılına kadar küresel olarak %70'e kadar artacağı tahmin edilmektedir [13]. Yoğun tarım faaliyetleri toprakların doğal erozyon oranlarına kıyasla 1000 katına kadar bir oranda aşınmasına neden olabilir ve bunun bir sonucu olarak her yıl hektar başına küresel ortalama 5.9 kg P hidrosfere boş yere kaybedilir. Döngüsel bir P ekonomisi için P'u yakalayıp tarımsal üretime geri kazandırarak fosfat kayasına olan bağımlılığı azaltmak, P kayıplarını önlemek ve P'un yol açacağı çevresel zararların önüne geçmek son derece kritik bir öneme sahiptir [14].

Atıksuların oluşturduğu çevresel zararları en aza indirme görevi üstlenen geleneksel atıksu arıtma teknikleri ve iyileştirme prosesleri, ön arıtma, birincil, ikincil, üçüncül arıtma ve dezenfeksiyon süreçleri gibi çeşitli adımları içermektedir. Bu prosesler atıksuda bulunan tüm kirlleticileri gidermede genellikle etkisiz kalmaktadır. Çeşitli kirleticilerin zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için alternatif arıtma seçenekleri gereklidir. Atıksulardan fosfat gideriminde kimyasal çöktürme işlemi nispeten kolaydır ancak bu teknik oldukça maliyetlidir ve büyük miktarlarda çamur üretimine neden olur [15].

Algler kullanılarak yapılan fikoremediasyon, atıksuyun biyolojik arıtımı ile çevre üzerindeki kirlilik yükünün azaltılmasına yardımcı olabilecek etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Ayrıca algler atıksu akışlarından besin ve çeşitli stratejik hammaddelerin geri kazanımına yönelik düşük maliyetli ve düşük enerjili bir alternatif çözüm sağlayabilir. Ayrıca yöntem alglerin muazzam çeşitliliği, oksijenasyon potansiyelleri, gün ışığından yararlanma, yüksek karbon tutma yetenekleri ve diğer geleneksel yöntemlere göre düşük maliyetli olması gibi çeşitli avantajlar da sunmaktadır [11], [16]. Son yıllardaki bazı çalışmalar atıksularda bulunan besin maddelerinin, alglerin gelişimini, protein ve lipid üretimi gibi kimyasal bileşimlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Algleri atıksu biyoremediasyon ajanları olarak kullanmak, evsel atıksudan Mg ve P'u etkili bir şekilde giderebilir, çözünmüş oksijen konsantrasyonunu koruyabilir ve atıksularda bulunan çeşitli hastalık yapan patojenleri ve fekal bakterileri azaltabilir. Algler, günlük kullanımlardan kaynaklanan evsel atıksular, tarımsal proseslerden kaynaklanan atıksular ve toksik maddeler içeren endüstriyel atıksular dahil olmak üzere çeşitli atıksu türlerinde yetiştirilebilmesi önemli avantaj sunmaktadır [17]. Özellikle makroalgler kullanılarak yapılan fikoremediasyon, geleneksel kimyasal yöntemlere göre daha sürdürülebilir, çevre ile uyumlu bir alternatif sunmaktadır. Genel olarak, makroalg bazlı fikoremediasyon, su kirliliğini azaltmak ve ekosistem sağlığını iyileştirmek için umut verici bir çözüm sunmaktadır [18].

Bir kağıt ve kağıt hamuru fabrikasından toplanan atıksu, iki mikroalg (*Planktochlorellanurekis* ve *Chlamydomonas*

reinhardtii) kullanılarak arıtılmıştır. Mikroalg, kağıt ve kağıt hamuru fabrikası atıksuyunda doğal çevre koşullarında büyütülerek 12. günde hasat edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, hem *P.nurekis* hem de *C. reinhardtii*'nin deneyden sonra fosfatı %100 ve %88 azaltabildiğini göstermiştir [19].

Elsayed ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, *Chlorella sorokiniana*'nın geleneksel büyüme ortamıyla farklı mezbaha atıksuyu oranlarında, %30-90 v/v, büyüme potansiyeli değerlendirilmiştir. Sonuçlar, 12 günlük yetiştirmeden sonra besin maddesi giderme verimliliğinin toplam azot için %85'e, toplam P için %78'e, potasyum için %70'e ve sodyum için %65'e ulaştığını göstermiştir [20].

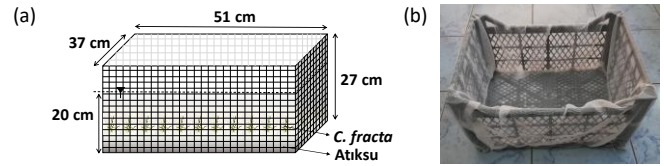
Brown N. ve ark., (2024) temel değişkenler arasındaki etkileşimleri dikkate alarak alg kültürü biyokütlesindeki P birikimini üst düzeye çıkarmak için gereken koşulları belirleyen sistematik bir çalışma sunmuş ve biyokütlenin P içeriğini minimum %0.2 (gP/gSS) ile maksimum %2.7 (gP/gSS) arasında değişmekte olduğunu, 40 reaktörün tamamında biyokütledeki ortalama P içeriğinin %1.1 (gP/gSS) olduğunu bildirmiştir [21].

Topal ve ark. (2020) kritik hammaddelerin (La, V, W, Sc, Bi, Sb, Ga ve Co) maden galeri suyundaki birikimini araştırmak için yapmış oldukları çalışmada; *C. fracta*'nın maden galerisi suyundan kritik mineralleri yüksek oranda akümüle ettiğini ve atıksuların biyoremediasyonunda iyi bir biyoakümülatör olduğunu bildirmiştir [22]. Benzer şekilde Yazılan Çamlık ve Taşkın (2024) *C. fracta*'nın ağır metalleri biriktirme kapasitesinin yüksek olduğu bildirmektedir [23]. Endüstriyel ve evsel atıksu gibi atıksuların arıtımında bu makroalg, adaptasyon kabiliyetinin yüksek olması, yetiştirme ve hasatlanmasının kolay ve düşük maliyeti olması gibi birçok avantajı bir arada sunmaktadır [24]. Makroalgler, biyolojik olarak aktif bileşikler açısından zengin bir kaynak olarak bilinir. Yeni çevresel koşullara hızla uyum sağlarlar çünkü diğer organizmalarda bulunmayan çok çeşitli ikincil metabolitlerin üretimini yaparlar. Bu bileşikler alg hücrelerini ultraviyole radyasyonu, ani sıcaklık değişimleri, besin konsantrasyonundaki dalgalanmalar ve tuzluluk seviyesi gibi stresli koşullara karşı korur [25], [26]. *Cladophora* türleri, yüksek tuzluluk oranına sahip ortamlarda hayatta kalabilme yeteneğine sahiptir, bu da onları ekolojik açıdan önemli kılmaktadır [26]. Bu çalışmada, stratejik hammaddelerden Mg ve P'un, bahsedilen üstün özelliklerinden dolayı makroalg (*C. fracta*) kullanılarak evsel atıksu, endüstriyel atıksu ve çöp sızıntı suyundan akümüasyonu araştırılmıştır. Böylece hem atıksuların remediasyonu ile çevresel etkilerinin azaltılması hem de stratejik hammaddelerden Mg ve P'un gerçek atıksulardan akümüasyon potansiyellerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Akümüasyon araştırmalarının ana odağının, metal çözeltileriyle yapılan laboratuvar deneylerinden ziyade, gerçek atıksularla yapılan çalışmalara kaydırılması ve böylece teknolojinin gerçek ölçekte uygulanabilirliğini değerlendirilebilmesi açısından son derece önemlidir [27].

II. YÖNTEM (METHOD)

Mg ve P'un farklı tipte atıksulardan akümüasyonu için yapılan çalışmalar, Malatya ilinde yürütülmüştür. Materyal olarak kullanılan *Cladophora fracta* (*C. fracta*) Elazığ İl sınırları içinde bulunan Hazar Gölü'nden toplanmıştır. Çalışma alanı olarak, Malatya İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi, Malatya Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Arıtma Tesisi ve Malatya Orduzu Katı Atık Entegre Çevre Tesisi seçilmiştir. Bu tesislerin deşarj noktalarına 37cm×51cm×27cm boyutlarında delikli yapıya sahip reaktörler hazırlanarak yerleştirilmiştir (Şekil 1a ve 1b). Sonuçların etkilenmemesi için plastikten imal edilmiş malzeme kullanılarak reaktörler hazırlanmıştır (Şekil 1b).

Doğal ortamından toplanan makroalgler belirlenen atıksu ortamlarına götürülerek reaktörlerin içine bırakılmıştır (Şekil 2a). Adaptasyon kabiliyetinin yüksek olması *C. fracta*'nın önemli



Şekil 1. Reaktörler: (a) Reaktörlerin şematik görünümü, (b) Reaktörlerin görüntüsü.

Figure 1. Reactors: (a) Schematic view of the reactors, (b) Photo of the reactors.

bir avantajıdır [24]. Burada atıksulara maruz bırakılan makroalgler günlük olarak aynı saatte reaktörden hasatlanmıştır (Şekil 2b). Hasatlanan makroalg örnekleri laboratuvara getirilmiş ve saf su ile yıkandıktan sonra oda şartlarında 1 hafta kurutmaya bırakılmıştır (Şekil 2c). Daha sonra örnekler 70 ± 5 °C'de sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Homojen bir yapı elde etmek ve parçacık boyutunu düşürmek için bıçaklı öğütücüde öğütülerek analize hazırlanmıştır (Şekil 2d). Örneklerdeki Mg ve P'un konsantrasyonları ISO 9001:2008 akreditasyonuna sahip ACME (Kanada) Analiz Laboratuvarında ICP-MS (ICP/MS Perkin Elmer ELAN 9000) ile belirlenmiştir. Analizler 3 tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır.

Doğal ortamından toplanan ve reaktöre alınmayan bir miktar makroalgdeki Mg ve P konsantrasyonları kontrol olarak kullanılarak Mg ve P'un günlük akümüasyonları (1) yardımıyla hesaplanmıştır:

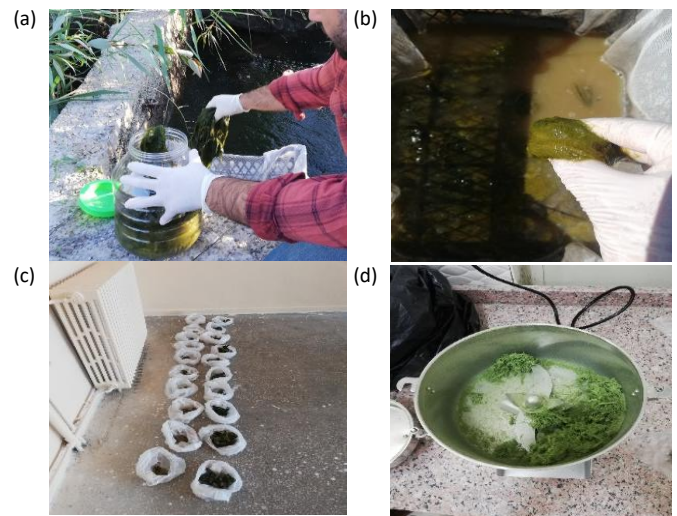
$$AC = 100(C - C_0)/C_0, \quad (1)$$

burada AC, akümüasyonu (%); C, *C. fracta*'da akümüle olan stratejik hammadde konsantrasyonunu (mg/kg); C_0 ise *C. fracta*'da tespit edilen başlangıçtaki stratejik hammadde konsantrasyonunu (mg/kg) ifade etmektedir.

Hesaplamalardan sonra Mg ve P için elde edilen günlük en yüksek akümüasyon değerine göre hasatlama süreleri belirlenmiş ve *C. fracta*'nın farklı tipte atıksudaki akümüasyonları karşılaştırılmıştır.

III. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Mg'un evsel nitelikli atıksudan akümüasyonu Şekil 3a'da verilmiştir. Makroalgdeki Mg'un evsel nitelikli atıksudan akümüasyonu 1. gün 40.0 ± 2.0 olarak hesaplanmıştır.



