

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

ALGLERLE KARBONDİOKSİTİN BİYOLOJİK OLARAK TUTULMASI

Berçem ELDELEKLİOĞLU DÜZOL

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2019**

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Berçem ELDELEKLİOĞLU DÜZOL tarafından hazırlanan “**Algilerle karbondioksitin biyolojik olarak tutulması**” adlı tez çalışması 07/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Emine BAYRAKTAR 
Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan : Prof. Dr. Ülkü MEHMETOĞLU 
Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Gönül DÖNMEZ 
Ankara Üniversitesi Biyoloji Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Metin GÜRÜ 
Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Deniz TANYOLAÇ 
Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Emine BAYRAKTAR 
Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

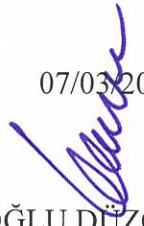
Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN

Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

07/03/2019


Berçem ELDELEKLİOĞLU DÜZOL

ÖZET

Doktora Tezi

ALGLERLE KARBONDİOKSİTİN BİYOLOJİK OLARAK TUTULMASI

Berçem DÜZOL

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Emine BAYRAKTAR

Sera gazları içerisinde artışı ve etkisi en yüksek olan CO₂, genel olarak fosil yakıt kullanımından kaynaklanmaktadır. CO₂ emisyonundaki artışı anlamak için Mauna Loa (Hawaii, ABD) gözlemevi sonuçlarına baktığımızda, 1958 yılında atmosferimizde 280 ppm CO₂ varken 2013 yılının Ağustos ayında bu miktarın 395 ppm gibi ciddi bir seviyeye çıkmış olduğunu görürüz.

Yapılan çalışmada, mikroalgler kullanılarak, biyolojik olarak karbon tutulması amaçlanmıştır. Tez kapsamında, mikroalglerin CO₂ giderimi üzerine alg türü (*Chlorella vulgaris* 211-11b, *Spirulina maxima* 49.88 ve *Scenedesmus obliquus* 276-3d), CO₂ derişimi (%3 - 25), akış hızı (1 vvm, 3 vvm, 5.2 vvm), ışık periyodu 18(a):6(k), 24(a):0(k), 6(a):18(k), ışık yoğunluğu (42 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 115 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ve 180 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), pH (5 - 10), NaHCO₃ içeriğı (10 - 20 ppm) gibi farklı parametrelerin etkisi yarı kesikli biyoreaktörlerde araştırılmıştır. Algal çoğalma kinetiğı incelenmiş, fazlar arasındaki kütle aktarım katsayısı (kLa) farklı akış hızları ve inorganik karbon içeriklerinde hesaplanmış, çoğalma hızı tahmininde Monod Modeli kullanılmıştır. Çalışmalar istatistiksel olarak ANOVA testleriyle desteklenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda üç farklı alg türünden *Scenedesmus obliquus* 276-3d ile çalışmaya karar verilmiştir. Ortama beslenen hava içerisindeki CO₂ derişimi, kültür ortamında bulunan NaHCO₃ miktarı, pH, akış hızı, ışık periyodu, ışık yoğunluğunun araştırıldığı deneyler sonucunda bu parametreler için en uygun değerler sırasıyla %20 CO₂, 20 ppm NaHCO₃, 1 vvm, 18s(aydınlık):6s(karanlık), 180 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ve pH 7 olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda kabarcık kolon fotobiyoreaktörde ulaşılan maksimum kuru kütle miktarı (C_{alg}), spesifik çoğalma hızı (μ), maksimum CO₂ tutma hızı (R_{CO_2}) ve maksimum biyokütle üretilebilirliği (P) ise sırasıyla 3.32 g L⁻¹, 0.37 gün⁻¹, 0.35 g L⁻¹ gün⁻¹, 0.19 g L⁻¹gün⁻¹ olarak bulunmuş olup % CO₂ giderimi %32.2'dir. Fotobiyoreaktörde elde edilen algal biyokütle lipid içeriğı %17.4 olarak belirlenmiştir.

Mart 2019, 121 sayfa

Anahtar kelimeler: *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris*, biyoreaktör, biyolojik CO₂ giderimi

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

ALGAL BIOFIXATION OF CARBONDIOXIDE

Berçem DÜZOL

Ankara University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of
Chemical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Emine BAYRAKTAR

CO₂ has the highest rise and effect within all greenhouse gases and in general emission of CO₂ is due to the use of fossil fuels. To understand the increase in emissions of CO₂, when we look at the Mauna Loa Observatory (Hawaii, U.S.), we see that out, while the level of CO₂ in atmosphere was 280 ppm in 1958, in August 2013, this amount has increased to a significant level as 395 ppm.

In this study, a better method beside physical and chemical methods of CO₂ capture, biological carbon sequestration by using microalgae is aimed. In this thesis effects of parameters such as algae species (*Chlorella vulgaris* 211-11b, *Spirulina maxima* 49.88 and *Scenedesmus obliquus* 276-3d), CO₂ concentration (%3- 25), flow rate (1 vvm, 3 vvm, 5.2 vvm), light periods 18(a):6(k), 24(a):0(k), 6(a):18(k), intensity (42 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 115 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and 180 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), pH (5 -10) and NaHCO₃ content in culture medium (10 – 20 ppm) on algal CO₂ biofixation has been studied semi-batch bioreactors. Also CO₂ biofixation in bubble column photobioreactor was investigated. Algal growth kinetics were investigated and the mass transfer coefficient (kLa) between gas and liquid phases was calculated at different flow rates and inorganic carbon contents. The studies also supported statistical by ANOVA tests.

In the scope of the project, investigations was started with different algae species, after assessments of the results it was decided to examine all cultivation and CO₂ biofixation parameters with *Scenedesmus obliquus* 276-3d. CO₂ concentration in the air supplied to the culture medium, the amount of NaHCO₃ in the culture medium, pH, gas flow rate, photoperiod, light intensity was investigated and the optimal values were found 20% CO₂, 20 ppm NaHCO₃, 1 vvm, 18h(light):6h(dark), pH 7 and 180 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. The maximum dry biomass amount (C_{alg}), specific growth rate (μ), maximum CO₂ biofixation rate (R_{CO_2}) and maximum biomass productivity (P) reached in bubble column photobioreactor under these conditions are respectively 3.32 g L⁻¹, 0.37 d⁻¹, 0.34 g L⁻¹d⁻¹ and 0.19 g L⁻¹d⁻¹. CO₂ biofixation is % 32.2. The algal biomass lipid content obtained in the photobioreactor was examined and it was determined as 17.4%.

March 2019, 121 pages

Key Words: *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris*, bioreactor, biofixation of CO₂

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam süresince, bilgi ve deneyimleriyle bilimsel anlamda bana çok şey katarak yol göstermesinin yanı sıra her zaman varlığıyla yanımda olan, hocam olmasının yanında bu sürece başlarken söylediği gibi ikinci annem olan, öğrencisi olduğum için her zaman kendimi çok şanslı hissettiğim ve onur duyduğum değerli hocam sayın Prof. Dr. Emine BAYRAKTAR'a (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) sonsuz teşekkür ederim. İyi ki hayatımdasınız, sizin bana inancınız ve desteğiniz olmasaydınız bu çalışmayı asla tamamlayamazdım. Sizi çok seviyorum.

Bana, kurucusu olduğu ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi'nde çalışma imkanı sağlayarak kariyerime çok güzel bir başlangıç yapmamı sağlayan, tez konumun belirlenmesine ışık tutan, birlikte çalışmaktan her zaman onur, gurur duyduğum ve tarifi mümkün olmayan büyük bir hayranlıkla izlediğim değerli hocam sayın Prof. Dr. Ender OKANDAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Araştırmalarımın her aşamasında öneri ve fikirleriyle çalışmalarımın gelişmesine büyük katkısı olan değerli hocalarım Prof. Dr. Ülkü MEHMETOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) ve Doç. Dr. Afife GÜVENÇ'e (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komitemde bulunan, fikirleri ile doktora süresince yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer Prof. Dr. Gönül DÖNMEZ'e (Ankara Üniversitesi Biyoloji Anabilim Dalı) sonsuz teşekkür ederim.

Bitirmelisin dedi ve bana işlerin en yoğun olduğu dönemde dahi fırsat yarattı, STAR Rafineri Kalite Müdürü Sayın Turhan RÜZGAR'a çok teşekkür ederim.

14L0443008 numaralı alt yapı projemizi destekleyerek, doktora tezimin ilerlemesine ve bitirmeme olanak veren, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinatörlüğü'ne (BAP) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1 İklim Sistemi.....	5
2.2 Sera Gazları	5
2.2.1 Türkiye'nin sera gazı envanteri.....	7
2.3 Küresel Isınma ve İklim Değişikliği	8
2.4 Karbon Tutma ve Depolama (KTD) Teknolojileri	9
2.4.1 Yanma sonrası.....	10
2.4.2 Yanma öncesi.....	11
2.4.3 Oksi yakıt yakma	11
2.4.4 Karbon tutma teknolojilerinde yeni yaklaşımlar.....	12
2.5 Algler.....	13
2.5.1 Alglerin sınıflandırılması.....	13
2.5.1.1 Siyanobakteri.....	13
2.5.1.2 Makroalgler	13
2.5.1.3 Mikroalgler	14
2.5.2 Algal çoğalma ve kullanılan farklı sistemler	14
2.5.2.1 Açık sistemler	15
2.5.2.2 Kapalı sistemler.....	16
2.5.3 Algal çoğalma kinetiği	17
2.5.4 İnhibisyon kinetiği	20
2.5.5 Algal çoğalmayı etkileyen önemli faktörler	22
2.5.5.1 Sıcaklık.....	23
2.5.5.2 pH	24
2.5.5.3 Işık.....	25
2.5.6 CO ₂ 'in algler tarafından biyolojik olarak tutulması ve fotosentez.....	26
2.5.7 Algial biyokütle içeriği.....	30
2.6 Biyodizel.....	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1 Kimyasallar	33
3.2 Alglerin Çoğaltılması	33
3.2.1 Kullanılan alglerin seçimi ve çoğalma koşulları	33
3.2.2 Besi ortamının hazırlanması	34
3.3 Çalışmalarda Kullanılan Kesikli Sistem ve Fotobiyoreaktör	35
3.3.1 Kesikli deney sistemi	35
3.3.2 Kabarcık kolon fotobiyoreaktör	36
3.4 Analiz Yöntemleri	37

3.4.1	Algal çoğalma	37
3.4.2	Biyokütle içeriği	37
3.4.3	Gaz analizleri	38
3.4.4	Algal biyokütleden lipid ekstraksiyonu ve yağ asitleri analizleri	38
3.4.5	Işık şiddeti ölçümü	39
3.5	Hesaplamalar	39
3.6	İstatistiksel Analiz	44
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI	45
4.1	Algal Çoğalma Üzerine Farklı Parametrelerin Etkisinin Araştırılması ...	45
4.1.1	<i>S. obliquus</i> , <i>Ch. vulgaris</i> ve <i>Spirulina maxima</i> çoğalma eğrisi	45
4.1.2	<i>S. obliquus</i> , <i>Ch. vulgaris</i> ve <i>Sp maxima</i> çoğalması üzerine CO ₂ miktarı etkisi	46
4.1.2.1	<i>S. obliquus</i> çoğalması üzerine CO ₂ miktarı etkisi	52
4.1.2.2	<i>Ch. vulgaris</i> çoğalması üzerine CO ₂ miktarı etkisi	53
4.1.3	Algal çoğalma üzerine ortam bileşimi etkisi	60
4.1.4	<i>S. obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine pH miktarı etkisi	65
4.1.5	<i>S. obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine aydınlatma periyodu etkisi	68
4.1.6	<i>S. obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine ışık şiddeti etkisi	70
4.1.7	<i>S. obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine akış hızı etkisi	73
4.2	Algal Çoğalma Kinetiği	75
4.2.1	Monod çoğalma kinetiği	76
4.2.2	Kütle aktarım katsayısının belirlenmesi	79
4.2.3	Kütle aktarım katsayısının (kLa) belirlenmesi	82
4.3	Kabarcık Kolon Fotobiyoreaktör Sisteminde Algal Çoğalma	91
4.4	Algal Biyokütleden Lipid Ekstraksiyonu	95
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	99
	KAYNAKLAR	103
	EKLER99	
	EK-1 Alg Çoğalması Kalibrasyon Grafikleri	109
	EK-2 ANOVA Testi Verileri	110
	EK-3 ANOVA Testi Verileri	113
	EK-4 ANOVA Testi Verileri	115
	EK-5 ANOVA Testi Verileri	117
	EK-6 ANOVA Testi Verileri	119
	EK-7 Gaz Analizi Kromatogram Örneği.....	120
	ÖZGEÇMİŞ.....	121

Doktora çalışmamın sonuna geldiğim bugünlerde geriye dönüp baktığımda başarılarıyla gurur duyduğum canım arkadaşlarım Zeynep YILMAZER HİTİT ve Kıvanç HİTİT'in desteğini bir kez daha tüm kalbimle hissediyor ve iyi ki varsın diyorum. Yaşadığım zorluklarda bana bir adım daha atma cesareti verdiği için sonsuz teşekkür ederim.

Tarifsiz bir sevgi ve dinmeyen bir özlem duyduğum, sevmeyi, seilmeyi, değer vermeyi bana öğreten, başarılarımla mutlu olup, üzüldüğümde hüzünlenen, çalışmalarım süresince maddi manevi desteklerini esirgemeyerek şu an bu aşamaya gelmiş olmamda büyük emekleri olan canım babam Suha ELDELEKLİOĞLU'na, canım annem Birsen ELDELEKLİOĞLU'na, biricik kardeşlerim Zeynep ELDELEKLİOĞLU ALGÜL'e, Onur ALGÜL'e ve tüm aileme minnettarım.

Bu süreçte çok destekçim oldu ama zamanlarından çaldığım 2 kişi var ki hayatımın gerçek anlamları.

Sen her daim yanımda oldun, geçecek dedin geçti, bitecek dedin bitti. İyi ki varsın sevgilim, eşim, en yakın arkadaşım Emrah DÜZOL. Benim için değerini, önemini anlatmaya kelimeler yetmez.

Doktorama başladığımda hayatımda yoktun, sonra sen geldin herşey güzelleşti... İyi ki varsın güzel kızım, perim, meleğim, pamuk kalpli kızım Ada Mia...

Varlığınıza minnettarım.

Bu çalışmayı size ithaf ediyorum.

Berçem ELDELEKLİOĞLU DÜZOL

ANKARA, Mart 2019

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Santigrat
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
ATP	Adenozin Tri Fosfat
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
C	Biyokütlenin Karbon İçeriği
C _{alg}	Algal Biyokütle Derişimi, gL ⁻¹
CHNS	Karbon, Hidrojen, Azot, Kükürt
CO ₂	Karbondioksit
C _{TIK}	Toplam inorganik karbon derişimi, gL ⁻¹
EPDK	Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
FB	Fotobiyoreaktör
FID	Alev İyonlaştırma Dedektörü
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
H ₂ CO ₃	Karbonik Asit
HCO ₃	Bikarbonat
H ₂ SO ₄	Sülfürik Asit
k _{La}	Kütle Aktarım Katsayısı, gün ⁻¹
K _S	Monod Sabiti
KT	Karbon Tutma
KTD	Karbon Tutma ve Depolama
M _C	Karbon Molekül Ağırlığı (12 g mol ⁻¹)
M _{CO2}	Karbondioksit Molekül Sğırlığı (44.01 g mol ⁻¹)
MEA	Monoetanolamin
MITI	Ministry of International Trade and Industry
MW	Mega Watt
NADPH	Nikotinamid Adenin Dinükleotid Phosphateoksidaz
NaOH	Sodyum Hidroksit
O ₂	Oksijen
ODTÜ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
P	Biyokütle Üretilebilirliği, gL ⁻¹ d ⁻¹
PPF	mol m ⁻² s ⁻¹
RITE	Research Innovative Technologies of the Earth
rpm	Dakikada Devir
SF ₆	Hekzaflorit
SO ₂	Kükürt Dioksit
TCD	Termal İletkenlik Dedektörü
TG	Trigliserit
UV	Ultraviyole Işınım
V	Fotobiyoreaktör Hacmi, L
V _{vm}	volume gas / volume liquid / min
Y	Kütle Dönüşüm Oranı
YAME	Yağ Asidi Metil Esteri
ZEP	Zero Emission Platformu
μ	Spesifik Çoğalma Hızı, gün ⁻¹

$\mu_{\max}$	Maksimum Spesifik oğalma Hızı, gün ⁻¹
$q_{\text{TİK}}$	Toplam İnorganik Karbon Kullanma Hızı
$Q_0 - Q_1$	oğalma Ortamına Giren ve çıkan Akımlar, Lgün ⁻¹
X_{alg}	Kuru algal biyokütle, mg
$X_{\text{yağ}}$	Yağ miktarı, mg



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	CO ₂ , CH ₄ ve N ₂ O miktarlarındaki değişim (0-2005) *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change	6
Şekil 2.2	Sera Gazı Emisyonlarının sektörlere göre dağılımı (1990-2012) * 2012 Ulusal Emisyon Envanteri Raporu (NIR)	8
Şekil 2.3	Dünya enerji talebi (1970-2030) *World Energy Outlook 2008, International Energy Agency	9
Şekil 2.4	Açık sistem alg çoğalma ortamlarına ticari firmalardan örnekler.....	16
Şekil 2.5	Kapalı sistem alg çoğalma ortamlarına ticari firmalardan örnekler.....	17
Şekil 2.6	Kesikli sistemde alglerin çoğalmasının şematik gösterimi 1. Lag Fazı 2. Logaritmik Çoğalma Fazı 3. Lineer Çoğalma Fazı 4. Durgun Çoğalma Fazı 5. Düşme/Ölüm Fazı (Richmond, 2004)	18
Şekil 2.7	Deneysel veriler kullanılarak Monod Sabitlerinin belirlenmesi	20
Şekil 2.8	Deneysel veriler kullanılarak Michaelis Menten Sabitlerinin belirlenmesi	21
Şekil 2.9	Deneysel veriler kullanılarak inhibisyonlu /inhibisyonsuz Michaelis Menten Sabitlerinin belirlenmesi	22
Şekil 2.10	Algal çoğalmayı etkileyen faktörler	23
Şekil 2.11	Algal çoğalma üzerine ışık şiddeti etkisi	25
Şekil 2.12	Kloroplast yapısı	28
Şekil 2.13	Kalvin Döngüsü	29
Şekil 3.1	Kesikli deney sistemi	36
Şekil 3.2	Kesikli çoğalma sisteminde kütle dengesi.....	41
Şekil 4.1	<i>Scenedesmus obliquus</i> 276-3d çoğalma eğrisi (● : %3 CO ₂ : %97 Hava, ▲ : %7 CO ₂ : %93 Hava - 18:6 a:k periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)	47
Şekil 4.2	<i>Spirulina maxima</i> 276-3d çoğalma eğrisi (● : %3 CO ₂ : %97 Hava, ▲ : %7 CO ₂ : %93 Hava - 18:6 a:k periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7).....	47
Şekil 4.3	<i>Chlorella vulgaris</i> 276-3d çoğalma eğrisi (● : %3 CO ₂ : %97 Hava, ▲ : %7 CO ₂ : %93 Hava - 18:6 a:k periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7).....	48

Şekil 4.4	Logaritmik fazda algal çoğalma eğrileri (○: <i>Scenedesmus obliquus</i> , Δ: <i>Spirulina maxima</i> , □: <i>Chlorella vulgaris</i> - %3 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7).....	48
Şekil 4.5	ln(X/X0) – Çoğalma Süresi (○: <i>Scenedesmus obliquus</i> , Δ: <i>Spirulina maxima</i> , □: <i>Chlorella vulgaris</i> - %7 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7).....	49
Şekil 4.6	<i>Scenedesmus obliquus</i> çoğalması üzerine CO ₂ miktarı etkisi (○: Kontrol, Δ: %3 CO ₂ , ●: %7 CO ₂ , ■: %12 CO ₂ , ▲: %20 CO ₂ , □: %25 CO ₂)	52
Şekil 4.7	<i>Chlorella vulgaris</i> çoğalması üzerine CO ₂ miktarı etkisi (○: Kontrol, Δ: %3 CO ₂ , ●: %7 CO ₂ , ■: %12 CO ₂ , ▲: %20 CO ₂ , □: %25 CO ₂).....	54
Şekil 4.8	ln(X/X0) – Çoğalma Süresi (○: <i>S. obliquus</i> , ▲: <i>Chlorella vulgaris</i> - %25 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm)	55
Şekil 4.9	ln(X/X0) – Çoğalma Süresi (○: <i>S. obliquus</i> , ▲: <i>Chlorella vulgaris</i> - %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm)	55
Şekil 4.10	ln(X/X0) – Çoğalma Süresi (○: <i>S. obliquus</i> , ▲: <i>Chlorella vulgaris</i> - %12 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm).....	56
Şekil 4.11	ln(X/X0) – Çoğalma Süresi (○: <i>S. obliquus</i> , ▲: <i>Chlorella vulgaris</i> - %7 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm).....	56
Şekil 4.12	ln(X/X0) – Çoğalma Süresi (○: <i>S. obliquus</i> , ▲: <i>Chlorella vulgaris</i> - %3 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm).....	57
Şekil 4.13	pH – Çözünmüş inorganik karbon ilişkisi.....	61
Şekil 4.14	<i>Scenedesmus obliquus</i> çoğalması üzerine NaHCO ₃ miktarı etkisi (Δ: Kontrol, ○: 10 ppm NaHCO ₃ , ▲: 10 ppm NaHCO ₃ , □: 20 ppm NaHCO ₃ + %20 CO ₂ , ●: %20 CO ₂).....	62
Şekil 4.15	<i>Ch. vulgaris</i> çoğalması üzerine NaHCO ₃ miktarı etkisi (Δ: Kontrol, ○: 10 ppm NaHCO ₃ , ▲: 10 ppm NaHCO ₃ , □: 20 ppm NaHCO ₃ + %20 CO ₂ , ●: %20 CO ₂)	62
Şekil 4.16	ln(X/X0) – Çoğalma Süresi (■: <i>Scenedesmus obliquus</i> , Δ: <i>Chlorella vulgaris</i> – 20 ppm NaHCO ₃ + %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm)	63
Şekil 4.17	<i>S. obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine pH etkisi (Δ: pH 5, ○: pH 7, ▲: pH 10 – %12 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm)....	66
Şekil 4.18	<i>S. obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine pH etkisi (Δ: pH 5, ○: pH 7, ▲: pH 10 – %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm)....	67

Şekil 4.19	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine aydınlatma periyodu etkisi (6:18, 12:12, 18:6, 24:00, 'a:k' - %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)	69
Şekil 4.20	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine ışık şiddeti etkisi, ● : 42 µmol m ⁻² s ⁻¹ , □ : 115 µmol m ⁻² s ⁻¹ , ▲ : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO ₂ , 28 ± 2 °C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)....	71
Şekil 4.21	ln(X/X ₀) – Çoğalma Süresi, ● : 42 µmol m ⁻² s ⁻¹ , □ : 115 µmol m ⁻² s ⁻¹ , ▲ : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ (18:6 a:k periyot - %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7).....	71
Şekil 4.22	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) çoğalması üzerine CO ₂ - Hava karışımı akış hızı etkisi, ● : 1 vvm, □ : 3 vvm, ▲ : 5.2 vvm (18:6 aydınlık:karanlık periyot, %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7).....	74
Şekil 4.23	ln(X/X ₀) – Çoğalma Süresi, ● : 1 vvm, □ : 3 vvm, ▲ : 5.2 vvm (18:6 aydınlık:karanlık periyot, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7).....	75
Şekil 4.24	<i>S. obliquus</i> , Spesifik çoğalma hızı – substrat miktarı, % CO ₂ (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7)	77
Şekil 4.25	<i>Ch. vulgaris</i> , Spesifik çoğalma hızı – substrat miktarı, % CO ₂ (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7)	77
Şekil 4.26	<i>S. obliquus</i> , Spesifik çoğalma hızı – substrat miktarı, NaHCO ₃ (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7)	78
Şekil 4.27	<i>Ch. vulgaris</i> , Spesifik çoğalma hızı – substrat miktarı, NaHCO ₃ (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7)	78
Şekil 4.28	<i>Chlorella vulgaris</i> için çoğalma hızının substrat miktarı ile değişimi (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm).....	80
Şekil 4.29	<i>Scenedesmus obliquus</i> için çoğalma hızının substrat miktarı ile değişimi (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm).....	80
Şekil 4.30	<i>Chlorella vulgaris</i> için 1/r – 1/ Cs değişimi (18:6 a:k periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm).....	81
Şekil 4.31	<i>Scenedesmus obliquus</i> için 1/r – 1/ Cs değişimi (18:6 a:k periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm).....	81
Şekil 4.32	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO ₂ miktarı değişimi (pH 7, %3 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)	83
Şekil 4.33	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO ₂ miktarı değişimi (pH 7, %7 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)	83

Şekil 4.34	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO ₂ miktarı değişimi (pH 7, %12 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)	84
Şekil 4.35	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO ₂ miktarı değişimi (pH 7, %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)	84
Şekil 4.36	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO ₂ miktarı değişimi (pH 7, %25 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)	85
Şekil 4.37	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (pH 7, %3 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C).....	86
Şekil 4.38	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (pH 7, %7 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C).....	86
Şekil 4.39	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (pH 7, %12 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C).....	87
Şekil 4.40	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (pH 7, %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C).....	87
Şekil 4.41	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (pH 7, %25 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C).....	88
Şekil 4.42	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (Akış hızı: 1 vvm, pH 7, %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C).....	89
Şekil 4.43	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (Akış hızı : 3 vvm, pH 7, %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C).....	90
Şekil 4.44	<i>Scenedesmus obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (Akış hızı : 5.2 vvm, pH 7, %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C).....	90
Şekil 4.45	Kabarcık kolon fotobiyoreaktör sistemi	92
Şekil 4.46	Kabarcık kolon fotobiyoreaktör <i>S. obliquus</i> çoğalması (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7)	93
Şekil 4.47	KFB ln(X/X ₀) – Çoğalma Süresi (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7)	93
Şekil 4.48	KFB <i>S. obliquus</i> (276-3d) Çoğalma Hızı – “C _{CO2} * - C _{CO2} ” değişimi (Akış hızı : 1 vvm, pH 7, %20 CO ₂ , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Mikroalg türlerinin lipid içeriği ve lipid üretilebilirliği	32
Çizelge 3.1 Zarrouk Besi Ortamı	34
Çizelge 3.2 BG11 Besi Ortamı	35
Çizelge 3.3 Gaz analizlerinin gerçekleştirildiği GC analizi cihaz koşulları	38
Çizelge 3.4 YAME analizlerinin gerçekleştirildiği GC analizi cihaz koşulları	38
Çizelge 4.1 <i>S. obliquus</i> , <i>Sp. maxima</i> , <i>Ch. vulgaris</i> için %3 CO ₂ seviyesinde kinetik parametreler	49
Çizelge 4.2 <i>S. obliquus</i> , <i>Sp. maxima</i> , <i>Ch. vulgaris</i> için %7 CO ₂ seviyesinde kinetik parametreler	50
Çizelge 4.3 <i>S. obliquus</i> , <i>Sp. maxima</i> , <i>Ch. vulgaris</i> için CO ₂ giderim oranları (12. Gün, % 7 CO ₂ - % 93 Hava)	51
Çizelge 4.4 <i>Scenedesmus obliquus</i> ve <i>Chlorella vulgaris</i> çoğalma ortamına %3 - %25 CO ₂ beslenmesi durumunda kinetik parametreler	57
Çizelge 4.5 <i>S. obliquus</i> , <i>Ch. vulgaris</i> için CO ₂ giderim oranları (12. Gün, % 7 CO ₂ - % 93 Hava)	60
Çizelge 4.6 Çoğalma ortamına NaHCO ₃ durumunda kinetik parametreler	64
Çizelge 4.7 <i>Scenedesmus obliquus</i> - Çoğalma ortamına NaHCO ₃ & CO ₂ beslenmesi durumunda ANOVA testi sonuçları	65
Çizelge 4.8 <i>Chlorella vulgaris</i> - Çoğalma ortamına NaHCO ₃ & CO ₂ beslenmesi durumunda ANOVA testi sonuçları	65
Çizelge 4.9 <i>S. obliquus</i> farklı pH ortamlarında CO ₂ giderim oranları (12. Gün)	68
Çizelge 4.10 <i>S. obliquus</i> farklı aydınlatma periyotlarında CO ₂ giderim oranları (12. Gün)	69
Çizelge 4.11 <i>Scenedesmus obliquus</i> çoğalması üzerine ışık şiddeti etkisi, kinetik parametreler (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)	72
Çizelge 4.12 <i>Scenedesmus obliquus</i> çoğalması üzerine akış hızı etkisi, kinetik parametrelerin karşılaştırılması (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7)	74
Çizelge 4.13 Farklı substrat türleri ve derişimlerinde hücre çoğalma hızının karşılaştırılması (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m ⁻² s ⁻¹ , pH : 7)	79

Çizelge 4.14 Substrat inhibisyonu durumunda görünür Michaelis Menten sabiti ve $r_{\max}$ değerleri (%25 CO ₂ , 18:6 a: periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)	82
Çizelge 4.15 <i>Scenedesmus obliquus</i> farklı CO ₂ derişimlerinde kla karşılaştırması (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)	88
Çizelge 4.16 <i>Scenedesmus obliquus</i> farklı akış hızlarında (1 vvm, 3 vvm, 5.2 vvm) kla değerlerinin karşılaştırması (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)	91
Çizelge 4.17 Kabarcık kolon fotobiyoreaktörde <i>Scenedesmus obliquus</i> çoğalmasında hesaplanan kinetik parametreler (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)	94
Çizelge 4.18 Kabarcık kolon fotobiyoreaktörde <i>S. obliquus</i> çoğalmasında kla (18:6 a:k periyot - %20 CO ₂ , 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)	95

1. GİRİŞ

Dünyamızın yaşanabilir sıcaklıkta kalmasını, başlıcaları CO₂, su buharı ve CH₄ olan gazların sebep olduğu “sera gazı” etkisine borçluyuz. Bu etkinin yokluğunda Dünya'nın ortalama sıcaklığının -18°C olacağı tahmin edilmektedir. Buz katmanlarında yapılan araştırmalar bu önemli gazların seviyelerinin binlerce yıl boyunca dar bir aralıkta seyrettiğini göstermektedir. Ancak, sanayi devriminin başlaması ile birlikte modern insanın hayatının bir parçası haline gelmiş olan fosil yakıt kullanımı, hızlı nüfus artışı, ormanların yok oluşu vb. nedenlerden dolayı atmosferdeki sera gazı miktarı hızla artmıştır. 2017 yılı içerisinde alınan veriler sanayi devrimi öncesine (1850–1900) göre sıcaklık artışının ortalama 1°C olduğunu göstermektedir. Yaşamsal etkisi olan sera gazlarının miktarının normalin üzerine çıkması ve bu artışın sürmesi de Dünya'nın iklimsel dengelerinin her geçen gün biraz daha bozulmasına neden olmaktadır (IPCC Özel Raporu 2018).

