

## SÜREKLİ FOTOBİYOREAKTÖR SİSTEMLERİNDE ÜRETİLEN KARIŞIK MİKROALG KÜLTÜRÜ KULLANILARAK CO<sub>2</sub> GİDERİM ORANLARININ İNCELENMESİ

Elmira AGHAALIPOUR<sup>1(\*)</sup>, Aydın AKBULUT<sup>2</sup>, Gülen GÜLLÜ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 06800  
Beytepe, Ankara

<sup>2</sup>Hacettepe Üniversitesi, Eğitim Fakültesi Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, 06800  
Beytepe, Ankara

### ÖZET

İklim değişikliğinin insanlar ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri hakkındaki küresel kaygılar CO<sub>2</sub> yakalama teknolojilerinin geliştirilmesini tetiklemiştir. Enerji üretim santralleri ve sanayi tesisleri gibi yüksek CO<sub>2</sub> salınımı yapan noktasal kaynakların baca gazı emisyonlarından karbondioksit yakalamak için çeşitli yaklaşımlar vardır. Bu yaklaşımlar karbon tutma ve depolama (CCS) olarak adlandırılan, absorpsiyon, fiziksel adsorpsiyon, kriyojenik ayırma, membran ayrılması gibi kimyasal ve fiziksel işlemlerle CO<sub>2</sub>'nin tutulmasıdır. Yüksek CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarına sahip emisyonlar, jeolojik oluşumlara taşınır ve depolanır. Son zamanlarda, mikroalglerle karbondioksitin biyolojik giderimi, araştırmacıların ilgisini çekmektedir; bu süreçte mikroalgler, gelişmeleri için noktasal kaynaklardan çıkan baca gazının CO<sub>2</sub>'ini kullanmaktadırlar. Bu çalışmada, CO<sub>2</sub> giderim verimi tespit için Ankara Çayı'ndan izole edilen iki alg türü (*Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*) ile hazırlanmış olan karışık kültür sürekli gaz akışlı fotobiyoreaktörler kullanılmıştır. Mikroalglerin karışık kültürü, 0,142 L /dakika akış oranı ile % 10 ve % 0,04 CO<sub>2</sub> konsantrasyonları ile beslenmiştir. Alglerin büyüme parametreleri tespit edilerek, reaktöre verilen karbondioksit oranlarının ne kadarının biyokütleyle çevrilerek giderilebileceği araştırılmıştır. %10 CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile beslendiği durumda karışık kültürün maksimum spesifik büyüme oranı ve biyokütle verimliliği sırasıyla  $0,58 \pm 0,05 \text{ gün}^{-1}$  ve  $0,129 \pm 0,017 \text{ gr L}^{-1}\text{gün}^{-1}$ , CO<sub>2</sub> tutma verimi ise  $0,217 \text{ gr CO}_2\text{L}^{-1}\text{gün}^{-1}$  olarak bulunmuştur.

### ANAHTAR SÖZCÜKLER

Mikroalg kültürleri, Fotobiyoreaktör, CO<sub>2</sub> yakalama, Büyüme parametreleri

### ABSTRACT

Globally apprehensions about the unfavorable impacts of climate change on the humans and environment have been triggered the improvement of CO<sub>2</sub> capture technologies. There are various approaches to capture carbon dioxide from the flue gas emissions of point sources such as power plants and cement industries. These approaches are CO<sub>2</sub> sequestration by the chemical and physical operates such as absorption, physical adsorption, cryogenic separation, membrane separation, which is named as carbon capture and storage (CCS). The resulting effluents with high CO<sub>2</sub> concentrations are transported and stored in geological formations. Recently, the biological

(\*)elmira.a.alipour@hacettepe.edu.tr

mitigation of carbon dioxide by microalgae has been attracted the interest of researchers, during this process microalgae are using the CO<sub>2</sub> of flue gases from point sources for their developments. In this study, two algae species (*Chlorella vulgaris*, *Scenedesmusobliquus*) which are isolated from the Ankara Creek were used as mixed cultures in continuous photobioreactors. The mixed culture of microalgae has fed with 10% and 0.04% CO<sub>2</sub> concentrations with the flow rate of 0.142 L/min. The rate of CO<sub>2</sub> mitigation through the conversion to biomass has been investigated by measuring the growth parameters of microalgae. The maximum specific growth rate and biomass productivity of mixed culture have been found respectively,  $0.58 \pm 0.05 \text{ day}^{-1}$ ,  $0.129 \pm 0.017 \text{ gr L}^{-1}\text{day}^{-1}$ , and CO<sub>2</sub> fixation rate of  $0.217 \text{ gr CO}_2 \text{ L}^{-1}\text{day}^{-1}$ , at %10 CO<sub>2</sub> concentration.