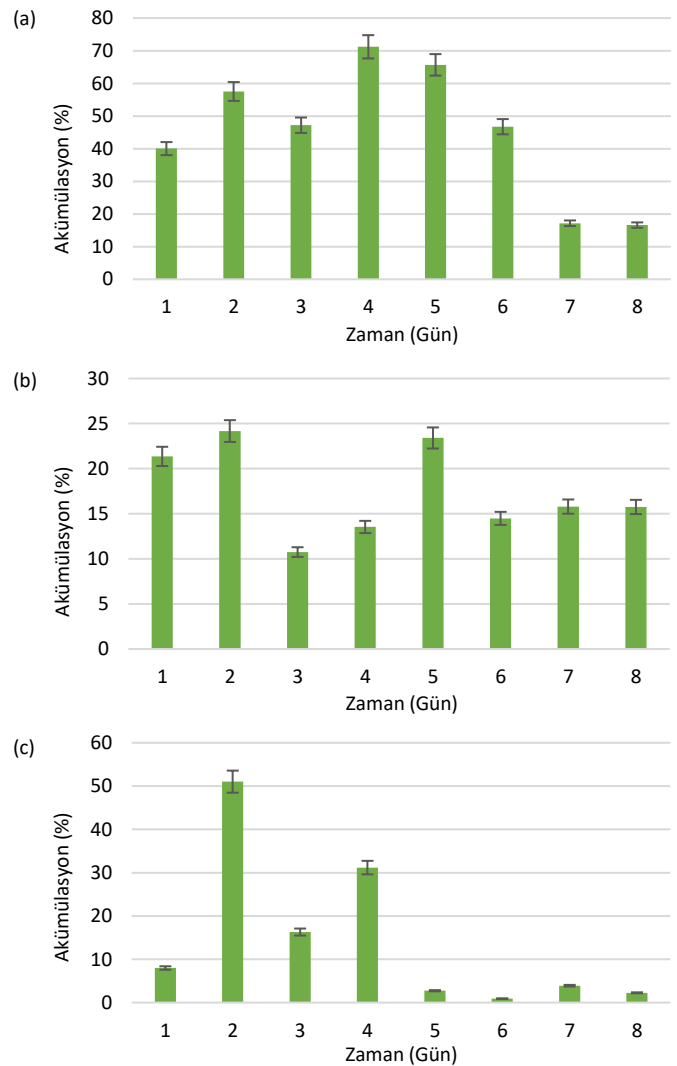
Şekil 2. Deneysel çalışmalar: (a) Reaktöre alma, (b) Günlük hasat, (c) Kurutma, (d) Öğütme.

Figure 2. Experimental applications: (a) Placing in the reactor, (b) Daily harvesting, (c) Drying, (d) Grinding.

Cladophora sp. kısa sürede toksik metal iyonlarını iyi bir şekilde uzaklaştırdığı bilinmektedir [26]. Mg, toksik ağır metallerin aksine, mikroalglerin büyümesi ve gelişmesi için gereklidir; klorofil molekülünde merkezi bir konumda yer alır ve fotosentetik enzimlerin aktivitesini etkilemektedir [28]. Algler tarafından metallerin adsorpsiyonu, metaller ve iyonize hücre duvarları arasında kovalent bir bağ oluşumu, metal katyonlarının mikroalg ekzopolisakaritlerinin negatif yüklü üronik asitlerine bağlanması ve metal iyonlarının hücre duvarı katyonları ile iyonik değişimi de dahil olmak üzere çeşitli mekanizmalarla gerçekleşebilen hızlı bir süreçtir [29]. İlk gün gerçekleşen yüksek Mg akümülyasyonu, biyoadsorpsiyon mekanizmasının işleyişinden kaynaklanmış olabilir. Çünkü alglerde metallerin birikimi başlangıçta hızlı (pasif) bir alım süreci ile başlar ardından çok daha yavaş (aktif) bir alım süreci devam eder. Pasif alım sırasında, metal iyonları nispeten kısa bir süre içinde (birkaç saniye veya dakika) hücre yüzeyine adsorbe olur ve bu süreç metabolizmadan bağımsızdır [30]. İkinci gün ise akümülyasyon artarak 57.5 ± 2.9 'a yükselmiştir. Algler tarafından metal alımı, ortam pH'ı, biyokütle, sıcaklık, metal türü ve konsantrasyonu, rakip iyonların varlığı ve alglerin metabolik durumundan etkilenir [31]. *Cladophora* türleri tarafından kirleticilerin biyosorpsiyonuna ilişkin deneylerin çoğu laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Sürekli akış çalışmaları kullanılarak biyosorpsiyonun ve alg biyosorbentlerinin endüstriyel uygulamalarının incelenmesine ise büyük ölçüde ihtiyaç vardır [26]. Bu çalışma sürekli akışlı reaktörde yapılmış olup atıksu artıma tesisi deşarjına maruz kalan *C. fracta*'da hesaplanan günlük akümülyasyonda artış ya da azalışların olması beklenen bir durumdur. Çünkü atıksu arıtma tesisi deşarjları giriş suyu özelliklerindeki değişikliklere bağlı olarak çıkış suyu kalitesinde dalgalanmalara neden olur [32], [33]. *C. fracta*'da 3. gün Mg akümülyasyonu bir miktar düşmüş ve 47.2 ± 2.4 olarak hesaplanmıştır. Mg için akümülyasyonda artış ve azalışlar gözlenmiştir. Ji ve ark. (2012) yaptığı çalışmada, deney materyali olarak canlı *C. Fracta* kullanmış ve çözeltilerde metal emiliminin çoğunun 1 gün içinde nispeten yüksek bir seviyeye ulaştığını ve kültür süresine bağlı olarak azalabileceğini veya artabileceğini bildirmiştir [24]. Dördüncü günde en yüksek Mg akümülyasyon değeri elde edilmiş ve bu değerin 71.2 ± 3.6 olduğu belirlenmiştir. Adsorpsiyon mekanizmaları yalnızca alg hücrelerinin yüzeyinde meydana gelir ve metabolik yollara bağlı değildir. Bu nedenle hem canlı algler hem de ölü alg hücreleri bu mekanizmayı gerçekleştirebilir. Öte yandan, biyoabsorpsiyon (biyoakümülyasyon olarak da adlandırılır), iyonların canlı alg hücrelerine difüzyonu ile gerçekleşen biyolojik bir süreçtir. Bu mekanizma metabolik yollara bağlı olduğundan, ölü alg biyokütlesi tarafından kullanılamaz [34]. Beşinci gün itibariyle Mg akümülyasyonu 65.7 ± 3.3 'e düşmüştür. Altıncı günden itibaren düşüş devam etmiş ve Mg'un akümülyasyonu 6. gün 46.7 ± 2.3 , 7. gün 17.2 ± 0.9 , 8. gün ise 16.6 ± 0.8 olarak hesap edilmiştir. Beşinci günden 8. gün sonuna kadar yaşanan düşüş *C. fracta*'nın artık doyumluğa ulaştığını ve tersine kaybın başladığını göstermektedir. Bu durum atıksuyun toksisitesine bağlı olarak gelişmiş olabilir. Örneğin Zhang ve ark., (2019), Cd stresinin, *Cladophora rupestris*'te mineral dengesizliğine ve mineral beslenmesinin iç stabilitesinin bozulmasına neden olduğunu, Mg adsorpsiyonunun düşük Cd konsantrasyonlarında teşvik edildiğini ve yüksek Cd konsantrasyonlarında engellendiğini bildirmiştir [35]. Topal ve ark., (2022) göre reaktörlere yerleştirilen makroalgler, kirleticilerin alımından sonra hasat edilir ve hasat zamanı, elementlerin biyolojik birikimi önemli ölçüde azaldıktan sonra belirlenebilir [36]. Biyolojik birikimdeki azalma, bu metallerin algler üzerindeki toksik etkisinin olası bir göstergesi de olabilir. Bu nedenle, alglerin hasat edilmesi, bu metallerin algler üzerindeki uzun vadeli toksik etkisini engelleyecektir. Bu çalışmada elde edilen verilere göre evsel nitelikli atıksuda en yüksek Mg akümülyasyon değerine 4. günde ulaşılmış ve 5. günden itibaren genel bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, makroalg tarafından Mg alımının 4. gün

sonunda en yüksek seviyeye ulaştığını ve daha sonra düştüğünü göstermektedir. Dolayısıyla, en yüksek akümülyasyon değerinin elde edildiği 4. gün, evsel nitelikli atıksudan *C. fracta*'yı hasatlama süresi olarak belirlenebilir.

Mg'un endüstriyel nitelikli atıksudan akümülyasyonu Şekil 3b'de verilmiştir. Endüstriyel atıksudan akümülye olan Mg'un günlük akümülyasyonları incelendiğinde, 1. gün 21.4 ± 1.1 olarak başlayan akümülyasyon 2. gün 24.2 ± 1.2 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Alg hücre duvarı, hücre yüzeyine negatif yük kazandıran hidroksil ($-OH$), fosforil ($-PO_3O_2$), amino ($-NH_2$), karboksil ($-COOH$), sülfidril ($-SH$) vb. gibi birçok fonksiyonel gruba sahiptir. Sudaki metal iyonları genellikle katyonik formda olduklarından, hücre yüzeyine adsorbe olurlar [30]. 3. ve 4. günlerde Mg akümülyasyonunda belirgin bir düşüş yaşanmış ve sırasıyla 10.8 ± 0.5 ve 13.5 ± 0.7 değerleri elde edilmiştir. Birçok endüstriyel atıksu, birden fazla metalin yüksek seviyelerini içermektedir. Alg biyokütlesi tarafından sentetik atıksularda tek tür metal iyonlarının birikimi kapsamlı bir şekilde incelenmiş olsa da çoklu metal sistemlerinin incelenmesine çok az dikkat edilmiştir. Endüstriyel atıksuların aynı anda birden fazla metal iyonu içermesine rağmen, çoklu metal çözeltilerinden metallerin adsorpsiyonuna çok az dikkat edilmiştir. Bol miktarda yetişen birçok tatlı su ve deniz algi, metal bağlama kapasiteleri açısından değerlendirilmemiştir. Bu nedenle, belirli bir metale



Şekil 3. Mg'un akümülyasyonu: (a) evsel nitelikli atıksudan akümülyasyon, (b) endüstriyel nitelikli atıksudan akümülyasyon, (c) çöp sızıntı suyundan akümülyasyon.

Figure 3. Accumulation of Mg: (a) Accumulation from domestic wastewater, (b) Accumulation from industrial wastewater, (c) Accumulation from landfill leachate.

yüksek afinitive sahip türleri veya aynı anda birden fazla metal iyonunu etkili bir şekilde bağlayabilen türleri seçmek için alglerin taranması yapılmalıdır [30]. Bu bağlamda bu çalışmada *C. fracta* ile Mg akümülayonu literatüre önemli bir katkı sunmaktadır. Bununla birlikte alglerin metal akümülayon potansiyellerini tam olarak kullanmak için hala uzun bir yol vardır. 5. gün itibarıyla tekrar bir artış gözlenmiş ve akümülayon %23.4 ± 1.2 seviyesine yükselmiştir. Bu artış makroalgın önceki iki günde düşen akümülayona rağmen hayatta kaldığını ve akümülayonun devam ettiğini gösterebilir. Benzer şekilde, Khatiwada ve ark., (2020), *Euglena*'nın yüksek ağır metal konsantrasyonlarında (örneğin, endüstriyel atıksular ve evsel atıksular) hayatta kalabildiğini ve bu metallere karşı doğal bir dirence sahip olduğunu bildirmiştir [37]. Altıncı günden sonra nispeten daha düşük ve dengeli bir akümülayon izlenmiş ve bu değerin 6. gün %14.5 ± 0.7, 7. gün %15.8 ± 0.8'e ulaştığı ve 8. gün %15.8 ± 0.8 olarak sabitlendiği görülmüştür. Gerçek endüstriyel atıksular, metal biyosorpsiyonunu önemli ölçüde etkileyebilecek farklı türde safsızlıklar içermektedir. Bu tür safsızlıklar arasında, hafif iyonlar çoğu endüstriyel atıksuda bulunur ve biyosorbentlerin metal adsorpsiyon potansiyelini büyük ölçüde etkilemektedir [30], [38].