Hükümetler, sanayi kuruluşları ve toplumsal örgütler her geçen gün artan enerji ihtiyacı ile etkisi gün geçtikçe daha fazla hissedilen küresel iklim değişikliği sorunu arasında sıkışıp kalmış ve artan çevre duyarlılığıyla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına daha fazla öncelik vermeye başlamıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yıllık olarak hazırlanan Dünya Enerji Görünümü 2014 Raporu'na göre (World Energy Outlook 2014) birincil enerji kaynakları arasında yenilenebilir olanların payı 2035 yılına kadar ki bütün senaryolarda giderek artış göstermektedir. Bunun en önemli nedenleri olarak ise hükümetlerin desteği, düşen maliyetler, fosil yakıt fiyatlarının artışı ve bazı bölgelerde uygulanmaya başlanan CO₂ kotası gösterilebilir. Raporda belirtilen yeni politikalar senaryosuna göre yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi içerisinde 2010 yılında %20 olan payı 2035'de %31'e çıkacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hızla artsa da, sera gazları içerisinde artışı ve etkisi en yüksek olan CO₂'in temel sebebi olarak gösterilen fosil yakıtlar tüm dünyada birincil enerji kaynağı olarak kalmaya devam edecektir. CO₂ salımını azaltacak nitelikte enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar hızla devam etmekle birlikte

kullanılmakta olan teknolojinin kısa dönemde değişmesi halinde dahi, karbondioksit salımının tamamen durdurulmasının çok kolay olmayacağı açıktır. Bu noktada önemli olan bir diğer konu ise fosil kaynakların yakın gelecekte tükeneyeceği gerçeğidir. Bilim adamları okyanus diplerinde bulunan kömür rezervlerinin binlerce yıl daha dünyanın enerji ihtiyacını karşılayacağı yönünde açıklamalarda bulunmakla birlikte, bu hem çok maliyetli bir proses olacaktır hem de enerji ihtiyacı karbon içeriği %60-90 olan kömüre dayalı bir dünya, nefes alan canlılar için yaşamın mümkün olmadığı bir hal alacaktır.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'nin her dört yılda bir yayınladığı raporların sonuncusu olan 5. İklim Değişikliği Değerlendirme Raporu da göstermektedir ki önümüzdeki yıllarda bütün ülkelerin CO₂ giderimi ile ilgili daha çok yatırım yapması gerekecektir. Raporun başlıca bulguları aşağıdaki gibidir;

- o İklim değişikliği üzerinde insanların net bir etkisi bulunmaktadır.
- o Ne kadar çok iklim değişikliğini tetiklerse, o kadar daha fazla risklere maruz kalınacak ve geri dönülemez etkiler ortaya çıkacaktır.
- o İklim değişikliği ile mücadele ve sürdürülebilir geleceği inşa etmek halen mümkün.

Ülkemiz, 24 Mayıs 2004 tarihi itibarıyla Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine 189. taraf olarak katılmıştır. Bu çerçevede ihtiyaç duyulan çalışmaların yapılabilmesi amacıyla alt çalışma grupları oluşturulmuştur. Bu çalışma gruplarından biri de Sera Gazları Emisyon Envanteri Çalışma Grubudur. Türkiye için sera gazlarının takibi artık bir plan olmaktan çıkmış 17/05/2014 tarihli ve 29003 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik gereğince takip edilmesi ve raporlanması gereken, yaptırımlar içeren bir durum haline gelmiştir. Bu nedenle yapılan CO₂'nin biyolojik olarak giderimi ile ilgili yapılan çalışmalar sanayi kuruluşları açısından da büyük önem taşımaktadır. CO₂'nin biyolojik olarak gideriminde alglerin kullanılmasının en önemli avantajları doğrudan baca gazı içerisindeki CO₂'nin de besin kaynağı olarak kullanılması, diğer bitkilere göre çok daha yüksek üretilebilirliğe sahip olmaları ve zengin içerikleri (lipid vs.) olarak sıralanabilir.

Bahsi geçen sebeplerden dolayı CO₂ salımını azaltacak, yenilenebilir enerji kaynakları ile salınan CO₂'in depolanması-tutulması konusunda yapılan araştırma geliştirme çalışmaları son yıllarda önem kazanmakta ve araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Sıfır emisyonlu fosil yakıt enerji kaynaklı fabrikalar için oluşturulan Avrupa Teknoloji Platformunun (ZEP) 2020 yılına kadarki Avrupa'da CO₂ yakalama ve depolama konusundaki önerileri içeren raporda da belirtildiği gibi fiziksel ve kimyasal CO₂ tutma yöntemlerinin yanında biyo tutma (biofixation) yöntemi öne çıkmaktadır (ZEP 2010).

Diğer yandan Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun yapmakta olduğu çalışmaya göre önümüzdeki yıllarda motorin içerisinde binde 1 oranında atık ve bitkisel yağ karışımı ile üretilen biyodizel katılması planlanmaktadır. 16 Kasım 2011 tarihinde düzenlenen "Biyoyakıt Politikalarının Gıda ve Yem Sanayine Etkileri" panelinde EPDK yetkilileri bu oranın zamanla artırılması gerektiğini belirtmişlerdir ancak verimli tarımsal alanların biyoyakıt üretimine açılmasının ne kadar mantıklı olduğu büyük bir tartışma konusu olarak gündemde kendine yer bulmaktadır. Bu anlamda Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı bu düzenlemelere, yemeklik yağın büyük bölümünün ithal edildiğini, mevcut bitkisel yağların biyodizel üretiminde kullanıldığı durumda mutfaklık bitkisel yağ fiyatının artacağını belirterek itiraz etmektedir. Dünya'da artan nüfusa bağlı olarak yiyecek ihtiyacı her geçen gün artmakta olup ve gıdanın petrolden daha stratejik olduğu kabul edilmelidir.

Algler, tarımsal alanlara ihtiyaç duyulmaması, yüksek yağ içerikleri, hasat için gerekli sürenin birkaç hafta gibi kısa bir zaman olması gibi nedenlerle ön plana çıkmakta ve ülkemizin biyoyakıt politikalarında ilerleyen yıllarda yer bulmaya açık bir konu olarak görülmektedir.

Yapılan doktora tezinin amacı, biyokimyasal olarak CO₂'in algler kullanılarak giderimidir. Çalışmada fotosentez esnasında CO₂ kullanımı karasal bitkilere göre yaklaşık 50 kat fazla olan mikroalgler kullanılmıştır. Algler güneş alabildikleri her yerde yaşayabilen, ortam koşullarına kolaylıkla uyum sağlayabilen, büyümelerini sadece birkaç gün içerisinde tamamlayabilen organizmalardır. CO₂ sabitleme çalışmalarında en çok kullanılan alg türü ise bir mikroalg olan siyanobakterilerdir.

Siyanobakteriler alg ve bakteri özelliği gösteren fotosentetik, prokaryot mikroorganizmalardır (ZEP 2010).

Tez kapsamında, siyanobakterilerden *Spirulina maxima* ve mikroalglerden *Scenedesmus obliquus* ile *Chlorella vulgaris* kullanılmıştır. Mikroalgler ile CO₂ giderimi üzerine CO₂ derişimi, akış hızı, pH, sıcaklık, ışık periyodu, ışık yoğunluğu, kùltür ortamı gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. CO₂ gideriminde kullanılan mikroalg biyokùtlesi yüksek protein içeriği nedeniyle hayvan yemi, gùbre olarak kullanılabileceği gibi yüksek yağ içeriği nedeniyle biyodizel üretiminde ayrıca biyokimyasal dönüşümle etanol, hidrojen üretiminde ve sağlık ve kozmetik sektöründe kullanılabilmektedir. Bu kapsamda mikroalgal biyokùtle içeriği ve algal biyokùtleden lipid ekstraksiyonu üzerine ultrasonifikasyon etki incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 İklim Sistemi

İklim sistemi, atmosfer, kara yüzeyleri, okyanuslar ve diğer su kütleleri ile canlıları kapsayan karmaşık ve etkileşimli bir sistemdir. İklim sistemini meydana getiren bileşenler arasındaki etkileşim sonucunda yerkürenin yüzey iklimi belirlenir.

İklim değişikliği ise küresel ölçekte karşılaşılan en büyük sorunlardan biridir. Özellikle sanayi devriminden sonra fosil yakıtların yakılmaya başlanması, arazi kullanımında meydana gelen değişiklikler, ormansızlaşma ve sanayi süreçleri sonucunda atmosferde biriken sera gazları atmosferin kimyasal özelliklerini etkilemekte uzun vadede ise sera etkisi nedeniyle küresel ölçekte ısınmaya ve sonuç olarak iklim değişikliğine neden olmaktadır. İklim değişikliği de fiziksel ve doğal çevre, kent yaşamı, kalkınma ve ekonomi, teknoloji, insan hakları, tarım ve gıda, temiz su ve sağlık gibi yaşamın bütün alanlarını olumsuz etkilemektedir. Ülkemizde de gerçekleştirilen iklim değişikliği çalışmalarına ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 4. Değerlendirme Raporuna göre, Türkiye, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinden en çok etkilenecek bölgeler arasında bulunan Akdeniz Havzası'nda yer almaktadır. İklim değişikliği ile mücadele etmek amacıyla gerçekleştirilen uluslararası çabalar sonucu Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) 1994 yılında imzalanmıştır. Bugün itibarıyla 194 ülke BMİDÇS'ye taraf olmuştur.

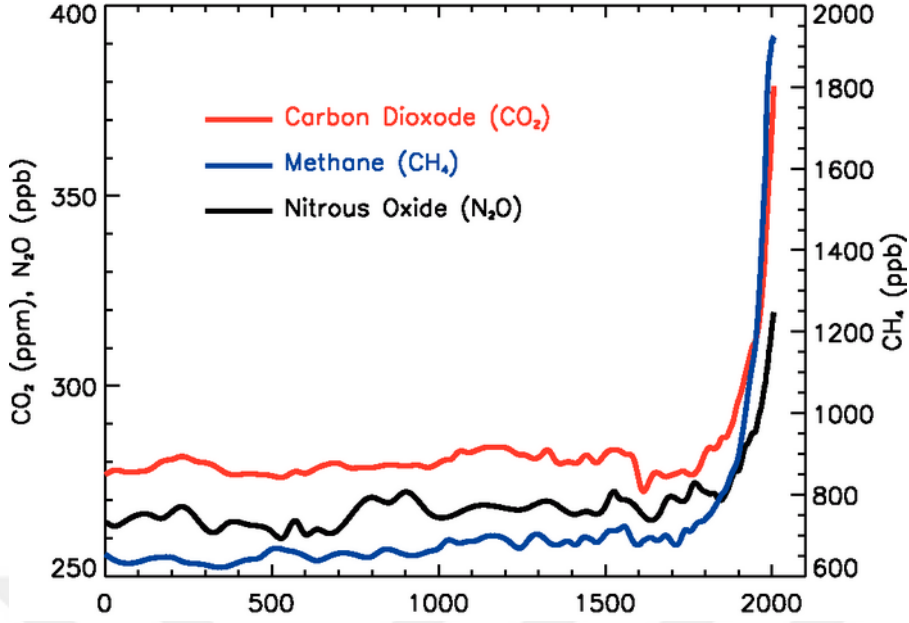
2.2 Sera Gazları

Atmosferde bulunan sera gazları güneşten yeryüzüne gelen ısıнын bir kısmını tutarak yeryüzünün belirli sıcaklık derecesinde kalmasını sağlar. Atmosferin ısıyı tutma özelliği sayesinde denizlerin, okyanusların donması önlenmiş olur. Atmosferin bu ısınma ve ısıyı tutma özelliğine sera etkisi denir (Akın 2006).

Sera gazları diye adlandırılan gazlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- o Karbondioksit (CO₂),
- o Su buharı (H₂O),
- o Azotoksitler (NO_x),
- o Metan (CH₄),
- o Kükürt,
- o Hekzaflorit (SF₆),
- o Hidroflorokarbon,
- o Perflorokarbon ve Kloroflorakarbon (CFC)'dir.

Sera gazları içerisinde seviyesindeki artış hızı, miktarı ve atmosferde kalma süresi göz önüne alındığında en önemli gaz CO₂'dir. CO₂ emisyonundaki artışı anlamak için Mauna Ioa (Hawaii, US) gözlemevi sonuçlarına baktığımızda 1958 yılında atmosferimizde 280 ppm CO₂ varken 2010 yılında bu miktarın 390 ppm gibi bir seviyeye çıkmış olduğunu görürüz. IPCC'nin (2007) raporuna göre de fosil yakıtların kullanılmaya başladığı buhar makinesinin icadıyla birlikte atmosferdeki CO₂ seviyesinde ciddi bir artış gözlenmiştir. Araştırmalarda kullanılan veriler, buz katmanı tetkikleri sırasında binlerce yıl boyunca donan buzun içinde sıkışıp kalan havanın dikkatli şekilde analiz edilmesi sonucunda bulunmuştur. Sonuçlar 1800'lü yılların sonundan itibaren normalin çok dışında bir yükseliş başladığını göstermektedir. Sanayi devrimi öncesinde 270-280 ppm olan CO₂ miktarı günümüzde 380-390 ppm dir ve her yıl ortalama 1.5 ppm artmaktadır. Şekil 2.1'de CO₂, CH₄ ve N₂O miktarlarındaki değişim (0-2005) verilmiştir. Açık bir şekilde görülmektedir ki 1700'lü yılların sonundan itibaren bu gazlarda normalin çok dışında bir yükseliş başlamıştır.

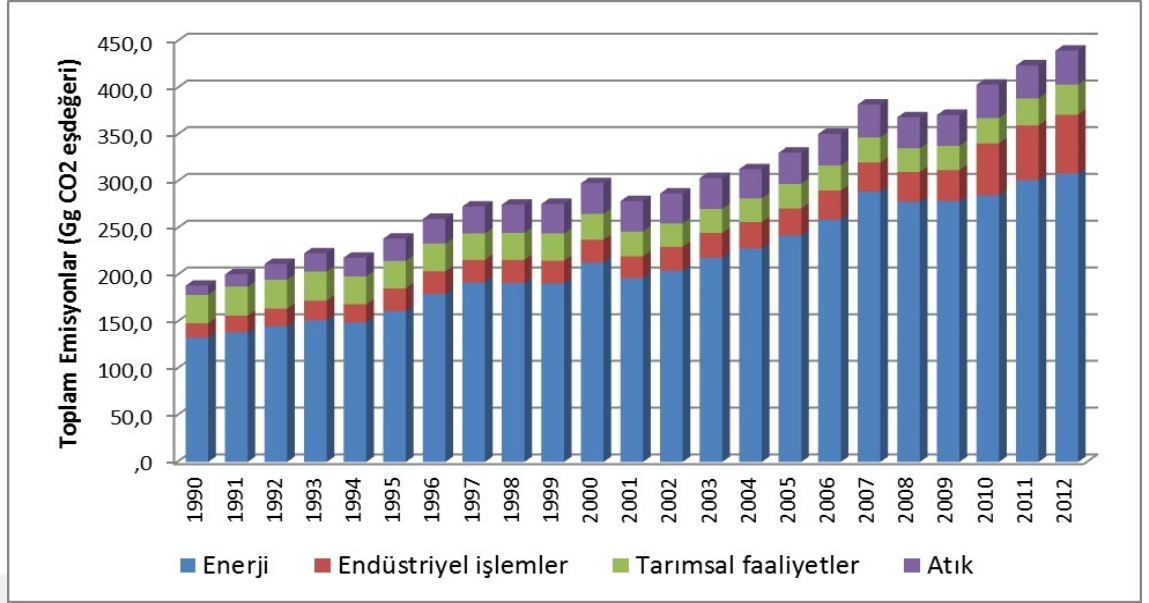


Şekil 2.1 CO₂, CH₄ ve N₂O miktarlarındaki değişim (0-2005) *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

2.2.1 Türkiye'nin sera gazı envanteri

1990-2012 yıllarına ait sera gazı emisyon envanteri, 14 Nisan 2012 tarihinde Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sekretaryasına sunulmuştur. Envanter sonuçlarına göre 2012 yılı toplam sera gazı emisyonları 439.9 milyon ton CO₂ eşdeğeri olarak tahmin edilmiştir. 2012 yılı sera gazı emisyonlarının CO₂ eşdeğeri olarak %70.2'si enerji, %14.3'ü endüstriyel işlemler, %8.2'si atık ve %7.3'ü tarımsal faaliyetler kaynaklıdır (Şekil 2.2).

İklim değişikliği ile mücadele kapsamında önemli bir adım olan ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanan "Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik" 25 Nisan 2012 tarih ve 28274 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Yönetmelik kapsamında ulusal sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmını teşkil eden elektrik ve buhar üretimi, çimento, demir-çelik, seramik, kireç, kağıt ve cam üretimi gibi sektörlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının tesis seviyesinde izlenmesi sağlanacaktır.

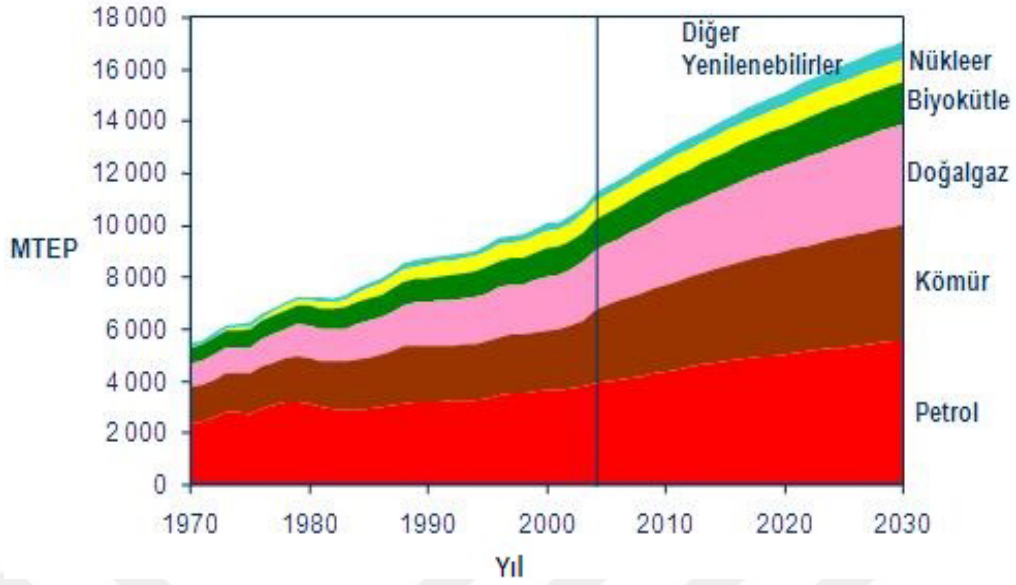


Şekil 2.2 Sera Gazı Emisyonlarının sektörlere göre dağılımı (1990-2012) * 2012 Ulusal Emisyon Envanteri Raporu (NIR)

2.3 Küresel Isınma ve İklim Değişikliği

"Küresel ısınma" alt atmosfer katmanındaki iklim değişikliğine yol açan ortalama sıcaklık artışını ifade eder. Dünya genelinde meydana gelen iklim değişikliğine sebep olan başlıca sera gazları (SG) su buharı, karbon dioksit (CO_2), metan (CH_4), kükürt oksitler (SO_x), azot oksitler (NO_x), kloroflorokarbonlar (CFC'ler) ve insanların tarım, enerji, ulaşım gibi çeşitli faaliyetleri sonucu ortaya çıkan diğer çeşitli gazlardır (Liu 1994).

Sanayi devriminden beri, özellikle fosil yakıtların yakılması, arazi kullanımı değişiklikleri, ormansızlaşma ve sanayi süreçleri gibi insan etkinlikleri sonucunda atmosfere salınan sera gazlarının atmosferdeki birikimleri hızla artmaktadır. Bu ise, doğal sera etkisini kuvvetlendirerek, şehirleşmenin de katkısıyla, dünyanın yüzey sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır. Sera gazlarının ve dolayısıyla küresel ısınmanın başlıca kaynağı olan enerji tüketimi projeksiyonlarına bakıldığında fosil yakıtlara bağlı enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 2.3'den de görüleceği gibi 2030 yılına kadar çoğunluğu kömürden olmak üzere yaklaşık olarak %50 talep artışı beklenmektedir.



Şekil 2.3 Dünya enerji talebi (1970-2030) *World Energy Outlook 2008, International Energy Agency

Fosil yakıtlardan petrol ve doğal gazın 40-70 yıl içinde tükeneceği, kömür rezervlerinin ise 100-500 yıl yetecek miktarda olduğu düşünülmektedir. Şekil 2.3'e bakıldığında da fosil yakıtlar arasında en çok talep artışının petrol ve kömürde olduğu görülmektedir. Diğer yandan kömür, içeriğindeki karbon oranının yüksek olmasından dolayı sera gazı salınımının başlıca sorumlusu olarak bilinmektedir. Geleceğin enerji sisteminin sadece kömüre dayanması durumunda dünyamızdaki çevresel sorunlar, telafisi imkansız boyutlara ulaşacaktır.

2.4 Karbon Tutma ve Depolama (KTD) Teknolojileri

IEA'nın (2009) raporuna göre fosil yakıt bazlı enerji üretimi hala Dünya'da ana elektrik kaynağıdır. Ancak fosil yakıtların yakılmasıyla atmosferde CO₂'nin seviyesi artar, dengesi bozulur ve bu durum küresel ısınmaya neden olur. Araştırmacılar tarafından doğal kaynaklı sera gazı artışının atmosferin dengesini bu denli değiştirecek ölçüde olmadığı kabul görmüş bir olgudur. Fosil yakıtların öncelikle dünyamıza zararları ve yakın zaman sonra tükenecek olmaları ile birlikte soruna kısmi olarak çözüm sağlamak amacıyla karbon (C) tutma teknolojileri (KTD) ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe ivme kazanmaktadır.

Karbon tutma ve depolama (KTD) CO₂'i enerji üretimi veya diğer sanayi tesisleri baca gazından ayırma, taşıma ve uzun dönemde atmosferden izole etme işlemidir.

Potansiyel teknik depolama tesisleri:

- o Petrol ve doğal gaz sahaları,
- o Kömür çıkarılamayan yer altı kömür ocakları,
- o Yer altı tuz ocakları gibi jeolojik depolama alternatifleri,
- o CO₂'in direk olarak okyanusların dibine pompalanması

Santraller ve diğer büyük sanayi tesisleri KTD için temel adaylardır. CO₂ tutmanın amacı yüksek basınçta yüksek konsantrasyonda bir depolama sahasına nakledilebilecek bir CO₂ akışı elde etmektir. Şu anda da CO₂ ayırma tesisleri bulunmaktadır, ancak bunlarda amaç diğer gazları üretmek amacıyla saflaştırmaktır ve ayrılan CO₂ atmosfere atılmaktadır. Santrallerin baca gazından CO₂ üretimi yapılan uygulamalar da vardır, ancak bunlar 500 MW'ın altındaki küçük santrallerdir.

CO₂ tutma için dört temel yaklaşım bulunmaktadır.

- o Yanma Sonrası (Post-combustion)
- o Yanma Öncesi (Pre-combustion)
- o Oksi yakıt yanma (Oxyfuel combustion)

2.4.1 Yanma sonrası

Bu sistemde normal bir kömür santralı veya doğal gaz kombine çevrim santralının baca gazından CO₂'yi ayırma işlemidir. Ana ögesi azot olan baca gazından sıvı bir solvent kullanarak CO₂'nin belli bir yüzdesi (Hacimsel olarak %3-15) ayrıştırılır. Modern bir pulverize kömür santralında veya doğal gaz kombine çevrim santralında normal olarak bir organik solvent örneğin MEA)kullanılır.

2.4.2 Yanma öncesi

Primer yakıt bir reaktör içinde buhar, hava veya oksijen’le işleme tabi tutularak büyük ölçüde hidrojen ve karbon monoksitten oluşan bir karışım elde edilir. Bir başka reaktörde karbonmonoksit, buharla reaksiyona girerek ilave hidrojenle birlikte CO₂ elde edilir. Bu karışımda hidrojen ve CO₂ ayrıştırılır. Eğer CO₂ depolanacaksa karbonsuz bir yakıt olan hidrojen enerji ve ısı elde etmek üzere yakılabilir. Başlangıçtaki adımlar “yanma sonrası” prosesine göre pahalı ve karmaşık olsa da özellikle ikinci reaktördeki daha yüksek basınç ve konsantrasyondaki (%15-60) CO₂, “yanma öncesi” prosesini CO₂’yi ayırmak için daha tercih edilir hale getirmektedir.

2.4.3 Oksi yakıt yakma

Oksi yakıt yakmada primer yakıt havayla değil oksijenle yakılır. Sonuçta baca gazı su buharı ve CO₂’den oluşur. Burada baca gazındaki CO₂ konsantrasyonu oldukça yüksektir ve hacimsel olarak %80’lere ulaşmaktadır. Bacadan çıkan gaz soğutularak ve sıkıştırılarak su buharı ayrıştırılır. Oksi fuel yanmada havadaki oksijenin %95-99 oranında saflıkta ayrıştırılması gerekir. Kazanlarda CO₂ tutma ve oksi yakıt yakma sistemleri hala demonstrasyon safhasındadır. Oksi yakıtın gaz türbinlerinde kullanılması konusu ise hala araştırma ve kavramsal tasarım safhasındadır. CO₂ tutma sistemleri işletmeleri için önemli ölçüde enerjiye ihtiyaçları vardır. Bu da net santral verimini düşürmektedir, diğer bir deyişle santraller 1 kWh üretmek için daha fazla yakıt kullanmaları gerekir. %90 konsantrasyonda en iyi teknolojiyle CO₂’yi tutmak için gerekli olan yakıt CO₂ tesisi olmayan benzer tesislerle mukayese edildiğinde; yeni bir süperkritik pulverize kömür santralında %24-40, doğal gaz kombine çevrim santralında %11-22 ve kömüre dayalı entegre gazlaştırmalı kombine çevrim santralında %14-15 olmaktadır. Tabi ki artan yakıt tüketimi kWh başına emisyonları ve katı atıkları artırmaktadır. Paralel olarak SO₂ için kullanılan kireç ve NO_x için kullanılan amonyak tüketiminde de artış yaratacaktır. Bu sebeple daha düşük verimdeki eski santrallara KTD tesisi kurmak yerine daha yüksek verime sahip olacak yeni santrallerle KTD tesisi kurmak daha mantıklı olacaktır.

2.4.4 Karbon tutma teknolojilerinde yeni yaklaşımlar

Atmosfere salınan CO₂'yi azaltmaya yönelik karbon tutma (KT) teknolojileri, kimyasal absorpsiyon, membran ayırması, fiziksel adsorpsiyon ve kryojenik ayırma metodları temellidir. Kimyasal absorpsiyon prosesleri kimyasal çözücülerin kullanımını gerektirir; monoetanolamin, dietanolamin, karışık aminler ve tersiyer aminler vb. fiziksel prosesler kryojenik soğutma ve katı adsorbanlar bazlıdır. Fosil yakıt kullanılan güç sahalarında emisyonu azaltmak ile ilgili çalışmalar yapan ZEP, 2020'den sonra gündemde olacak KTD teknolojileri ile ilgili yayınladıkları raporda yukarıda bahsedilen tutma yöntemlerinin yanı sıra yeni yaklaşımlara yer verilmiştir.

Bunlar ;

1. Ex-situ mineral karbonizasyon
2. CO₂'nin kimyasal olarak kullanılması
3. CO₂'nin biyolojik giderimi
4. Biyokütle ile birleştirme

Bahsedilen yöntemler içerisinde sanayi bölgelerine alg tarlaları kurulması yolu ile CO₂'nin biyolojik olarak giderilmesi diğer yöntemlere göre daha ekonomik bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Algler laboratuvar ortamında ya da dış mekanlarda üretimi yapılabilen, çevre koşullarına çok kolay uyum sağlayabilen organizmalardır. Bu alanda hedeflenen amaçlar uygun alg türünün ve koşulların kontrollünün kolaylığı açısından üretimin gerçekleştirildiği uygun fotobiyoreaktörün geliştirilmesidir. Yapılan çalışmalardan elde edilen veriler %80 CO₂'nin fotobiyoreaktörler kullanılarak uzaklaştırılabildiğini göstermektedir (Goel 2009).

Gerçekleştirilen doktora tezi çalışmasında bu yeni yaklaşımlardan CO₂'nin biyolojik olarak giderilmesi üzerinde durulmuştur. CO₂ biyolojik olarak yaşayan organizmalara sabitlenebilir ve bu uygulama için algler yüksek potansiyele sahiptir. Bu nedenle CO₂'nin biyolojik olarak sabitlenmesi yeni bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Doktora

tezi kapsamında amaç genel olarak alg türlerinin en fazla CO₂ kullanacak şekilde çalışma koşullarının belirlenmesidir.

2.5 Algler

2.5.1 Alglerin sınıflandırılması

Alglerin sınıflandırılmasında içerdikleri pigmentler, biyokimyasal özellikleri, depoladıkları maddeler ve kamçı gibi organellerinin yapıları ve hayat devreleri gözönüne alınır. Farklı sınıflandırmalar mevcut olmakla birlikte günümüzde temel olarak üç grupta sınıflandırılmaktadır.

2.5.1.1 Siyanobakteri

Siyanobakteriler enerjilerini fotosentez yolu ile elde eden bir bakteri dalıdır. İsmi bakterinin renginden gelir. Tek hücreli ve prokaryot olan bu algler toprakta ve kayalıklarda yaşama kabiletlerinden dolayı özel bir gruptur. Siyanobakterileri genellikle gözle görülebilir koloniler oluşturmaktadır. Siyanobakterilerin karbondioksit ile fotosentez gerçekleştirmesi yeteneğini ile erken dönem dünya atmosferinin oksijenle dolmasını sağladığı ve bu şekilde yaşam çeşitliliğinin artmasına neden olduğu düşünüldüğü için en önemli organizma gruplarından biridir. Algler ile siyanobakteriler arasındaki en önemli fark, alglerin nükleus zarına sahip olmalarıdır.

2.5.1.2 Makroalgler

Makroalgler daha çok yosun adıyla bilinmektedir. Makroskopik ve çok hücreli olan makroalgler gıda, ilaç, gübre ve enerji üretiminde kullanılmaktadır. Birçok makroalg doğada kendiliğinden çoğalır. Farklı fotosentetik pigmentleri nedeniyle kırmızı, kahverengi ya da yeşil görünebilirler.

2.5.1.3 Mikroalgler

Mikroalgler tek hücrelidir ve tek hücre ya da birbirine bağlı tek hücre grupları halinde bulunabilir. Mikroalgler karbondioksit tüketerek fotosentez yaparak atmosferde bulunan oksijenin yaklaşık yarısını üretir. 200.000'in üzerinde tür mevcut olmakla birlikte sadece yaklaşık 50.000'i tanımlanmıştır. Mikroalglerin ilginç bir yönü bazı türlerin çevresel koşullara bağlı olarak fototrofik ve/veya heterotrofik özellik göstermesidir. Bu olgudan dolayı, mikroalgler organik karbon kaynakları bulunan besi ortamlarında, fermentörlerde çoğaltılabilirler. Heterotrofik çoğalma gerçekleştiğinde ise herhangi bir ışık kısıtlaması olmadığı için çok daha yüksek hücre yoğunluğuna ulaşılabilir (Xu vd. 2006).

Mikroalgler, gelişimlerini sadece birkaç gün içerisinde tamamlayabildikleri için karasal bitkilere göre çok daha hızlı çoğalabilmeleri, güneş alabildikleri her yerde yaşayabilmeleri ve çevresel faktörlere direnç gösterebilmeleri, fotosentetik pigmentlere sahip olmaları gibi biyolojik özellikleri yanında maliyetlerinin düşük olması sebebiyle çok önemli organizmalar olup kendilerine pek çok çalışma alanında yer edinmişlerdir.

2.5.2 Algal çoğalma ve kullanılan farklı sistemler

Mikroalg üretimleri genelde dış mekanda ya da iç mekanda yapılabilir. Pekçok çalışmanın konusu olan algler ile ilgili büyük ölçekli çalışmalar Stanford Araştırma Enstitüsü'nde başlamıştır (Borowitzka ve Moheimani 2013).