## KEYWORDS

Mikroalgae cultures, Photobioreactor, CO<sub>2</sub> capture, Growth parameters

## 1. GİRİŞ

Atmosferdeki CO<sub>2</sub> seviyesinin artması nedeniyle meydana gelen küresel ısınma, bu yüzyıldaki en önemli sorunlarından biri olarak tespit edilmiştir. Küresel ısınma sera gazlarının (GHG) emisyonundan kaynaklanmaktadır, bu gazların arasında CO<sub>2</sub> gazı önemli rol oynamaktadır (IPCC, 2007). Temmuz 2017 itibari ile atmosferdeki CO<sub>2</sub> konsantrasyon seviyesi yaklaşık 407,07ppm kaydedilmiştir (NOAA, 2017). Mevcut artış hızı ile CO<sub>2</sub> seviyelerinin 1000 ppm'e ulaşabileceği ve geri döndürülemez iklim değişikliklerine yol açacağı öne sürülmüştür (Matthews, 2008). Bilim insanları, dünya çapındaki nüfusun artmasına paralel olarak, fosil yakıtlara olan talebin de artmasıyla bu değerlerin mümkün olacağına inanıyorlar. Artan CO<sub>2</sub> düzeylerinin küresel iklim, nüfus ve doğal kaynaklar üzerindeki mevcut etkileri ile ilgili tartışmalar halen devam etmekle birlikte, birçok bilim adamı öngörülen artışların çevre üzerinde derin etkilere sahip olacağı konusunda hemfikirlerdir. Aslında, Birleşmiş Milletler, 2100 yılına kadar her on yılda 0,2-0,4°C'lik bir yükselme öngörüyor ve bu artışın küresel sıcaklıklarda 3-5°C'lik bir yükselişe sebep olacağı söyleniyor (United Nations, 2007). Küresel sıcaklık artışları deniz seviyesinin yükselmesine, tatlı su kaynaklarının yetersiz kalmasına ve geleneksel tarım rejimlerinin yok olmasına neden olabilir. Antropojenik CO<sub>2</sub> emisyonlarının çoğu, enerji üretimi için fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanır.

Karbondioksit emisyonunu arttırmadan bu artan enerji talebini karşılamak, enerji üretim verimliliğinde saf artıştan daha önemlidir. Bu durum, küresel enerji sistemi vasıtasıyla yayılan karbonu saklama, yakalama ve depolama esnasında varolan tüm enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak için kapsamlı bir plan gerektirir. Karbon yakalama ve depolama (CCS), verimli ve sorumlu fosil yakıt kullanımı ve geri dönüşüm yoluyla atmosferik CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynayabilir. CCS için üç temel teknik, 1970 yılından 2010 yılına kadar toplam GHG emisyonunun kabaca %78'inden sorumlu olan elektrik santralleri ve endüstriyel tesisler üzerinde yoğunlaşmıştır (IPCC, 2014), Bu noktasal kaynaklardan kaynaklanan emisyonların azaltılması için en basit amaçtır.

Günümüzde, santrallere uygulanan üç tip CCS teknolojisi vardır; yanma sonrası (post-combustion), yanma öncesi (pre-combustion) ve oksijen yakma (oxy-combustion) teknolojileri olarak

sıralanabilirler. Her yöntem farklı derecelerde başarılı olmasına rağmen, yüksek maliyetleri vardır. Geleneksel bir kömürle çalışan elektrik santralinden CO<sub>2</sub>'nin alınması için kapsamlı tahminler vardır; bu tahminlerden bazıları % 5-30 parazit enerji kaybı, sermaye maliyetinde% 35-110 artış ve elektrik maliyetinde% 30-80 artış şeklindedir(DOE, 2009).Gerçekten küresel uyum sağlamak ve küresel hareket başlatmak için daha maliyeti etkin bir yaklaşım kabul edilmeli ve dünya çapında yaygınlaştırılmalıdır.

Maliyet etkinyaklaşımlardan biri algal biyokütle'nin kullanılmasıdır; Bazı bilim adamları, yosunların mevcut petrol bazlı fosil yakıt stoklarımızın öncüsü olduğu anlaşıldığında, bunların fosil yakıt döngüsünü tamamlayacağını önermektedir. Birincil üreticiler olarak algler, karbon izolasyonunda hayati bir rol oynayabilir ve atmosferden CO<sub>2</sub>yakalama ve milyarlarca yıl önce yaptıkları gibi biyokütle tutmaları için eyleme çağırabilir.

İzolasyon miktarı aşağıdaki gibi, kütle dengesine dayanarak belirtilebilir; oluşturulan her bir kilogram mikroalg biyo kütle için 1,83 kilogram CO<sub>2</sub>yakalanmıştır (Chisti, 2007).

Fotosentez sayesinde yosunlar, "açık" ortamda %6 güneş enerjiverimliliği ile CO<sub>2</sub>'yi yakalayabilir. Gelişmiş bitkiler sadece %0,2 güneş enerjisi verimliliği kullanmaktadır(Nakamura vd., 2002).Besin maddelerinin ve ışık gerekliliğinin sıkı bir şekilde izlendiği "kapalı" bir sistemde, yosunlar, "açık" bir sistemde görülen miktarın 10 katına kadar daha yüksek verimlilik seviyeleri elde edebilirler (Usui ve Ikenouchi, 1997).Fotobiyoreaktörler gibi kapalı sistemler kullanılarak algal biyokütle üretimi ile ilgili en önemli konulardan biri, hücrelerin karıştırılması, oksijenin alınması ve CO<sub>2</sub>'nin sağlanması gibi belirli parametrelerin kültür koşullarında muhafaza edilmesi için, algal üretim sistemlerini çalıştırmak için gereken gücü sağlamaktır (Jorquera vd., 2010;Reyna-Velarde vd., 2010;Stephenson vd., 2010).