Çeşitli araştırmacılar birbirinden bağımsız olarak, algler tarafından metal adsorpsiyonunun ana mekanizmasının iyon değişimi olduğu sonucuna varmışlardır [39]. Gerçek atıksu akışlarında yürütülen bu çalışmada Mg'un günlük akümülayonundaki salınımların iyon değişiminden kaynaklandığı veya etkisinin yüksek olduğu düşünülmektedir. İyon değişimi alg biyokütlesinin protonlandığını veya ağır metal katyonlarının bağlanması üzerine bazı hafif metal iyonlarının (Mg²⁺, K⁺, Na⁺, gibi) salındığı anlamına gelmektedir [30]. Ek olarak Deng ve ark. (2007) endüstriyel atıksularda bulunan Na(I), K(I), Mg(II) ve Ca(II) gibi hafif metal iyonlarının, alg biyokütlesi tarafından toksik metal iyonlarının alımını engelleyebileceğini bildirmiştir [40]. Bu çalışmada elde edilen veriler, endüstriyel atıksuda en yüksek Mg akümülayon değerine 2. gün ulaşıldığını göstermektedir. Beşinci gün akümülayon nispeten yüksek olsa da sonraki günlerde tekrar bir düşüş görülmektedir. Bu nedenle, endüstriyel atıksudan Mg akümülayonu için 2. gün, *C. fracta*'yı hasatlama süresi olarak belirlenebilir.

Mg'un çöp sızıntı suyundan akümülayonu Şekil 3c'de verilmiştir. Sızıntı suyunda *C. fracta*'da 1. günün sonunda Mg akümülayonunun 0.8 ± 0.4 olduğu belirlenmiştir. 2. gün bu değer önemli bir artış göstererek %51 ± 2.6 seviyesine ulaşmıştır. Metallerin farklı atıksulardaki biyosorpsiyonu; pH, sıcaklık, akış rejimi ve reaktör tipleri gibi proses faktörlerinden, hücre duvarındaki radikal grupların türü gibi biyokütle faktörlerinden ve ortamdaki anyon ve katyonların akümülayon kapasitesi üzerindeki etkisi gibi faktörlerden yüksek oranda etkilenmektedir [41]. Üçüncü gün itibarıyla akümülayonda düşüş başlamış ve bu değer %16.3 ± 0.8 olarak hesaplanmıştır. Dördüncü gün bir miktar artış gözlenmiş ve akümülayon %31.2 ± 1.6 seviyesine yükselmiştir. Beşinci gün ise bu değer tekrar azalış göstererek %2.7 ± 0.1 seviyesine gerilemiştir. Sentetik atıksularda ve kontrollü laboratuvar şartlarında çeşitli faktörlerin etkisini inceleyen çok sayıda çalışma vardır. Ayrıca atıksularda verimli bir proses tasarlarlarken dikkat edilmesi gereken en önemli husus akümülatör türün doğru seçilmesi olacaktır. Bunun için optimizasyon çalışmalarından önce öncelikli olarak gerçek atıksularda ve doğal şartlarda saha performansının gözlenmesi gerekir. Algler ile sentetik veya simüle edilmiş atıksu arıtımının, doğası gereği karmaşık olan gerçek atıksu özelliklerine benzememesi nedeniyle bazı dezavantajları olabilir. Dahası, simüle edilmiş atıksudan elde edilen sonuçlar, atıksu arıtma tesislerinin gerçek uygulamasına uygulanamayabilir [42]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar gerçek atıksularda maruz kalan *C. fracta*'nın stratejik hammaddelerin akümülayonuna dair bilgileri sunmaktadır. En yüksek akümülayonun elde edildiği gün, ilgili stratejik

hammaddenin akümülayon potansiyelini göstermektedir ve elde edilen verilere göre, Mg için sızıntı suyunda en yüksek akümülayon değerine 2. gün ulaşıldığı ve bu süreden sonra genel olarak düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum *C. fracta*'nın Mg'u 2. gün sonunda en yüksek oranda akümüle ettiği ve doyunluğa ulaştığını gösterebilir. Dolayısıyla Mg için sızıntı suyundan *C. fracta*'yı hasatlama süresi 2 gün olarak belirlenebilir.

P'un evsel nitelikli atıksudan akümülayonu Şekil 4a'da verilmiştir. *C. fracta*'da 1. gün evsel atıksudaki P'un akümülayonu %347.8 ± 17.4 olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki genel görüş, ortamda daha yüksek fosfat konsantrasyonları olduğunda biyokütlenin daha yüksek oranda P içereceği ve bunun geniş bir fosfat konsantrasyonu aralığında gerçekleştiği yönündedir [43], [44]. Birinci gün hesaplanan yüksek akümülayon bunu doğrulamaktadır. İkinci gün ise akümülayon azalarak %192.6 ± 9.6'ya düşmüştür. Kaneko ve ark. (2004) yaptığı çalışmada ortamda bulunan bazı toksik maddelerin fosfat alımını etkilediği hatta bazı bileşiklerin P alımı üzerinde inhibitör etkiler gösterdiğini bildirmiştir [45]. Bu çalışmada sürekli akışlı reaktörlerde bulunan makroalglerde muhtemelen değişen ortam toksisitesine bağlı olarak günlük akümülayon değerlerinde artış ve azalışlar gözlenmiştir. Üçüncü günde ise akümülayon değeri %675.1 ± 33.8'e ulaşarak evsel atıksudaki en yüksek değeri oluşturmaktadır. Algler, atıksuda bulunan P ile birlikte karbon ve azot gibi elementleri birincil büyüme kaynağı olarak kullanır ve alglerin büyümesi, atıksudaki besin içeriğinin ve bulunabilirliğinin doğrudan bir göstergesidir ve akümülayonun etkinliği de atıksudaki kirleticilerin bulunabilirliği tarafından belirlenir [46]. Üçüncü gün meydana gelen artış *C. fracta*'nın polifosfat içeriğinin kinetiğinden kaynaklanmış olabilir. Yeterli besin koşulları altında, büyüyen hücre kültüründeki polifosfat içeriği önce azalır ve yaklaşık iki gün sonra artmaya başlar [47]. Dördüncü günden sonra ise daha düşük akümülayonların seyrettiği belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan *C. fracta* sürekli akışlı reaktörlerin içinde, sürekli değişen özelliklere sahip atıksuya maruz kalmaktadır. Ayrıca yapılan deneyler tesislerin deşarj noktalarında ve doğal açık hava şartlarda yürütülmüştür. Dolayısıyla; atıksuyun değişen özellikleri ve değişken çevresel faktörler göz önüne alındığında akümülayonda düşüş ve yükselişlerin gözlenmesi zaten beklenmekte olan bir durumdu. Ek olarak çevresel faktörlerden bazılarının alg büyümesi ve etkin arıtma üzerindeki etkisi hala büyük ölçüde belirlenememiştir [48]. Khuantrairong ve Traichaiyaporn (2011), Ortama P eklenmesinin *Cladophora*'nın üretimini ve besin değerini artırabildiğini ve sudaki fosfat miktarının azalmasını, *Cladophora* biyokütle miktarını önemli ölçüde düşürebildiğini bildirmektedir [49]. Bu çalışmadan farklı olarak *Ulva*'nın kullanıldığı bir çalışmada ise P biyoremediasyon kapasitesinin büyüme ortamındaki atıksu konsantrasyonu ile pozitif olarak ilişkili olduğu rapor edilmiştir [50]. Bu çalışmada elde edilen verilere göre en yüksek P akümülayon değerine 3. günde ulaşılmıştır. Üçüncü günden sonra akümülayon seviyesinde kısmi artış ve azalışlar olsa da genel bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, *C. fracta* tarafından evsel nitelikli atıksuda P akümülayonunun 3. gün sonunda en yüksek seviyeye ulaştığını ve daha sonra düştüğünü göstermektedir. Dolayısıyla, en yüksek P akümülayon değerinin elde edildiği 3. gün evsel nitelikli atıksudan *C. fracta*'nın hasatlanma süresi olarak belirlenebilir. Evsel atıksularda üretilen makroalg biyokütlesinin en büyük avantajlarından biri, makroalglerin kolayca hasat edilebilmesi ve biyokütlenin değerlendirilebilmesidir [51]. Evsel atıksularda yetiştirilecek *C. fracta* P açısından zengin biyokütle potansiyelinden dolayı bu stratejik hammadde için önemli bir kaynak olabilir.

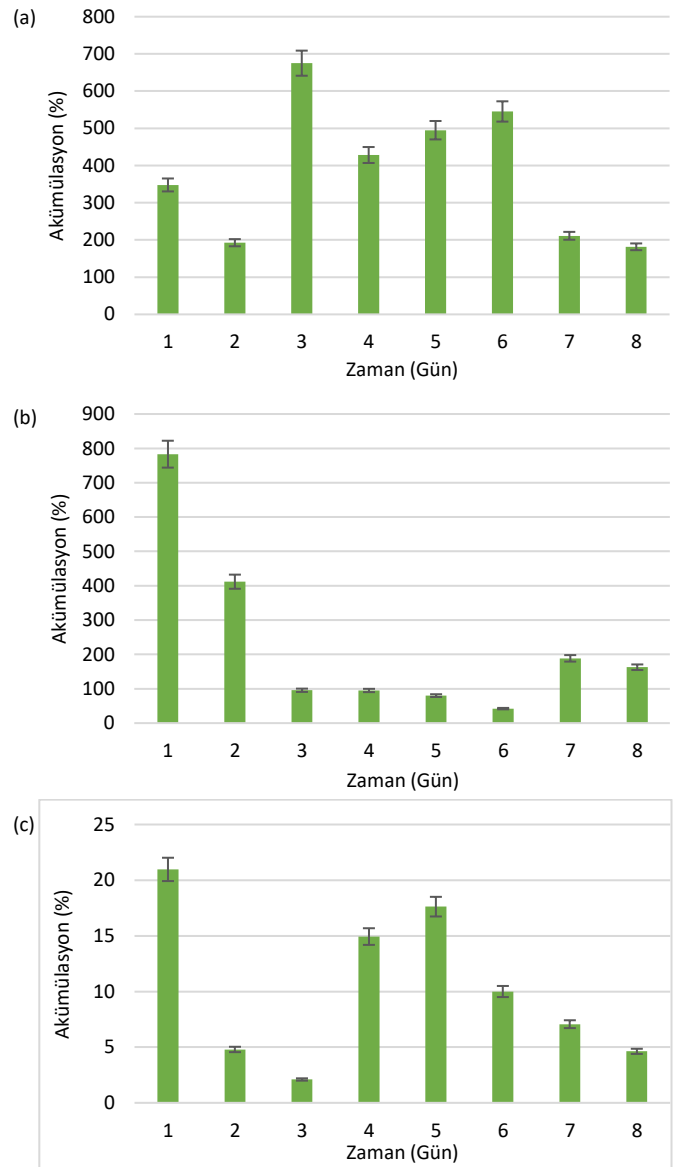
Literatürde evsel atıksularda çeşitli organizmalar tarafından farklı P birikimleri bildirilmiştir. Schaedig ve ark. (2023) tarafından evsel atıksu içeren sistemlerden elde edilen P biriktiren suşlar ile yapılan çalışmada en yüksek polifosfat biriktiren suşun neredeyse üç kat daha fazla polifosfat biriktirdiği

bildirilmiştir. Mikroalg suşları arasında poliP birikiminde %0 ila %14 hücre kuru ağırlığı arasında değişen önemli bir varyasyon tespit etmiştir. Elementel P, ağırlıkça poliP'un yaklaşık %40'unu oluşturmaktadır [52].