Dış mekanda açık sistem de dediğimiz doğal gölet, havuz, tank vb. de olabilirken, iç mekanda küçük ölçekli torba sistemleri, erlenler, çeşitli fotobiyoreaktörler (FB) gibi kapalı sistemler kullanılabilir. Kapalı sistemlerde algal çoğalmanın kontrolünün kolay sağlanması bu sistemlerin en büyük avantajıdır (Jorquera vd. 2010).

Mikroalgal kültürlerde sıcaklık, ışık, besin maddeleri gibi çoğalmayı etkileyen önemli parametrelerden biri olan karıştırma kapalı ve açık sistemlerde birbirinden farklıdır.

Karıştırma, mikroalgal kütlenin ortamda homojen bir şekilde dağılımında ve optimum seviyelerin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu sayede tüm hücrelerin, ışık ve besin maddelerinden eşit oranda faydalanmasını sağlanır. Ayrıca kültür ortamı ve hava arasındaki gaz transferini düzenlemesi sağlanır. Literatürde *Chlorella sp.* nin büyümesi ve CO₂ kullanımı üzerine 2 farklı kültürleme modunun etkisi araştırılmıştır. Bunlardan birinde açık kültürleme yapılmıştır, dolayısıyla çoğalmanın yapıldığı fotobiyoreaktör durgun'dur, diğerinde ise kapalı kültürleme yapılmıştır bu nedenle de kabarcık kolon fotobiyoreaktör kullanılmıştır. Kapalı sistemde spesifik çoğalma hızı ve CO₂ sabitlemesi 0.5121 gün⁻¹ ve 1.378 g CO₂ L⁻¹gün şeklindedir ve bu değerler açık sistemden sırayla 1.78 ve 5.39 kat daha yüksektir. Bu farkın ana sebebi kapalı sistemde yapılan havalandırmanın gaz-sıvı (CO₂ kültür ortamı) temasını artırması, fotosentez yapan mikroalgin CO₂'yi daha verimli kullanmasını sağlamasıdır. Bununla birlikte türbülent bir akış ters etki yaparak algin büyümesini önleyebilir. Her mikroalg türü için optimum bir akış hızı vardır. Ayrıca her iki mod için ortamdaki çözünmüş O₂ derişimi ve pH ölçülmüş, karşılaştırılmıştır. Kapalı sistemlerde havalandırma H⁺ iyonlarının artışına dolayısıyla pH'da düşüşe neden olmaktadır. pH çok düştüğünde alglerin büyümesi üzerine inhibisyon etkisi olabilir. Aynı şekilde ortamdaki çözünmüş O₂ de inhibisyon etkisi gösterebilecek bir parametredir. Ancak kapalı sistemde çözünmüş O₂ gaz akışındaki kabarcıklarla birlikte sistemi terk ettiği için böyle bir etkinin gözlenmesi söz konusu olmamıştır (Zhao vd. 2009).

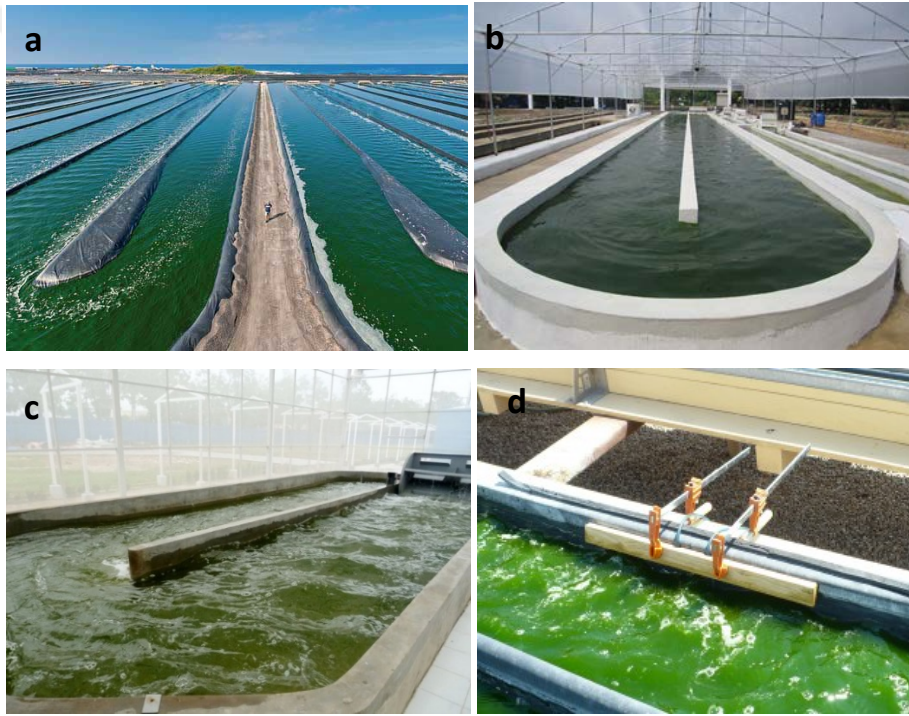
Algal çoğalma ortamında kütle aktarımını arttırmak için literatürde farklı çalışmalar incelenmiştir. Özet olarak farklı gaz dağıtıcıların kullanılması, hava – CO₂ karışımlarında akış hızı ve CO₂ basıncının arttırılması gibi değişkenler incelenmiştir. Gaz dağıtıcılar kullanıldığında gözenekler sıklıkla kirlenerek tıkanmakta ve temizlikleri gerekmektedir.

2.5.2.1 Açık sistemler

Açık sistemler göller, lagünler gibi doğal sistemler ve farklı formlardaki yapay havuzlar olarak iki gruba ayrılabilir. Yapımının kolay olması, maliyetin düşük olması sebebiyle daha çok tercih edilen açık sistemlerin zayıf ışık kullanımı, buharlaşma, düşük kütle

aktarımı, CO₂'nin atmosfere difüzyonu ve yüksek alan gereksinimi gibi pekçok dezavantajı vardır (Ugwu 2008).

Ayrıca sıcaklık, pH gibi çevre koşullarının kararlılığının sağlanması da açık sistemlerde daha zordur çünkü mikrobiyal kontaminasyonu önleyebilmek için çok seçici özel ortam koşulların sağlanması gerekir; örneğin *Chlorella* zengin besin ortamında, *Spirulina* yüksek pH ve bikarbonat derişiminde çoğalırken *D. salina* çok yüksek tuz içeren ortamda çoğalabilmektedir (Scott vd. 2010). Şekil 2.4'de açık sistemlere örnekler verilmiştir.



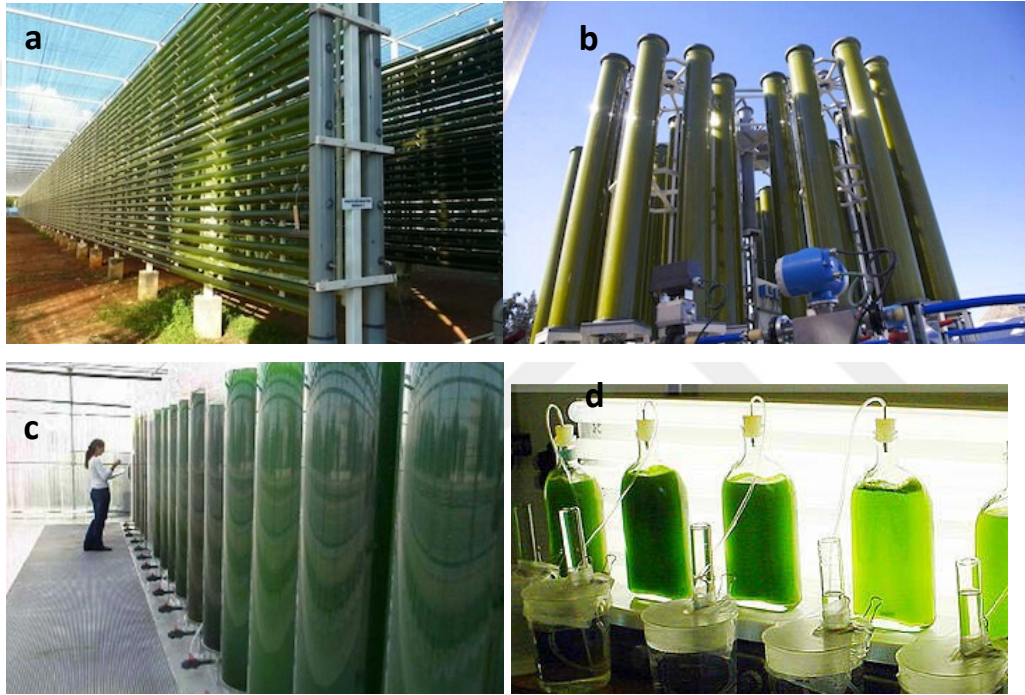
Şekil 2.4 Açık sistem alg çoğalma ortamlarına ticari firmalardan örnekler a. Cyanotech Corporation b. Aban Infrastructure Ltd. c. Algatech Int. d. Agrilife Research

2.5.2.2 Kapalı sistemler

Kapalı sistemler karıştırmalı reaktör, hava kaldırmalı reaktör, torba reaktör, yatay yada dikey borusal fotobiyoreaktörler gibi çeşitli formlarda olabilir. Borusal reaktörler dikey ya da yatay yerleştirilebilir ve havalandırma/karıştırma reaktör tabanından gönderilen

CO₂ ile zenginleştirilmiş hava ile yapılır (Richmond 1990). Açık sistemlere göre ışık geçirgenliği daha iyidir ve bu nedenle de daha kısa sürelerde daha yüksek biyokütle miktarlarına ulaşılabilmektedir.

Bu tarz sistemler genellikle değerli ürünler elde edilirken tercih edilirler. Gelişmiş bir teknolojiye sahip olmalarının dezavantajı ise kullanımlarında daha çok enerjiye ihtiyaç duyulması nedeniyle daha maliyetli olmalarıdır (Pushparaj vd. 1997). Şekil 2.5’de kapalı sistemlere örnekler verilmiştir.



Şekil 2.5 Kapalı sistem alg çoğalma ortamlarına ticari firmalardan örnekler a. Algatech International b. BFS Blue Petroleum c. LiveFuels d. OpenAlgae

2.5.3 Algal çoğalma kinetiği

Genel olarak algal çoğalma Şekil 2.6’da gösterildiği gibi beş basamakta gerçekleşmektedir (Vaccari vd. 2006).

Bu fazlar;

1) Lag Fazı (Gecikme Dönemi)

İlk bölünmenin başladığı zamana kadar geçen süredir. Hücre sayısında artış olmaz. Üreme için gerekli yeni bileşenler, enzimler sentezlenir. Hücreler yeni besi ortamına veya diğer koşullara adapte olurlar.

2) Logaritmik Çoğalma Fazı

Hücre çoğalmasının zamanın ekponensiyel fonksiyonu olarak gerçekleştiği dönemdir.

3) Lineer Çoğalma Fazı

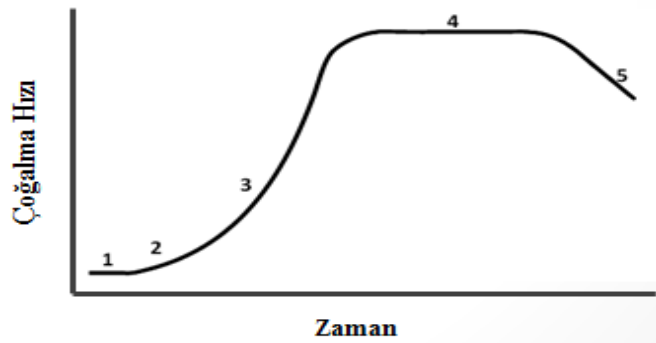
Hücre çoğalmasının zamanın lineer fonksiyonu olarak değiştiği dönemdir.

4) Durgun Çoğalma Fazı

Çoğalma hızının sabit kaldığı dönemdir.

5) Düşme/Ölüm Fazı

Besin maddelerindeki azalma yada toksik ürünlerin birikmesi mikroorganizmaların ölümüne neden olur.



Şekil 2.6 Kesikli sistemde alglerin çoğalmasının şematik gösterimi 1. Lag Fazı 2. Logaritmik Çoğalma Fazı 3. Lineer Çoğalma Fazı 4. Durgun Çoğalma Fazı 5. Düşme/Ölüm Fazı (Richmond 2004)

Logaritmik çoğalma fazında hücre çoğalma hızı aşağıdaki şekilde ifade edilir (Eşitlik 2.1);

Hücre çoğalma hızı = $f(C_{alg})$

$$r_x = \mu C_{alg} \quad (2.1)$$

Üstel çoğalma bölgesinden elde edilen veriler kullanılarak, spesifik çoğalma hızı (μ , gün⁻¹) 2.2 Eşitliği ile hesaplanabilir (Naderi vd. 2015).

$$\mu = \frac{\ln(x_2/x_1)}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Spesifik çoğalma hızı (μ), çoğalma ortamı bileşimi, sıcaklık, pH ve diğerleri gibi farklı parametrelere bağlıdır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, metabolik reaksiyon hızı sınırlamaları nedeniyle, çoğalma hızının belirli bir maksimum değerin üzerine ($\mu_{\max}$) çıkamayacağını göstermiştir. Monod'a göre (1949) kısıtlayıcı parametrenin substrat olduğunu da gösteren aşağıdaki eşitlikle çoğalma hızı belirtilebilir (2.3) (Bailey 1986, Doran 1995).

$$\mu = \frac{\mu_{\max} CS}{K_S + CS} \quad (2.3)$$

2.3 Eşitliğinde:

μ : Spesifik çoğalma hızı, zaman⁻¹

$\mu_{\max}$: Maksimum çoğalma hızı, zaman⁻¹

C_S : Ortamdaki substrat derişimi, derişim

K_S : Substrat doygunluk sabiti (Monod sabiti), derişim

$C_S \ll K_S$ olduğunda çoğalma hızı aşağıdaki eşitlikle ifade edilir (2.4);

$$\mu = \frac{\mu_{\max} CS}{K_S} \quad (2.4)$$

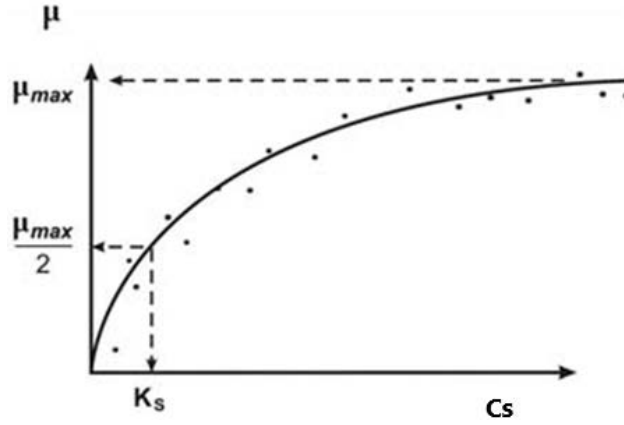
$C_S \ll K_S$ olduğunda ise;

$$\mu = \mu_{\max} \quad (2.5)$$

2.1 ve 2.3 eşitliklerini birleştirdiğimizde 2.6 eşitliği elde edilir;

$$r = \frac{\mu_{\max} CS}{K_s + CS} C_{\text{alg}} \quad (2.6)$$

Spesifik çoğalma hızına karşılık substrat derişimi grafiğe geçirildiğinde Monod sabitlerinin aşağıdaki şekilde bulunabilir (şekil 2.7);



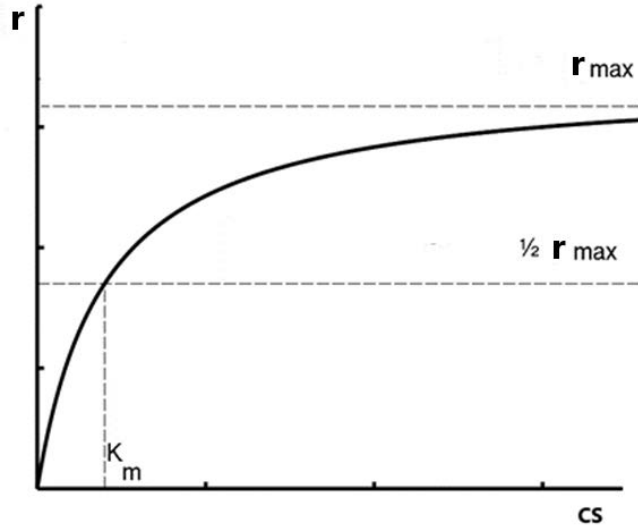
şekil 2.7 Deneysel veriler kullanılarak Monod Sabitlerinin belirlenmesi

2.5.4 İnhibisyon kinetiği

İnhibitörler enzimlerin aktivitesini azaltan maddelerdir. Enzimle katalizlenmiş reaksiyonlarda, reaksiyon hızları artan substrat miktarı ile doğrusallık göstermez. Reaksiyon hızı çeşitli substrat derişimleri için ölçülürse, reaksiyon hızı substrat arttıkça artar ancak, substrat miktarı yükseldikçe, enzim doğunlaşır ve reaksiyon hızı enzimin en büyük hızına ulaşır. Enzim kinetiği ile ilgili matematiksel model L. Michaelis ve M. L. Menten tarafından geliştirilmiştir. Bir enzimatik reaksiyonda enzim moleküllerinin yarısının substrata doğduğu ve maksimum hızın yarısının gözleendiği noktadaki substrat derişimine “Michaelis-Menten sabiti” denir ve K_m ile gösterilir (Bisswanger 2008).

$$r = \frac{r_{\max} CS}{K_m + CS} \quad (2.4)$$

Enzimatik bir reaksiyon için K_m , substrat derişimine karşılık reaksiyon hızlarını grafiğe geçirerek deneysel olarak belirlenebilir (şekil 2.8).



Şekil 2.8 Deneysel veriler kullanılarak Michaelis Menten sabitlerinin belirlenmesi (Bisswanger 2008).

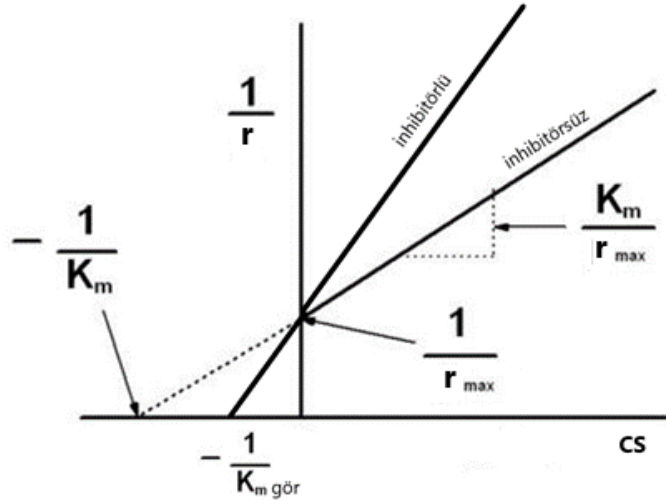
Michaelis-Menten Eşitliği bir hiperbolik eğrinin Eşitlik olduğundan ve hiperbolik eğrinin karakteristik noktalarını belirlemek zor olduğundan, bir enzime ait $r_{\max}$ ve K_m 'yi deneysel olarak belirlemeyi kolaylaştırmak için Lineweaver-Burk Eşitliği kullanılmaktadır (Bisswanger 2008).

$$\frac{1}{r} = \frac{K_m}{r_{\max}} \frac{1}{CS} + \frac{1}{r_{\max}} \quad (2.5)$$

Algal çoğalma hızı üzerine substrat inhibisyonu aşağıda verilen 2.6 Eşitliği ile ifade edilir;

$$r = \frac{r_{\max} CS}{K_m \left(1 + \underbrace{\left(\frac{CI}{K_I} \right)}_{K_{mgör}} \right) + CS} \quad (2.6)$$

Lineweaver-Burk Eşitliğine göre inhibisyonlu ve inhibisyonlu olmayan enzimatik bir reaksiyon için substrat derişimine karşılık reaksiyon hızlarını grafiğe geçirilerek $1/K_m$ ve $1/K_{mgör}$ deneysel olarak belirlenebilir (Şekil 2.9).

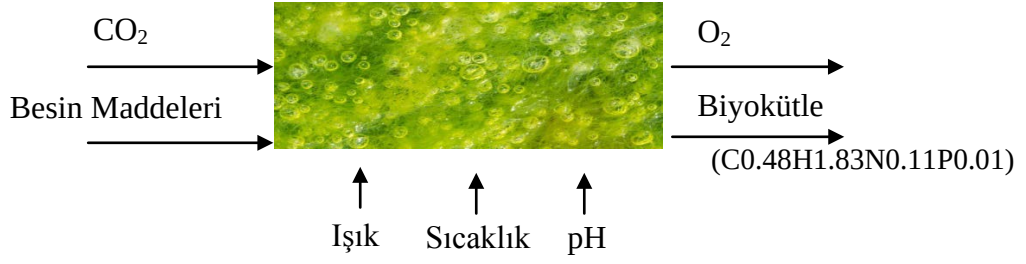


Şekil 2.9 Deneysel veriler kullanılarak inhibisyonlu ve inhibisyonlu Michaelis-Menten sabitlerinin belirlenmesi (Bisswanger 2008).

Gerçekleştirilen çalışmada substrat kaynağı olarak kullanılan CO₂'nin inhibisyon etkisi incelenmiş olmakla birlikte, algal çoğalma üzerine diğer bir inhibitörün fotosentetik proseste etkili olan, bu çalışmada olduğu gibi genellikle çoğalma ortamına gönderilen CO₂ seviyesini ayarlamak için kullanılan O₂ olduğu ve çoğalma ortamında birikimin önlenmesi gerektiği de unutulmamalıdır. Çözünmüş oksijenin glikolat metabolizmasını etkileyerek, mikroalgılal CO₂ kullanımı azalttığını ve buna bağlı olarak da çoğalma hızını düşürdüğünü gösteren çalışmalar bulunmakta olup bu durum genel olarak CO₂ miktarının çok düşük olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır (Ota vd. 2009). Gerçekleştirilen çalışmalarda çözünmüş O₂ miktarı incelenmemiştir.

2.5.5 Algal çoğalmayı etkileyen önemli faktörler

Algal çoğalma Şekil 2.10'da gösterildiği gibi pekçok faktörden etkilenebilmekte olup aşağıda en önemlilerinden bahsedilmiştir.



Şekil 2.10 Algal çoğalmayı etkileyen faktörler

2.5.5.1 Sıcaklık

Sıcaklık algal çoğalmayı en çok etkileyen parametrelerden biridir. Hücresel enzimlerin aktivitelerini ve reaksiyon hızlarını, besinlerin kullanımını, CO₂'nin tutulmasını ve bunlara bağlı olarak algal çoğalmayı etkilemektedir (Tan vd. 2009). Ayrıca CO₂'in sudaki çözünürlüğü de sıcaklık ile değişmektedir. Atmosferik basınç sabit kalıp sıcaklık arttığında CO₂'in kinetik hızının arttığı, sıvı yüzeyinden kolaylıkla atmosfere karışabildiği, buna bağlı olarak da çözünürlüğünün azaldığı bilinmektedir (Liu vd. 1998).

Yapılan çalışmalar her tür için optimum bir sıcaklık olduğunu, çoğalma hızının sıcaklık artışı ile birlikte arttığını ancak bu sıcaklık seviyesinden sonra fazla gelen sıcaklık nedeniyle çoğalma hızının azaldığını göstermektedir. CO₂ kaynağı olarak sanayi tesislerinin baca gazı kullanılacağı durumda ise baca gazı çıkış sıcaklığının yüksek olması nedeniyle sıcaklık toleranslı alglerin kullanımının soğutma maliyetini önemli ölçüde azaltacağı öngörülmektedir. Bu durumda yüksek sıcaklıklarda (42 - 75°C) çoğalabilen termofilik alg türlerinin kullanımı daha uygun olacaktır (Ono ve Cuello 2006).

Doktora tezi kapsamında çalışılan mezofilik alg (13 – 45°C çoğalan) türler ile çalışılmıştır. Bunlardan biri olan *Chlorella* için optimum çoğalma sıcaklığı 25°C - 30°C'dir. Bununla birlikte pek çok canlı da olduğu gibi alglerde de stres ortamında hücre içeriği değişiklik göstermekte ve meydana gelen ürünlerde artış gözlenmektedir. Converti vd. (2009) *Chlorella* sp. ile yaptıkları çalışmada sıcaklığın 30°C'den 25°C'ye düşürülmesi ile lipid içeriğinin arttığı gözlenmiştir. *Scenedesmus* sp. için ise 20-40°C

olan optimum sıcaklık aralığı yapılan çalışmalardan elde edilen farklı sonuçlara bağlı olarak daha genişir (Sanchez vd. 2008). Martinez vd. (1999) yaptıkları çalışmada *Scenedesmus obliquus* ile farklı sıcaklıklarda 20°C, 25°C, 30°C, 35°C yaptıkları çalışmada en yüksek çoğalma hızı olan 0.047 saat⁻¹ değerine 30°C’de ulaştıklarını belirtmişlerdir.

2.5.5.2 pH

Besi ortamının pH değeri mikroalglerin çoğalmasını ve çoğalma hızını büyük ölçüde etkilemektedir. Su ile reaksiyona girerek, sudaki karbon dengesi eşitlikleri (2.7-2.10) ile gösterileceği gibi karbonat ve bikarbonat gibi farklı formlarda bileşikler oluşturan CO₂ nedeniyle ortam pH’ı değişmektedir.



Mikroalglerin fotosentezi, yukarıdaki eşitliklerde gösterilen sudaki iyon değişimleri, sıcaklık gibi parametreler pH değişimine sebep olurlar. 2.5 bölümünde anlatıldığı gibi solunum sırasında açığa CO₂ çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu fazla CO₂ nedeniyle 2.4 Eşitliğinde gösterilen HCO₃⁻ dekompozisyonu inhibe olmakta ve pH değeri düşmektedir. Fotosentez sırasında ise ortamdaki CO₂ tüketildiği için ortam pH’ı yükselmektedir.

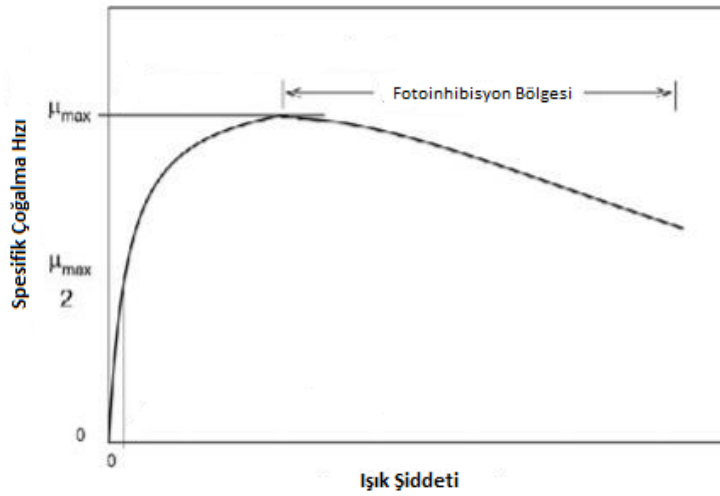
Literatür araştırmasında incelenen çalışmalar göstermektedirki mikroalglerin çoğalmasında optimum pH seviyeleri bulunmaktadır. Bu seviyelerin altına inildiğinde

ya da üstüne çıkıldığında çoğalma inhibi olmakta ve çoğalma hızı düşmektedir (Liu vd. 2006).

2.5.5.3 Işık

Bazı alglerin basit organik bileşikleri karbon ve enerji kaynağı olarak kullanarak çoğalabilmeleri yeteneklerine rağmen genel olarak baktığımızda enerjilerini ışıktan alan mikroalglerin, fotosentez mekanizmasını ve enzimatik aktivitelerini doğrudan etkilemesi nedeniyle ışık çoğalmayı belirleyici en önemli parametrelerden biridir.

Sıcaklık parametresinde olduğu gibi ışık için de bir optimum seviye vardır ve bu seviye aşıldığında algal çoğalma hızı düşer (Borowitzka 1998). Şekil 2.11’de gösterilen bu duruma fotoinhibisyon adı verilmektedir (Chisti 2007).



Şekil 2.11 Algal çoğalma üzerine ışık şiddeti etkisi (Chisti 2007)

Mikroalg kültür ortamında ışık kaynağı doğal ya da yapay olabilir. Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarda kontrolün daha kolay olmasından dolayı yapay aydınlatma tercih edilir. Yapay aydınlatma için genellikle floresan lambalar kullanılır. Mavi ya da kırmızı ışık spektrumu yayan floresanlar, fotosentez için kullanılan en aktif ışık spektrum aralığına sahip olduklarından tercih edilmektedir. *Aphanothece microscopica* Nægeli siyanobakterisi kullanılarak yapılan bir çalışmada biyokütle

üretimi ve CO₂ tutulmasının üzerine fotoperiodların etkisini araştırılmıştır. 4 mm kalınlıkta camdan yapılmış, iç çapı 7.5 cm, yüksekliği 75 cm kabarcık kolon fotobiyoreaktörde deneyler gerçekleştirilmiştir. Fotobiyoreaktör'ü aydınlatmak için fotoperiyod bölmesinde 16 adet paralel bağlı 20 W floresan gün ışığı tipi tüpler (General Electric, Brazil) ve periyotları belirlemek için de bir zamanlayıcı kullanılmıştır. Işık periyotları sırasıyla şu şekildedir; 0:24, 2:22, 4:20, 6:18, 8:16, 10:14, 12:12, 14:10, 16:8, 18:6, 20:4, 22:2, 24:0 (karanlık:aydınlık saat). Sürekli olarak CO₂ (%15) ile zenginleştirilmiş hava (1 vvm) ile havalandırma yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında ışık süresi azaldıkça doğrusal bir şekilde biyokütle üretimi ve CO₂ tutulması azalmıştır. En yüksek hacimsel çoğalma hızı 0.770 g L⁻¹ gün⁻¹ ve maksimum hücre derişimi 5.100 g L⁻¹ olarak belirlenmiştir. CO₂ tutma hızı 1.440 g L⁻¹ 0(k):24(a) ışık periyodunda gerçekleşmiştir (Jacob Lopes vd. 2008).

2.5.6 CO₂'in algler tarafından biyolojik olarak tutulması ve fotosentez

1990 yılı öncesine bakıldığında konuyla ilgili yapılan çalışma sayısı çok az olmakla birlikte günümüzde, karasal bitkilere göre daha yüksek fotosentetik dönüşüm verimine ve dolayısıyla daha yüksek büyüme hızına sahip alglerin enerji kaynağı olarak ve aynı zamanda CO₂ gideriminde alternatif olarak değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır. Japonya'da 1990-2000 yılları arasında CO₂'nin mikroalgler kullanılarak biyolojik olarak giderimi konulu ve Ministry of International Trade and Industry (MITI) tarafından desteklenen Research Innovative Technologies of the Earth (RITE) Programı ile yapılan çalışma sayısı ve destek miktarları çok hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Bu 10 yıllık süreçte Ar-Ge çalışmalarında özel 20 şirket ve Dünya'nın her yerinden çok sayıda araştırma enstitüsünün katılımıyla 250 milyon dolara yakın para harcanmıştır (Oonk ve Van Hermelen 2005).