Bu çalışmada,*Chlorellavulgaris* ve *Scenedesmus obliquus*kültürleri kullanarak elde edilen karışık kültürü ile geleneksel mikroalg saf kültürü kıyaslanarak CO<sub>2</sub> biyo-tutma oranıve alglerin büyüme parametreleri tespit edilerek, reaktöre verilen karbondioksit oranlarının ne kadarının biyokütleyle çevrilerek giderilebileceği araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD

### 2.1. Mikroorganizma ve kültür koşulları

Bu çalışmada kullanılan iki mikroalg kültürü, Ankara Gazi Üniversitesi'nden alınmıştır. Stoklanmış *Chlorella vulgaris* ve *Scenedesmus obliquus*karışık kültürüBBM isimli besi yerinde üretilmiştir. Besiyerinin içeriği litrede; 25g NaNO<sub>3</sub>, 2,5gCaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O, 7,5g MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, 7,5g K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 17,5g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 2,5g NaCl, 50g disodyum EDTA, 31g KOH, 4,98g FeSO<sub>4</sub>, 11,42g H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 8,82g ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, 1,44g MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O, 0,71g MoO<sub>3</sub>, 1,57g CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O ve 0,49g CoNO<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O şeklindedir. Ortamın başlangıç pH'sı deneysel koşullarına göre ayarlanmıştır. Laboratuvar çalışmaları, pleksiglastan imal edilmiş ve 1,3 lt çalışma hacmine, 90 cm uzunluğa ve 5 cm dış çapa sahip olan dikey boru şeklindeki fotobiyoreaktör ile yürütülmüştür (Şekil 1). Işık kaynağı olarak fotobiyoreaktörün etrafında 2 adet LED lamba kullanılmıştır, fotobiyoreaktörlerin maruz kaldığı ışık şiddeti yaklaşık olarak 4800 lümen olarak ölçülmüştür. Laboratuvarın sıcaklığının kontrolü sayesinde reaktörün sıcaklığı 26±0,5°C'de sabit tutulmuştur. Kültür ortamına

verilen iki farklı karbondioksit gaz karışımı özel olarak hazırlanmıştır; kuru havayı temsil etmek üzere içeriğinde %0,04 CO<sub>2</sub> ve kömür yanması sonucu bacadan atılan CO<sub>2</sub> düzeyine eş olan %10 CO<sub>2</sub> kullanılmıştır. Havalandırma ve karışım %10'luk karbondioksitin fotobiyoreaktörün altındaki hava taşı ile 0,142 lt/dak hızla sürekli olarak içeriye verilmesi sayesinde sağlanmıştır. Fotobiyoreaktör sürekli gaz akışının olduğu sabit sıvı hacimli bir reaktördür. Reaktörden her 48 saatte bir numune alma çıkışından örnek alınmış ve pH, klorofil, kuru ağırlık, bulanıklık, çözülmüş oksijen, toplam karbon, inorganik karbon, organik karbon ve iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Gazın akış hızını düzenlemek için ayarlanabilen akış ölçer kullanılmıştır. Üç tekrarlı çalışmak için üç adet fotobiyoreaktör kullanılmıştır. Çalışma koşulları ve yürütülen tekrarlar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Dikey fotobiyoreaktörlerinin özellikleri



Çap	5cm
uzunluk	90cm
Çalışma hacmi	1,3 L

Şekil 1. Fotosentetik Algleri içeren Dikey Borulu Fotobiyoreaktörler

Tablo 2 Fotobiyoreaktörde yürütülen deneylerde kullanılan çalışma koşulları ve ölçülen parametreler

Gaz konsantrasyonu (%)	CO <sub>2</sub> gaz debisi (L/dak)	Alg türü (sp)	Ölçülecek Parametreler (periyodik ölçümler)	Hasat sonrası
0,04 CO <sub>2</sub>	0,142	<i>Chlorella vulgaris</i> + <i>Scenedesmus obliquus</i>	48 saatte bir ❖ Klorofil ❖ Kuru ağırlık ❖ TOC ❖ IC ❖ TC ❖ İletkenlik ❖ Çözülmüş oksijen ❖ pH ❖ Bulanıklık (biyokütle)	C,H,N,S tayini (W/W%), Elemental Analiz Cihazı (LECO, CHNS-932) kullanılarak ölçülmüştür.
10 CO <sub>2</sub> (3 tekrar)	0,142	<i>Chlorella vulgaris</i> + <i>Scenedesmus obliquus</i>		

## 2.2. Mikroalgal hücre konsantrasyonunun belirlenmesi

Kuru hücre ağırlığı (g L<sup>-1</sup>), Chiu vd., (2009) tarafından tarif edilen yöntemle ölçülmüştür. Mikroalg hücreleri 10 dakika için 5000 rpm'de santrifüj ile hasat edilmiş ve iki kez saf su ile yıkanmıştır. Mikroalg pelleti kuru ağırlık ölçümü için 105°C'de kurutulmuştur. Reaktördeki biyokütle konsantrasyonu (X, gL<sup>-1</sup>) spektrofotometre DU 530 life science UV/vis Beckman

spektroforometresi kullanılarak 670 ve 620 nm'de ölçülen optik yoğunluk ve biyokütle kuru ağırlığı arasındaki eşitlik kullanılarak belirlenmiştir (Yan and Pan, 2002).