Molitor ve ark., (2024), P gideriminin temel etkenlerini ve karışık alg topluluklarında polifosfat birikimi potansiyelini belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada P'un sınırlı olduğu durumlarda mikroalg hücrelerindeki P içeriğinin genellikle kuru ağırlığın yaklaşık %1'i kadar olduğunu, mikroalgler P'u aşırı miktarda tükettiğinde ise bu oran kuru ağırlığın %3-10'una kadar çıkabildiğini bildirmektedir [53]. Bu değer, %200-900 akümülyasyona karşılık gelmekte olup; bu çalışmada elde edilen sonuçlara benzer bir durum göstermiştir.

P'un endüstriyel nitelikli atıksudan akümülyasyonu Şekil 4b'de verilmiştir. *C. fracta*'da endüstriyel nitelikli atıksuda akümülye olan P'un 1. gün akümülyasyonu 783 ± 39.2 olarak hesaplanmıştır. Fosfor tatlı su sisteminde sınırlayıcı besin maddesi olarak bilinir [54]. Belirli koşullar altında algler, gerekenden çok daha fazla P alımına yönlendirilebilir ve bunu hayatta kalmak ve çoğalmak için yaparlar [43]. Algler göl gibi çok düşük P konsantrasyonlarına sahip doğal sistemlerden alınıp P'a maruz kaldıklarında "lüks alım" (luxury uptake) mekanizmasından farklı olarak "aşırı telafi" (over-compensation) veya "aşırı tepki fenomeni" (overshoot phenomenon) olarak adlandırılan mekanizmalar da ortaya çıkmaktadır. [43], [55], [56]. Plyusina ve ark. (2021) yaptığı çalışmada *Chlorella vulgaris*'in açlıktan sonra P açısından zengin ortama alındığında, ilk 24 saat içinde P havuzlarında oldukça hızlı değişiklikler gözlemlemiş ve bu süre zarfında, ortamdaki neredeyse tüm dış fosfatın hücreler tarafından emildiğini bildirmiştir [47]. Bu çalışmada 2. gün ise akümülyasyon önemli ölçüde azalarak 411.7 ± 20.6 seviyesine düşmüştür. Bunun iki nedeni olabilir: Birincisi, atıksu deşarjındaki P içeriğinin azalmasına bağlı olarak P'un hücre içinden ortama akışı nedeniyle akümülyasyonda bir azalma meydana gelmiş olabilir. Fosfat eksikliğinde, algler P içermeyen bir ortama aktarıldığında hücrelerdeki inorganik P'un ortama akışına bağlı olarak hücre içi tüm P 40 saat içinde minimum değerlerine kadar tükenmektedir [47]. İkincisi hücre yüzeyinde tutulan P ortama geçmiş olabilir. Yao ve ark. (2011) yaptığı çalışmada; algler tarafından P'un akümülyasyonunun, yüzey adsorpsiyonu ve iç alımı içeren iki aşamalı bir alım kinetiği süreci olduğu ve fosfatın yüzey adsorpsiyonunun, ortam ile yüzeye adsorbe edilmiş P arasındaki denge yoluyla tersine çevrilebilir olduğu için P akümülyasyonunda önemli bir rol oynadığını bildirmiştir [57]. Bu çalışmada sonraki günlerde ise daha düşük akümülyasyonlar gözlenmiştir. Endüstriyel atıksuda hesaplanan P akümülyasyonu makroalg bünyesinde meydana gelen farklı mekanizmalardan kaynaklandığı, sürekli akışa sahip reaktörde atıksuyun hızlı değişen yapısından dolayı makroalgde bu mekanizmaların işleyişine bağlı olarak artış ve azalışların meydana geldiği düşünülmektedir. Organize sanayi bölgelerinden toplanan endüstriyel atıksular, genel olarak üretim sürecinden kaynaklanan farklı proses atıklarını, boya atıkları, yıkama sularını gibi karmaşık birçok atıksuları içerir. Bu atıksuların bileşimi atıkların kaynağına oldukça bağımlı olup farklı kaynaklardan gelen deşarjlara göre anlık değişimler gösterebilir. pH, temas süresi, sıcaklık ve kirleticilerin konsantrasyonu gibi dış ve iç fizikokimyasal parametreler mekanizmadan bağımsız olarak akümülyasyonu önemli ölçüde etkilemektedir [58]. Biyoakümülyasyon ve biyosorpsiyon mekanizmaları önemli ölçüde farklı süreçler olsa da bu iki mekanizma dinamik olarak birbiriyle etkileşim halinde olduğundan, biyosorbe edilmiş ve biyoakümülye edilmiş kirleticileri belirlemek oldukça zordur [59]. Bu çalışmada elde edilen veriler doğrultusunda, endüstriyel nitelikli atıksudan P'un en yüksek akümülyasyonu 1. gün elde edilmiştir, (783 ± 39.2). İkinci günden itibaren akümülyasyonda belirgin bir düşüş meydana geldiği için 1. gün, *C. fracta*'nın endüstriyel nitelikli atıksudan hasatlama süresi olarak belirlenebilir.

P'un çöp sızıntı suyundan akümülyasyonu Şekil 4c'de verilmiştir. P'un sızıntı suyunda hesaplanan günlük akümülyasyonları incelendiğinde, 1. gün elde edilen değer 21 ± 1 ile en yüksek seviyedeyken, 2. ve 3. günlerde belirgin bir düşüş gözlenerek sırasıyla 4.8 ± 0.2 ve 2.1 ± 0.1 seviyelerine gerilemiştir. Atıksulardaki yüksek P konsantrasyonu yüksek P alımını tetikleyebilir [60]. Alglerde P'un lüks alımı, alglerin önceden bir yoksunluk aşaması olmaksızın büyüme için gerekenden daha fazla P alması durumunda meydana gelir [43]. P'un sızıntı suyunda 1. gün gerçekleşen diğer atıksulara göre daha düşük akümülyasyonu polifosfat depolamasından kaynaklanmış olabilir. Organizmalar, bir eksiklik durumuyla karşılaştıklarında hücre içi depoları kullanarak büyümelerini sürdürebilirler [61]. Dördüncü günde P'un akümülyasyonu artmaya başlamış ve 5. günde 17.6 ± 0.9 ile ikinci en yüksek değere ulaşmıştır. Algler tarafından P'un alımı hem çevresel koşullar hem de hücre durumu tarafından belirlenen, karmaşık reaksiyonlar ve geri bildirimler içeren bir süreçtir ve modellenmesi genellikle paradoksal ve tartışmalıdır [57]. Çalışmada elde edilen veriler *C. fracta*'da, sızıntı suyundan P akümülyasyonunun 1. gün yüksek bir seviyede başladığını ve en yüksek değerine ulaştığını göstermektedir. Birinci günden sonra



Şekil 4. P'un akümülyasyonu: (a) evsel nitelikli atıksudan akümülyasyon, (b) endüstriyel nitelikli atıksudan akümülyasyon, (c) çöp sızıntı suyundan akümülyasyon.

Figure 4. Accumulation of P: (a) Accumulation from domestic wastewater, (b) Accumulation from industrial wastewater, (c) Accumulation from landfill leachate.

C. fracta'nın artık P'u tercih etmediğini veya P akümülyasyonunun uygunluğa ulaştığını gösterebilir. Bundan dolayı P için sızıntı suyundan hasatlama süresi 1. gün olarak belirlenebilir.

A. Mg'un farklı atıksulardaki akümülyasyonu (Accumulation of Mg from different wastewaters)

Mg'un üç farklı tipte atıksudaki akümülyasyonunun zaman içindeki değişimi Şekil 5a'da gösterilmektedir. Üç farklı tipte atıksuda elde edilen en yüksek Mg akümülyasyonları karşılaştırıldığında; en yüksek Mg akümülyasyonu evsel nitelikli atıksuda 71.2 ± 3.6 olarak 4. günde elde edilmiştir. Ayrıca evsel nitelikli atıksudaki Mg akümülyasyonu tüm günlerde diğer atıksulardan daha yüksek oranlarda gerçekleşmiştir. Evsel nitelikli atıksudan sonra en yüksek Mg akümülyasyonu ise sızıntı suyunda 51 ± 2.6 değeri ile elde edilmiştir. Endüstriyel atıksuda elde edilen en yüksek değer ise 24.2 ± 1.2 olarak diğer atıksuların gerisinde kalmaktadır. *C. fracta*'da elde edilen en yüksek Mg akümülyasyonuna göre üç farklı tipte atıksu sıralandığında Evsel > Sızıntı suyu > Endüstriyel sırası elde edilmiştir.

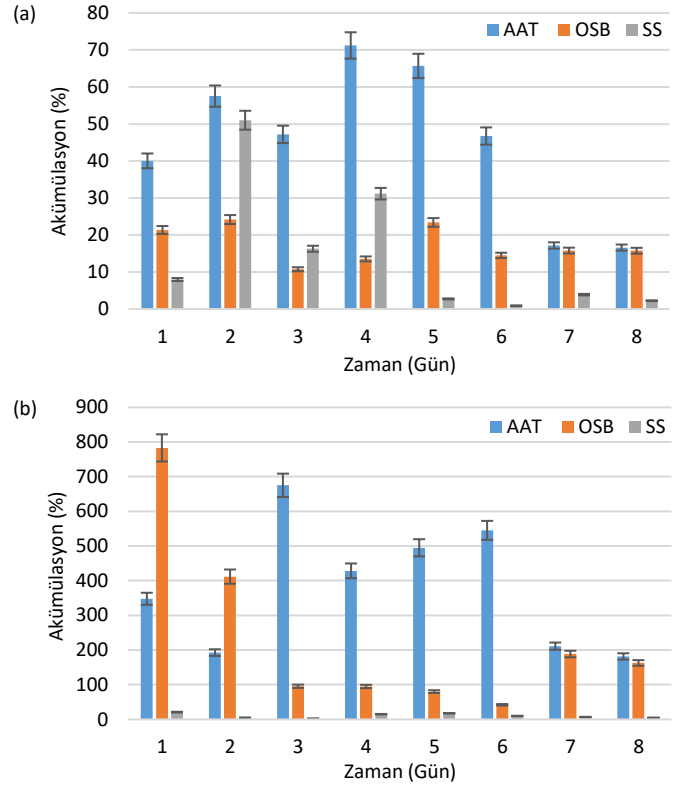
Ben Amor-Ben Ayed ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada; bu çalışmadan farklı olarak bir fotobiyoreaktörde 16.0 mg/l'lik Mg^{2+} konsantrasyonunda yapılan deneylerde *C. vulgaris* kullanılarak Mg biyobirikimi gerçekleştirilmiştir. Kültür ortamında bulunan toplam $Mg^{(2+)}$ 'nin %18'i hücre duvarına adsorbe edildiği ve %51'i deneyin sonunda (765 saat) biyokütle tarafından alındığı, genel olarak, başlangıçtaki $Mg^{(2+)}$ 'nin %69'unun ortamdan uzaklaştırıldığı bildirilmiştir [28].

Ahmad ve ark. (2022)'na göre atıksu bazlı alg yetiştiriciliği biyokütle üretim maliyetlerini düşürmek için umut vadeden bir yöntemdir [62]. Bu çalışmada kullanılan atıksulardan farklı olarak Manyok işleme sonucu oluşan ve Manipueira olarak da bilinen atıksu kullanılarak *C. pyrenoidosa*, *Phormidium* sp., *Scenedesmus* sp., *Chlorella sorokiniana*, *Spirulina platensis* ve *Acutodesmus obliquus* ile alg yetiştiriciliği yapıldığında P ve Mg'un atıksu ortamından önemli ölçüde giderildiğini rapor etmiştir. Bu çalışmada ise üç farklı atıksuda *C. fracta*'nın Mg ve P'u akümüle ettiği belirlenmiştir. Bu sayede Mg ve P gibi stratejik hammaddelerce zengin alg biyokütlesi elde edilebilir ve bu atıksuların biyoremediasyonu gerçekleştirilebilir.