Alglerin çoğalması ışık, sıcaklık, besin maddeleri başta olmak üzere çevresel faktörlerle sınırlanmıştır. Temel besin maddesi karbon kaynağıdır. Alglerin kuru kütle içeriğinin yaklaşık %45-50'si organik karbondan oluşmaktadır. Buradan da anlaşılağı gibi alglerin çoğalması için en temel besin maddesi karbondur. Teorik olarak bakıldığında 1

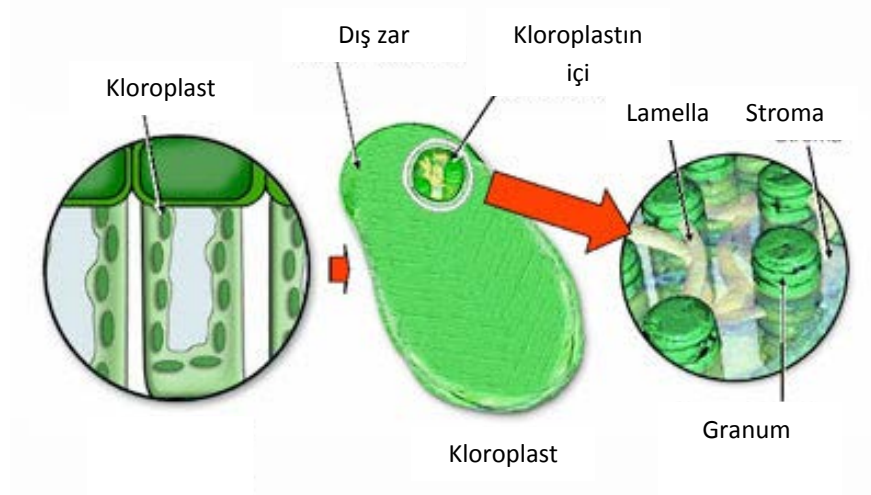
kg algal biyokütlenin oluşabilmesi için 1.83 kg CO₂'ye ihtiyaç olduğu görülmektedir (Doucha vd. 2005).

Algler güneş ışığından enerji alan ve bu enerjiyi absorblayabilen renk pigmentlerine sahiptir ve algleri diğer prokaryotik ve ökaryotik canlılardan ayıran en önemli özellikleri fotosentez yapabilmeleridir. Fotosentez klorofil taşıyan canlılarda ışık enerjisi kullanılarak organik bileşiklerin üretilmesidir. Klorofil molekülüne sahip ototrof canlılar dış ortamdan aldıkları CO₂ ve H₂O'yu, güneş enerjisinden yararlanarak (2.11) eşitliğinde gösterildiği gibi karbonhidratlara dönüştürürler (Carvalho vd. 2011). Oluşan bu karbonhidratlar ise solunum esnasında (2.12) eşitliğindeki şekilde yıkılarak CO₂ açığa çıkarır (Zhang 2009).



Algler ve fotosentez yapan diğer canlılar havadaki CO₂'yi, güneş enerjisi kullanılarak, nişasta ve diğer yüksek enerjili karbonhidratlara dönüştürür. Karbon kullanıldıktan sonra ortaya çıkan oksijen ise havaya bırakılır, daha sonra besine ihtiyaç duyduğunda bu karbonhidratlarda depolanan enerji kullanır.

Fotosentez kloroplastlarda gerçekleşir. Klorofil molekülü basit yapılı ototroflarda hücrede serbest halde bulunurken, yüksek yapılı ototroflarda (bitkilerde) kloroplast içinde bulunur. Kloroplastlar, iç içe geçmiş balonlara benzeyen yapılarıyla, doğanın yeşil rengini verirler. Bir hücrede bulundukları ortamdan iki zarla ayrılmış 40'a yakın kloroplast vardır. Kloroplast yapısı Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12 Kloroplast yapısı

Kloroplastlarındaki karbonik anhidraz enzimi CO_2 'nin HCO_3^- halinde taşınmasını ve daha sonra tekrar CO_2 'ye dönüştürülerek fotosentezde kullanılması sağlar (Botre vd 1991). Bilim adamları kloroplastların içinde gerçekleşen fotosentez olayını uzun bir kimyasal reaksiyon zinciri olarak tanımlamaktadırlar.

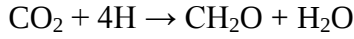
Fotosentez iki evreli bir olaydır;

1. Işık enerjisinin kullanıldığı, enerji dönüşümünün gerçekleştiği ışık tepkimeleri (Aydınlık evre). Bu evrede NADPH_2 ve ATP üretilir, O_2 açığa çıkar (2.13).



Aydınlık evre sonucunda ortaya çıkan enerji yüklü ATP ve NADPH molekülleri, karanlık evrede kullanılan karbondioksiti, şeker ve nişasta gibi besin maddelerine dönüştürürler.

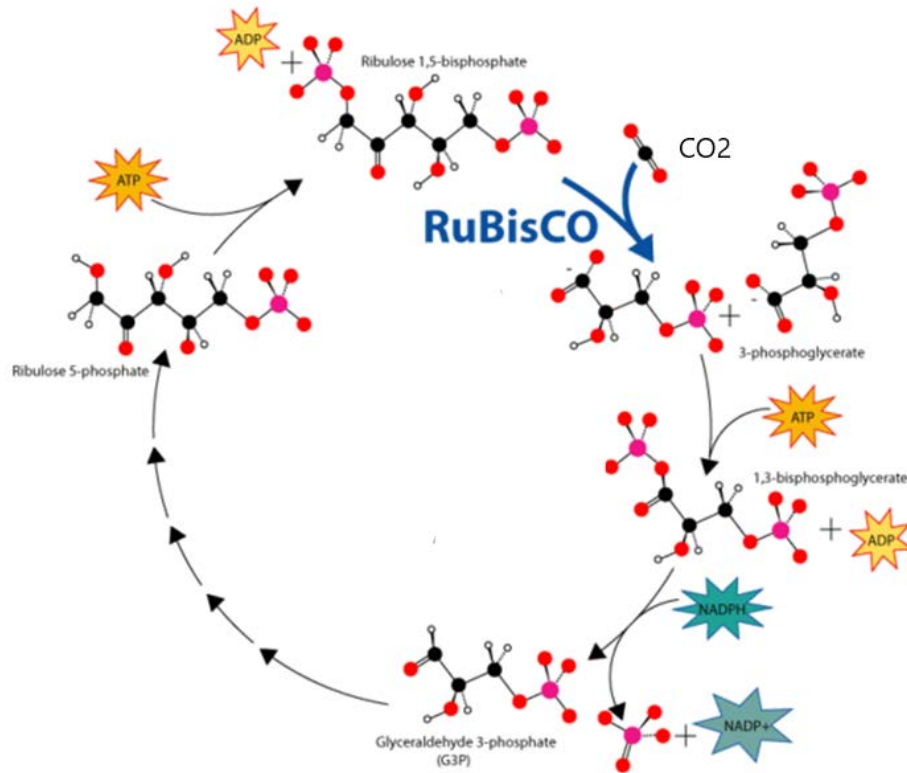
2. Karbondioksitin tepkimelere katıldığı karanlık evre. Bu evrede CO_2 redüklenerek glikoz üretilir. 1. evrede elde edilen kimyasal enerji kullanılarak CO_2 'den şeker gibi organik maddeler üretilir (2.14).



(2.14)

Algler fotosentezde uzun süren karanlık faz süresince karbondioksit açığa çıkarılır ve ortamda bulunan fazla karbondioksit bağli olarak da çoğalma hızları düşer. Algal çoğalmayı etkileyen parametrelere ve fotosentezin karanlık ve aydınlık faz aşamalarına bakıldığında aydınlatma periyodunun önemi ve bu periyotların kontrolü göze çarpmaktadır (Carvalho vd. 2011).

Karanlık evre dairesel bir reaksiyondur. Bu devre, sürecin devam edebilmesi için reaksiyonun sonunda yeniden üretilmesi gereken bir molekülle başlar. Kelvin devri de denilen bu reaksiyonda NADPH'yle bitişik olan elektronlar ve hidrojen iyonları ve ATP'yle bitişik olan fosfor kullanılarak glikoz üretilir. Karanlık evre reaksiyonu karbondioksit ihtiyacı duyar, karbondioksit molekülleri stromada, 5-RuBP adı verilen şeker moleküllerine bağlandıklarında 6-karbon molekülü oluştururlar ve böylece karanlık evre başlamış olur (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Kalvin döngüsü (<https://bio.libretexts.org>)

6-karbon molekülü kararsızdır ve hemen ayrılarak, iki tane 3-fosfoglisarat (3PG) molekülü ortaya çıkartır. Her iki moleküle de ATP tarafından fosfat eklenir ve bu işleme fosforilasyon denir. Fosforilasyon sonucunda iki bifosfoglisarat (BPG) molekülü oluşur. Bunlar NADPH tarafından parçalanır ve ortaya iki gliseral-3-fosfat (G3P) molekülü çıkar. Gliseral-3-fosfatın (G3P) bir kısmı kloroplastı terk ederek sitoplazmaya gider ve glikoz üretimine katılır, bir kısmı ise Kalvin döngüsü devam eder ve tekrar fosforilasyona uğrayarak devrin en başındaki 5-RuBP molekülüne dönüşür. Bir glikoz molekülü oluşturmak için gerekli olan G3P molekülünün üretilmesi için bu devrin 6 kez tekrarlanması gerekir. Fotosentezin bu aşamasında etkili olan karboksidismütaz (ribuloz 1,5 difostaz karboksilaz) adlı enzim asitleri ayrıştırır, oksitleme işlerini katalize eder. Kalan 5 RuBP molekülü sistemi yeniden başlatmak için gerekli olan madde ihtiyacını karşılayarak, kesintisiz bir reaksiyon zincirinin kurulmasını sağlamış olur. Karbondioksit, ATP ve NADPH mevcut olduğu sürece bu reaksiyon bütün kloroplastlarda devamlı olarak tekrarlanır.

2.5.7 Algial biyokütle içeriği

Genel olarak bakıldığında, algal biyokütle protein, karbohidrat ve lipidlerden oluşmaktadır (Hu 2004). CO₂ gideriminde kullanılan algal biyokütle yüksek lipid içeriğine sahiptir. Bütün algler lipid üretir ancak bazılarında bu oran %70'e kadar çıkabilir. Kuru ağırlığına göre %30 - %75 lipid içeren alglere *oilalg* adı verilir. Algler lipid içerikleri nedeniyle biyodizel üretiminde de en verimli kaynak olarak görülmektedir. Ortalama olarak mikroalgler kullanıldığında yağlı tohum ve bitki yağlarına göre 10 - 20 kat daha fazla biyodizel elde edilir (Gouveia ve Oliveira 2009).

Algler kısa zaman öncesine kadar daha çok hayvan yetiştiriciliğinde besin katkısı olarak üretilip değerlendirilmiş olmakla birlikte, yüksek lipid içerikleri nedeniyle biyokütle enerjisi araştırmaları sonucu, fosil yakıtlara bağımlılığımızı azaltacak, umut vadeden bir enerji kaynağı olarak görülmeye başlanmıştır.

Alglerin lipid ve yağ asidi içeriği kültür koşullarına çok bağlıdır. Algal lipidlerin önemi nedeniyle lipid üretimini arttırmaya yönelik yapılan çalışmalar literatürde yerlerini

almıştır. Widjaja vd. (2009), *Chlorella vulgaris* ile gerçekleştirdikleri çalışmada lipid üretimi üzerine CO₂ derişimi, azot kısıtlaması, kültürün hasat zamanı ve ekstraksiyon metodlarının etkisi incelenmiştir. Çözücünün uzaklaştırıldığı sıcaklığın sadece lipid içeriğini değil, lipid miktarını da etkilediği gözlenmiştir. Optimum sıcaklık olarak 60°C belirlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklar TG miktarında düşüşe neden olmaktadır. Biyokütlenin öğütülmesi yeterince yapıldığında ultrasonifikasyona gerek olmadığı görülmüştür. Lipid içeriğini arttırmak için gerçekleştirilen azot kısıtlamasının aynı zamanda lipid bileşimini de değiştirdiği, azot kısıtlılığından dolayı çoğalma yavaş gerçekleşirken lipid miktarının arttığı gözlenmiş ve yüksek lipid içeriği için en uygun hasat zamanının belirlenmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır. CO₂ derişimindeki artış mikroalgal çoğalmayı etkilediği gibi lipid üretimini de olumlu yönde etkilemektedir. Algdeki yağ ekstakte edildikten sonra kalan biyokütle yüksek oranda protein içerir ve hayvanlar için yem olarak kullanılabilecek niteliktedir (Demirbaş 2011).

2.6 Biyodizel

1900 yılında dizel teknolojisinin mucidi Rudolf Diesel, biyodizel için, “Dizel motorlarda bitkisel yağ kullanımı şimdilik bir hayal gibi görünebilir, ama gelecekte petrolün yerini alacak” demişti. İlk dizel motorlar piyasaya çıktığında gerçekten de bitkisel yağlarla çalışacak şekilde tasarlanmıştı. Ancak bitkisel yağların o gün için yüksek maliyetleri, ekonomileri o zamanın ucuz ve alternatif enerjisi olan petrole yöneltmişti. Petrol fiyatlarının hızla yükselişi ve fosil yakıtların çevreye zararları bitkisel yağların kullanılarak biyodizel üretimini gündeme getirdi. Biyodizel, kolza (kanola), ayçiçek, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinden ve alglerden elde edilen yağların veya hayvansal yağların bir katalizatör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile (metanol ve ya etanol) reaksiyonu sonucunda açığa çıkan ve yakıt olarak kullanılan bir üründür. Evsel kızartma yağları ve hayvansal yağlar da biyodizel hammaddesi olarak kullanılabilir. CO₂ gideriminde kullanılan mikroalg biyokütlesi ise yüksek yağ içeriği nedeniyle biyodizel üretiminde kullanılabilir. Çizelge 2.1’de bazı mikroalg türlerinin lipid içerikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı mikroalg türlerinin lipid içeriği ve lipid üretilebilirliği (Zang vd. 2014)

	Lipid İçeriği (% kuru ağırlık)	Lipid Üretilebilirliği mgL⁻¹gün⁻¹
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	16.49	56.07
<i>Ankistrodesmus fusiformis</i>	20.66	49.58
<i>Botryococcus braunii</i>	44.97	112.43
<i>Botryococcus terribilis</i>	49.00	98.00
<i>Scenedesmus obliquus</i>	16.73	26.77
<i>Chlorella vulgaris</i>	28.07	204.91

Literatürde yapılan çalışmalar genel olarak alglerin karbondioksit kullanılarak çoğaltılması ve sonrasında algal biyokütlenin biyodizel üretiminde kullanılmasına yöneliktir. Algal biyokütlenin biyodizel üretiminde kullanılması önemli olmakla birlikte ilk aşama olan algal CO₂ giderimi atmosferdeki CO₂ seviyesini dengelemek için kullanılabilecek oldukça etkili bir yöntemdir. Tez kapsamında elde edilen bulgular biyodizel üretimi ile ilgili yapılabilecek çalışmalara ışık tutmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında *Chlorella vulgaris* 211-11b, *Spirulina maxima* 49.88 ve *Scenedesmus obliquus* 276-3d algleri ile çalışılmaya başlanmış ancak yapılan ara değerlendirmelerin sonunda çalışmalara *Scenedesmus obliquus* 276-3d ile devam edilmiştir.

3.1 Kimyasallar

Bu araştırmada kullanılan, besi ortamlarının hazırlanmasında ve lipid ekstraksiyonu aşamasında kullanılan analitik saflıkta kimyasallar Merck, Fluka ve Sigma Aldrich'den temin edilmiştir. Saf (>99.9) CO₂ tüpleri HatGrup tarafından sağlanmıştır.

3.2 Alglerin Çoğaltılması

3.2.1 Kullanılan alglerin seçimi ve çoğalma koşulları

Doktora tez çalışmasında kullanılan *Chlorella vulgaris*, *Spirulina maxima* ve *Scenedesmus obliquus* algleri SAG Culture Collection – Almanya'dan temin edilmiştir.

Katı besi ortamında gelen *Chlorella vulgaris* 211-11b, *Spirulina maxima* 49.88 ve *Scenedesmus obliquus* 276-3d algleri önce 10 mL sıvı ortama açılmış, önce 250 mL lik erlenlerde toplam 150 mL çalışma hacmine, ardından ise 500 mL lik erlenlerde 350 mL çalışma ortamına aktarılmıştır.

Çalışılan türler olan *Chlorella vulgaris*, *Spirulina maxima* ve *Scenedesmus obliquus* için literatürde verilen optimum sıcaklıklar kullanılmıştır. Çalışma ortamı sıcaklığı kalibrasyonu yapılmış olan Innocal Dijital Baramotre ile ölçülmüştür. Gerçekleştirilen deneylerde, aksi belirtilmedikçe ortam sıcaklığı $28 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur.

3.2.2 Besi ortamının hazırlanması

Sp. maxima için Zarrouk besi ortamı, *Chlorella vulgaris* ve *Scenedesmus obliquus* için ise BG11 besi ortamı kullanılmıştır. Besi ortamına aktarılan algler $100 \mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$ ışık şiddetinde ve sürekli aydınlatma ile $28 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de deneylerde kullanıma hazır hale getirilmişlerdir.

Besi ortamlarının pH değerleri 1 M NaOH ve 1 M H₂SO₄ çözeltileri ile ayarlanmıştır. Ortamlar 121°C, 20 dk otoklavlanarak sterilize edilmiştir.

Kullanıma hazır ortamlar +4°C'de buzdolabında kullanılıncaya kadar muhafaza edilmişlerdir. Zarrouk ve BG 11 besi ortamlarının içerikleri sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Zarrouk Besi Ortamı

Bileşen	g L ⁻¹
NaNO ₃	2.5
NaHCO ₃	16.8
K ₂ HPO ₄	0.5
K ₂ SO ₄	1.0
MgSO ₄ .7H ₂ O	0.2
CaCl ₂ .7H ₂ O	0.04
FeSO ₄ .7H ₂ O	0.01
EDTA	0.01
Çözelti A	1 ml
Çözelti B	1 ml
Çözelti A	g L⁻¹
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ . 4 H ₂ O	1.81
ZnSO ₄	0.22
CuSO ₄	0.08

Çizelge 3.2 BG 11 Besi Ortamı

Bileşen	g L⁻¹
NaNO ₃	150
Na ₂ HCO ₃	2
K ₂ HPO ₄	4
MgSO ₄ . 7 H ₂ O	0.15
CaCl ₂ . 7 H ₂ O	3.6
Citric Acid. 7 H ₂ O	0.6
Ferric Ammonium Citrate	0.6
EDTA	0.1
Çözelti A	1 ml
Çözelti A	g L⁻¹
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ . 4 H ₂ O	1.81
ZnSO ₄	0.22
CuSO ₄	0.08
Co(NO ₃) ₂ . 7 H ₂ O	0.01

3.3 Çalışmalarda Kullanılan Kesikli Sistem ve Fotobiyoreaktör

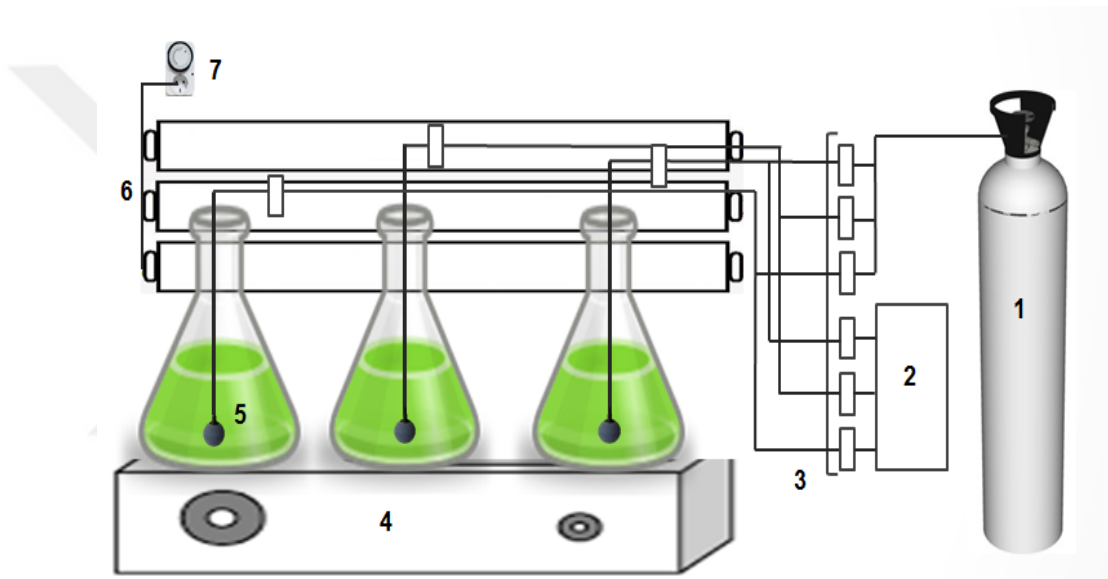
3.3.1 Kesikli deney sistemi

Tasarlanan kesikli deney sistemi Şekil 3.1’de görülmektedir. Sistemdeki CO₂ saf karbondioksit tüplerinden, gerekli hava ise hava pompası ile verilmiştir. 3 adet CO₂, 3 adet hava için olmak üzere toplam 9 adet akış ölçer içeren sistemde yüksek basınca dayanıklı polietilen hortumlar, gaz vanaları ve diğer gaz bağlantı aparatları mevcuttur. CO₂ tüpü çıkışındaki selenoid valf karanlık evrede ışıqla birlikte CO₂ akışının da kapatılmasını sağlamaktadır.

Aydınlatma, için üzerinde 3 adet TLD Super 80 32 W floresans lamba bulunan bir panel yaptırılmıştır. Bu 3 adet lamba ayrı ayrı açılıp, kapatılabilmektedir. Aydınlatma periyotlarının kontrolü açısından zaman ayarlı priz kullanılmıştır. Aydınlatma periyodu

etkisi dışındaki bütün deneyler 18:6 (aydınlık:karanlık) periyotlarda $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık kontrolü için sıcaklık ısıtmalı bir karıştırıcı sistemde mevcut olup, kalibrasyonlu bir termometre kullanılarak günde 1 kez ortamların sıcaklıkları ölçülmüştür. Aksi belirtilmedikçe bütün deneyler kullanılmakta olan algler için literatür araştırması sonucunda, tespit edilen en uygun sıcaklık olan $28 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Kesikli deney sistemi (1: CO₂ gaz tüpü, 2: hava pompaları, 3: akış ölçerler (toplamda 9 adet), 4: karıştırıcı ısıtıcı, 5: gözenekli gaz dağıtıcı, 6: floresan lamba, 7: zaman ayarlı priz)

3.3.2 Kabarcık kolon fotobiyoreaktör

Optimum koşulların belirlenmesi ile ilgili çalışmalar kesikli sistemde gerçekleştirilmiştir. Optimum koşulların belirlenmesinin ardından yarı kesikli kabarcık kolon fotobiyoreaktörde çalışmalara devam edilmiştir. Algal çoğalma süresince her gün ortamdan hücre yoğunluğu ölçmek amacıyla alınan 10 mL örnek yerine aynı miktarda besi ortamı ilave edilmiştir.

Aydınlatma üzerinde 3 adet TLD Super 80 36 W gümüşü floresans lamba bulunan panel kullanılarak sağlanmıştır. Kabarcık kolon fotobiyoreaktördeki deneyler 18:6 (aydınlık:karanlık) periyotlarda $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir.

Akış hızı 3 vvm olarak ayarlanmış olup, akış hızı Cole – Parmer akış hızı ölçer ile takip edilmiştir.

3.4 Analiz Yöntemleri

3.4.1 Algal çoğalma

Hücre çoğalması, Hitachi U-1800 cihazı ile spektrofotometrik olarak, 682 nm (OD_{682})’deki absorbans ölçülerek takip edilmiştir. Bütün analizler 2 tekrarlı yapılmış olup sapma değerleri ile birlikte sonuçlar verilmiştir. Çoğalmanın takip edilmesi her gün alınan örnekler ile yapılmıştır.

Bu amaçla algal çoğalma ortamından bir miktar örnek alınarak belli oranlarda (0.25, 0.5, 1, 1.25, 1.5, 1.75 mL m.o/3 mL) alg içermeyen büyüme ortamı ile seyreltilerek UV spektroskopi de 682 nm’deki absorbans ölçülmüştür.

Kuru ağırlık, alg üretim ortamından 50 mL örnek alınarak Whatman filtreden süzülüp 3 saat 105°C ’de kurutulmasıyla belirlenmiştir. Bu ağırlık bize 50 mL örnekteki biyokütle miktarını vermekte olup buradan 1 mL deki algal biyokütle miktarına geçilmiş ve UV spektroskopisinden alınan sonuçlarla birlikte kalibrasyon (Absorbans – Derişim) grafiği çizilmiştir (EK-1).

3.4.2 Biyokütle içeriği

Mikroalgal çoğalma durduğunda alınan örnekler ile biyokütle analizi gerçekleştirilmiştir. Biyokütle içerisindeki karbon miktarı ODTÜ Merkez Laboratuvar’da bulunan Leco (CHNS) Elementel Analiz Cihazı ile belirlenmiştir.

3.4.3 Gaz analizleri

Sisteme giriş ve çıkıştaki gaz kompozisyonu ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi'nde bulunan Gaz Kromatografi Cihazı ile analiz edilmiştir. Örnek analiz kromatogramı EK-7'de verilmiştir.

Kullanılan GC cihazı Çizelge 3.3'de özelliklere sahiptir;

Çizelge 3.3 Gaz analizlerinin gerçekleştirildiği GC analizi cihaz koşulları

Cihaz	Gaz Kromatografi Cihazı
Dedektör	Termal İletkenlik Dedektörü (TCD) – Alev İyonlaştırma Dedektörü (FID)
Kolonlar	Al ₂ O ₃ – MolSieve - Proplot Q
Taşıyıcı Gaz	Helyum
Sıcaklık Programı	İzotermal

3.4.4 Yağ asidi metil esteri (YAME) analizleri

Yağ asidi metil esteri analizleri ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi'nde bulunan Gaz Kromatografi Cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan GC cihazı Çizelge 3.4'de verilen özelliklere sahiptir;

Çizelge 3.4 YAME analizlerinin gerçekleştirildiği GC analizi cihaz koşulları

Cihaz	Agilent 6890 Gaz Kromatografi Cihazı
Dedektör	Alev İyonlaştırma Dedektörü (FID)
Kolon	DB-23 (60 m*0.25 mm*0.25 µm)
Taşıyıcı Gaz	Helyum
Enjeksiyon Sıcaklığı	250°C
Fırın Sıcaklık Programı	70 °C de 2 dk, 8 °C/dk artış ile 230°C, 230°C de 20 dk

Yağ asidi metil esteri piklerinin yerlerini belirlemek için sertifikalı Supelco 37 Bileşenli YAME Karışımı kullanılmıştır. Ayrıca analiz Shimadzu GC-MS Cihazı ile tekrarlanmıştır (1 µL split (2:1) enjeksiyon, 30 m*0.25 mm*0.15 mm Agilent DB-23 kolon, enjeksiyon sıcaklığı 240°C, taşıyıcı gaz Helyum).

3.4.5 Işık şiddeti ölçümü

Deney setlerindeki kullanılan ışık şiddeti LX lüx metre ile ölçülmüştür. LX-1108 ile lüx birimi ile gerçekleşen ölçümler $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PPF) birimine çevrilmiştir. Bu birim çevirme işleminde ışık kaynağının cinsine bağlı olarak bir katsayı kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda kullanılan katsayı (10 PPF = 540 lüx) literatürde gün ışığı veren ışık kaynakları için verilmiş olan değerdir (Thimijan vd. 1982).

3.5 Hesaplamalar

Mikroalgal kuru biyokütlenin yaklaşık %50'sini karbon meydana getirmektedir (Sánchez Mirón vd. 2003). Bu karbonun tamamı tutulmuş olan karbondur. Bu durumda 100 g algal biyokütlenin 183 g CO₂ tuttuğu kabul edilebilir. Buna göre Tutulmuş CO₂ miktarı ve diğer kinetik parametreler aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Mikroalgal biyokütlenin literatürde geçen tipik formülü CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01} şeklindedir (Chisti 2007).

OD_{682nm} – Algal Biyokütle Derişim grafiği Eşitliği

$$\text{Kuru ağırlık (gL}^{-1}\text{)} = a \times \text{OD}_{682 \text{ nm}} + b \quad (3.1)$$

a,b : Kalibrasyon eğrisi Eşitliğinden gelen katsayılar

$$\text{Tutulmuş CO}_2 \text{ miktarı (gL}^{-1}\text{)} = 1.83 \times \text{Kuru ağırlık (gL}^{-1}\text{)} \quad (3.2)$$

$$\text{CO}_2 \text{ tutma hızı (R}_{\text{CO}_2}\text{, gL}^{-1}\text{gün}^{-1}\text{)} = 1.83 \times P \quad (3.3)$$

3.3 Eşitliğindeki algal prodüktivite (P , $\text{gL}^{-1}\text{gün}^{-1}$) ise aşağıda verilen 3.4 Eşitliği ile hesaplanmıştır (Naderi vd. 2015).

$$P = \frac{X_2 - X_1}{\Delta t} \quad (3.4)$$

x_1 : t_1 deki algal biyokütle, gL^{-1}

x_2 : t_2 deki algal biyokütle, gL^{-1}

Δt : x_1 ve x_2 nin elde edildiği zamanlar arasındaki fark, gün

Üstel çoğalma bölgesinden elde edilen veriler kullanılarak, spesifik çoğalma hızı (μ , gün^{-1}) 3.5 Eşitliği ile hesaplanmıştır (Naderi vd. 2015).

$$\mu_{\text{net}} = \frac{\ln(x_2/x_1)}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.3’de CO_2 tutma hızının nasıl hesaplanabileceği ile ilgili literatürde sıklıkla kullanılan Eşitlik verilmiştir ancak bu eşitlik bize yaklaşık bir değer vermektedir. Daha kesin sonuçlar için algal biyokütlenin karbon içeriği ölçümü yapıldığında aşağıda verilen 3.6 numaralı eşitlik kullanılmaktadır (Naderi vd. 2015).

$$R_{\text{CO}_2} = C \times P \times (M_{\text{CO}_2}/M_C) \quad (3.6)$$

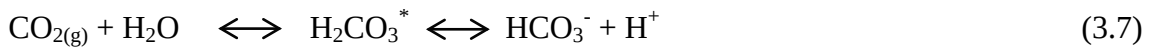
C : Biyokütlenin karbon içeriği, %

M_C : Karbon molekül ağırlığı, (12 g mol^{-1})

M_{CO_2} : Karbondioksit molekül ağırlığı (44.01 g mol^{-1})

P : Biyokütle üretilebilirliği, $\text{gL}^{-1}\text{gün}^{-1}$

Aşağıda verilen eşitliklere göre algal çoğalma ortamındaki çözünmüş CO_2 miktarı H_2CO_3^* , HCO_3^- ve CO_3^{2-} nin toplanmasıyla hesaplanabilmektedir (Hill 2006).