### 2.3. Biyokütle verimliliğinin ve spesifik büyüme oranının belirlenmesi

Fotobiyoreaktörde elde edilen maksimum biyokütle konsantrasyonu  $P_{max}$  ( $g L^{-1}$ ) aşağıdaki eşitlik (1) kullanılarak elde edilmiştir.

$$P_{max} = \frac{(xt - x_0)}{(tx - t_0)} \quad (1)$$

Burada  $X_0$ ,  $t_0$  zamanındaki ilk biyokütle konsantrasyonudur ( $g L^{-1}$ ) ve  $X_t$  biyokütle konsantrasyonu ( $g L^{-1}$ ) ise  $t_0$ 'dan sonraki herhangi bir zamandaki biyokütle miktarıdır (Graanet ve Ort, 1984).

Maksimum spesifik büyüme oranı ( $\mu_{max}$ ,  $gün^{-1}$ ) aşağıdaki denklem(2) ile hesaplanmıştır (Schmidell vd., 2001).

$$\mu_{max} = \frac{(\ln N_2 - \ln N_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

Burada  $N_1$  ve  $N_2$  sırasıyla eksponansiyel büyüme fazının başlangıcındaki ( $t_1$ ) ve sonundaki ( $t_2$ ) hücre konsantrasyonudur.

### 2.4. Klorofil ölçümü

Klorofil konsantrasyonu fotobiyoreaktörden çıkan alg süspansiyonundan hesaplanmış, toplam klorofil konsantrasyonunu hesaplamak için metanol yöntemi kullanılmıştır (Hulatt ve Thomas, 2011).

### 2.5. Karbondioksit tutma oranı

Karbondioksitin biyokütleyle geçerek tutulma miktarı aşağıdaki (3) formül kullanılarak hesaplanmıştır (Tang et al., 2011).

$$R_{CO_2} = C_c P_{max} \left( \frac{M_{CO_2}}{M_c} \right) \quad (3)$$

Burada  $C_c$  LECO CHNS-932 Elemental Analiz Cihazı ile (tablo 3) ölçülen kuru mikroalge hücrelerinin karbon içeriği (% w/w),  $P_{max}$  maksimum biyokütle üretkenliği ( $g L^{-1}gün^{-1}$ ),  $M_{CO_2}$  karbondioksitin molar kütlesi ( $g mol^{-1}$ ) ve  $M_c$  karbonun molar kütlesi ( $g mol^{-1}$ ) göstermektedir.

### 2.6. Toplam inorganik ve organik karbon ölçümü

Fotobiyoreaktör içindeki toplam organik karbon ve inorganik karbon konsantrasyonu, toplam organik karbon (TOC) cihazı ile ölçülmüştür.

## 3. SONUÇ VE TARTIŞMA

### 3.1. CO<sub>2</sub> konsantrasyonun mikroalg üremesi üzerine etkisi

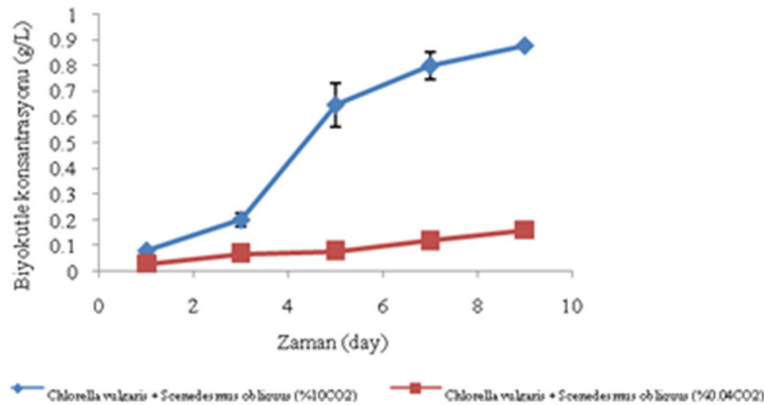
Mikroalgler gibi fotosentetik mikroorganizmalar, hızlı büyüme oranları, değişen çevresel koşullara toleranslı ve birim alan başına gelişmiş bitkilerden daha fazla CO<sub>2</sub> yakalayabildikleri için özellikle