Atıksulardan P geri kazanımında kullanılan yöntemlerden biri olan struvit ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) kristalizasyonunda Mg sınırlayıcı bir elementtir ve bu proses birçok durumda toplam maliyetin %75 kadarını oluşturan Mg ilavesine ihtiyaç duymaktadır. Struvit üretimi için düşük maliyetli Mg kaynaklarının kullanılması, struvit kristalleştirme ekonomisini iyileştirmenin etkili bir yoludur [63]. *C. fracta* ile Mg akümülyasyonu sonucu elde edilen alg biyokütlesi kullanılarak atıksulardan struvit üretimi için Mg etkili bir şekilde atıksudan kazanılabilir. Sistemin aynı zamanda P akümüle ettiği de düşünüldüğünde evsel ve endüstriyel atıksularda oldukça verimli bir struvit üretimi gerçekleştirilebilir. Bunun için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

B. P'un farklı atıksulardaki akümülyasyonu (Accumulation of P from different wastewaters)

P'un üç farklı tipte atıksudaki akümülyasyonunun zaman içindeki değişimi Şekil 5b'de gösterilmektedir. Üç farklı tipte atıksuda elde edilen en yüksek P akümülyasyonları karşılaştırıldığında; en yüksek P akümülyasyonu endüstriyel nitelikli atıksuda 783 ± 39.2 olarak 1. günde elde edilmiştir. Endüstriyel nitelikli atıksudan sonra en yüksek P akümülyasyonu ise evsel nitelikli atıksuda 675.1 ± 33.8 değeri ile elde edilmiştir. Çöp sızıntı suyunda elde edilen en yüksek değer ise 21 ± 1 olarak diğer atıksuların gerisinde kalmaktadır. *C. fracta*'da elde edilen en yüksek P akümülyasyonuna göre üç farklı tipte atıksu sıralandığında Endüstriyel > Evsel > Sızıntı suyu sırası elde edilmiştir.



Şekil 5. Farklı tipte atıksudaki günlük akümülyasyon: (a) Mg'un akümülyasyonu, (b) P'un akümülyasyonu.

Figure 5. Daily accumulation in different types of wastewater: (a) Accumulation of Mg, (b) Accumulation of P.

Alg bazlı biyoremediasyon ile atıksularda bulunan besin maddelerinin giderilmesi birkaç on yıldır uygulanmaktadır, ancak daha geniş endüstriyel önemi hala belirlenme aşamasındadır [64]. Alg yetiştiriciliğinde atıksuların kullanımı fikri ise sürdürülebilir biyokütle verimliliği ve besin geri kazanımının yanı sıra, atıksuların iyileştirilmesine de katkı sağlayabilir. Atıksu deşarjlarını değerli bir kaynağa dönüştüren bu bütünsel yaklaşım, dışarıdan ilave edilecek besin maddelerine ve tatlı suya olan bağımlılığı azaltır ve böylece alg yetiştiriciliğinin ekonomik uygulanabilirliğini artırır [65]. Örneğin fikoremediasyon sonucu elde edilen alg biyokütlesinin biyoenerji üretimi için hammadde olarak kullanılmasıyla proses için gerekli olan suyun yetiştirme aşamasında atıksulardan sağlanması nedeniyle prosesin su ayak izini %90'a kadar azaltma potansiyeli taşıdığı rapor edilmiştir [66]. Evsel atıksulardaki toplam P'un yaklaşık %50'sinin nedeni deterjanlardır ve P'un uzaklaştırılma olgusu henüz tam olarak açıklanamamıştır. Alglerin atıksulardan P'u uzaklaştırma mekanizması; P'un büyüme için asimilasyonu, polifosfatlar olarak alınması ve depolanması gibi karmaşık metabolik süreçler tarafından yönetilir [67]. Atıksularda besinlerin bulunabilirliği, algler için besin alım şekillerini etkiler. Örneğin, yavaş büyüyen makroalgler, besin açısından zengin dönemlerde P biriktirerek, besin açısından fakir dönemlerde büyüme için depolar (lüks alım). Besinler atıksuda sınırlı olduğunda, bu yavaş büyüyen algler, büyüme oranlarını azaltarak besin taleplerini en aza indirir. Bu nedenle makroalglerin aşırı miktarda besin biriktirme yeteneği, biyoremediasyon için faydalıdır [68]. Bu durumda bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre P için günlük akümülyasyonlarda gözlemlenen dalgalanmaların sürekli akışa sahip reaktörlerde, değişken atıksu besin içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. P konsantrasyonunun düşük olduğu dönemde makroalgler yüksek oranda P depolamış, yüksek olduğunda da atıksuya tekrar bırakmış olabilir. Tutsuz atıksu bileşenleri alg bazlı atıksu arıtma sistemlerinde sistem performansını büyük ölçüde etkilemektedir [69]. Nitekim günlük akümülyasyon değerlerinde

dalgalanmaların olabileceği beklenen bir durumdu. Ayrıca bu çalışmada ulaşılmış hedeflenen asıl amaç atıksularda giderim verimi hesaplamak değil *C. fracta*'nın en fazla ne kadar akümülyasyon değerine ulaşabileceğinin tespit edilmesidir.

Alg biyokütlesinin piroliz teknolojisi yoluyla fonksiyonel biyokömüre dönüştürülmesi ve aynı zamanda P zenginleştirilmesi, kaynak geri kazanımı için umut vadeden bir strateji olarak ortaya çıkmaktadır [70], [71]. Bunun için *Cladophora* biyokütlesinden piroliz yoluyla biyokömür üretimi gerçekleştirilerek tarım alanında kullanılabilir [26]. Abeyisiriwardana-Arachchige ve ark. (2021) yaptığı çalışmada, biyokömürün alkali liçini ve ardından eluattan struvit çökmesini içeren iki aşamalı bir prosedür belirleyerek, biyokömürden P'un yaklaşık %80'ini struvit olarak geri kazanmayı başarmıştır [72]. Bu bağlamda, alglerin P biriktirme eğilimi nedeniyle atıksularının arıtılmasında alg bazlı yöntemler avantajlıdır ve verimli P geri kazanımı için fırsatlar sunmaktadır. Alg biyokütlesinden P'un geri kazanılması ve kullanılması, zararlı alg patlamalarının olumsuz etkilerini azaltırken, aynı zamanda devam eden P kaynak krizi sorununu da hafifletebilir [71]. Atıksular gibi alternatif P kaynakları, besin ihtiyaçlarını karşılayabilir ve kaya fosfatına aşırı bağımlılığı azaltmaya yardımcı olabilir [73]. Ayrıca P'un gübre endüstrisindeki hayati önemi ve döngüsel ekonomi stratejilerinin benimsenmesi nedeniyle, atıksudan P geri kazanımı ve geri dönüşümü birçok ülkede ivme kazanmaktadır [63].

C. Atıksularda gerçekleşen Mg-P akümülyasyonları (Mg-P accumulations occurring in wastewater)

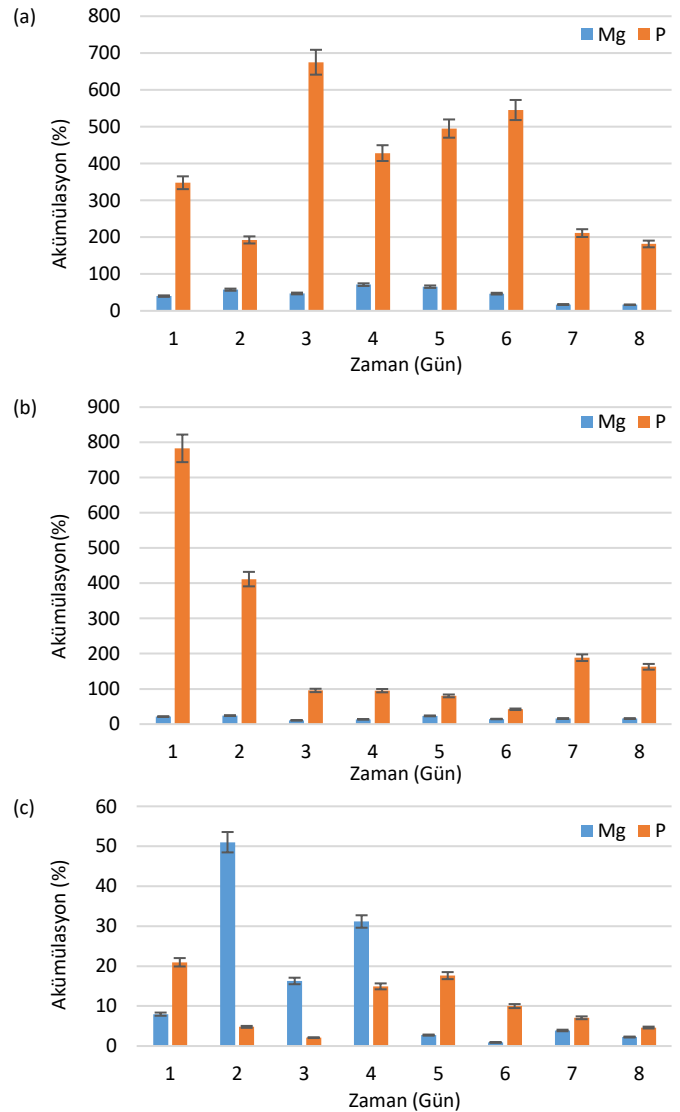
C. fracta ile Mg ve P'un evsel atıksuda elde edilen günlük akümülyasyonu Şekil 6a'da verilmiştir. Şekil 6a'ya göre evsel atıksuda en yüksek akümülyasyon (3. günde) P için elde edilmiştir. (%675.1 ± 33.8). Dolayısıyla evsel atıksuda gerçekleşen akümülyasyon için P > Mg sırası elde edilmiştir. Evsel atıksularda bulunan P lipitlerin, proteinlerin ve nükleik asitlerin başlıca bileşenidir ve alg metabolizmasında $H_2PO_4^-$ ve HPO_4^{2-} olarak tüketilir. Algler ayrıca bu PO_4^{3-} 'yi fosforilasyon işlemiyle organik bileşiğe dönüştürür [31]. P'un *Cladophora* büyümesi için birincil büyüme sınırlayıcı besin maddesi olduğu belirlenmiştir [74]. Michalak ve Messyas (2021), P bakımından zengin *Cladophora* biyokütlesinin, organik gübrelerin, toprak iyileştiricilerinin ve bitki büyümesi için biyostimulanların üretiminde hammadde olarak kullanılabileceğini ve alg biyokütlesinin tarım için faydalı ürünlere dönüştürülmesiyle, özellikle P'un geri kazanımının mümkün olduğunu bildirmektedir [26]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre *C. fracta* evsel atıksulardan P'u yüksek oranlarda akümüle etmiştir. Dolayısıyla biyokütle, P stratejik hammaddesini tarım alanında değerlendirilme potansiyelini taşımaktadır.

C. fracta ile Mg ve P'un endüstriyel atıksuda elde edilen günlük akümülyasyonu Şekil 6b'de verilmiştir. Şekil 6b'ye göre endüstriyel atıksuda en yüksek akümülyasyon (1. günde) P için elde edilmiştir. (%783 ± 39.2). Dolayısıyla endüstriyel atıksuda gerçekleşen akümülyasyon için P > Mg sırası elde edilmiştir. Endüstriyel atıksular, ağır metaller, boyalar, farmasotik bileşikler (PC'ler), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), poliklorlu bifeniller (PCB'ler), mikroplastikler ve daha birçok elementel tehlikeli kirleticileri içermesi nedeniyle büyük bir çevresel tehdit oluşturmaktadır. Alglerin kullanıldığı fikoremediasyon, kirleticilerin atıksulardan uzaklaştırılması ve karbon fiksasyonu gibi çeşitli çevresel faydalar sunmanın yanında döngüsel ekonomi stratejilerine katkıda bulunur ve büyük ölçüde P'a bağlı olan alıcı ortamlardaki ötrofikasyon risklerini potansiyel olarak azaltır [75]. Evsel ve endüstriyel nitelikli atıksu arıtma tesisleri deşarjlarında Mg ve P seviyeleri oldukça düşük olsa bile, nehirlere, göllere veya denizlere sürekli olarak deşarj edilen büyük hacimler, zaman içinde önemli bir ekolojik etkiye sahip olabilir. Özellikle arazi işgalinin sorun olmadığı yerlerde, diğer sistemlere kıyasla daha düşük maliyetle, erişilebilir bir çözüm

sunmak için alg havuzları değerlendirilebilir [76]. Ayrıca kullanılan atıksu türüne göre, uygun hasat süresi belirlenerek bu atıksularda P açısından zengin alg biyokütlesi üretilebilir.