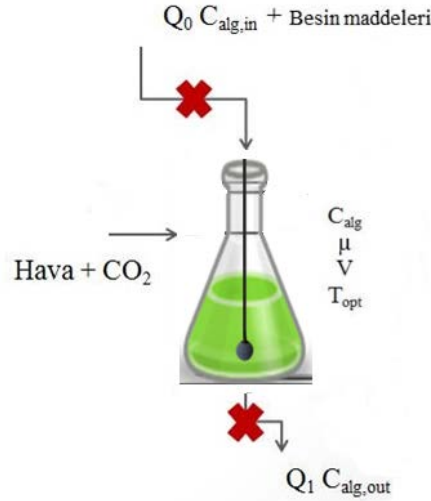


HCO_3^- ün belirlenmesi için doğrudan bir analiz yöntemi bulunmamaktadır. Doktora çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde ortam pH'ı düzenli olarak takip edilmiş ve HCO_3^- miktarı aşağıdaki Eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Bu teorik hesaplama yöntemine literatürde pekçok çalışmada karşılaşılmaktadır (Szep vd. 2017).

$$\text{HCO}_3^- = 10^{-11.24 + \text{pH}} \text{ (eq L}^{-1}\text{)} \quad (3.9)$$

Kesikli sistemde algal kütle denklği (Şekil 3.2) aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur;

- o Kesikli sistemde tam karışma vardır.
- o Gaz kabarcıklarının boyutu sabittir.
- o Algal spesifik çoğalma hızı inorganik karbon derişimi ile bağlantılıdır.
- o Çoğalma ortamına alg girişı ve çıkışı bulunmamaktadır.
- o Çoğalmayı etkileyen sıcaklık, ışık gibi parametreler deneyler süresince sabittir.



Şekil 3.2 Kesikli çoğalma ortamı kütle dengesi

$$Q_0 C_{alg,in} - Q_1 C_{alg,out} + rV = V \frac{d[C_{alg}]}{dt} \quad (3.10)$$

$$Q_0 = 0 \quad (3.11)$$

$$Q_1 = 0 \quad (3.12)$$

V = Çoğalma ortamı hacmi, sabit

$$r = \mu C_{alg} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.10 ve 3.13 birleştirildiğinde çoğalma ortamındaki algal kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir (3.14).

$$\frac{d[Calg]}{dt} = \mu C_{alg} \quad (3.14)$$

Doktora tezi kapsamında algal çoğalma ortamında kullanılan kullanılan substrat toplam inorganik karbondur (TIK). İnorganik karbon çoğalma ortamındaki çözünmüş CO_2 olarak verilmiştir. Hücrelerin inorganik karbonu kullanabilmeleri için inorganik karbon sıvı fazda çözünmüş olmalıdır. Çoğalma ortamına sürekli olarak sabit akışta Hava - CO_2 beslemesi vardır. Sıvı fazdaki CO_2 denklığı aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\text{Gaz fazdan aktarılan } CO_2 - \text{Hücrelerin Kullandığı } CO_2 = \text{Birikim} \quad (3.15)$$

Ortamdaki toplam inorganik karbon dinamiği oksijen aktarım hızına benzer şekilde aşağıdaki eşitlikle verilebilir (Kargı ve Shuler 1997);

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = k_L a (C_{CO_2}^* - C_{CO_2}) - q_{CO_2} C_{alg} \quad (3.16)$$

$$q_{CO_2} = \frac{\mu}{Y_{Calg/CO_2}} \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.16 ve 3.17 birleştirildiğinde toplam inorganik karbon denklığı aşağıdaki gibi yazılabilir (3.18).

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = k_{La} (C_{CO_2}^* - C_{CO_2}) - \frac{\mu}{Y_{Calg/CO_2}} C_{alg} \quad (3.18)$$

Toplam inorganik karbonun sıvı fazda birikimi ihmal edilebilir.

$$k_{La} (C_{CO_2}^* - C_{CO_2}) = \frac{\mu}{Y_{Calg/CO_2}} C_{alg} \quad (3.19)$$

$$Y_{Calg/CO_2} = \frac{Calgt - Calg_0}{CCO_{2t} - CCO_{20}} \quad (3.20)$$

Bu durumda eşitlik 3.14 ve 3.19 birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir (3.21).

$$k_{La} (C_{CO_2}^* - C_{CO_2}) Y_{Calg/CO_2} = \frac{d[Calg]}{dt} \quad (3.21)$$

Yukarıda verilen 3.21 eşitliği doktora tez çalışmaları kapsamında kütle aktarım katsayısının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Spesifik çoğalma hızı (μ), çoğalma ortamı bileşimi, sıcaklık, pH ve diğerleri gibi farklı parametrelere bağlıdır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, metabolik reaksiyon hızı sınırlamaları nedeniyle, çoğalma hızının belirli bir maksimum değerin üzerine (μ_{max}) çıkamayacağını göstermiştir. Monod'a göre (1949) kısıtlayıcı parametrenin substrat olduğunu da gösteren aşağıdaki eşitlikle çoğalma hızı belirtilebilir (3.22).

$$\mu = \frac{\mu_{max} CS}{K_s + CS} \quad (3.22)$$

Algal biyokütle içerisindeki yağ oranı gravimetrik olarak 3.23 Eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$\%Algal\ Yağ\ Miktarı = \frac{X_{alg} - X_{yağ}}{X_{alg}} * 100 \quad (3.23)$$

3.6 İstatistiksel Analiz

Sıcaklık, ışık şiddeti, pH gibi araştırılan parametrelerdeki değişimlerin algal çoğalmayı ne derecede etkilediğini istatistiksel olarak değerlendirebilmek amacıyla tek yollu ANOVA Testi kullanılmıştır. İstatistiksel analiz güven aralığı %95'te gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar arasındaki farkın belirgin olabilmesi için 0.05 olan p olasılık değeri Fischer'in varyans oranı olan F değerinden küçük olmalıdır. Aksi durumlarda aradaki fark istatistiksel olarak fark yaratacak kadar anlamlı değildir.

Her ölçüm mümkün olduğu kadarıyla iki tekrarlı yapılmış standart sapmalar MS Excel programı ile hesaplanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Algal Çoğalma Üzerine Farklı Parametrelerin Etkisinin Araştırılması

4.1.1 *S. obliquus*, *Chlorella vulgaris* ve *Spirulina maxima* çoğalma eğrisi

Scenedesmus obliquus - 276-3d, *Spirulina maxima* – 49.88 ve *Chlorella vulgaris* - 211-11b çoğalma eğrilerini oluşturmak için, algal çoğalma ortamından bir miktar örnek alınarak belli oranlarda (0.25, 0.5, 1, 1.25, 1.5, 1.75 mL m.o/3 mL) alg içermeyen büyüme ortamı ile seyreltilmiş ve UV spektroskopisi de 682 nm'deki absorbans ölçülmüştür.

Kuru ağırlık ise, 50 mL gerçekleştiği çoğalmanın besisi ortamının alınarak Whatman filtreden süzülüp 3 saat 105°C'de kurutulmasıyla belirlenmiştir. Bu ağırlık 50 mL örnekteki biyokütle miktarını vermekte olup, buradan 1 mL deki algal biyokütle miktarına geçilmiş ve UV spektroskopisinden alınan sonuçlarla birlikte kalibrasyon (Absorbans – Derişim) grafiği çizilmiştir (EK-1). Grafiklerden elde edilen kalibrasyon Eşitlikleri (4.1, 4.2, 4.3) aşağıda verilmiştir;

$$C_{alg} = 2.43OD_{682} + 0.06 \quad R^2 = 0.99 \text{ (} \textit{Scenedesmus obliquus} \text{ - 276-3d)} \quad (4.1)$$

$$C_{alg} = 0.42OD_{682} + 0.01 \quad R^2 = 0.99 \text{ (} \textit{Spirulina maxima} \text{ – 49.88)} \quad (4.2)$$

$$C_{alg} = 2.45OD_{682} - 0.05 \quad R^2 = 0.99 \text{ (} \textit{Chlorella vulgaris} \text{ - 211-11b)} \quad (4.3)$$

Kullanılan türler arasında en hızlı çoğalma *S. obliquus* 276-3d'ta gözlenmiş olup çoğalma 17. gün tamamlanmıştır. En uzun sürede çoğalan ise 21 gün ile *Spirulina maxima* 49.88'dır.

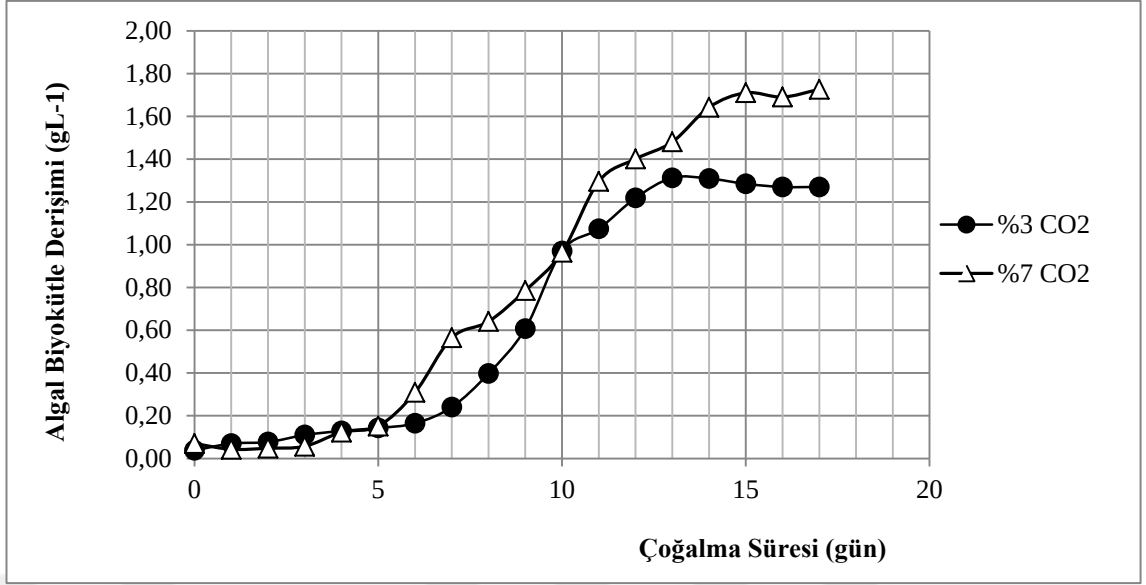
4.1.2 *Scenedesmus obliquus* 276-3d, *Chlorella vulgaris* 211-11b ve *Spirulina maxima* 49.88 çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisi

Algal çoğalma ve CO₂ giderimi üzerine CO₂ etkisinin incelendiği çalışmada, ortama hava ile birlikte CO₂ 18:6 aydınlık periyotta beslenmiştir. Farklı CO₂ derişimleri (%3, %7, %12, %20, %25) hazırlamak için CO₂ % 99.9 saflıkta gazı ve ortam havası kullanılmıştır. Kültür ortamına sürekli olarak 3 vvm akış hızında besleme yapılmış ve gözenekli bir gaz dağıtıcı kullanılarak erlen tabanından kabarcıklandırma yapılarak havalandırma yapılmıştır. CO₂'nin hava ile gönderilmesinin sebebi çoğalma ortamına gönderilen CO₂ miktarını seyrelterek istenilen miktarı ayarlamaktır.

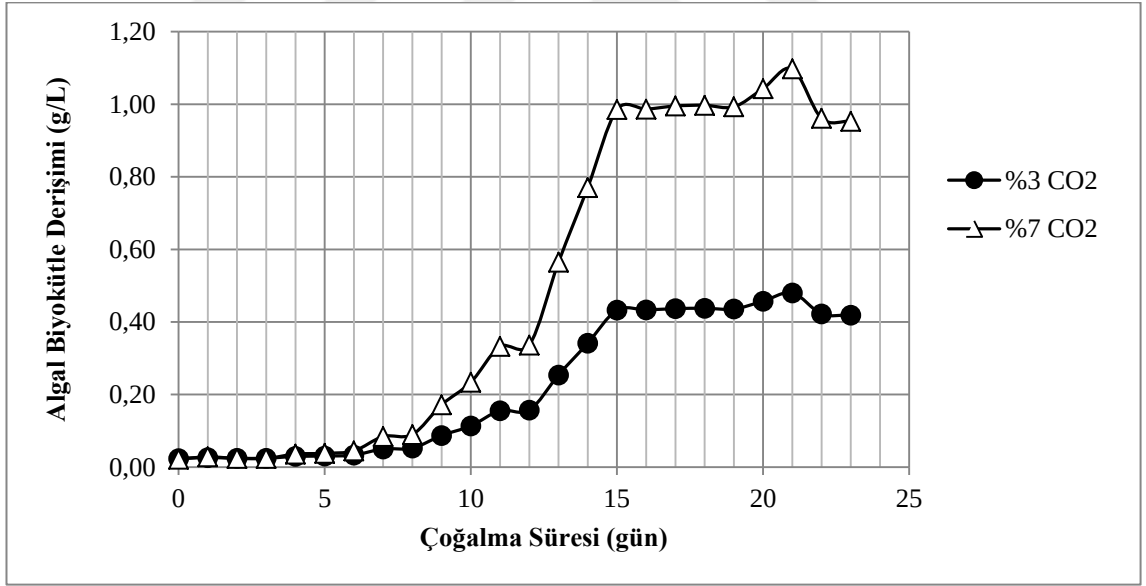
CO₂, algal fotosentez için karbon kaynağı olarak kullanılır ancak hücre alımından önce gaz fazından sıvı faza aktarılması gerekir. CO₂ beslenmesi ile birlikte algal metabolizma hızlanmakta olup, ayrıca hava-CO₂ karışımı ile karıştırma sağlanarak alglerin ışığa daha çok maruz kalmalarını sağlanmaktadır.

Doktora tez çalışmalarının ilk aşamasında, 3 tür için de algal çoğalma üzerine CO₂ miktarı etkisi incelenmiş ve %3 ve % 7 CO₂ oranlarında deney setleri gerçekleştirmiştir. Besi ortamından her defasında 2 noktadan ölçüm alınarak sonuç olarak iki ölçümün ortalaması verilmiştir. Örnek almaya çoğalma duraklamaya ya da azalmaya başlayana kadar devam edilmiştir. CO₂ miktarına bağlı olarak *Scenedesmus obliquus* - 276-3d, *Spirulina maxima* – 49.88 ve *Chlorella vulgaris* - 211-11b çoğalması sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

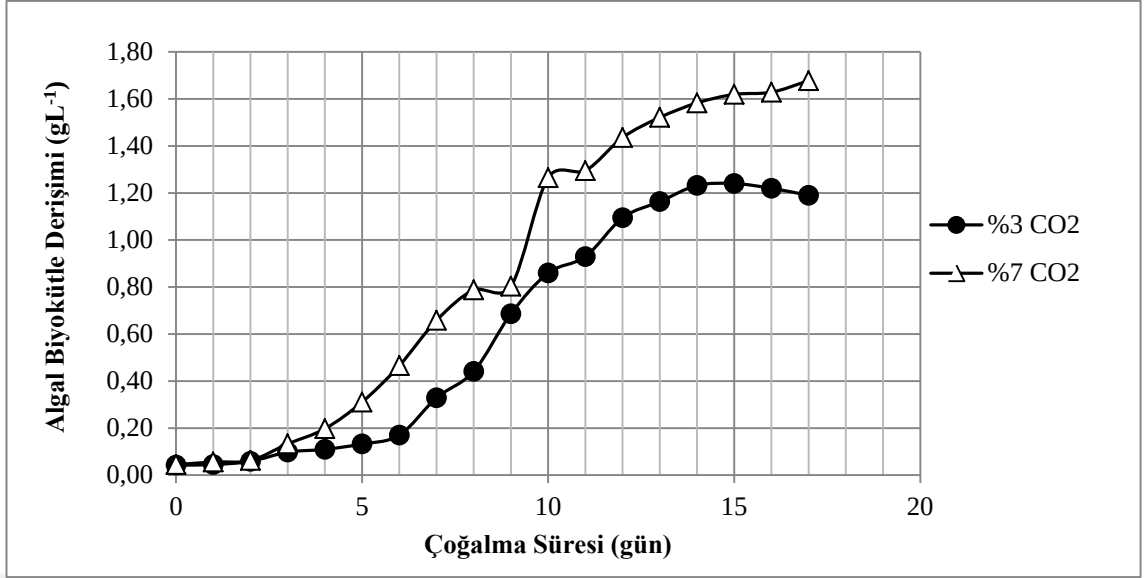
Algal çoğalma ortamına beslenen %3 ve %7 CO₂ oranları için hesaplanan $\ln(X/X_0)$ değerleri çoğalma süresine karşılık Şekil 4.4 ve 4.5'de gösterilmektedir. Üstel çoğalma bölgesi verileri kullanılarak spesifik çoğalma hızı (μ , gün⁻¹) 3.5 Eşitliği ile hesaplanmıştır.



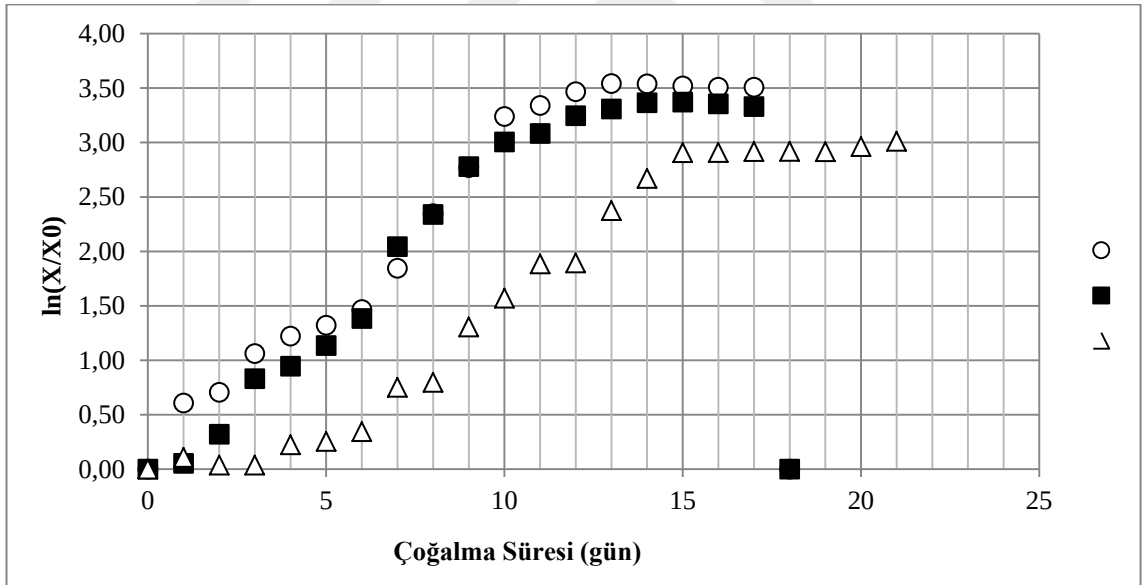
Şekil 4.1 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalma eğrisi (● : %3 CO₂ : %97 Hava, Δ: %7 CO₂ : %93 Hava - 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)



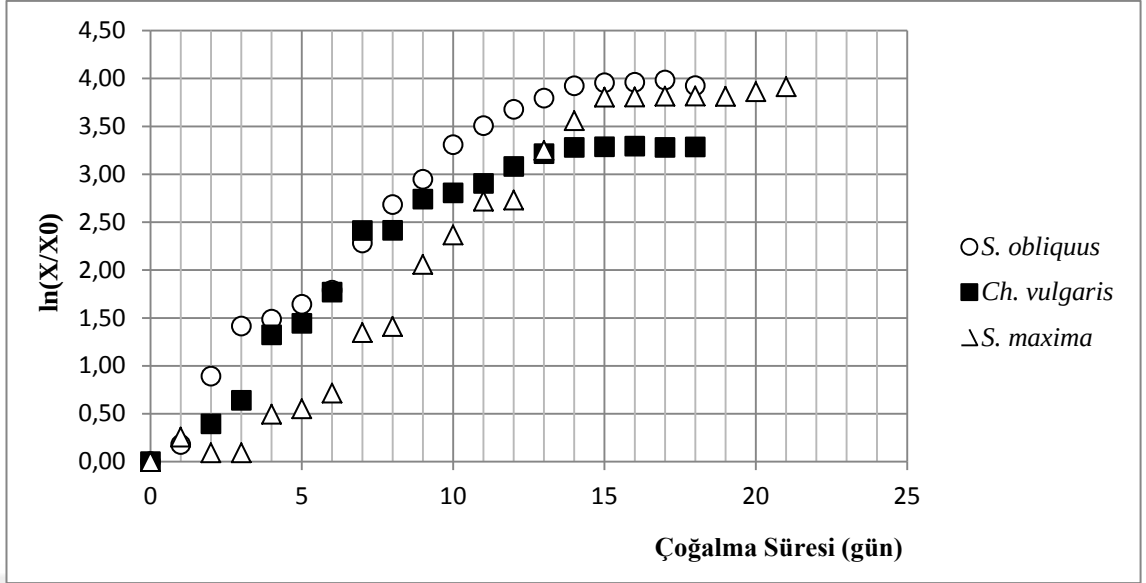
Şekil 4.2 *Spirulina maxima* 49.88 çoğalma eğrisi (● : %3 CO₂ : %97 Hava, Δ: %7 CO₂ : %93 Hava - 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 6)



Şekil 4.3 *Chlorella vulgaris* 211-11b çoğalma eğrisi (● : %3 CO₂ : %97 Hava, Δ: %7 CO₂ : %93 Hava - 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)



Şekil 4.4 $\ln(X/X_0)$ - Çoğalma süresi (○: *Scenedesmus obliquus*, Δ : *Spirulina maxima*, □ : *Chlorella vulgaris* - %3 CO₂, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)



Şekil 4.5 $\ln(X/X_0)$ – Çoğalma süresi (○: *Scenedesmus obliquus*, △: *Spirulina maxima*, □: *Chlorella vulgaris* - %7 CO₂, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)

Çoğalma ortamına %3 CO₂ gönderildiği durumda elde edilen üstel çoğalma fazı verilerinden hesaplanan maksimum kuru kütle miktarı (C_{alg}), spesifik çoğalma hızı (μ) (eşitlik 3.5), maksimum CO₂ tutma hızı (R_{CO_2}) (eşitlik 3.3) ve algal prodüktivite (P) (eşitlik 3.4) Çizelge 4.1’de, %7 CO₂ beslendiği durum için hesaplananlar ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 *S. obliquus*, *Sp. maxima*, *Ch. vulgaris* için %3 CO₂ beslemesinde kinetik parametreler (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)

CO ₂ , %	Alg	μ , gün ⁻¹	C_{alg} , gL ⁻¹	* R_{CO_2} , hesap gL ⁻¹ gün ⁻¹	P , gL ⁻¹ gün ⁻¹
3	<i>S.obliquus</i> 276-3d	0.28	1.27	0.13	0.07
	<i>Ch.vulgaris</i> 211-11b	0.25	1.23	0.15	0.08
	<i>Sp. maxima</i> 49.88	0.21	0.48	0.04	0.02

* Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2 *S. obliquus*, *Sp. maxima*, *Ch. vulgaris* için %7 CO₂ beslemesinde kinetik parametreler (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)

CO ₂ , %	Alg	μ , gün ⁻¹	C _{alg} , gL ⁻¹	*R _{CO₂} , hesap gL ⁻¹ gün ⁻¹	P, gL ⁻¹ gün ⁻¹
7	<i>S.obliquus</i> 276-3d	0.33	1.73	0.18	0.10
	<i>Ch.vulgaris</i> 211-11b	0.24	1.62	0.18	0.10
	<i>Sp. maxima</i> 49.88	0.26	1.10	0.09	0.05

* Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Elde edilen maksimum kuru kütle, maksimum CO₂ tutma hızına bakıldığında CO₂ seviyesi %3'den %7'ye çıktığında kinetik parametrelerde artış olduğu görülmektedir. Tüm türler için artış olduğu görülmekle birlikte, çalışmalarda kullanılmasına karar verilen *Scenedesmus obliquus* 276-3d için maksimum kuru kütle miktarı (C_{alg}) %22.8 artarak 1.73 gL⁻¹'ye ulaşmış, buna bağlı olarak da maksimum CO₂ tutma hızı %38 artarak (R_{CO₂}) ise 0.13 gL⁻¹gün⁻¹'den 0.18 gL⁻¹gün⁻¹'e yükselmiştir. Algal prodüktivite (P) de ise %42.8 artış görülmektedir.

Spesifik çoğalma hızları değerlendirildiğinde, *Chlorella vulgaris* 211-11b, *Spirulina maxima* 49.88 ve *Scenedesmus obliquus* 276-3d için, spesifik çoğalma hızı (μ) çoğalma ortamına % 7 CO₂ beslendiğinde sırasıyla 0.24 gün⁻¹, 0.26 gün⁻¹, 0.33 gün⁻¹ olarak bulunmuştur. Yapılan bir çalışmada *Chlorella vulgaris* çoğalması üzerine farklı çoğalma ortamlarının etkisi incelemiş, BG11 çoğalma ortamında 0.21 gün⁻¹ olarak spesifik çoğalma hızını belirlemişlerdir (Wong vd 2017).

Spirulina maxima 49.88 çoğalması her iki CO₂ oranında da (% 3 ve % 7) oldukça düşük olup çoğalma ortamına % 3 CO₂ beslendiğinde ulaşılan biyokütle miktarı 0.48 gL⁻¹, % 7 CO₂ beslendiğinde ulaşılan biyokütle miktarı ise 1.10 gL⁻¹ dir. Algal çoğalma ortamına % 7 CO₂ beslendiğinde *Scenedesmus obliquus* 276-3d ve *Chlorella vulgaris* 211-11b ile ulaşılan maksimum kuru kütle miktarları (C_{alg}) sırasıyla 1.73 g L⁻¹ ve 1.62 g L⁻¹dir. Sonuçlar ANOVA Testi (EK-2) ile değerlendirildiğinde bu iki türe ait elde edilen biyokütle miktarının birbirlerinden istatistiksel olarak farklı olmadığı sonucu elde edilmiştir (F = 0.0376 < Fkritik = 4.13). Bununla birlikte bu aşamada en yüksek kuru

biyokütleyle ulaşılması ve biyokütle oluşumuna bağlı olarak da CO₂ giderimlerinin daha yüksek olması nedeniyle çalışmalara *Scenedesmus obliquus* 276-3d ve *Chlorella vulgaris* ile devam edilmesine karar verilmiştir.

Algal çoğalma ortamlarının giriş ve çıkışlarından gaz örnekleri alınmış ve bu örnekler Gaz Kromatografi cihazında analiz edilmiştir. Ölçüm sonuçlarındaki karbondioksit miktarları arasındaki fark değerlendirildiğinde çoğalmanın 12. gününde alınmış olan örneklerle göre en yüksek % giderim *Scenedesmus obliquus* 276-3d ile (%30.8), en düşük ise *Spirulina maxima* 49.88 ile (%11.7) gerçekleşmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 *S. obliquus*, *Sp. maxima*, *Ch. vulgaris* için CO₂ giderim oranları (12. Gün, %12 CO₂ - % 88 Hava)

	<i>S. obliquus</i> 276-3d	<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b	<i>Sp. maxima</i> 49.88
% CO ₂ giriş	12.3	12.1	12.4
% CO ₂ çıkış	8.5	8.4	8.6
% CO ₂ giderimi	30.8	28.6	11.7

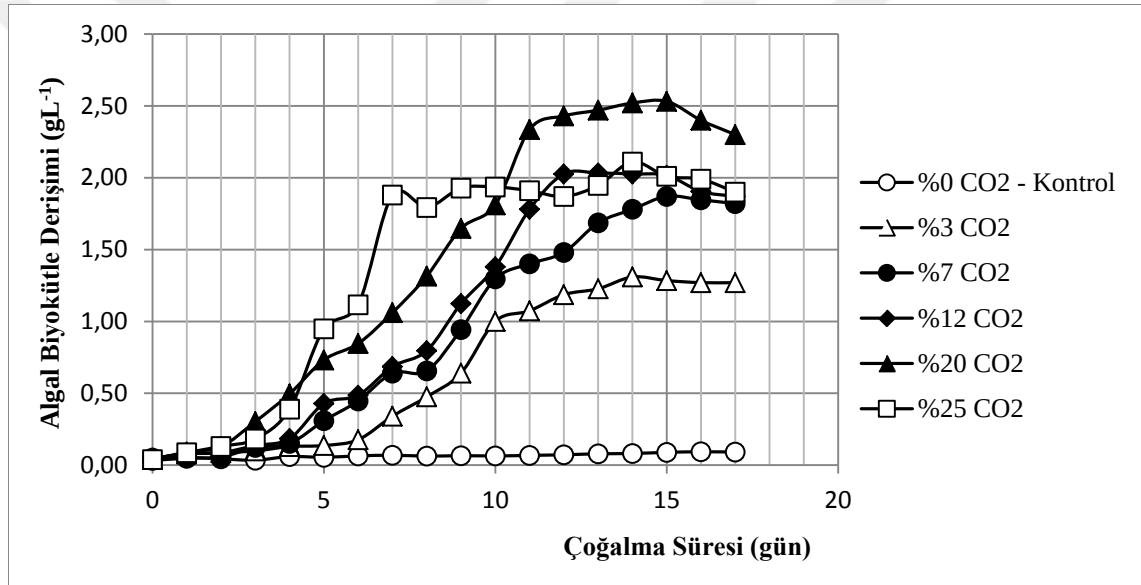
Doktora tez çalışmasının bu aşamasında yapılan değerlendirmede çalışmalara *Scenedesmus obliquus* 276-3d ve *Ch. vulgaris* 211-11b ile devam edilmesine karar verilmiştir. Bunun sebebi olarak yapılan deneylerde en yüksek kuru biyokütleyle bu iki tür ile ulaşılması ve biyokütle oluşumuna bağlı olarak da CO₂ giderimlerinin daha yüksek olması gösterilebilir. Her iki tür için de CO₂ miktarının %3'den %7'ye artmasıyla biyokütle oluşumunun arttığı gözlemlendiği için farklı CO₂ seviyelerinde çalışılarak CO₂ miktarının etkisinin incelenmesine karar verilmiştir.

Scenedesmus obliquus 276-3d ve *Chlorella vulgaris* 211-11b için, çoğalma ortamına beslenen hava – CO₂ karışımındaki CO₂ miktarının %3'den %7'ye artmasıyla biyokütle oluşumunun arttığı gözlemlendiği için daha yüksek CO₂ (%3 - %25) seviyelerinde çalışılarak CO₂ miktarının etkisi incelenmiştir.

4.1.2.1 *Scenedesmus obliquus* (376-3d) çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisi

Scenedesmus obliquus (276-3d) çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmalar 17 gün sürmüştür. Başlangıç aşılama derişimi tez kapsamında yapılan diğer deneylerde olduğu gibi 0.5 g L⁻¹ ve başlangıç pH'ı 7'dir.

Çoğalma ortamından 2 örnek alınmış ve absorbans ölçümü yapılmıştır (OD₆₈₂). Sonuçlar bu iki ölçümün ortalaması olarak verilmiştir. Şekil 4.6'da *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisi verilmiştir.



Şekil 4.6 *Scenedesmus obliquus* çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisi (○: Kontrol, Δ : %3 CO₂, ● : %7 CO₂, ■ : %12 CO₂, ▲ : %20 CO₂, □ : %25 CO₂)

Scenedesmus obliquus (276-3d) için CO₂ miktarının artmasıyla (%3 - %20) biyokütle derişimi artmakta olup en iyi sonuçlara hava içerisindeki karbondioksit oranı %20 olduğu durumda ulaşılmıştır (2.53 g L⁻¹). Ortama ilave olarak CO₂ gönderilmediği sadece hava beslendiği durumda, hava içerisindeki substrat olarak kullanılan %0.03 oranındaki CO₂, çoğalmanın gerçekleşmesini sağlamaya yeterli olmadığından ancak 0.093 g L⁻¹ biyokütle miktarına ulaşılmıştır.