ilgi çekmektedir (Brown, 1996). Şekil 2. %10 ve %0,04 karbon dioksit konsantrasyonları altında, mikroalga hücrelerinin büyüme modelini göstermektedir. Büyüme, biyokütle kuru ağırlığı (x, g/L) üzerinden ölçülmüştür. Daha önceki araştırmalar, %5'in üzerindeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarıyla büyüyen mikroalglerin hücrelerine zararlı olabileceğini ve gelişimlerini engelleyebileceğini göstermiştir (Chiu vd., 2008; De Morais ve Costa, 2007). Şekil 2'de görüldüğü gibi, bu çalışmada kullanılan karışık kültürün %10 CO<sub>2</sub> havalandırması ile büyümeleri onaylanmıştır. Yüksek karbondioksit konsantrasyonunda daha fazla karbon tutulması ve sonucunda biyokütle üretkenliğinin artması beklenmektedir. Ancak alglerin fazla karbonu, metabolik aktiviteleri yerine hücre organellerinin yapımı için daha fazla kullanmaları durumunda karbon dioksit yakalama etkinliğinin azalabileceğine yönelik çalışmalar mevcuttur (Chiu vd., 2009). Bu çalışmada Tablo 3'den de görülebileceği gibi %10 CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile beslenen *Chlorella vulgaris* + *Scenedesmus obliquus* (karışık kültür)'ün CO<sub>2</sub> tutma oranı 0,21 gCO<sub>2</sub>/L/gün değeri ile %0,04 CO<sub>2</sub> ile beslenen mikroalg kültürüne göre 21 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum %10 CO<sub>2</sub> konsantrasyonu beslemesinde dahi karışık kültürün karbonu metabolik aktiviteleri için kullandığını göstermektedir.

**Tablo 3** karışık kültürün %10 CO<sub>2</sub> ve 0.1 havalandırma oranı altında büyüme parametreleri

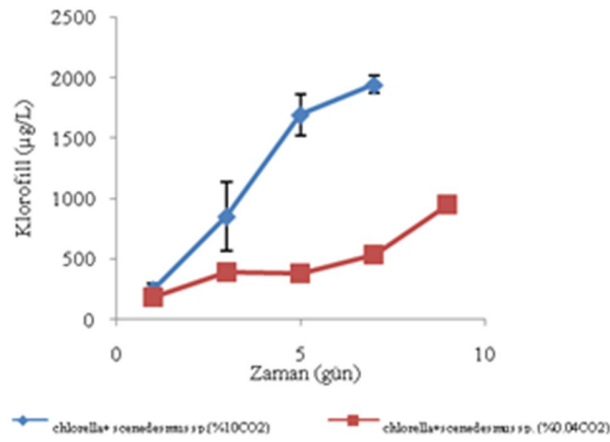
Alg türü	%CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> gaz debisi (L/dak)	M <sub>max</sub> (gün <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	X <sub>max</sub> (g/L) <sup>b</sup>	P <sub>max</sub> (g/L/gün) <sup>c</sup>	CO <sub>2</sub> tutma oranı (gCO <sub>2</sub> /L/gün) <sup>d</sup>	Karbon içeriği (%)	Ekim süresi (gün)
<i>Chlorella vulgaris</i> + <i>Scenedesmus obliquus</i> (karışık kültür)	10	0,1	0,58 ± 0,05	0,87	0,12±0,01	0,21	46,01	10
<i>Chlorella vulgaris</i> + <i>Scenedesmus obliquus</i> (karışık kültür)	0.04	0,1	0,49	0.16	0,03	0,01	12,93	10

a. Maksimum spesifik büyüme hızı; b. Maksimum kuru hücre konsantrasyonu; c. Maksimum kuru biyokütle üretkenliği