Metallerin sorpsiyonu hakkında mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu kesikli sorpsiyon deneyleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekte evsel veya endüstriyel atıksular için kesikli sistemin kullanımı büyük hacimler nedeniyle oldukça zordur [27]. Bu nedenle, sürekli sistemlerin geliştirilmesi ticari uygulamalar için iyi bir seçenek olacaktır. *C. fracta*'nın atıksu deşarjlarındaki akümülyasyonunun araştırılması için yürüttüğümüz bu çalışmada makroalgın başarılı sonuçları elde edilmiştir. Dolayısıyla bu atıksuların iyileştirilmesinde, arıtılmasında ve akümülyasyon yoluyla zengin biyokütlenin elde edilmesinde potansiyel sunmaktadır. Ji ve ark. (2012) tarafından bu çalışmadan farklı olarak ağır metallerin (bakır, çinko, kadmiyum ve cıva) endüstriyel atıksulardan *C. fracta* ile alım kapasitesi araştırılmıştır [24]. Bu çalışmada farklı olarak ağır metaller incelenmiş olsa da canlı *C. fracta*'nın sulu çözeltilerden ağır metal iyonlarının uzaklaştırılması ve geri kazanılması için uygun olduğu ve endüstriyel atıksuların arıtılmasında potansiyel bir araç olabileceği bildirilmiştir.

C. fracta ile Mg ve P'un sızıntı suyunda elde edilen günlük akümülyasyonu Şekil 6c'de verilmiştir. Şekil 6c'ye göre en yüksek



Şekil 6. Günlük Mg-P akümülyasyonu: (a) Evsel atıksuda akümülyasyon, (b) Endüstriyel atıksuda akümülyasyon, (c) Sızıntı suyunda akümülyasyon.

Figure 6. Daily Mg-P accumulation: (a) Accumulation in domestic wastewater, (b) Accumulation in industrial wastewater, (c) Accumulation in leachate.

akümülyasyon 2. günde Mg için elde edilmiştir. (%51 ± 2.6). Dolayısıyla sızıntı suyunda gerçekleşen akümülyasyon için Mg > P sırası elde edilmiştir.

Birçok alg türü, metalleri biriktirme yeteneği sayesinde atıksuların remediasyonunda kullanılır ve bu yöntem diğer geleneksel yöntemlerden önemli ölçüde daha ucuzdur [77]. Organik içeriğe sahip atıksuların kullanıldığı fikoremediasyonda yüksek biyokütle verimlilikleri elde edilebilir ve besin açısından zengin sızıntı suyu gibi bu atıksularda algler için kültür ortamı olarak kullanılabilir [78]. Bu sayede Mg, sızıntı sularından *C. fracta* ile akümüle edilebilir. Biyosorpsiyon sürecinin büyük ölçekli kullanımı büyük miktarda biyokütle gerektirmektedir [27]. Biyokütle üreten sistemler esasen güneş enerjisiyle çalışan, açık tank veya havuz olabilen ve uygun büyüme için bazı temel besin maddelerinin girdisine bağlı olan sistemlerdir [79]. Alg biyokütlesi, doğadan kolayca elde edilebilir ve alg yetiştiriciliği teknikleriyle atıksularda hızla yetiştirilebilir. Büyük ölçekli makroalg yetiştiriciliğinde kütle kültürü operasyonunun optimizasyonunda sistemin performansı ve biyokütle üretimi için en önemli faktörlerden biri de hidrolik koşullardır. Akış koşullarının ve türbülansın sağlanması, yetiştirme sistemlerinde alg verimliliğini etkilediği, düşük türbülansın düşük verimliliğe sebep olduğu bildirilmiştir [80]. Bu çalışmada, sızıntı suyundaki akış hızının ve türbülansın diğer atıksulara göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Sızıntı suyunda diğer atıksu türlerine göre daha düşük akümülyasyonların elde edilmesinin sebebi hidrolik koşullarından akış hızının ve türbülansın düşük olmasından kaynaklanılabılır.

Bu çalışmada genel bir amaç olarak stratejik hammaddelerin atıksulardan akümülyasyonu araştırılmıştır. Bunun için farklı atıksular seçilerek bu atıksularda gerçekleşen akümülyasyonlar karşılaştırılmıştır. Stratejik hammaddelerden ise atıksularda bol miktarda bulunan bir metal (Mg) ve bir ametal (P) seçilmiştir. Alg metabolizması sürecinde P, nükleik asitlerin, ATP'nin, fosfolipidlerin ve proteinlerin sentezi için gerekli olduğundan kritik bir makro besin maddesidir [81]. Mg ise evsel atıksu arıtımında alglerin metabolizması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve fotosentez için en önemli bileşenlerden biridir [82]. Literatürde kesikli sistemlerde akümülyasyon süreçleri ve optimizasyonu hakkında bol miktarda bilgi mevcutken, sürekli sistemler için bu tür bilgiler yok denecek kadar azdır. Literatürdeki bu boşluğu dolduran bu çalışmada doğal ortamından elle toplanan ve canlılığını koruyabilmesi için bir miktar göl suyunun içinde hızlıca yeni ortamlarına taşınan *C. fracta*'nın deneysel süreçte (8 gün boyunca), sürekli akışa sahip reaktörlerin içinde, doğal koşullar altında iyi bir şekilde büyüdüğü ve alg biyokütlesinde belirgin bir sararma veya ölü kısımlar olmadığı görülmüştür. Bu durum *C. fracta*'nın farklı atıksulara iyi adapte olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde evsel atıksu akışında makroalg *Oedogonium*'un P'ü uzaklaştırmada etkili olduğunu ve makroalglerin farklı su kaynaklarına uyum sağlama yeteneğini bildirmektedir [51]. Ayrıca *Oedogonium*'un açık havuzlarda sürekli atıksu arıtımı sırasında deney süresince kirlenmemiş kalması, su kalitesi ve hava koşullarındaki dalgalanmalara karşı dirençli olması ve bir makroalg olduğu için taşma ile kolayca hasat edilip ağ eleklerinde %14-28 kuru katı maddeye kadar yoğunlaştırılabilmesi gibi önemli özellikler sergilediği bildirilmiştir. Makroalglerin hasat edilmesi mikroalglerle karşılaştırıldığında daha büyük boyutu, sürdürülemez malzemelerin kullanımına gerek olmaması, yoğun yüzen ya da yüzeye tutunan tabakalar halinde büyümesi nedeniyle daha kolay ve uygun maliyetlidir [83]. Makroalg yetiştiriciliği tipik olarak deniz yosunlarının yetiştirilmesi ve hasadı ile eş anlamlıdır. Kirleticileri gidermek için tatlı su makroalg yetiştirme sistemlerini tarımsal uygulamalar, su ürünleri yetiştiriciliği ve endüstriyel tesislerle entegre etme girişimleri devam etmektedir [80]. Bu çalışmada en yüksek akümülyasyon değerinin elde edildiği gün hasatlama süresi olarak belirlenerek ilgili element için en yüksek alım potansiyeli

vurgulanmaktadır. Hasatlama sürelerinin farklı olması ise alg bazlı herhangi bir biyolojik prosesin dinamik doğasını vurgulamaktadır [51]. Stratejik hammaddelerin atıksudan uzaklaştırılarak çevresel etkilerin azaltılması veya hedeflenen elementçe zengin alg biyokütleri üretilerek bu biyokütleden stratejik hammaddelerin geri kazanımı hedeflerine ulaşmak için operasyonel parametrelerin optimize edilmesi gerekir. Bu çalışma akümülyasyon ve biyokütlenin bileşimi hakkında bilgi sağlamakta olup araştırmada biyokütle üretimi ve verimliliği gibi konular kapsam dışında tutulmuştur. Fakat biyokütle üretimi ve verimliliğini değerlendirmek de hedeflere ulaşmada etkili olacaktır. Çevresel faktörler ve atıksu karakterizasyonu gibi akümülyasyonunu etkileyen değişkenlere bağlı olarak, hasatlama süresinin akümülyasyon kinetiğine göre optimize edilmesi ve her bir stratejik hammadde için ayrı bir hasat süresinde çalışılması, belli bir stratejik hammadde açısından zengin alg biyokütlesi üretilmesine olanak sağlayabilir. Neveux ve ark. (2016) makroalglerin hasadının, susuzlaştırılması için gereken teknoloji seviyesinin ve bunlar için katlanılması gereken maliyetlerin mikroalglerinkinden önemli ölçüde daha düşük olduğunu bildirmektedir [51]. Gelecekte atıksu arıtma tesislerinin kademeli olarak geri dönüşüm tesislerine dönüştürülmesi ve P geri kazanım yaklaşımlarına ihtiyaç duyulması beklenmektedir [84], [85]. Atıksu arıtma tesislerinde uygulanacak süreç, geleneksel yanma veya birlikte yakmadan elde edilen küllerden P'un geri kazanılmasıdır [86]. İkincil kaynaklardan stratejik hammaddelerin geri kazanımı, yüksek tedarik riskinin üstesinden gelmek için umut vadeden bir seçenektir [87].

VI. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada ekonomik ve uygulanabilir iyileştirme tekniği kullanılarak gerçek atıksulardaki Mg ve P, *C. fracta* ile akümüle edilmiştir. *C. fracta*'da elde edilen en yüksek Mg akümülyasyonuna göre 3 farklı tipte atıksu sıralandığında Evsel atıksu (%71.2 ± 3.6) > Sızıntı suyu (%51 ± 2.6) > Endüstriyel atıksu (%24.2 ± 1.2) sırası, en yüksek P akümülyasyonuna göre üç farklı tipte atıksu sıralandığında Endüstriyel atıksu (%783 ± 39.2) > Evsel atıksu (%675.1 ± 33.8) > Sızıntı suyu (%21 ± 1) sırası elde edilmiştir. *C. fracta*'nın farklı atıksulardan Mg ve P'ü biriktirmedeki başarısı, bu makroalg'in çeşitli atıksulara iyi adapte olabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla *C. fracta*'nın bu stratejik hammaddelerin akümülyasyonunda iyi performans gösterdiği ve fikoremediasyon teknolojisinde kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca yüksek adaptasyon yeteneği sayesinde *C. fracta* atıksularda Mg ve P açısından zengin alg biyokütlesi üretme potansiyeli sunmaktadır.

Düşük maliyetler sunan alg yetiştiriciliği teknikleri geliştirilerek *C. fracta*'nın bu stratejik hammaddelerin biriktirmedeki yüksek potansiyelinden yararlanılabilir. Böylece *C. fracta*, sızıntı suları, evsel ve endüstriyel atıksular gibi yüksek miktarda stratejik hammadde bulundurma potansiyeli olan atıksuların yönetimi için iyi bir alternatif sunabilir. Ayrıca, stratejik hammaddelere olan talebin artması ile akümülyasyon sonucu elde edilen alg biyokütlesinden Mg ve P'un geri kazanılması, bu hammaddelerin çıkarılmasındaki zorluklar göz önüne alındığında iyi bir seçenek olabilir. Genel bir sonuç olarak, makroalg kullanılarak stratejik hammaddelerin akümülyasyonu ile hem çevresel yükün azaltılması hem de döngüsel ekonomi açısından fayda elde edilebileceği değerlendirilmektedir. Belki de akümülyasyon gelecekte atıksu arıtmanın yanında stratejik hammaddelerin üretiminde büyük bir yer tutacaktır.