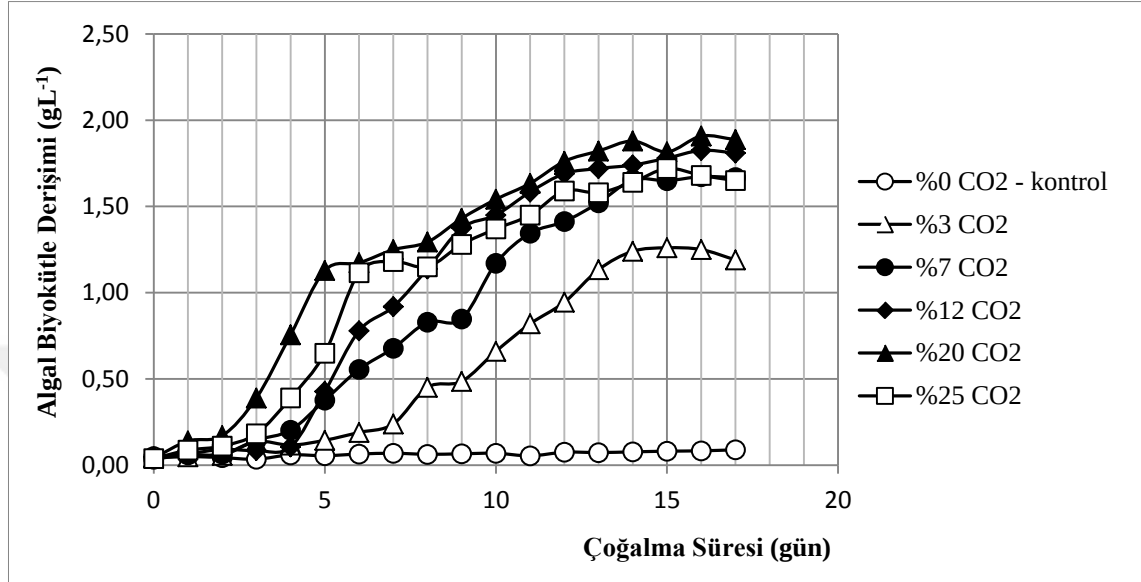
%25 CO₂ miktarına çıkıldığında, substrat inhibisyonu nedeniyle biyokütle miktarında düşüş gözlenmiştir. *Scenedesmus obliquus* (276-3d) için deney süresi sonundaki ulaşılan maksimum kuru kütle miktarı %20 CO₂ beslemesinde ulaşılan değere göre %16.6 azalmış ve 2.11 g L⁻¹ olarak bulunmuştur.

Scenedesmus çoğalması üzerine CO₂ etkisinin incelendiği çalışmalara bakıldığında genel olarak CO₂ miktarı arttığında çoğalmanın da arttığı görülmektedir. Tang vd. (2011) *S. obliquus* SJTU-3'nun farklı CO₂ seviyelerindeki çoğalması üzerine bir çalışma gerçekleştirmiş ve %50 CO₂ seviyesinde dahi çoğalmanın gerçekleştiği gözlemiştir. Bununla birlikte en iyi sonuçlara ortama hava ile karışmış durumda %10 CO₂ gönderildiğinde ulaşılmış, biyokütle miktarı ve CO₂ tutma hızı sırasıyla 1.84 g L⁻¹ ve 0.29 g L⁻¹gün⁻¹ olarak bulunmuştur. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda ise *Scenedesmus obliquus* (276-3d)'un %20 CO₂ oranına toleranslı olduğu gösterilerek %27 daha yüksek bir biyokütle miktarı elde edilmiştir (2.53 g L⁻¹). Aynı şekilde *S. obliquus* ile yapılan bir diğer çalışmada ortama beslenen CO₂ miktarının artmasıyla çoğalmanın da arttığı gözlenmiş ve tez çalışması sonuçları ile uyumlu olarak, en yüksek biyokütle miktarı olan 2.3 g L⁻¹'ye %15 CO₂ seviyesinde ulaşılmıştır (Kaewkannetra vd. 2012). Qi vd. (2018) mutant ve parent *Scenedesmus obliquus* ile çoğalma üzerine CO₂ etkisini incelemek için yaptıkları çalışmada çoğalma ortamına sadece hava ve hava ile karışımı sağlanan %15 CO₂ göndermişlerdir. Tez çalışmasında kullanılan BG11 çoğalma ortamından bileşim olarak farklı bir ortam olan Basal ortam ve mutant tür kullanılan çalışmalarda ulaşılan maksimum biyokütle miktarı hava ile 0.17 g L⁻¹ olurken, %15 CO₂ ile ise 7 günün sonunda yaklaşık 2 katına çıkmış 0.32 g L⁻¹ olarak belirlenmiştir. Çalışma parent *Scenedesmus obliquus* ile tekrar edildiğinden %15 CO₂ seviyesinde ulaşılan biyokütle miktarı olan 0.24 g L⁻¹ dir.

4.1.2.2 *Chlorella vulgaris* 211-11b çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisi

Doktora tez çalışması kapsamında *Chlorella vulgaris* 211-11b çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmalar 17 gün sürmüştür. Başlangıç aşılama derişimi yapılan diğer deneylerde olduğu gibi 0.05 gL⁻¹ ± 0.02 gL⁻¹ ve başlangıç pH'ı 7'dir. 24 saat aralıklarla ortamdan 2 örnek alınmış ve absorbans ölçümü yapılmıştır

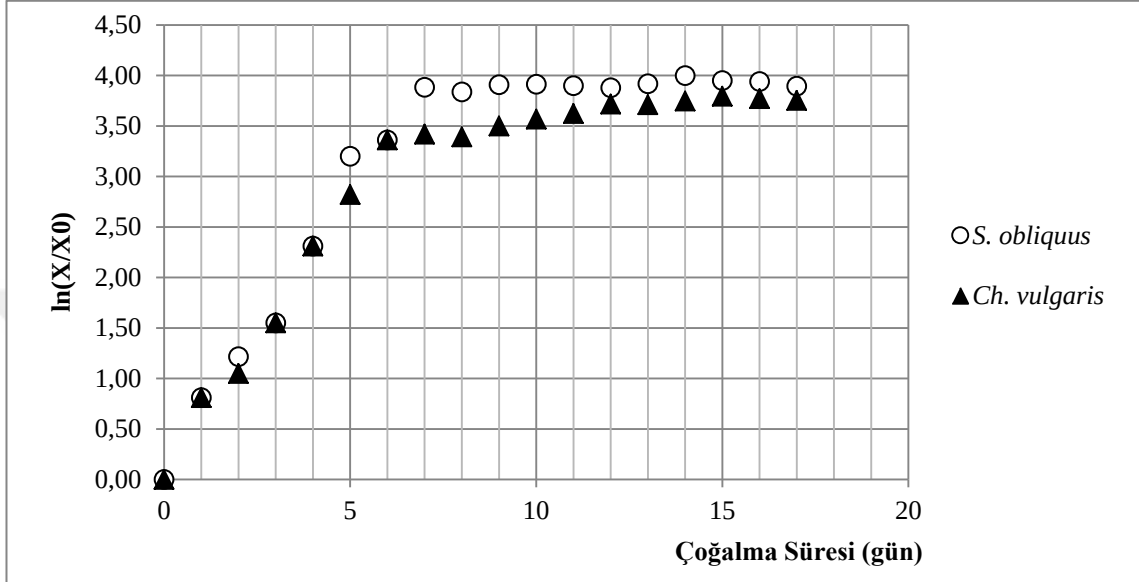
(OD₆₈₂). Sonuçlar bu iki ölçümün ortalaması olarak sonuç olarak bu iki ölçümün ortalaması verilmiştir. Şekil 4.7’de *Chlorella vulgaris* 211-11b çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisi verilmiştir.



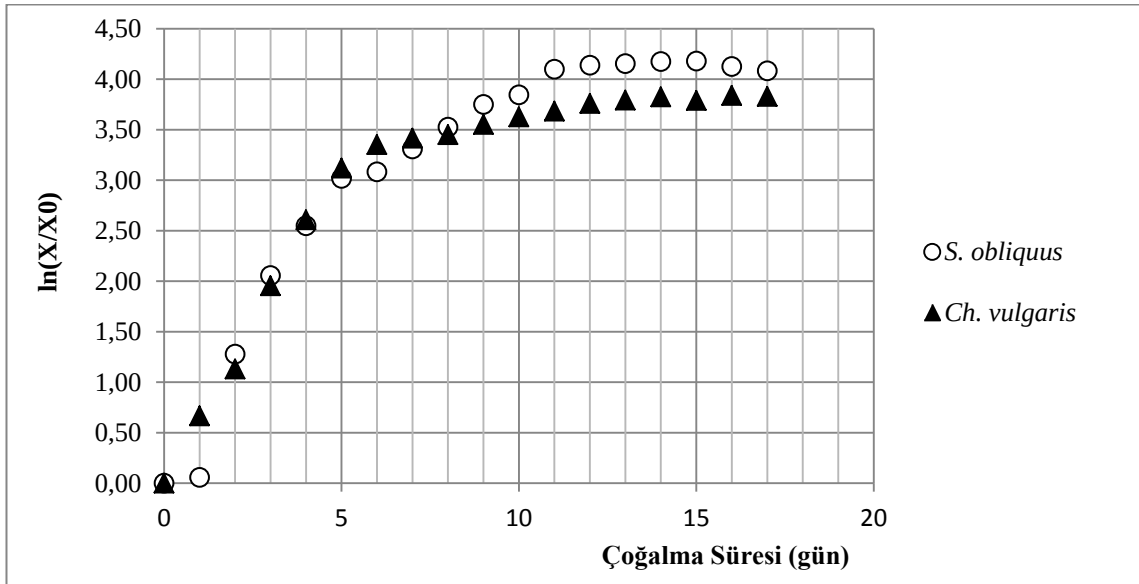
Şekil 4.7 *Chlorella vulgaris* çoğalması üzerine CO₂ miktarı etkisi (○: Kontrol, Δ : %3 CO₂, ● : %7 CO₂, ■ : %12 CO₂, ▲ : %20 CO₂, □ : %25 CO₂)

Chlorella vulgaris (211-11b) için CO₂ miktarının artmasıyla (%3 - %20) biyokütle derişimi artmaktadır. Çoğalma ortamına %20 CO₂ - %80 hava beslendiğinde ulaşılan maksimum biyokütle miktarı olan 1.90 g L⁻¹, ortama ilave olarak CO₂ gönderilmediği sadece hava beslendiği durumda, ulaşılan 0.89 g L⁻¹ den 2 kat daha yüksektir. Lam ve Lee (2013) 16 gün süren deneylerde %0.03 - 5 CO₂ aralığında *Ch. vulgaris* çoğalmasını incelemiş ve %5 CO₂ seviyesinde maksimum biyokütle miktarı olan 0.72 g L⁻¹’ye ulaşmışlardır. Doktora çalışmalarında ulaşılan en yüksek biyokütle miktarı olan 1.90 g L⁻¹ bu değerin yaklaşık 3 katıdır. Bununla birlikte Adamczyk vd. (2015) %4 ve %8 CO₂ seviyelerinde, fotobiyoreaktörde *Chlorella vulgaris* ile algal çoğalma ve CO₂ biyotutulmasını incelemişler ve %8 CO₂ seviyesinde 10 günün sonunda 3.3 g L⁻¹ biyokütle miktarına ulaşmışlardır. Zheng vd. (2012) algal çoğalma üzerine CO₂ etkisini incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada *Ch. vulgaris* için en uygun CO₂ miktarını %5 olarak belirlenmiş, bu seviyede biyokütle miktarı ve CO₂ tutma hızını sırasıyla 3.76 g L⁻¹ ve 1.01 g L⁻¹ gün⁻¹ olarak bulmuşlardır.

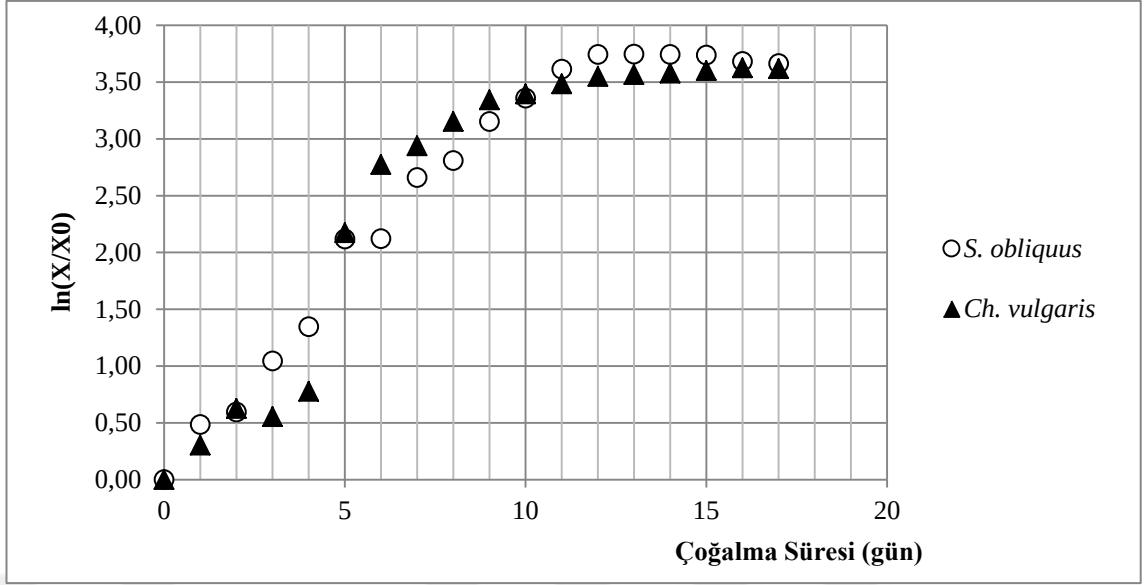
Scenedesmus obliquus 276-3d ve *Chlorella vulgaris* 211-11b çoğalması için her bir deney setindeki verilerden $\ln(X/X_0)$ hesaplanmış ve çoğalma süresine karşılık %25, %20, %12, %7, %3 CO₂ miktarları için sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



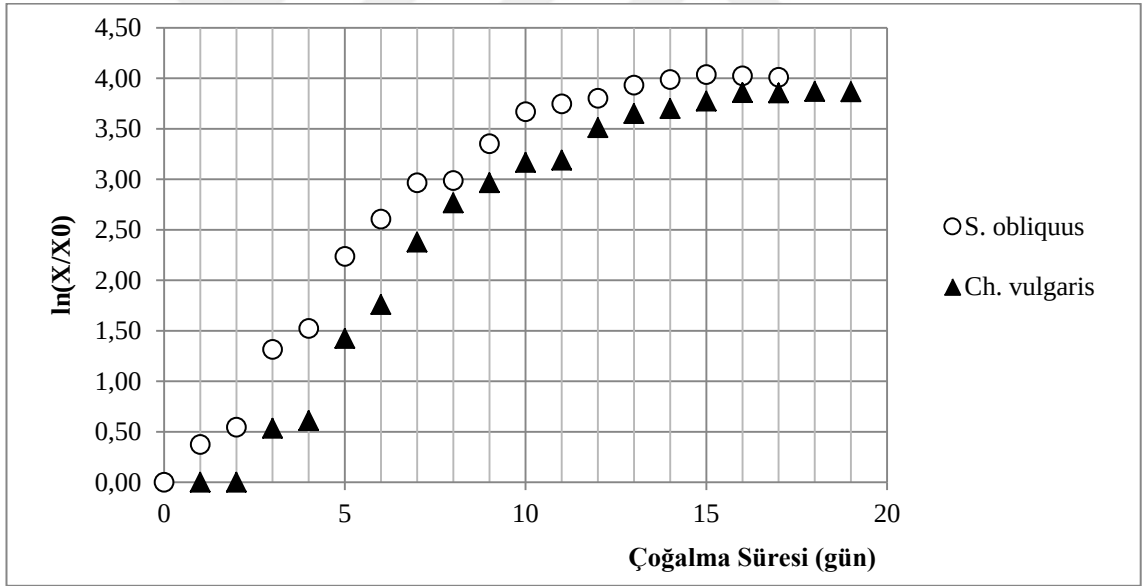
Şekil 4.8 $\ln(X/X_0)$ – Çoğalma süresi (○: *Scenedesmus obliquus*, ▲: *Chlorella vulgaris* - %25 CO₂, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm)



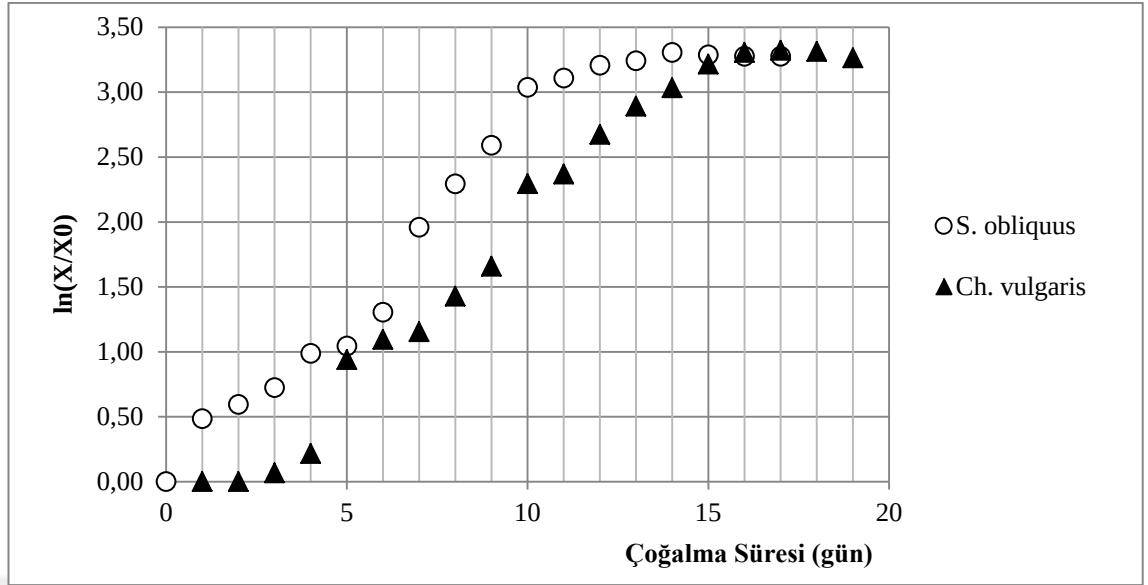
Şekil 4.9 $\ln(X/X_0)$ – Çoğalma süresi (○: *Scenedesmus obliquus*, ▲: *Chlorella vulgaris* - %20 CO₂, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm)



Şekil 4.10 $\ln(X/X_0)$ – Çoğalma süresi (○: *Scenedesmus obliquus*, ▲: *Chlorella vulgaris* - %12 CO_2 , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm)



Şekil 4.11 $\ln(X/X_0)$ – Çoğalma süresi (○: *Scenedesmus obliquus*, ▲: *Chlorella vulgaris* - %7 CO_2 , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm)



Şekil 4.12 $\ln(X/X_0)$ – Çoğalma süresi (○: *Scenedesmus obliquus*, ▲: *Chlorella vulgaris* - %3 CO₂, 18:6 a:k periyot, 28 ± 2°C, akış hızı : 3 vvm)

Algal çoğalma ortamına %3 - %25 CO₂ gönderildiğinde elde edilen üstel çoğalma fazındaki veriler kullanılarak hesaplanan maksimum kuru kütle miktarı (C_{alg}), spesifik çoğalma hızı (μ) (eşitlik 3.5), maksimum CO₂ tutma hızı (R_{CO_2}) (eşitlik 3.3) ve algal prodüktivite (P) (eşitlik 3.4) Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 *Scenedesmus obliquus* ve *Chlorella vulgaris* çoğalma ortamına %3 - %25 CO₂ beslenmesi durumunda kinetik parametreler

CO ₂ %	Alg	μ , gün ⁻¹	C_{alg} , gL ⁻¹	P , gL ⁻¹ gün ⁻¹	* R_{CO_2} , gL ⁻¹ gün ⁻¹	** R_{CO_2} , hesap, gL ⁻¹ gün ⁻¹
3	<i>S.obliquus</i> (276-3d)	0.28	1.31	0.09	0.12	0.16
	<i>Ch. vulgaris</i> (211-11b)	0.15	1.21	0.08	0.08	0.15
7	<i>S.obliquus</i> (276-3d)	0.30	1.87	0.12	0.15	0.22
	<i>Ch. vulgaris</i> (211-11b)	0.19	1.71	0.11	0.10	0.20
12	<i>S.obliquus</i> (276-3d)	0.36	2.03	0.14	0.17	0.26
	<i>Ch. vulgaris</i> (211-11b)	0.29	1.81	0.12	0.14	0.24
20	<i>S.obliquus</i> (276-3d)	0.37	2.53	0.17	0.27	0.30
	<i>Ch. vulgaris</i> (211-11b)	0.32	1.90	0.13	0.24	0.14
25	<i>S.obliquus</i> (276-3d)	0.36	2.38	0.15	0.22	0.27
	<i>Ch. vulgaris</i> (211-11b)	0.31	1.81	0.12	0.11	0.22

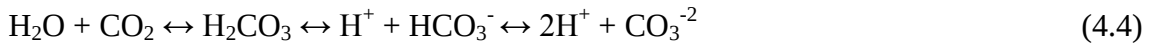
* Eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır. ** Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Tez çalışmaları sonuçlarına bakıldığında, çoğalma ortamına %20 CO₂ - %80 Hava beslendiği durumda *Scenedesmus obliquus* (276-3d) ve *Ch. vulgaris* (211-11b) için spesifik çoğalma hızı (μ) sırasıyla 0.37 gün⁻¹ ve 0.32 gün⁻¹ olarak bulunmuştur. Bu koşullarda ulaşılan maksimum kuru kütle miktarları ise *Scenedesmus obliquus* (276-3d) ve *Ch. vulgaris* (211-11b) için sırasıyla 2.53 g L⁻¹ ve 1.90 g L⁻¹'dir. Çoğalma ortamına % 20 CO₂ gönderildiği duruma *Scenedesmus obliquus* (276-3d) ile ulaşılan maksimum kuru kütle miktarı olan 2.53 g L⁻¹, çoğalma ortamına % 3 CO₂ gönderildiği duruma göre % 48.2 yüksektir ve ANOVA Testi (EK-3) ile sonuçlar değerlendirildiğinde istatistiksel olarak da farklı olduğu kanıtlanmaktadır (F = 8.12 > F_{kritik} = 4.13).

Çalışmalarda Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.6 kullanılarak iki farklı CO₂ tutma hızı hesaplanmıştır. Algal biyokütlenin elementel bileşimi analizi ile elde edilen karbon miktarı verisi kullanılarak Eşitlik 3.6 ile hesap yapılmaktadır. 3.3 numaralı eşitlik ise algal biyokütlenin yaklaşık %50'sinin karbondan oluştuğu varsayımı ile türetilmiş olan bir eşitliktir. Dolayısıyla 3.6 bize daha kesin sonuçlar verirken, 3.3 yaklaşık olarak bir tahmin yürütmemizi sağlar. *Scenedesmus obliquus* (276-3d) ve *Ch. vulgaris* (211-11b) için algal kütle bileşimine bakıldığında, karbon miktarları ortalama olarak sırasıyla %38 ve %28 olarak bulunmuştur. Bu nedenle *Scenedesmus obliquus* (276-3d) için her iki hesap yöntemi ile de yakın olan sonuçlar elde edilirken, *Ch. vulgaris* (211-11b) için elde edilen CO₂ tutma hızlarında fark gözlenmiştir.

Algal çoğalma üzerine CO₂ etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları incelendiğinde literatürde yer alan çalışmalar ile uyum gösterdiği görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar *Scenedesmus* türlerinin *Chlorella* türlerine göre CO₂'ye göre daha toleranslı olduğunu göstermekte olup Hanagata vd. (1992) %10 - %30 CO₂ seviyesinde *Scenedesmus* ve *Chlorella*'nın yakın hızlarda çoğaldığını belirtmişlerdir. Tez çalışmalarında her iki tür için de CO₂ miktarının artmasıyla (%3 - %20) biyokütle derişiminin arttığı görülmekle birlikte, kullanılan koşullar ile birlikte değerlendirildiğinde en iyi sonuçlara %20 CO₂ miktarında ulaşılmıştır. Farklı çalışmalarda belirlenen optimum CO₂ seviyesi algal çoğalmada kullanılan farklı biyoreaktör, ışık kaynağı, pH, çoğalma ortamı bileşimi gibi pekçok parametreye bağlı olup türe göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Çoğalma ortamına gönderilen CO₂ miktarı %25'e çıktığında beklenenin yükselmenin aksine biyokütle miktarında artış değil, her iki tür için de substrat inhibisyonu nedeniyle düşüş gözlenmiştir. Bu seviyede çoğalma başladıktan birkaç gün sonra algal hücreler topaklanmaya başlamış ve reaktör dibinde partiküler çöküntüler meydana gelmektedir. Bu durum su - inorganik karbon ilişkisi (Eşitlik 4.4) ile de açıklanabilir. Besi ortamına gönderilen ve algler tarafından kullanılmayan fazla CO₂ su ile reaksiyona girerek ortam pH'sını düşüren karbonik asit (H₂CO₃) oluşturmakta olup algal çoğalma inhibe olmaktadır (Wurtz ve Durborow, 1992).



Tang vd. (2011) *Scenedesmus obliquus* ile yaptıkları çalışmada %10 CO₂ oranına kadar algal çoğalmada bir artış gözlenmiş, hava ile beslenen CO₂ derişimi arttıkça ölçülen ulaşılan algal kuru kütle miktarları düşmüştür. Ulaşılan en yüksek kuru kütle miktarı 1.84 g L⁻¹'dir. Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, çoğalma ortamına %25 CO₂ gönderildiği durumda, %20 CO₂ gönderildiği duruma üstel fazdaki verileri kullanarak hesaplanan spesifik çoğalma hızı *Scenedesmus obliquus* (276-3d) için 0.39 gün⁻¹'den 0.36 gün⁻¹'e, *Ch. vulgaris* (211-11b) için ise 0.32 gün⁻¹'den 0.31 gün⁻¹'e düşmüştür.

Çalışmada tek substrat kaynağı olarak CO₂ olduğu düşünüldüğünde CO₂'in artması ile gözlenen biyokütle miktarındaki düşüş substrat inhibisyonu ile açıklanabilmektedir. Çoğalma hızı doğrudan fotosentez verimliliği ile orantılıdır. Fotosentez üzerine CO₂ etkisinin incelendiği çalışmalara bakıldığında karbonik anhidraz enzimi ile hücre ve kloroplastda CO₂ derişimini sağlayan CO₂ derişim mekanizmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Deneyisel veriler ile birlikte inhibisyon kinetiği ve ilgili katsayılar Bölüm 4.2.2'de hesaplanmıştır.

Farklı CO₂ besleme oranlarında algal çoğalma ortamlarının giriş ve çıkışlarından gaz örnekleri alınmış ve bu örnekler Gaz Kromatografi cihazında analiz edilmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 *Scenedesmus obliquus* 276-3d ve *Ch. vulgaris* 211-11b farklı CO₂ beslemelerinde CO₂ giderim oranları (12. Gün)

	<i>S. obliquus</i> 276-3d			<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b		
	%12	%20	%25	%12	%20	%25
% CO ₂ giriş	12.4	20.3	24.8	12.2	20.4	25.1
% CO ₂ çıkış	8.7	13.7	19.6	9.1	14.1	20.5
% CO ₂ giderimi	29.8	32.5	21.0	25.4	30.9	18.3

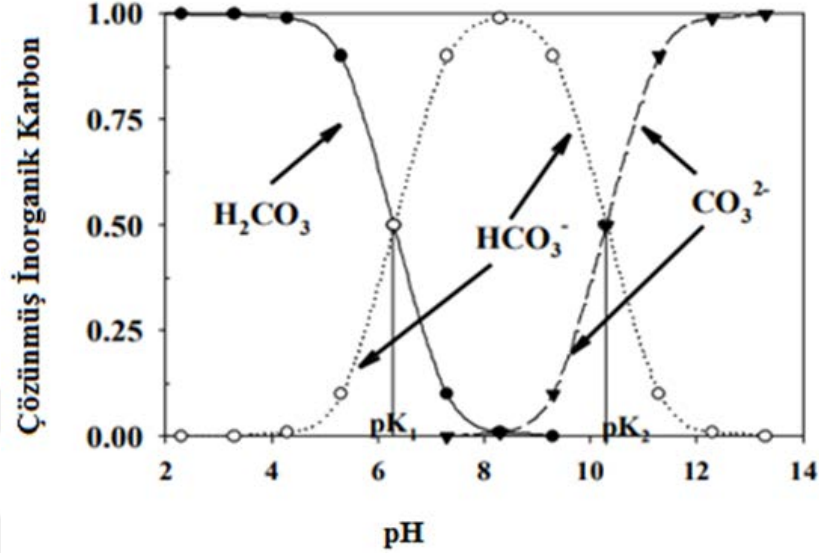
En yüksek % CO₂ giderimi *Scenedesmus obliquus* 276-3d ve *Ch. vulgaris* 211-11b için çoğalma ortamına %20 CO₂ beslendiği durumda gerçekleşmiş ve sırasıyla %32.5 ve %30.9 olarak hesaplanmıştır. Literatürde gaz kromatografi kullanılarak inceleme yapılmış çalışma sayısı çok az olmakla birlikte Mohanakrishnan ve Joseph (2016) *Scenedesmus obliquus* ile biyogaz içerisindeki CO₂ miktarını azaltmak için yaptıkları çalışmada %40 CO₂ giderimi elde etmişlerdi.

4.1.3 Algal çoğalma üzerine ortam bileşimi etkisi

Algal çoğalmayı etkileyen en önemli faktörlerden biri ortamda bulunan inorganik karbon kaynağıdır. Bu anlamda CO₂ için en büyük kısıtlayıcı etken CO₂'nin sudaki düşük çözünürlüğü nedeniyle hızlı bir şekilde tekrar atmosfere dağılması olup fotosentez için yeterli karbonun sağlanması için düzenli olarak besleme gereklidir. Bununla birlikte sodyum bikarbonattan (NaHCO₃) elde edilen bikarbonat iyonu (HCO₃⁻), NaHCO₃'ün kolay ulaşılabilir ve ucuz bir madde olması nedeniyle alternatif bir karbon kaynağı olarak değerlendirilmektedir.

Karbon kaynağı alternatifleri değerlendirilirken, algler için kullanılabilir olması önemlidir. Algler çözünmüş inorganik karbonun her şeklini kullanamaz. Sudaki CO₂ dengesi Şekil 4.13'deki gibidir. Bu bileşiklerin ortamda bulunma durumları ortam pH'ı ile ilgilidir (Yang ve Gao 2003). Çözünmüş CO₂ doğrudan kullanılabilirken, HCO₃ pekçok tür tarafından kullanılabilir ancak CO₃ kullanılamaz ancak genelde ortam pH 8.5'dan düşük olduğu için bu bir sorun değildir. Genellikle kullanılmakta olan gaz

haldeki CO₂'nin suda çözünürlüğü oldukça düşüktür ve bu algal çoğalmayı sınırlayabilir.