**Şekil 2.** Karışık mikroalg kültürünün %10 karbondioksit ve kuru hava koşulu altında büyüme hızı değişimi

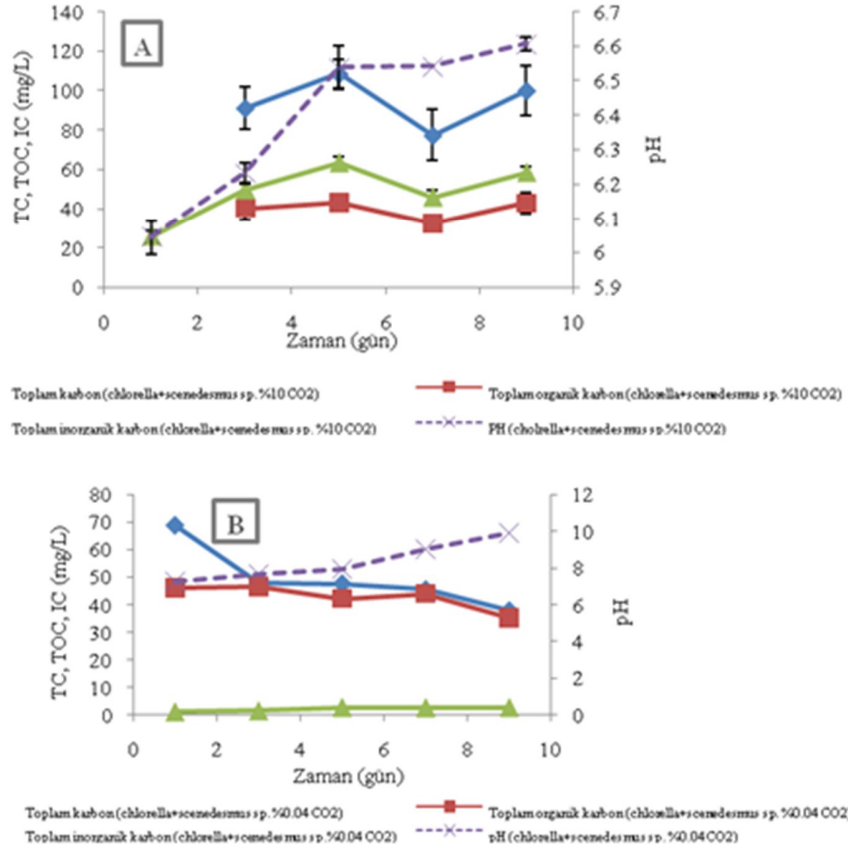
Hem %10 hem de %0,04 CO<sub>2</sub> içeren gaz ile beslenmesi durumunda fotobiyoreaktörlerdeki klorofil konsantrasyonlarının değişimi Şekil 3’de gösterilmektedir. Görülebileceği gibi, %10’luk CO<sub>2</sub> ile beslenmesi durumunda 10. Gün sonunda klorofil miktarı 1940 µg/L’ye ulaşmış iken, %0,04 CO<sub>2</sub> ile beslenmesi durumunda aynı gün ulaşılan klorofil değeri 951 µg/L düzeyinde idi. Biyokütle içindeki pigmentlerin artması bu pigmentlerin ışığı hasat etme rolleri ile ilgilidir. Reaktördeki hücre konsantrasyonu arttıkça, ortalama ışık yoğunluğu reaktör içindeki hücrelerin kendilerini gölgeleme (self-shading) etkisinden dolayı azalır. Sonuç olarak, hücrelerin buna tepkisi fotopigmentlerinin konsantrasyonunu arttırarak mevcuttuktan daha fazla hasat etmeye çalışmalarıdır (Asteroiet vd., 2002). %10CO<sub>2</sub> ile beslenen fotobiyoreaktörde artan biyokütleden dolayı fotopigment konsantrasyonunda buna bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 3. Karışık microalg kültürünün %10 ve %0,04 karbondioksit beslenmesi durumunda klorofil konsantrasyonu değişimi

Fotobiyoreaktörde %10 ve %0,04 CO<sub>2</sub> gazı beslemesi durumunda reaktördeki sıvı içinde gözlenen toplam karbon, toplam organik karbon ve inorganik karbon miktarlarındaki değişim Şekil 4(A,B)’da gösterilmektedir. Şekil 4(A,B)’dan görülebileceği gibi, ortamdaki inorganik karbonun her iki CO<sub>2</sub> gazı konsantrasyonu beslemesi durumunda da log faz süreci içinde arttığı gözlenmektedir. Normal büyüme sırasında fotosentetik olarak yakalanan karbonun bir kısmı alg hücrelerinden dış ortama pasif difüzyon yoluyla kaçar. Çözünmüş inorganik karbon (DIC) kültür ortamında CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-1</sup> ve CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> formlarına ayrılır, ortamın pH değerine bağlı olarak birbiri ile dengededirler, ve mikroalgler için karbon kaynağını temsil ederler (Tang vd., 2011). Ancak reaktörün sıvı fazında yüksek toplam organik karbon oranları alg hücreleri stress faktörlerine (mesela besinin tükenmesi) maruz bırakıldığında gözlenebilmektedir. Fotobiyoreaktörlerin %10 ve %0,04 CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile beslenmeleri durumunda sıvı fazda bulunan maksimum toplam karbon miktarı sırasıyla 108,48 mg/L ve 68,95mg/L düzeylerinde ölçülmüştür. Fotobiyoreaktörlerin her iki CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile beslenmeleri durumunda sıvı fazda bulunan maksimum toplam organik karbon miktarı yaklaşık olarak 50 mg/l’ düzeyinde ölçülmüştür, bu durum kullanılan karışık mikroalg kültürün yüksek CO<sub>2</sub> seviyelerinde dayanıklı oldukları ve %0,04 CO<sub>2</sub> gazı ile beslenen reaktöre kıyasla fazla stresse girmediklerinin göstermektedir. %10 CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile beslenen Fotobiyoreaktörlerde ortamdaki maximum inorganik karbon miktarı kuru hava ile beslenen reaktöre göre 22 kat daha yüksek bulunmuştur (Şekil 4 A,B). Karbon dioksit konsantrasyonu arttıkça ortamdaki çözünmüş inorganik karbonun artışı ve

mikroalg hücrelerinin ortamdan daha fazla karbon yakalayabildikleri sonucunda fotosentezin çoğalmasa gözlenmektedir.