YAZAR BEYANI (AUTHOR STATEMENT)

İntihal Kontrolü (Plagiarism Check)—Makale iThenticate programı ile taranmış ve derginin intihal politikası ile uyumlu bulunmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)—Makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Etik Kurul Onayı (Ethics Committee Approval)—Makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Yapay Zekâ Araçlarının Kullanımı (Use of Artificial Intelligence Tools)—Bu çalışmada, makale yazımında herhangi bir yapay zekâ aracı kullanılmamıştır. Makaledeki tüm içerik yazarın özgün katkısı yansıtmaktadır.

Finansman ve Proje Desteği (Funding)—Bu çalışma için herhangi bir kurumsal/finansal destek alınmamıştır.

Veri Paylaşım (Data availability)—Bu çalışmanın bulgularını destekleyen veriler yazar(lar) tarafından üretilmiş olup; makul talepler doğrultusunda yazar(lar)dan temin edilebilir.

Yazar Katkısı (CRediT Author Contribution)—Kavramsallaştırma, Yöntem, Araştırma, Görseleştirme, Biçimsel Analiz, Yazma – ilk taslak, Yazma-inceleme ve düzenleme (**Mehmet Mustafa Deniz**); Doğrulama, Danışmanlık, Yazma-inceleme ve düzenleme (**Murat Topal**).

Teşekkür (Acknowledgment)—Bu makale, Munzur Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları Anabilim Dalı'nda tamamlanan "Farklı Tipte Atıksularda Bulunan Bazı Stratejik Hammaddelerin Makroalg İle Akümülyasyonunun Araştırılması" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Mammadli, G. Barakos, P. Chang, J. Gamutan, Z. Efendiyeve, "Evaluation of Potentially Critical and Strategic Raw Materials in Azerbaijan", *Geomining*, A. Shukurov, O. Vovk, A. Zaporozhets, N. Zuevska, Eds., Switzerland Cham, Springer, 2024, Ch. 1, 3-29. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_1.
- [2] S. Singh, M. Bai, A. Matthews, S. N. Joshi, S. Goel, "Strain engineering: A sustainable alternative to avoid using strategic and critical raw materials in developing high-performance alloys", *Materials Today Advances*, 24, 100538, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2024.100538>.
- [3] M. Almousa, T. Olusegun, Y. Lim, K. Al-Zboon, I. Khraisat, A. Alshami, B. Ammary, "Chemical recovery of magnesium from the Dead Sea and its use in wastewater treatment", *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 14(3), 229–243, 2024. <https://doi.org/10.2166/washdev.2024.267>.
- [4] European Commission, "Study on the critical raw materials for the EU 2023", Luxembourg, Final Report, 2023. <https://doi.org/10.2873/725585>.
- [5] K. E. B. Tan, A. E. S. Choi, "Development of Separation Techniques for Magnesium Recovery: A Mini-Review", *Chemical Engineering Transactions*, 106, 55-60, 2023. <https://doi.org/10.3303/CET23106010>.
- [6] S. You, Y. Huang, K. U. Kainer, N. Hort, "Recent research and developments on wrought magnesium alloys", *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(3), 239-253, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.09.001>.
- [7] J. Song, J. She, D. Chen, F. Pan, "Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide", *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(1), 1-41, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.02.003>.
- [8] V. Patel, P. Sharma, A. Tiwari, H. Vasnani, "Magnesium alloys in the automotive industry: Alloying elements and their impact on material performance", *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 21(01), 130-145, 2024. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2024.21.1.0194>.
- [9] T. Xu, Y. Yang, X. Peng, J. Song, F. Pan, "Overview of advancement and development trend on magnesium alloy", *Journal of Magnesium and Alloys*, 7(3), 536-544, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.08.001>.
- [10] C. R. Benitez-Nelson, "The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems", *Earth-Science Reviews*, 51(1-4), 109–135, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00018-0).
- [11] C. Walters, M. Steyn, L. Ndlela, X. Nocanda, M. Moloi, P. Oberholster, "Phycoremediation of industrial wastewater: review of algae consortia", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(7), 6209-6224, 2025. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06130-5>.
- [12] D. Liu, X. Li, Q. Qiao, L. Bai, Z. Lu, Y. Zhang, C. Lu, "Assessment of phosphorus pollution and phosphorus release mechanisms of sediment in the Tuojiang River, Southwest China", *Journal of Hydrology- Regional Studies*, 51, 101635, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101635>.
- [13] W. J. Brownlie, P. Alexander, D. Cordell, M. Maslin, G. S. Metson, M. A. Sutton, B. M. Spears, "National phosphorus planning for food and environmental security", *Current Opinion in Biotechnology*, 90, 103226, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103226>.
- [14] M. Walsh, G. Schenk, S. Schmidt, "Realising the circular phosphorus economy delivers for sustainable development goals", *NPI Sustainable Agriculture*, 1(1), 2, 2023. <https://doi.org/10.1038/s44264-023-00002-0>.
- [15] A. Machnika, J. Suschka, K. Gröbel, "The importance of Potassium and Magnesium ions in biological phosphorus removal from wastewater", 87-96, 2005. <https://www.energiomiljo.org/kth/Polishproject/rep12/MSG.pdf>.
- [16] R. Dadhich, A. K. Jaiswal, H. L. Sharma, G. Gualia, "Phycoremediation of Waste Water of Gandhi Sagar Pond, Bhilwara", *Advances in Bioresearch*, 14(6), 596-600, 2023.
- [17] S. Natesan, A. Balasubramanian, B. M. Dakshinamoorthi, P. Madhiahazhagan, P. Raja, "Phycoremediation of Domestic Waste Water and Biodiesel Extraction from Fresh-Water Microalgae", *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 21(3), 1157-1171, 2024. <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/3294>.
- [18] S. Ali Akbar, A. Nur Lestari, R. Rizki Fazli, G. Gunawan, "Harnessing macroalgae for heavy metal phycoremediation: A sustainable approach to aquatic pollution control", *BIO Web of Conferences*, 156, 02013, 2025. <https://doi.org/10.1051/biocconf/202515602013>.
- [19] P. K. Sasi, A. Viswanathan, J. Mechery, D. Thomas, J. P. Jacob, S. V. Paulose, "Phycoremediation of paper and pulp mill effluent using *Planktochlorella nurekis* and *Chlamydomonas reinhardtii* - a comparative study", *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 8(2), 809–817, 2020.
- [20] M. Elsayed, Y. Mysnyk, M. Mahmoud-Aly, E. Mostafa, A. W. Almutairi, D. G. Abbas, M. M. Ibrahim, D. Hanelt, A. Abomohra, "Valorization of abattoir water discharge through phycoremediation for enhanced biomass and biodiesel production", *Biomass and Bioenergy*, 191, 107448, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107448>.
- [21] N. Brown, M. Sells, N. Jayamaha, A. Shilton, "Predicting phosphorus accumulation and proposing conditions needed for an algal-based phosphorus uptake process", *Environmental Technology*, 45(21), 4408–4418, 2024. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2252607>.
- [22] M. Topal, E. Öbek, E. I. Arslan Topal, "Performance of *Cladophora fracta* for Bioaccumulation of Critical Raw Materials from Mine Gallery Waters", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(6), 4531–4539, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04522-6>.
- [23] Ö. Yazılan Çamlık, E. Taşkın, "Accumulation of Heavy Metals in *Cladophora fracta* and *Chaetomorpha ligustica* Species", *Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research*, 7(2), 70-78, 2024. <https://doi.org/10.63039/medfar.1478935>.
- [24] L. Ji, S. Xie, J. Feng, Y. Li, L. Chen, "Heavy metal uptake capacities by the common freshwater green alga *Cladophora fracta*", *Journal of Applied Phycology*, 24(4), 979–983, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9721-0>.
- [25] I. Elenkov, K. Stefanov, M. Alexandrova, S. Dimitrova-Konaklieva, S. Popov, "Lipid composition of some Bulgarian *Cladophora* species", *Botanica Marina*, 39(2), 79–82, 1996. <https://doi.org/10.1515/botm.1996.39.1-6.79>.
- [26] I. Michalak, B. Messyasz, "Concise review of *Cladophora* spp.: macroalgae of commercial interest", *Journal of Applied Phycology*, 33, 133–166, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02211-3>.
- [27] D. Kumar, L. K. Pandey, J. P. Gaur, "Metal sorption by algal biomass: from batch to continuous system", *Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts*, 18, 95–109, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.05.026>.
- [28] H. Ben Amor-Ben Ayed, B. Taidi, H. Ayadi, D. Pareau, M. Stambouli, "Magnesium Uptake by the Green Microalga *Chlorella vulgaris* in Batch Cultures", *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26(3), 503-510, 2016. <https://doi.org/10.4014/jmb.1507.07039>.
- [29] Y. K. Leong, J. S. Chang, "Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms", *Bioresource Technology*, 303, 122886, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122886>.
- [30] S. K. Mehta, J. P. Gaur, "Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: Progress and Prospects", *Critical Reviews in Biotechnology*, 25(3), 113–152, 2005. <https://doi.org/10.1080/07388550500248571>.
- [31] B. Koul, K. Sharma, M. P. Shah, "Phycoremediation: A sustainable alternative in wastewater treatment (WWT) regime", *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102040, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102040>.
- [32] J. Hu, L. M. Jiang, L. Wang, X. Ding, X. Han, Y. Zhang, H. Wei, Z. Qiu, Y. An, Z. Zhou, "Differential impacts of rain event and continuous rainfall on biological phosphorus removal of a full-scale wastewater treatment plant: performance analysis and optimization strategies", *Journal of Environmental Management*, 390, 126385, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126385>.