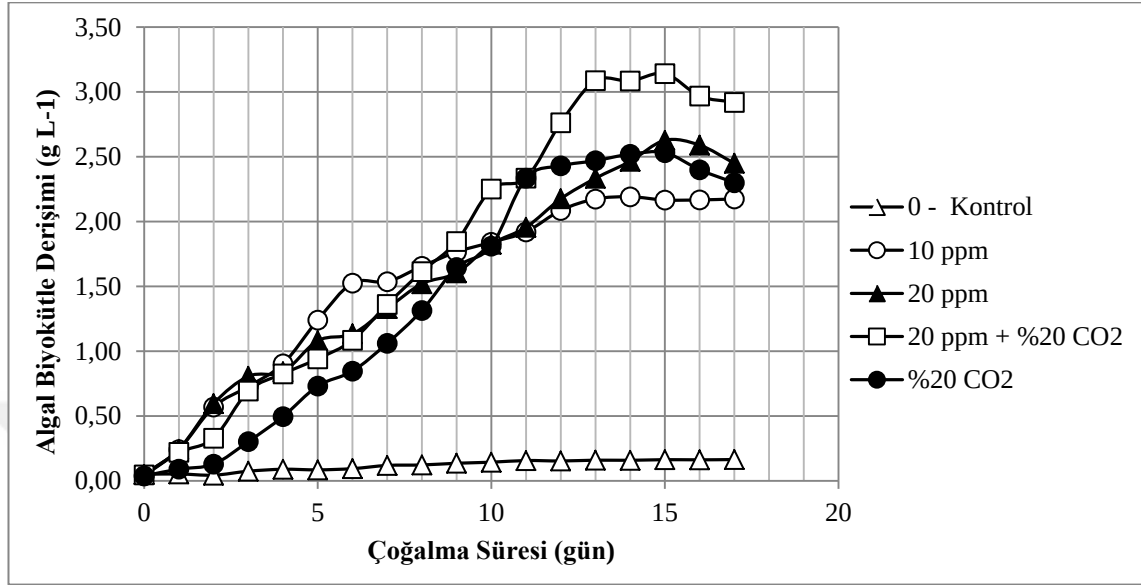


Şekil 4.13 pH – Çözünmüş inorganik karbon ilişkisi (Chen vd. 2016)

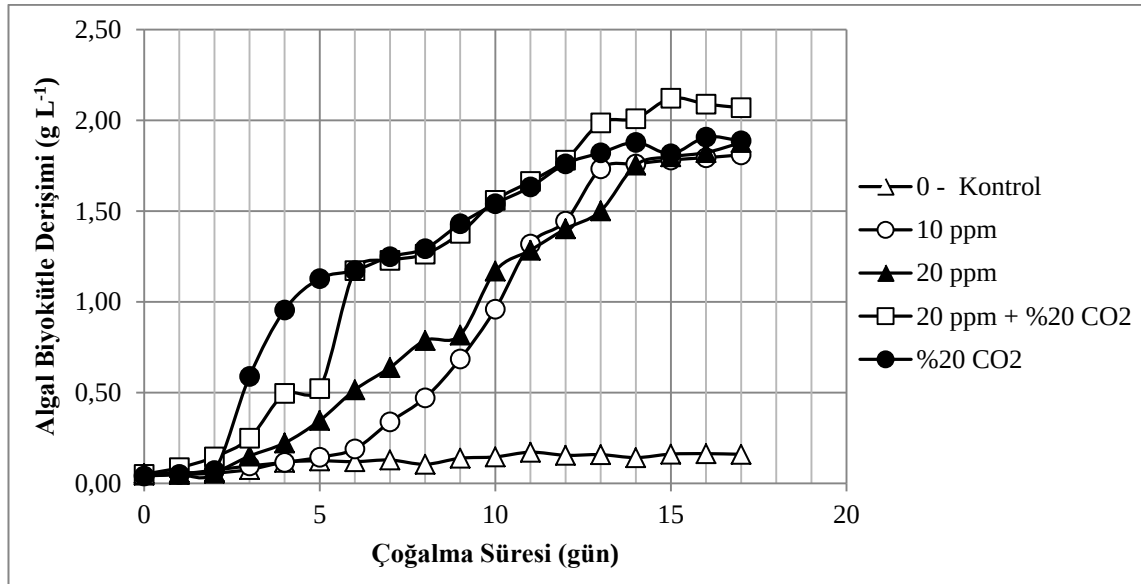
Suda çözünmeyen serbest haldeki CO₂ ise kolaylıkla atmosfere taşınabilir. Bununla birlikte ortam pH'sına bağlı olarak sodyum bikarbonattan (NaHCO₃) gelen bikarbonat iyonları (HCO₃⁻) gaz haldeki CO₂ ile karşılaştırıldığında suda yüksek çözünürlüğe sahiptir ve bu nedenle alternatif bir karbon kaynağı olarak kullanılabilir (Devgoswami vd. 2011). Sodyum bikarbonatın diğer bir avantajı ise CO₂ gazına göre çok daha maliyetsiz olmasıdır.

Algal çoğalma ve CO₂ giderimi üzerine NaHCO₃ miktarının etkisini görebilmek amacıyla farklı miktarlarda (10 ppm, 20 ppm) NaHCO₃ içeren ortamlar hazırlanmıştır. Ortamlardan birine ise hiç NaHCO₃ ilavesi yapılmamış sadece %20 CO₂ beslemesi yapılmıştır. Bu çalışma *Chlorella vulgaris* 211-11b ve *Scenedesmus obliquus* 276-3d için ayrı ayrı tekrarlanmıştır (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15). Ortamda karbon kaynağı olarak NaHCO₃ bulunduğunda CO₂ beslemesi yapılmamış olup, bu çalışmanın amacı ulaşılan biyokütleyi karşılaştırmaktır. NaHCO₃'e bağlı olarak yükselen ortam pH'ı deney seti başlangıcından itibaren 1 M NaOH ve 1 M H₂SO₄ çözeltileri ile 7'ye ayarlanmıştır.

Bunun sebebi ise oluşan karbonat iyonlarının ortam pH'ını sürekli olarak yükseltmeye sebep olmasından dolayı



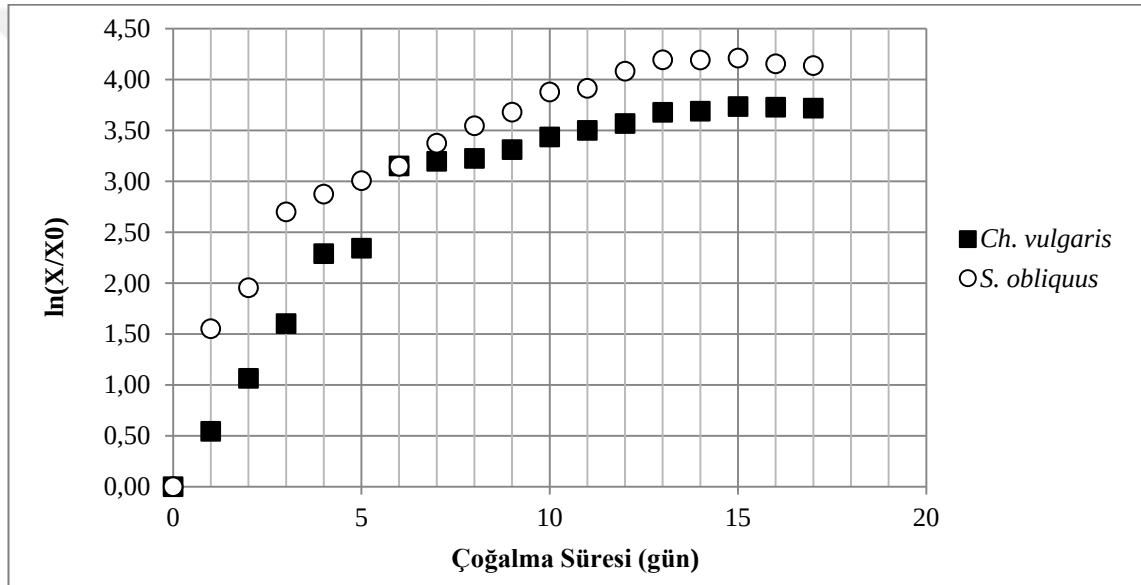
Şekil 4.14 *Scenedesmus obliquus* çoğalması üzerine NaHCO₃ miktarı etkisi (Δ: Kontrol, ○: 10 ppm NaHCO₃, ▲: 10 ppm NaHCO₃, □: 20 ppm NaHCO₃ + %20 CO₂, ●: %20 CO₂)



Şekil 4.15 *Chlorella vulgaris* çoğalması üzerine NaHCO₃ miktarı etkisi (Δ: Kontrol, ○: 10 ppm NaHCO₃, ▲: 10 ppm NaHCO₃, □: 20 ppm NaHCO₃ + %20 CO₂, ●: %20 CO₂)

Scenedesmus obliquus (276-3d) için ortamda NaHCO_3 bulunan deneylerde başlangıç aşamasında çoğalmanın daha hızlı gerçekleştiği söylenebilir (Şekil 4.7). Bu durum NaHCO_3 'ün sudaki çözünürlüğünün daha yüksek olması ile açıklanabilir ancak *Ch. vulgaris* için aynı durum geçerli olmamıştır. Ortamda NaHCO_3 bulunmayıp sadece %20 oranında CO_2 beslendiğinde çoğalma çok daha hızlı başlamıştır (Şekil 4.8).

Şekil 4.16'da %20 CO_2 ve 20 ppm NaHCO_3 varlığında *Scenedesmus obliquus* 276-3d ile *Chlorella vulgaris* 211-11b çoğalma verilerinden hesaplanan $\ln(X/X_0)$ değerlerine karşılık çoğalma süresi verilmektedir.



Şekil 4.16 $\ln(X/X_0)$ – Çoğalma süresi (■: *Scenedesmus obliquus*, Δ: *Chlorella vulgaris* – 20 ppm NaHCO_3 + %20 CO_2 , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm)

Üstel fazdaki veriler kullanılarak hesaplanan kinetik parametreler Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Çoğalma ortamına NaHCO₃ katılması durumunda kinetik parametrelerin karşılaştırılması

NaHCO ₃ ppm	CO ₂ %	Alg	μ , gün ⁻¹	C _{alg} , gL ⁻¹	P, gL ⁻¹ gün ⁻¹	*R _{CO₂} , gL ⁻¹ gün ⁻¹	**R _{CO₂} , hesap gL ⁻¹ gün ⁻¹
20	20	<i>S.obliquus</i> 276-3d	0.38	3.10	0.21	0.38	0.38
		<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b	0.36	2.10	0.14	0.15	0.25
20	-	<i>S.obliquus</i> 276-3d	0.29	2.63	0.14	0.18	0.26
		<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b	0.24	1.88	0.13	0.16	0.23
10	-	<i>S.obliquus</i> 276-3d	0.28	2.19	0.12	0.15	0.23
		<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b	0.22	1.82	0.14	0.15	0.25

* Eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır. ** Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Elde edilen veriler algal çoğalma için en uygun koşulun 20 ppm NaHCO₃ içeren ortama hava ile karıştırılmış %20 CO₂ gönderilmesi olduğunu göstermektedir. Bu koşullarda maksimum kuru kütle miktarı (C_{alg}), spesifik çoğalma hızı (μ), maksimum CO₂ tutma hızı (R_{CO₂}) ve maksimum biyokütle üretilebilirliği (P) ise *S. obliquus* (276-3d) ve *Ch. vulgaris* (211-11b) için sırasıyla 3.10 g L⁻¹ ve 2.10 g L⁻¹, 0.38 gün⁻¹ ve 0.36 gün⁻¹, 0.38 g L⁻¹gün⁻¹ ve 0.25 g L⁻¹gün⁻¹, 0.22 g L⁻¹gün⁻¹ ve 0.14 g L⁻¹gün⁻¹ olarak bulunmuştur. *Scenedesmus obliquus* (276-3d) için 0.22 g L⁻¹gün⁻¹ olarak hesaplanan algal prodüktivite (P) *Ch. vulgaris* (211-11b) için hesaplanan 0.14 g L⁻¹gün⁻¹ değerinden % 66 oranında daha yüksektir.

ANOVA Testi (EK-4 ve EK-5), kontrol numunesi, %20 CO₂ beslemesi ve 20 ppm NaHCO₃ bulunan ortama %20 CO₂ gönderildiği çoğalma koşulları için gerçekleştirilmiştir. Çoğalma ortamına NaHCO₃ eklenmesinin istatistiksel olarak bir farklılık yaratmadığı sonucuna ulaşılmıştır (F < F_{kritik}). Bununla birlikte kontrol numunesi ile 20 ppm NaHCO₃ bulunan ortama %20 CO₂ gönderildiği çoğalma koşulları için gerçekleştirilen ANOVA Testi sonuçlarından (EK-4) görüleceği üzere üzere her iki alg türü için de F > F_{kritik} tir. Bu durum bize farklı miktarlardaki CO₂'nin ve besi ortamında bulunan NaHCO₃'ün çok belirgin bir şekilde farklılık yarattığını ve çoğalmanın arttığını göstermektedir. İstatistiksel testlerin sonuçları Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 *Scenedesmus obliquus* 276-3d - ANOVA testi sonuçları

ANOVA Testi - Kontrol Numunesi & 20 ppm NaHCO ₃ %20 CO ₂						
Varyasyon Kaynağı	SS	df	MS	F	P-değeri	F kritik
Gruplar Arası	25.318	1	25.318	42.222	0.0002	4.13
Gruplar İçinde	20.387	34	0.5996			
Toplam	45.705	35				
ANOVA Testi - %20 CO ₂ & 20 ppm NaHCO ₃ %20 CO ₂						
Varyasyon Kaynağı	SS	df	MS	F	P-değeri	F kritik
Gruplar Arası	1.053	1	1.053	0.9803	0.3291	4.13
Gruplar İçinde	36.53	34	1.074			
Toplam	37.58	35				

Çizelge 4.8 *Chlorella vulgaris* 211-11b - ANOVA testi sonuçları

ANOVA Testi - Kontrol Numunesi & 20 ppm NaHCO ₃ %20 CO ₂						
Varyasyon Kaynağı	SS	df	MS	F	P-değeri	F kritik
Gruplar Arası	11.843	2	11.843	40.248	4.4E-08	4.26
Gruplar İçinde	10.005	34	0.2943			
Toplam	21.848	35				
ANOVA Testi - %20 CO ₂ & 20 ppm NaHCO ₃ %20 CO ₂						
Varyasyon Kaynağı	SS	df	MS	F	P-değeri	F kritik
Gruplar Arası	0.0044	1	0.0044	0.0082	0.9282	4.17
Gruplar İçinde	17.961	34	0.5283			
Toplam	17.965	35				

Doktora tez çalışmasının bu aşamasında yapılan değerlendirmede çalışmalara *S. obliquus* (276-3d) ile devam edilmesine ve algal çoğalma üzerine pH, akış hızı, ışık periyodu ve ışık şiddeti etkisi incelenmesine karar verilmiştir.

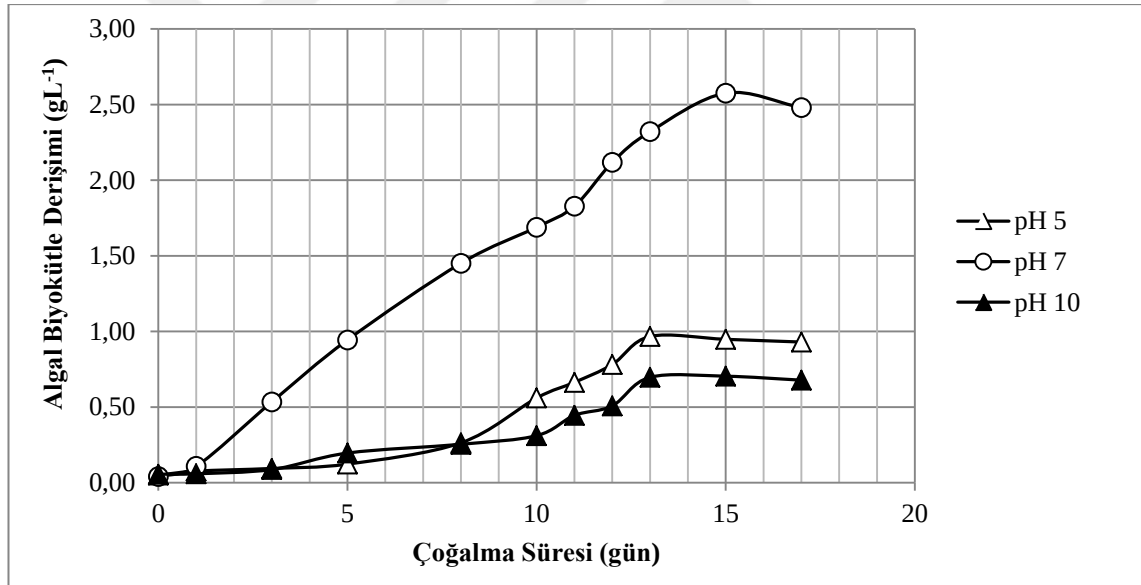
4.1.4 *Scenedesmus obliquus* çoğalması üzerine başlangıç pH'ı etkisi

Algal çoğalma üzerine %12 ve %20 CO₂ besleme oranlarında pH (5, 7, 10) etkisi deneyleri yapılmıştır. pH ölçümlerinde Orion 720 A pH metre cihazı kullanılmıştır.

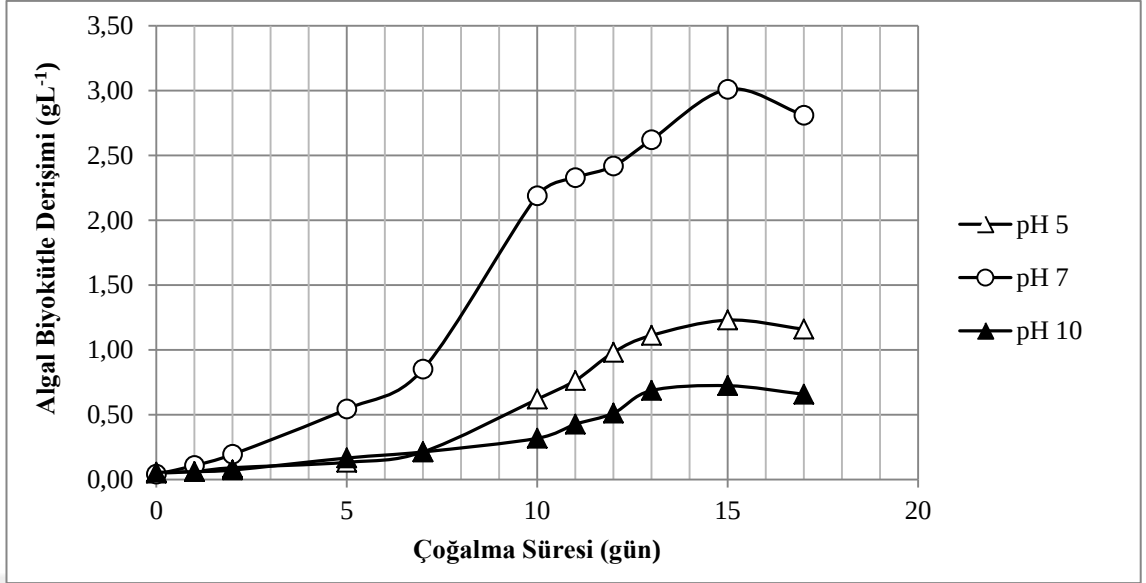
Yapılan çalışmalarda pH hem besi ortamı hazırlanma aşamasında hem de hergün alınan ölçümlerde kontrol edilmiştir.

Çoğalmanın başlangıç aşamasında gerçekleşmesi için 3 adet 150 ml çalışma hacmindeki besi ortamı pH 7'ye ayarlanmıştır. 4 günün sonunda çoğalmanın gerçekleştiği gözlemlendiğinde 2. erlen pH 5'e, 3. erlen ise pH 10'a ayarlanmıştır. Bu birkaç günlük beklemenin sebebi başlangıç aşamasında düşük ve yüksek pH ortamları kullanıldığında alglerde çoğalmanın çok az yada hiç gözlenememiş olmasıdır.

Sonuç ölçümü alınırken her bir zamanda 2 adet ölçüm alınmıştır. Bu iki ölçüm arasındaki standart sapma ortalama olarak ± 0.3 'dür. %12 CO₂ oranında elde edilen sonuçlar Şekil 4.17'de, %20 CO₂ oranındakiler ise Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.17 *Scenedesmus obliquus* (276-3d) çoğalması üzerine pH etkisi (Δ : pH 5, $\circ$: pH 7, $\blacktriangle$: pH 10 – %12 CO₂, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm)



Şekil 4.18 *Scenedesmus obliquus* (276-3d) çoğalması üzerine pH etkisi (Δ: pH 5, ○: pH 7, ▲: pH 10 – %20 CO₂, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2 °C, akış hızı : 3 vvm)

Her iki CO₂ seviyesindeki pH etkisi sonuçlarına bakıldığında 15. günde elde edilen değerlerin yakın olduğu ve en iyi sonuçlara pH 7’de ulaşıldığı görülmektedir. %20 CO₂ seviyesinde maksimum spesifik çoğalma hızı (μ) pH 5, pH 7 ve pH 10 için sırasıyla 0.22 gün⁻¹, 0.34 gün⁻¹, 0.20 gün⁻¹ olarak bulunmuş olup, maksimum CO₂ tutma hızı (R_{CO_2}) sırasıyla 0.15 g L⁻¹gün⁻¹, 0.38 g L⁻¹gün⁻¹, 0.09 g L⁻¹gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır. pH 7 olan çoğalma ortamında elde edilen *Scenedesmus obliquus* (276-3d) biyokütlesi (3.01 g L⁻¹), pH 10 olan çoğalma ortamında elde edilenden 4 kat daha yüksektir (0.72 g L⁻¹). Çoğalma süresince CO₂’ye bağlı olarak gerçekleşen hafif pH değişimleri mikroalgal çoğalmayı çok etkilemezken, pH 5 ve pH 10 değerlerinde algal çoğalmanın düşük olmasının sebebi ortam pH’ına bağlı olarak çoğalma ortamında bulunan çözünmüş karbondioksit formatının değişmesi ve buna bağlı olarak inhibisyon etkisi yaratmasıdır.

Literatürde *Scenedesmus obliquus* çoğalması üzerine pH etkisi çalışmalarına bakıldığında elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Hodaifa vd. (2009) *S. obliquus* 276/3A ile pH 5-9 aralığında yaptıkları incelemede en yüksek spesifik çoğalma hızının çoğalma ortamının pH değeri 7’de sabit tutulduğunda gerçekleştiğini görmüşlerdir (0.41 g L⁻¹).

Algal çoğalma ortamlarının giriş ve çıkışlarından gaz örnekleri alınmış ve bu örnekler Gaz Kromatografi cihazında analiz edilmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9 *Scenedesmus obliquus* 276-3d farklı pH ortamlarında CO₂ giderim oranları

	pH 5		pH 7		pH 10	
	%12	%20	%12	%20	%12	%20
% CO ₂ giriş	12.4	20.3	12.2	20.2	12.4	20.3
% CO ₂ çıkış	11.9	18.7	9.1	14.1	12.0	19.2
% CO ₂ giderimi	4.0	7.9	25.4	30.2	1.6	5.4

Farklı pH ortamlarında *Scenedesmus obliquus* 276-3d ile en yüksek % CO₂ giderimi hem %12 hem de %20 CO₂ için pH 7 de gerçekleşmiştir ve sırasıyla %25.4 ile %30.2 olarak hesaplanmıştır.

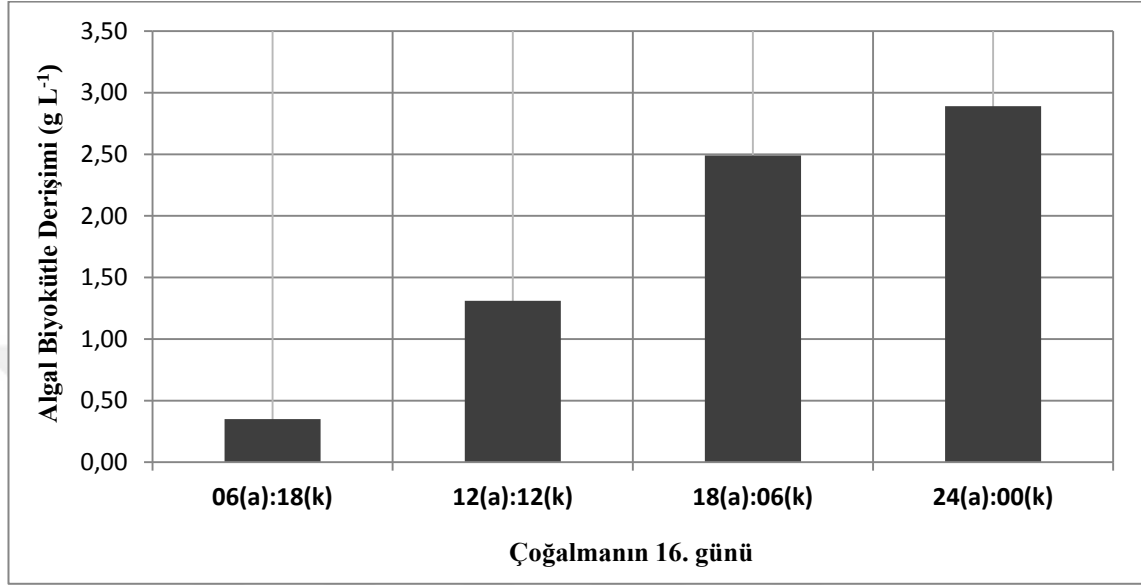
4.1.5 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine aydınlatma periyodu etkisi

Alglerin çoğalmasında ışık çok önemli bir parametredir. Algler etkin bir şekilde fotosentez yapabilmek ve çoğalabilmek için aydınlık:karanlık periyotlara ihtiyaç duymaktadır. Hem aydınlık hem de karanlık fazlarda çoğalmak için önemli bileşikler sentezlenmektedir. Örnek olarak aydınlık faz ürünlerinden ATP, bilinen bütün organizmalarda hücrelerde enerji taşıyan koenzim ve NADPH enzim kompleksi veriler.

S. obliquus 276-3d çoğalması üzerine en uygun CO₂ ve pH belirlendikten sonra yapılan değerlendirmede çalışmalara %20 CO₂ ve pH 7 de devam edilmesine, besi ortamına sadece gaz haldeki CO₂ verilip, farklı bir karbon kaynağı kullanılmamasına karar verilmiştir. Sistemde sadece bir adet aydınlatma paneli bulunmaktadır. Deneyleri simultane gerçekleştirebilmek amacıyla karanlık periyotları oluşturmak için karanlık periyot etkisi yaratabilmek için üç kat alüminyum folyo kullanılmıştır.

Farklı aydınlık(a) : karanlık(k) periyotlar için algal çoğalmanın 16. gününde elde edilen maksimum kuru biyokütle miktarları Şekil 4.19'da verilmiştir. *Scenedesmus obliquus*

(276-3d) ile farklı aydınlık:karanlık periyotlar için yapılan çalışmada elde edilen maksimum kuru biyokütle miktarları 18(aydınlık):6(karanlık) periyodu için 2.57 g L^{-1} , 24(aydınlık):0(karanlık) periyodu için ise 2.83 g L^{-1} 'dir.



Şekil 4.19 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine aydınlatma periyodu etkisi (6:18, 12:12, 18:6, 24:00, 'a:k' - %20 CO₂, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı: 3 vvm, pH: 7)

Algal çoğalma ortamlarının giriş ve çıkışlarından gaz örnekleri alınmış ve bu örnekler Gaz Kromatografi cihazında analiz edilmiştir (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10 *Scenedesmus obliquus* 276-3d ile farklı aydınlatma periyotlarında CO₂ giderim oranları (12. Gün, %20 CO₂, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)

	6(a):18(k)	24(a):0(k)
% CO ₂ giriş	20.30	20.20
% CO ₂ çıkış	18.40	13.80
% CO ₂ giderimi	9.4	31.7

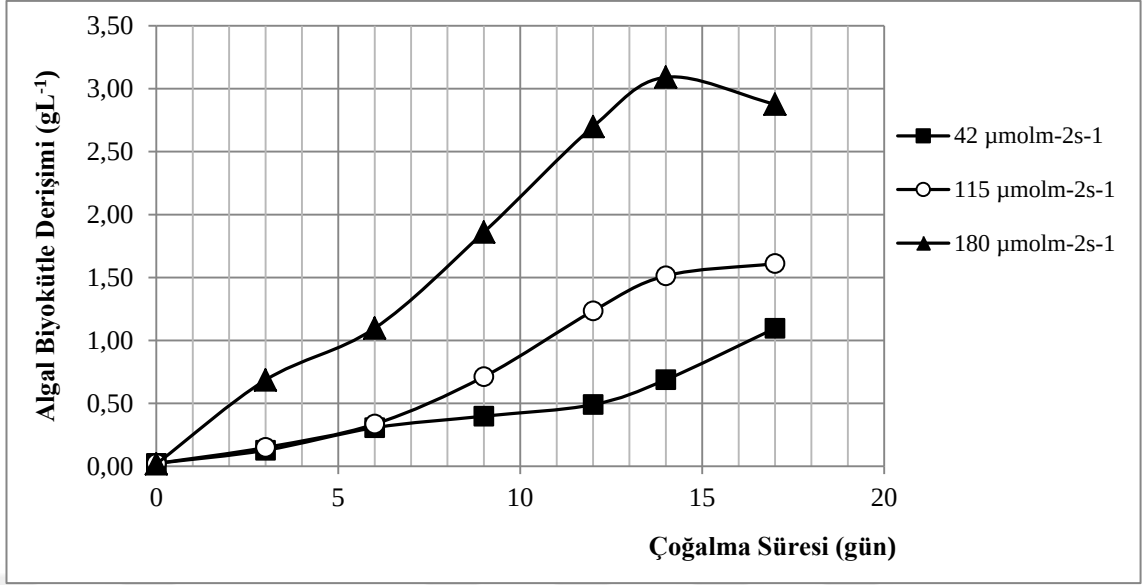
Çoğalma ortamları giriş ve çıkışlarından alınan gaz örneklerinin analizi ile hesaplanan CO₂ giderimi 6(a):18(k) aydınlatma periyodunda %9.4'ken 24(a):0(k) periyodunda %31.7'ye yükselmiştir.

Maksimum spesifik çoğalma hızı (μ) 18(a):6(k), 24(a):0(k) periyotları için sırayla 0.29 gün⁻¹ ve 0.32 gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır. ANOVA Testi (EK-5) sonuçların istatistiksel olarak farklı olmadığı belirlenmiştir ($F = 0.065 < F_{\text{kritik}} = 4.301$). Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde mikroalgin karanlık geçen sürede yetecek kadar enerji depolayabildiğini ve bu sayede büyüme hızını koruyabildiği sonucu çıkarılabilir. Sürekli aydınlık olan ortamda çoğalmanın daha yüksek olması beklenen bir durum olmakla birlikte alglerle karbondioksit gideriminin verimli olabilmesi için ekonomik de olması gereklidir. Bu nedenle ve enerji tasarrufunu da göz önünde bulundurarak bundan sonraki çalışmalara 18 (aydınlık):6 (karanlık) periyodunda devam edilmesine karar verilmiştir

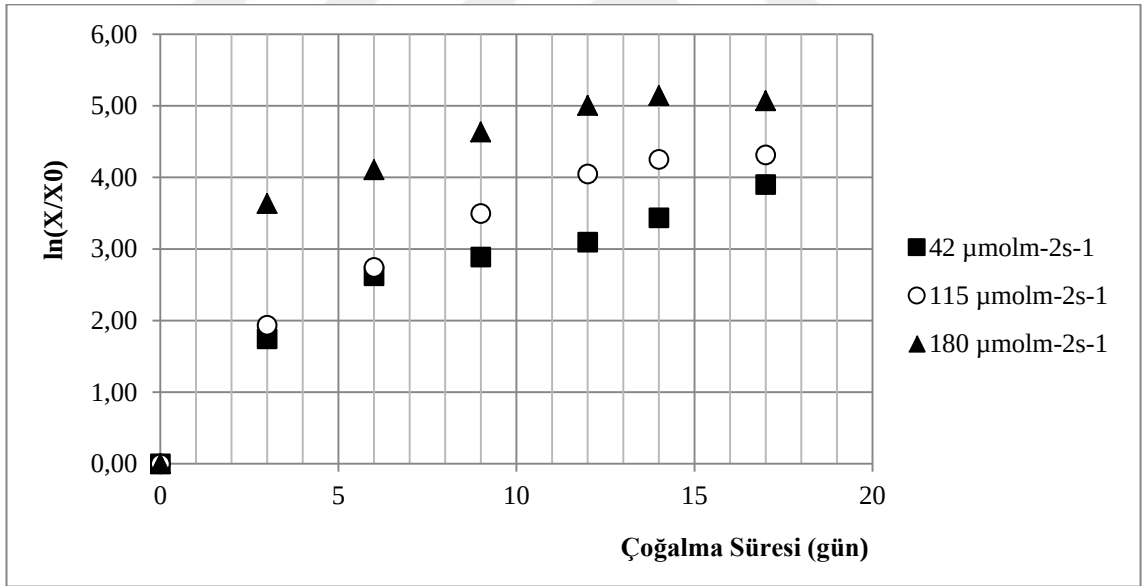
4.1.6 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine ışık şiddeti etkisi

Aydınlatma şiddetinin algal çoğalma üzerine etkisi doktora çalışmaları kapsamında incelenmiştir. Aydınlatma şiddeti ile birlikte aydınlatma türünün de algal çoğalma üzerine etkisi olduğu bilinmektedir. Fotoototrofik alglerin çoğalması ve CO₂ tutmaları için, ışık kaynağı oldukça önemli bir parametredir. Uygun ışık yoğunluğu, periyot ve dalga boyu seçimi algal çoğalmayı olduğu kadar alglerden elde edilecek ürünlerin içeriğini de değiştirecektir. Gereğinden fazla ışık fotooksidasyon ve inhibisyona sebep olacağı gibi düşük ışık seviyeleri de çoğalmayı sınırlayıcı etki gösterecektir.