**Şekil 4.** %10 ve %0,04 CO<sub>2</sub> gazı beslemesi durumunda Fotobiyoreaktörde pH değışim sonucunda gözlenen toplam organik karbon, toplam karbon ve inorganik karbon miktarı (mg/l) . (A) *chlorella vulgaris*+ *scenedesmus obliquus* (%10CO<sub>2</sub>) , (B) *chlorella vulgaris*+ *scenedesmus obliquus*(%0.04 CO<sub>2</sub>)

### 3.2. Bu çalışmada elde edilen sonuçların literatür ile kıyaslanması

Tablo 4' mikroalgler ve değişik tipte fotobiyoreaktörde yapılan karbon tespit çalışmaları sonuçlarını özetlemektedir. Fotobiyoreaktör tipi, CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, gaz akışı hızı, mikroalg tohumları türleri ve çevresel faktör (pH, sıcaklık, ışık) gibi karbondioksit tutma oranının verimliliğini etkileyebilecek birçok faktörün var olduğunu belirtmek gerekir. Bu nedenle optimum büyüme şartların sağlanması mikroalglerin büyüme hızında önemli bir role sahiptir. Farklı CO<sub>2</sub> gaz konsantrasyonları ve farklı reaktör tipleri ile yapılan çalışmaların sonuçlarına göre, bu çalışmada elde edilen CO<sub>2</sub> yakalama oranı, diğer çalışmalarda gözlemlenen değerlere benzer bulunmuştur.



**Tablo 4.** Karışık alg kültürü ile fotobiyoreaktörde gerçekleştirilen karbon tutumu çalışmaları sonuçları

%CO <sub>2</sub>	Mikroalg türü	Gaz akış hızı (vvm)	$\mu_{max}(\text{gün}^{-1})^a$	$X_{max}(\text{g/l})^b$	$P_{max}(\text{g/l/gün})^c$	CO <sub>2</sub> tutma oranı (g/l/gün) <sup>d</sup>	Fotobiyoreaktör tipi (FBR)	referans
10	<i>Chlorella+scenedesmus sp.</i> (karışık kültür)	0,1	0,58 ± 0,05	0,87	0,129±0,017	0,217	Sürekli gaz akışı sağlanan dikey FBR	Mevcut çalışma
0.04	<i>Chlorella+scenedesmus sp.</i> ( karışık kültür)	0,1	0,49	0,16	0,03	0,014	Sürekli gaz akışı sağlanan dikey FBR	Mevcut çalışma
10	<i>Scenedesmus obliquus</i> (saf kültür)	0,25	0,887 ± 0,012	1,84 ± 0,01	0,155 ± 0,004	0,288 ± 0,004	Erlenmeyer flask	Tang vd., 2011
0.03	<i>Scenedesmus obliquus</i> (saf kültür)	0,25	0,507 ± 0,009	1,05 ± 0,02	0,083 ± 0,002	0,150 ± 0,007	Erlenmeyer flask	Tang vd., 2011
10	<i>Chlorella pyrenoidosa</i> (saf kültür)	0,25	0,993 ± 0,082	1,55 ± 0,01	0,144 ± 0,011	0,260 ± 0,007	Erlenmeyer flask	Tang vd., 2011
0.03	<i>Chlorella pyrenoidosa</i> (saf kültür)	0,25	0,688 ± 0,028	0,87 ± 0,01	0,065 ± 0,007	0,134 ± 0,004	Erlenmeyer flask	Tang vd., 2011
0.038	<i>Scenedesmus obliquus</i> (saf kültür)	0,54	0,216 ± 0,027	1,11 ± 0,01	0,064 ± 0,001	-	Conical flask FBR	DeMoraisa ve Vieira Costa (2007)
0.038	<i>Chlorella kessleri</i> (saf kültür)	0,54	0,257 ± 0,016	1,45 ± 0,01	0,090 ± 0,001	-	Conical flask FBR	DeMoraisa ve Vieira Costa (2007)
10	<i>Scenedesmus sp.</i> (saf kültür)	-	-	-	0,188	0,46	Batch Bubble column FBR	Jin vd., (2006)
10	<i>Chlorella sp.</i> (saf kültür)	-	0,25	-	0,381	0,71	Batch Air-lift FBR	Chiu vd., (2009)

a. Maksimum büyüme hızı

b. Maksimum kuru hücre konsantrasyonu

c. Maksimum kuru biyokütle üretkenliği

d. karbon dioksittutma oranı

#### 4. GENEL SONUÇLAR

Çalışma, farklı CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun, karışık mikroalg kültürünün saf kültürler ile karşılaştırıldığında, biyokütle üretkenliği ve mikroalg bileşenleri üzerindeki etkileri üzerine yoğunlaşmıştır. %10 karbon dioksitle beslenen mikroalglerin biyokütle üretkenliği, hücrelerin hızla çoğaldığı fazda (Exponential growth phase), %0,04 ile beslenen reaktöre göre arttığı gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak, kuru mikroalg hücrelerindeki karbon içeriğinin %10 CO<sub>2</sub> ile beslenen fotobiyoreaktörde 22 kat daha yüksek olarak bulunmuştur. CO<sub>2</sub>'in biyo-tutma mikroalglerinin karışık kültür şeklinde kullanılmasında saf kültürler ile kıyaslandığında benzer derecede etkili bulunmuştur. Diğer taraftan, *Chlorella vulgaris* ve *Scenedesmus obliquus* türlerin karışık kültürü aralarında oluşan simbiyotik ilişki ile biyokütlenin hücresel gelişimleri üzerinde de etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, bakım kolaylığı ve maliyet etkinliği nedeniyle büyük ölçekli operasyonlarda daha uygun bir seçenek olabileceği söylenebilir.