- [33] X. Wang, K. Kvaal, H. Ratnaweera, "Characterization of influent wastewater with periodic variation and snow melting effect in cold climate area", *Computers & Chemical Engineering*, 106, 202-211, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.06.009>.
- [34] S. Grira, H. Abu Khalifeh, K. Harby, M. Ramadan, M. Alkhdher, "Advancing biological water treatment: Biodesalination and heavy metal remediation using immobilized algae", *Next Research*, 8, 101627, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101627>.
- [35] H. M. Zhang, G. Geng, J. J. Wang, Y. Xin, Q. Zhang, D. J. Cao, Y. H. Ma, "The remediation potential and kinetics of cadmium in the green alga *Cladophora rupestris*", *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 775-783, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3661-z>.
- [36] M. Topal, E. I. A. Topal, E. Öbek, "A green algae *Cladophora fracta* for accumulation of toxic/harmful pollutants causing environmental pollution in mine gallery waters", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), 4481-4490, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03479-9>.
- [37] B. Khatiwada, M. T. Hasan, A. Sun, K. S. Kamath, M. Mirzaei, A. Sunna, H. Nevalainen, "Proteomic response of *Euglena gracilis* to heavy metal exposure—Identification of key proteins involved in heavy metal tolerance and accumulation", *Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts*, 45, 101764, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101764>.
- [38] H. S. Lee, B. Volesky, "Interaction of light metals and protons with seaweed biosorbent", *Water Research*, 31(12), 3082-3088, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00022-5).
- [39] R. H. Crist, J. R. Martin, P. W. Guptill, J. M. Eslinger, D. R. Crist, "Interaction of metals and protons with algae. 2. Ion exchange in adsorption and metal displacement by protons", *Environmental Science & Technology*, 24(3), 337-342, 1990. <https://doi.org/10.1021/es00073a008>.
- [40] L. Deng, X. Zhu, X. Wang, Y. Su, H. Su, "Biosorption of copper (II) from aqueous solutions by green alga *Cladophora fascicularis*", *Biodegradation*, 18(4), 393-402, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10532-006-9074-6>.
- [41] L. Brinza, M. J. Dring, M. Gavrilescu, "Marine micro and macro algal species as biosorbents for heavy metals", *Environmental Engineering and Management Journal* 6(3), 237-251, 2007. <https://doi.org/10.30638/eemj.2007.029>.
- [42] N. Arumugam, S. Chelliapan, H. Kamyab, S. Thirugnana, N. Othman, N.S. Nasri, "Treatment of Wastewater Using Seaweed: A Review", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(12), 2851, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122851>.
- [43] N. Brown, A. Shilton, "Luxury uptake of phosphorus by microalgae in waste stabilisation ponds: current understanding and future direction", *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 13(3), 321-328, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9337-3>.
- [44] G. Markou, I. Chatzipavlidis, D. Georgakakis, "Effects of phosphorus concentration and light intensity on the biomass composition of *Arthrospira (Spirulina) platensis*", *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(8), 2661-2670, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11274-012-1076-4>.
- [45] H. Kaneko, A. Shimada, K. Hirayama, "Short-term algal toxicity test based on phosphate uptake", *Water Research*, 38(8), 2173-2177, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.02.006>.
- [46] S. D. Priyadharshini, P. S. Babu, S. Manikandan, R. Subbaiya, M. Govarthanan, N. Karmegam, "Phycoremediation of wastewater for pollutant removal: A green approach to environmental protection and long-term remediation", *Environmental pollution*, 290, 117989, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117989>.
- [47] T. Y. Plyusnina, S. S. Khrushev, P. V. Fursova, A. E. Solovchenko, T. K. Antal, G. Y. Riznichenko, A. B. Rubin, "Simulating the Interplay between the Uptake of Inorganic Phosphate and the Cell Phosphate Metabolism under Phosphorus Feast and Famine Conditions in *Chlorella vulgaris*", *Cells*, 10(12), 3571, 2021. <https://doi.org/10.3390/cells10123571>.
- [48] Yuvraj, A. S. Vidyarthi, J. Singh, "Enhancement of *Chlorella vulgaris* cell density: Shake flask and bench-top photobioreactor studies to identify and control limiting factors", *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(8), 2396-2405, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0087-5>.
- [49] T. Khuantairong, S. Traichaiyaporn, "The nutritional value of edible freshwater alga *Cladophora* sp. (*Chlorophyta*) grown under different phosphorus concentrations", *International Journal of Agriculture and Biology*, 13(2), 297-300, 2011.
- [50] S. Sode, A. Bruhn, T. J. S. Balsby, M. M. Larsen, A. Gotfredsen, M. B. Rasmussen, "Bioremediation of reject water from anaerobically digested waste water sludge with macroalgae (*Ulva lactuca*, *Chlorophyta*)", *Bioresource Technology*, 146, 426-435, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.062>.
- [51] N. Neveux, M. Magnusson, L. Mata, A. Whelan, R. de Nys, N. A. Paul, "The treatment of municipal wastewater by the macroalga *Oedogonium* sp. and its potential for the production of biocrude", *Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts*, 13, 284-292, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.12.010>.
- [52] E. Schaedig, M. Cantrell, C. Urban, X. Zhao, D. Greene, J. Dancer, M. Gross, J. Sebesta, K. J. Chou, J. Grabow, M. Gross, K. Kumar, J. Yu, "Isolation of phosphorus-hyperaccumulating microalgae from revolving algal biofilm (RAB) wastewater treatment systems", *Frontiers in Microbiology*, 14, 1219318, 2023. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1219318>.
- [53] H. R. Molitor, G. Y. Kim, E. Hartnett, B. Gincley, M. M. Alam, J. Feng, N. M. Avila, A. Fisher, M. Hodaie, Y. Li, K. McGraw, R.D. Cusick, I. M. Bradley, A. J. Pinto, J. S. Guest, "Intensive Microalgal Cultivation and Tertiary Phosphorus Recovery from Wastewaters via the EcoRecover Process", *Environmental Science & Technology*, 58 (20), 8803-8814, 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c10264>.
- [54] Q. Emparan, R. Harun, M. K. Danquah, "Role of phycoremediation for nutrient removal from wastewaters: a review", *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 889-915, 2019. https://doi.org/10.15666/aeer/1701_889915.
- [55] T. Chopin, H. Lehm, K. Halcrow, "Polyphosphates in the red macroalga *Chondrus crispus* (Rhodophyceae)", *New Phytologist*, 135, 587-594, 1997. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00690.x>.
- [56] A. D. Cembella, N. J. Antia, P. J. Harrison, G. -Y. Rhee, "The utilization of inorganic and organic phosphorus compounds as nutrients by eukaryotic microalgae: a multidisciplinary perspective: Part 2", *CRC Critical Reviews in Microbiology*, 11(1), 13-81, 1984. <https://doi.org/10.3109/10408418409105902>.
- [57] B. Yao, B. Xi, C. Hu, S. Huo, J. Su, H. Liu, "A model and experimental study of phosphate uptake kinetics in algae: Considering surface adsorption and P-stress", *Journal of Environmental Sciences*, 23(2), 189-198, 2011. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60392-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60392-0).
- [58] Q. Xiong, Y. S. Liu, L. X. Hu, Z. Q. Shi, W. W. Cai, L. Y. He, G. G. Ying, "Co-metabolism of sulfamethoxazole by a freshwater microalga *Chlorella pyrenoidosa*", *Water Research*, 175, 115656, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115656>.
- [59] A. Abdelfattah, S. S. Ali, H. Ramadan, E. I. El-Aswar, R. Eltawab, S. H. Ho, T. Elsamahy, S. Li, M. M. El-Sheekh, M. Schagerl, M. Kornaros, J. Sun, "Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects", *Environmental Science and Ecotechnology*, 13, 100205, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.iese.2022.100205>.
- [60] N. Powell, A. Shilton, Y. Chisti, S. Pratt, "Towards a luxury uptake process via microalgae – Defining the polyphosphate Dynamics", *Water Research*, 43(17), 4207-4213, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.06.011>.
- [61] P. Lundberg, R. G. Weich, P. Jensen, H. J. Vogel, "Phosphorus-31 and Nitrogen- 14 NMR Studies of the Uptake of Phosphorus and Nitrogen Compounds in the Marine Macroalgae *Ulva lactuca*", *Plant Physiology*, 89(4), 1380-1387, 1989. <https://doi.org/10.1104/pp.89.4.1380>.
- [62] A. Ahmad, F. Banat, H. Alsafar, S. W. Hasan, "Algae biotechnology for industrial wastewater treatment, bioenergy production, and high-value bioproducts", *Science of The Total Environment*, 806, 150585, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150585>.
- [63] S. Shaddel, T. Grini, J. P. Andreassen, S. W. Østerhus, S. Ucar, "Crystallization kinetics and growth of struvite crystals by seawater versus magnesium chloride as magnesium source: towards enhancing sustainability and economics of struvite crystallization", *Chemosphere*, 256, 126968, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126968>.
- [64] C. E. Najar-Almanzor, K. D. Velasco-Iglesias, R. Nunez-Ramos, T. ribe-Velázquez, M. Solis-Bañuelos, O. J. Fuentes-Carrasco, I. Chairez, I. García-Cayuela, D. Carrillo-Nieves, "Microalgae-assisted green bioremediation of food-processing wastewater: a sustainable approach toward a circular economy concept", *Journal of Environmental Management*, 345, 118774, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118774>.
- [65] E. Borhan, V. Korhonen, S. Sirin, Y. Allahverdiyeva, "Long-term phycoremediation of hydroponic drainwater in a pilot-scale turbidostat", *Journal of Environmental Management*, 405, 129635, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129635>.

- [66] J. Yang, M. Xu, X. Zhang, Q. Hu, M. Sommerfeld, Y. Chen, "Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance", *Bioresource Technology*, 102(1), 159-165, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.017>.
- [67] S. Mustafa, H. N. Bhatti, M. Maqbool, M. Iqbal, "Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities", *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102009, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102009>.
- [68] L. N. Nguyen, L. Aditya, H. P. Vu, A. H. Johir, L. Bennar, P. Ralph, N. B. Hoang, J. Zdart, L. D. Nghiem, "Nutrient Removal by Algae-Based Wastewater Treatment", *Current Pollution Reports*, 8(4), 369-383 2022. <https://doi.org/10.1007/s40726-022-00230-x>.
- [69] Y. Su, "Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment", *Science of The Total Environment*, 762, 144590, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144590>.
- [70] M. Kumar, Y. Sun, R. Rathour, A. Pandey, I. S. Thakur, D. C. W. Tsang, "Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges", *Science of The Total Environment*, 716, 137116, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137116>.
- [71] L. Zhou, J. Chen, Y. Qian, Y. Zhang, E. Batjargal, B. A. Tuulaikhuu, X. Zhou, "Unlocking phosphorus recovery from microalgae biomass: The enhanced transformation and release of phosphorus species", *Water Research*, 275, 123196, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123196>.
- [72] I. S. A. Abeywardana-Arachchige, H. M. K. Delanka-Pedige, S. P. Munasinghe-Arachchige, N. Nirmalakhandan, "Techno-economic optimization of phosphorous recovery in an algal-based sewage treatment system", *Bioresource Technology*, 332, 125128, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125128>.
- [73] V. Akuku, F. Satogno, "Sustainable phosphorus recovery from wastewater using microalgae: Economic, environmental, and agronomic implications for future phosphorus fertilizer solutions", *Cleaner Waste Systems*, 12, 100377, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100377>.
- [74] T. W. Stewart R. L. Lowe, "Benthic algae of Lake Erie (1865-2006): a review of assemblage composition, ecology, and causes and consequences of changing abundance", *Ohio Journal of Science*, 108(5), 82-94, 2008.
- [75] M. Fatima, N. Shukla, S. Afzal, M. Monalisha, P. Ashutosh, N. Chaudhary, A. Patel, N. K. Singh, "Phycoremediation of industrial wastewater: Mechanisms, efficiency, and future prospects", *Bioresource Technology Reports*, 32, 102385, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102385>.
- [76] F. Sabatte, R. Baring, H. Fallowfield, "Suspended filamentous algal cultures for wastewater treatment: A review", *Journal of Applied Phycology*, 36(4), 1987-2004, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03220-2>.
- [77] A. F. M. Udaiyappan, H. Abu Hasan, M. S. Takriff, S. R. S. Abdullah, "A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment", *Journal of Water Process Engineering*, 20, 8-21, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.09.006>.
- [78] S. B. Velásquez-Orta, I. Yáñez-Nogues, I. M. Ramírez, M. T. O. Ledesma, "Pilot-scale microalgae cultivation and wastewater treatment using high-rate ponds: a meta-analysis", *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 46994-47021, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34000-7>.
- [79] D. Chaumont, "Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture", *Journal of Applied Phycology*, 5(6), 593-604, 1993. <https://doi.org/10.1007/BF02184638>.
- [80] J. H. Yun, V. H. Smith, R. C. Pate, "Managing nutrients and system operations for biofuel production from freshwater macroalgae", *Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts*, 11, 11-13, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.05.016>.
- [81] X. Y. Liu, Y. Hong, "Microalgae-Based Wastewater Treatment and Recovery with Biomass and Value-Added Products: a Brief Review", *Current Pollution Reports*, 7(2), 227-245, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00184-6>.
- [82] Y. Mao, R. Xiong, X. Gao, L. Jiang, Y. Peng, Y. Xue, "Analysis of the Status and Improvement of Microalgal Phosphorus Removal from Municipal Wastewater", *Processes*, 9(9), 1486, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9091486>.
- [83] S. Ge, P. Champagne, "Cultivation of the Marine Macroalgae *Chaetomorpha linum* in Municipal Wastewater for Nutrient Recovery and Biomass Production", *Environmental Science & Technology*, 51(6), 3558-3566, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06039>.
- [84] B. Cieřlik, P. Konieczka, "A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of "no solid waste generation" and analytical methods", *Journal of Cleaner Production*, 142, 1728-1740, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.116>.
- [85] M. Topal, E. I. A. Topal, "Investigation of Critical Raw Materials in Sludge of Municipal Wastewater Treatment Plant", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(1), 107-115, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07238-x>.
- [86] B. M. Cieřlik, J. Namieřnik, P. Konieczka, "Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods", *Journal of Cleaner Production*, 90, 1-15, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.031>.
- [87] D. L. Ramasamy, V. Puhakka, E. Repo, S.B. Hammouda, M. Sillanpää, "Two-stage selective recovery process of scandium from the group of rare earth elements in aqueous systems using activated carbon and silica composites: dual applications by tailoring the ligand grafting approach", *Chemical Engineering Journal*, 341, 351-360, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.024>.