#### KAYNAKLAR

- Asterio Sánchez Mirón a, Marie C. Cerón Garc'ia a, Francisco Garc'ia Camacho, Emilio Molina Grima a, Yusuf Chisti Growth and biochemical characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch culture. 2002. Enzyme and Microbial Technology 31 (2002) 1015–1023
- Brown, L.M., 1996. Uptake of carbon dioxide from flue gas by microalgae. Energy Convers. Manage. 37, 1363–1367.
- Chisti, Y. “Biodiesel from Microalgae.” Biotechnology Advances, 25.294-306 (February, 2007).
- Chiu SY, Tsai MT, Kao CY, Ong SC, Lin CS. The air-lift photobioreactors with flow Patterning for high-density cultures of microalgae and carbon dioxide removal. Eng Life Sci 2009; 9.254–60
- Chiu, S.Y., Kao, C.Y., Chen, C.H., Kuan, T.C., Ong, S.C., Lin, C.S., 2008. Reduction of CO<sub>2</sub> by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. Bioresour. Technol. 99, 3389–3396
- DeMorais, M.G., Costa, J.A.V., 2007. Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for bio fixation of carbon dioxide. Energy Conversion and Management 48, 2169-2173.
- Department of Energy (DOE), National Energy Technology Laboratory. Carbon Sequestration Excerpt from informational website.n.pag.02 February 2009. [http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon\\_seq/index.html](http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/index.html)
- Graan T and DR Ort. 1984. Quantitation of the rapid electron donors to P700, the functional plastoquinone pool, the ratio of the photosystems in spinach chloroplasts. J Biol Chem 259: 14003– 14010.
- Hulatt, C. and Thomas, D. 2011. Productivity, carbon dioksit uptake and net energy return of microalgal bubble column photobioreactors. Biosource technology 102 (2011) 5775-5787.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2-26.(2014).
- IPCC. Climate change 2007: synthesis report contribution of working groups i, ii and iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [core writing team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (eds.)]. Geneva, Switzerland; 2007. p. 104.
- Jorquera, O., Kiperstock, A., Sales, E., Embirucu, M., Ghirardi, M., 2010. Comparative energy life-cycle analysis of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresour. Technol.* 101, 1406–1413.
- JİN HF, Lim BR, Lee K. Influence of nitrate feeding on carbon dioxide fixation by microalgae. *J Environ Sci Health A Toxic Hazard Subst Environ Eng* 2006; 41,2813–24.
- Matthews, J. A. “Carbon-Negative Biofuels.” *Energy Policy*, 36:940-945 (January, 2008).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). “CO<sub>2</sub> concentration data.” Excerpt from website publication, Dated 7 July 2017. [https://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/CO2\\_trend\\_mlo.pdf](https://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/CO2_trend_mlo.pdf)
- Nakamura, T., Olaizola, M., and S. Masutani. “Recovery and Sequestration of CO<sub>2</sub> from Stationary Combustion Systems by Photosynthesis of Microalgae.” Quarterly Report 7, Technical Progress Report (October 2002).
- Reyna-Velarde, R., Cristiani-Urbina, E., Hernandez-Melchor, D., Talasso, F., Canizares-Villanueva, R.O., 2010. Hydrodynamic and mass transfer characterization of a flat-panel airlift photobioreactor with high light path. *Chem. Eng. Process.* 49, 97–103.
- Stephenson, A., Kazamia, E., Dennis, J., Howes, C., Scott, S., Smith, A., 2010. Life-cycle assessment of potential algal biodiesel production in the United Kingdom: a comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors. *Energ. Fuel* 24, 4062– 4077.
- Schmidell, W. Lima, A.U. Aquarone, E. Borzani, W. 2001. *Biotechnologia Industrial.V.2. São Paulo: Edgard Blücher LTDA. ISBN: 85-212-0279-2.*
- Tang, D. Han, W. Li, P. Miao, X. Zhong, J. 2011. CO<sub>2</sub> biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO<sub>2</sub> levels. *Bioresour. Technol.* 102, 3071–3076.
- Usui, N., and M. Ikenouchi. “Biological CO<sub>2</sub> fixation and utilization project by RITE.1.Highly-effective photobioreactor system.” *Energy Conv. Management*, 38:487-492 (April, 1997).
- United Nations Foundation. Executive Summary of Confronting Climate Change: Avoiding the Unmanageable and Managing the Unavoidable. Independent Publication. 1-6. (February 2007) 5 November 2008. <http://www.simaxi.org/about/news/UNSEGRpt.html>
- Yan, H., Pan, G., 2002. Toxicity and bioaccumulation of copper in three greenmicroalgal species. *Chemosphere* 49 (5), 471–476.