Algal çoğalma için gün ışığı aydınlatması tez çalışmaları kapsamında kullanılmıştır. Ardışık deney setleri ile 42 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 115 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ve 180 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık şiddetlerinde çalışılarak *Scenedesmus obliquus* (276-3d) çoğalması üzerine ışık şiddeti etkisi incelenmiştir. Biyokütle miktarını gösteren sonuçlar Şekil 4.20’de verilmiş olup $\ln(X/X_0)$ verilerine karşılık çoğalma süresi Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine ışık şiddeti etkisi, ● : 42 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, □ : 115 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ▲ : 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (18:6 a:k periyot - %20 CO_2 , $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)



Şekil 4.21 $\ln(X/X_0)$ – Çoğalma süresi, ● : 42 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, □ : 115 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ▲ : 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO_2 , $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)

Şekil 4.20’de görüleceği gibi 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda *Scenedesmus obliquus* (276-3d) ile en yüksek biyokütle miktarına ($3,09 \text{ g L}^{-1}$) ulaşılmıştır. Bu değer 42 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde ulaşılan biyokütle miktarının yaklaşık 2.8 katıdır.

Şekil 4.21’de verilen üstel çoğalma fazı verilerinden spesifik çoğalma hızları (μ , gün^{-1}) hesaplanmış artan ışık şiddeti ile birlikte spesifik çoğalma hızlarındaki artış ile birlikte deneye ait kinetik parametreler Çizelge 4.11’de verilmiştir. Spesifik çoğalma hızına (μ , gün^{-1}) bakıldığında da artan ışık şiddeti ile spesifik çoğalma hızının arttığı görülmektedir. $180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde 0.37 gün^{-1} olan spesifik çoğalma hızı aydınlatma azaltıldığında 0.26 gün^{-1} olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.11 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine ışık şiddeti etkisi, kinetik parametrelerin karşılaştırılması (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO_2 , $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm, pH : 7)

Işık Şiddeti, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	μ , gün^{-1}	C_{alg} , g L^{-1}	P , $\text{g L}^{-1}\text{gün}^{-1}$	* R_{CO_2} , hesap $\text{g L}^{-1}\text{gün}^{-1}$
42	0.26	1.10	0.06	0.072
115	0.33	1.61	0.09	0.113
180	0.37	3.09	0.22	0.274

* Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Literatürde yer alan incelemelere bakıldığında, Sforza vd. (2014) aynı alg türü ile $10\text{--}1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ aralığında çalışmış ve maksimum çoğalma hızının (0.863 gün^{-1}) $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde gerçekleştiğini görmüşlerdir. Bu değer, doktora çalışmaları kapsamında yaklaşık olarak aynı ışık şiddetinde ($180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) elde edilen spesifik çoğalma hızından %46 daha yüksektir. Bu farka sebep olarak araştırmacıların levha tipi biyoreaktör kullanmış olmasının, alglerin ışık kaynağından daha fazla yararlanmış olmalarını sağlaması düşünülebilir. Ho vd. (2012) yaptıkları çalışmada ise yine *Scenedesmus obliquus*’un bir türü olan *Scenedesmus obliquus* CNW-N ile çalışılmış ve ışık şiddetinin $420 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ seviyesine artmasıyla CO_2 tutma hızı ve biyokütle üretilebilirliğinde artış olduğunu belirlemişlerdir.

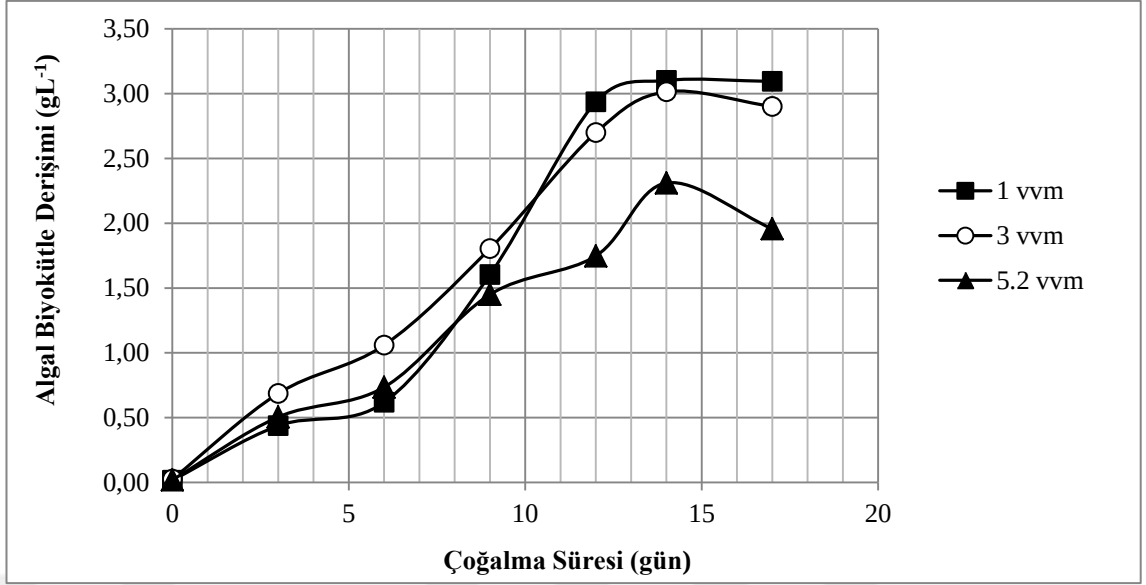
Her deney setinde çoğalma ortamı giriş ve çıkışlarından gaz örnekleri alınmış olup CO_2 içeriğini tespit etmek amacıyla analiz edilmiştir. $180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde %28.2 olan CO_2 giderimi ışık şiddetinin azalması ile birlikte düşmekte ve $42 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde %17.4 olarak hesaplanmaktadır.

4.1.7 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine akış hızı etkisi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda deney setlerinde ilave bir karıştırıcı kullanılmamış olup karışma çoğalma ortamına gönderilen hava – CO₂ karışımı ile sağlanmıştır. Yeterli karışma çoğalma ortamında pH ve sıcaklığın homojen dağılımını sağladığı gibi hücre sedimentasyonunu önlemekte ve fazlar arası kütle aktarımını arttırmaktadır.

CO₂ çözünürlüğü zayıf olan bir gazdır (1.45 g L⁻¹, 25°C ve 1 atm'de, Zhang vd. 2007). Ortamda yeterli miktarda besin, uygun pH, sıcaklık ve yeterli ışık kaynağı bulunduğu çoğalma üzerine etki eden en kritik parametre CO₂'nin çözünürlüğü, gaz kabarcıklarının kalma süresi, ve gaz-sıvı kütle aktarımı olmaktadır. Düşük hızlarda gaz kabarcıklarının ortamda kalma süresi artmakta ancak gaz-sıvı kütle aktarımı düşük olmaktadır. Yüksek hızlarda ise gaz-sıvı kütle aktarımı yüksek olup kalma süresi kısalmaktadır. Ortam türbülansı çok arttığında CO₂ süspansiyon içerisinde çözünmeden uzaklaşabilmekte olup, bu nedenle optimum akış hızının belirlenmesi önemlidir.

1 vvm, 3 vvm ve 5.2 vvm akış hızlarında *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması incelenmiştir. Deneyler süresince ulaşılan biyokütle miktarını gösteren sonuçlar Şekil 4.22'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde akış hızının artmasıyla çoğalmanın düştüğü görülmektedir. Akış hızının artmasıyla birlikte çoğalma daha kısa sürede gözlenmiş ancak hemen sonrasında algal çoğalma ortamının renginde sararmalar meydana gelmiş ve çoğalma durmuştur. En yüksek sonuçlara 1 vvm akış hızında ulaşılmıştır. Çoğalma ortamındaki hücrelerin eşit miktarda ışığı maruz kalmaları, sıcaklık homojenizasyonu gibi faktörler nedeniyle karıştırma çok önemli olmakla birlikte, optimum seviyenin üzerinde olan akış hızları nedeniyle CO₂'nin ortamda kalma süresi azalmakta ve/veya hücre yapıları kayma gerilimi nedeniyle zarar görebilmektedir.



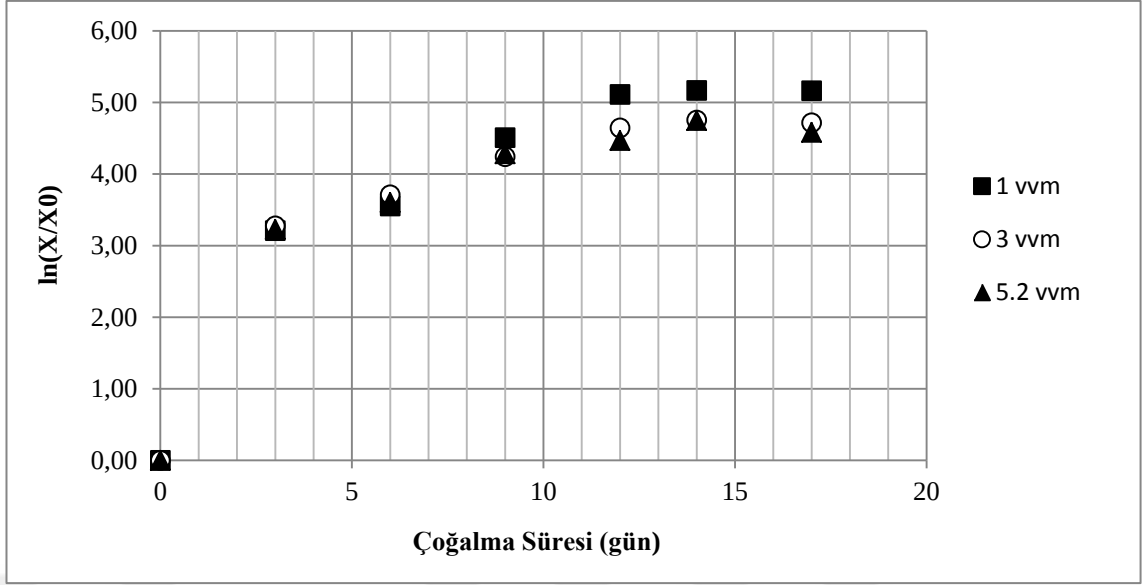
Şekil 4.22 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine CO₂ - Hava karışımı akış hızı etkisi, ● : 1 vvm, □ : 3 vvm, ▲ : 5.2 vvm (18:6 a:k periyot, %20 CO₂ , 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)

Zamana karşı $\ln(X/X_0)$ değerlerinin gösterildiği grafik ise Şekil 4.23'da verilmiştir. Bu grafik kullanılarak hesaplanan eğim bize spesifik çoğalma hızlarını vermektedir. Şekil 4.23'de verilen üstel çoğalma fazı verilerinden spesifik çoğalma hızları (μ , gün⁻¹) hesaplanmıştır, deneye ait kinetik parametreler Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12 *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine akış hızı etkisi, kinetik parametrelerin karşılaştırılması (18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO₂, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)

Akış Hızı, vvm	μ , gün ⁻¹	C_{alg} , g L ⁻¹	*R _{CO₂} , hesap g L ⁻¹ gün ⁻¹	P , g L ⁻¹ gün ⁻¹
1	0.20	3.10	0.40	0.22
3	0.18	3.01	0.38	0.21
5.2	0.14	2.31	0.30	0.16

* Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.23 $\ln(X/X_0)$ -Çoğalma süresi, ●: 1vvm, ○: 3vvm, ▲: 5.2vvm (18:6 aydınlık: karanlık periyot - %20 CO₂, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)

1 vvm akış hızında 3.10 g L⁻¹ olarak belirlenen kuru biyokütle miktarı ile çalışmaların bu aşamasına kadar ki bütün deneylerde kullanılan akış hızı olan 3 vvm ile ulaşılan kuru biyokütle miktarı olan 3.01 g L⁻¹ arasındaki fark ANOVA testi ile istatistiksel olarak değerlendirildiğinde ihmal edilebilir (F = 0.001 < F_{kritik} = 4.74). 1 vvm, 3 vvm ve 5.2 vvm akış hızları için maksimum spesifik çoğalma hızı (μ) sırasıyla 0.20 gün⁻¹, 0.18 gün⁻¹, 0.14 gün⁻¹ olarak bulunmuştur.

Deney setlerinin giriş ve çıkış noktalarından alınan gaz örnekleri analiz edilerek %CO₂ giderimi hesaplanmıştır. 1 vvm akış hızında gerçekleşen %30.4 CO₂ giderimi, 5.2 vvm akış hızında ulaşılan CO₂ gideriminden %19.3 daha yüksektir.

4.2 Algal Çoğalma Kinetiği

Bu bölümde, *Scenedesmus obliquus* 276-3d kinetik çoğalma modeli incelenmiştir. Model oluşturulurken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır;

- Tam karışma vardır.
- İdeal gaz varsayımı yapılmıştır.

- o Reaktör içerisindeki gaz kabarcıklarının boyutu sabittir.
- o Algal spesifik çoğalma hızı inorganik karbon derişimi ile bağlantılıdır.
- o Reaktöre sürekli alg girişı bulunmamaktadır.
- o Çoğalmayı etkileyen azot, sıcaklık, ışıık gibi parametreler deneyler süresince sabittir.

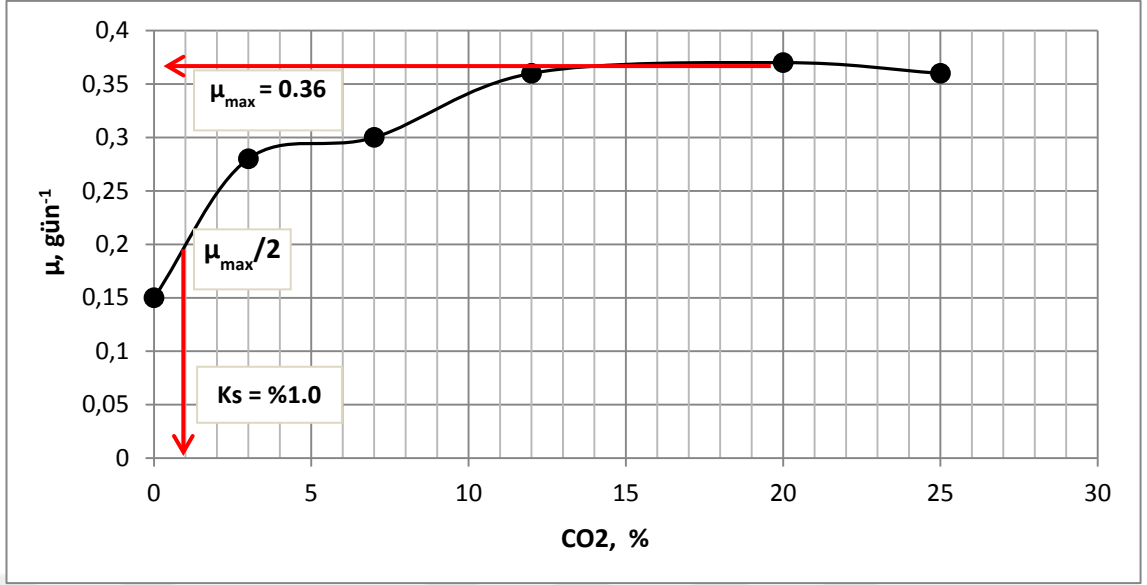
Algal çoğalma ortamında toplam inorganik karbon (TIK) ortam pH'ına bağılı olarak karbondioksit, bikarbonat (HCO_3^-) ve karbonat (CO_3^{2-}) iyonları olmak üzere 3 farklı formda bulunur. Deneylerde algal çoğalma ortamı pH'ı 7 olduğu için çözünmüş CO_2 miktarı belirlenirken ortamda sadece HCO_3^- bulunduğu varsayımı yapılmıştır.

4.2.1 Monod çoğalma kinetiğı

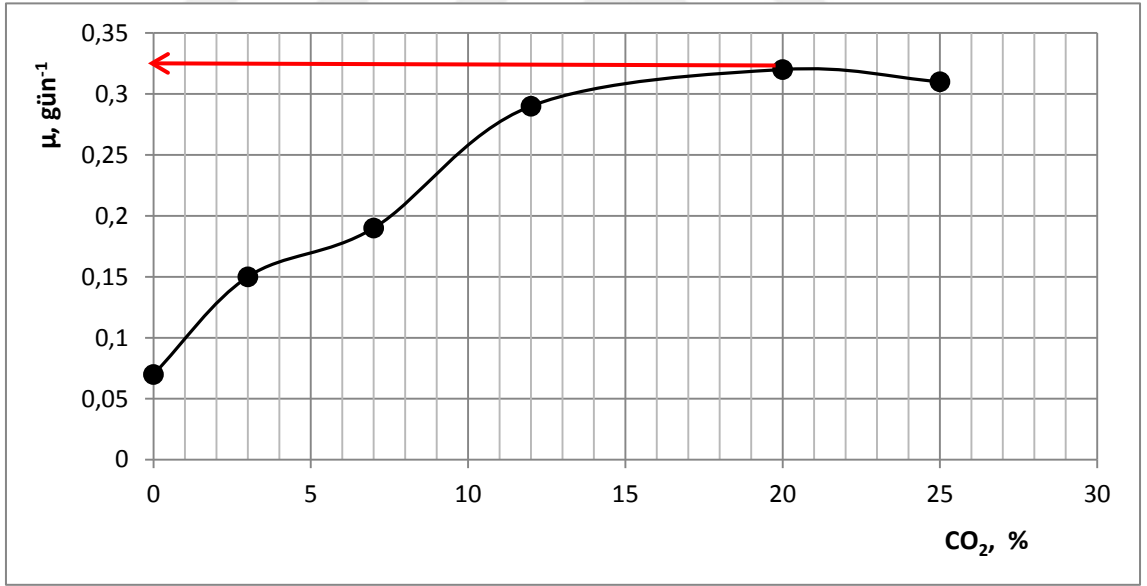
Spesifik çoğalma hızı μ , şu üç parametrenin bir fonksiyonu olarak bulunabilir:

- o S: Sınırlayıcı substrat konsantrasyonu,
- o μ_{max} : Maksimum çoğalma hızı,
- o K_s : Monod sabiti

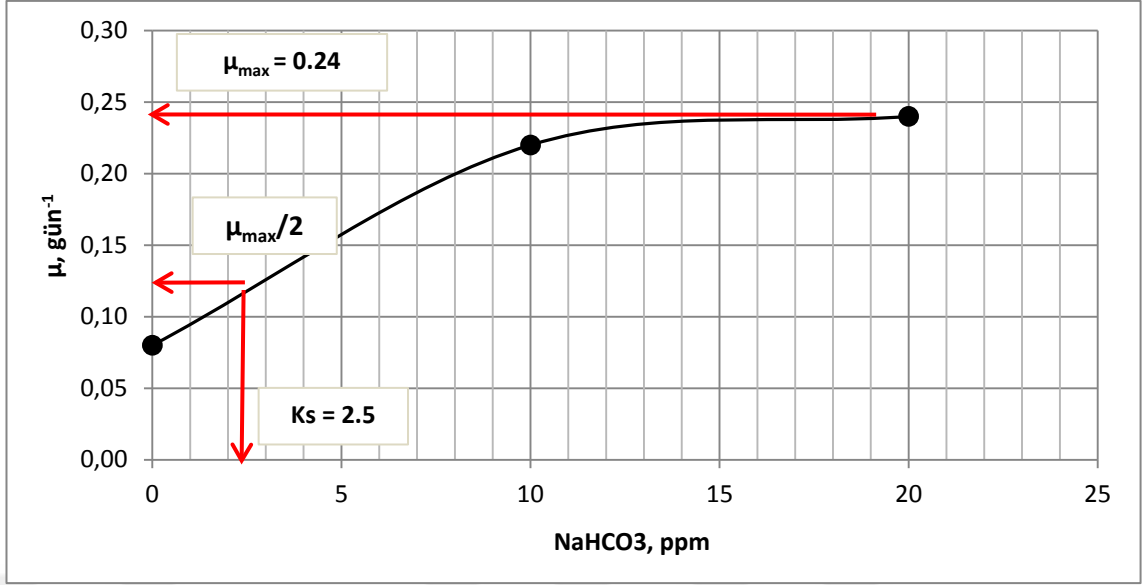
Doktora tezi çalışmaları kapsamında Monod çoğalma modeli, kültür ortamındaki substrat derişimine göre alglerin çoğalma hızını tahmin etmek için kullanılmış, bu amaçla algal çoğalma ortamında iki farklı substrat olan gaz fazdaki CO_2 ve katı fazdaki NaHCO_3 'ün çoğalma üzerine etkisi incelenmiştir. *S. obliquus* 276-3d ve *Ch. vulgaris* 211-11b için sırasıyla Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de CO_2 (%), Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de NaHCO_3 (ppm) etkisinin değerlendirildiğı çalışmaları kullanılarak substrat derişimlerine bağılı hesaplanan spesifik çoğalma hızları verilmiştir.



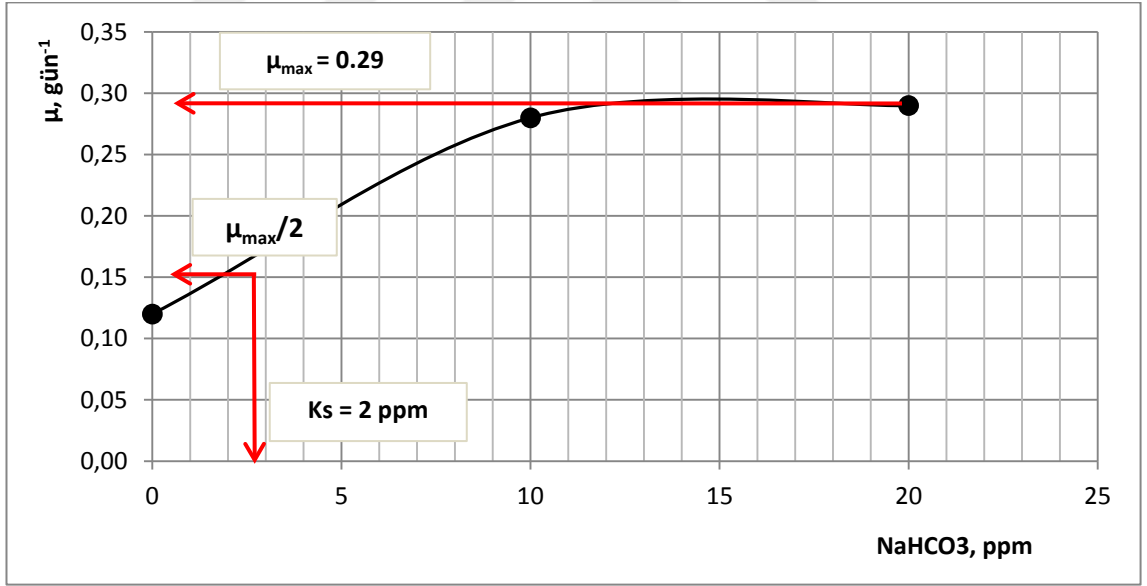
Şekil 4.24 *Scenedesmus obliquus* 276-3d, Spesifik çoğalma hızı – substrat miktarı, % CO_2 (18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, ışık şiddeti : $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)



Şekil 4.25 *Ch. vulgaris* 211-11b, Spesifik çoğalma hızı – substrat miktarı, % CO_2 (18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, ışık şiddeti : $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)



Şekil 4.26 *Ch. vulgaris* 211-11b, Spesifik çoğalma hızı – substrat miktarı, NaHCO₃, ppm (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 μmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)



Şekil 4.27 *S. obliquus* 276-3d Spesifik çoğalma hızı – Substrat miktarı, NaHCO₃, ppm (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 μmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)

Hücre çoğalma hızı (μ) Eşitlik 3.13 kullanılarak hesaplanmış olup, ilgili parametreler Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13 Farklı substrat türleri ve derişimlerinde hücre çoğalma hızının karşılaştırılması (18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, ışık şiddeti : $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pH : 7)

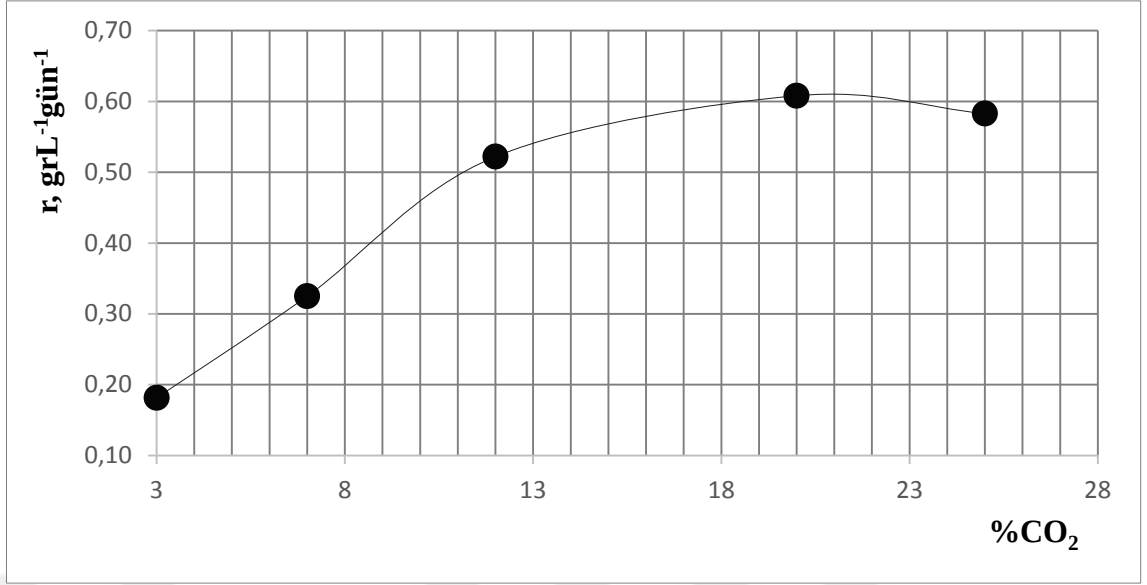
Alg	Substrat (C)	Cs	μ_{max} gün^{-1}	Ks	μ gün^{-1}
<i>S. obliquus</i> 276-3d	CO ₂	20, %	0.36	1.0, %	0.34
	NaHCO ₃	20, ppm	0.29	2.0, ppm	0.26
<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b	CO ₂	20, %	0.32	3.0, %	0.27
	NaHCO ₃	20, ppm	0.24	2.5, ppm	0.21

Scenedesmus obliquus (276-3d) için çoğalma ortamına %20 CO₂ beslendiği durumdaki hesaplanan maksimum spesifik çoğalma hızı (μ_{max}) 0.34 gün^{-1} , çoğalma ortamında 20 ppm NaHCO₃ bulunduğu durumda ulaşılan maksimum spesifik çoğalma hızı (μ_{max}) olan 0.26 gün^{-1} 1.5 kat daha yüksektir. *Chlorella vulgaris* (211-11b) için ise de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum algal çoğalma için gaz fazda ortama beslenen CO₂'nin NaHCO₃'e göre daha uygun bir karbon kaynağı olduğunu göstermektedir.

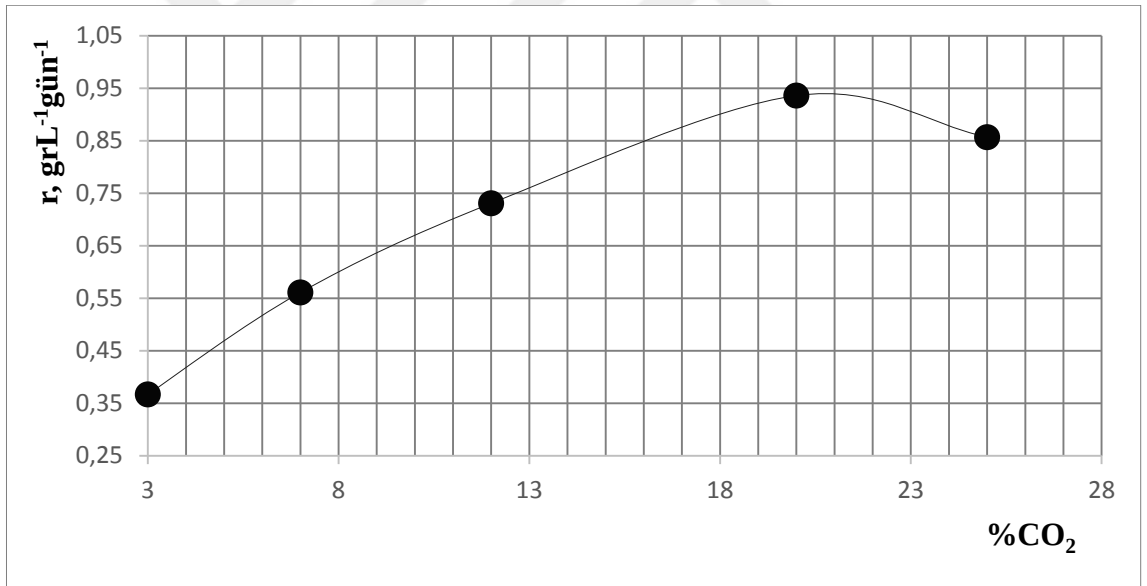
4.2.2 İnhibisyon kinetiği ve ilgili parametrelerin belirlenmesi

Algal çoğalma üzerine CO₂ miktarının etkisinin incelendiği çalışma sonuçlarına göre CO₂ miktarı %25'e çıktığında, *Scenedesmus obliquus* (276-3d) ve *Chlorella vulgaris* (211-11b) biyokütlesinde substrat inhibisyonu nedeniyle düşüş gözlenmiştir.

Şekil 4.28'de *Ch. vulgaris* (211-11b), Şekil 4.29'de *Sc. obliquus* (376-3d) için substrat miktarı ile (%CO₂) değişen spesifik çoğalma hızı gösterilmektedir.

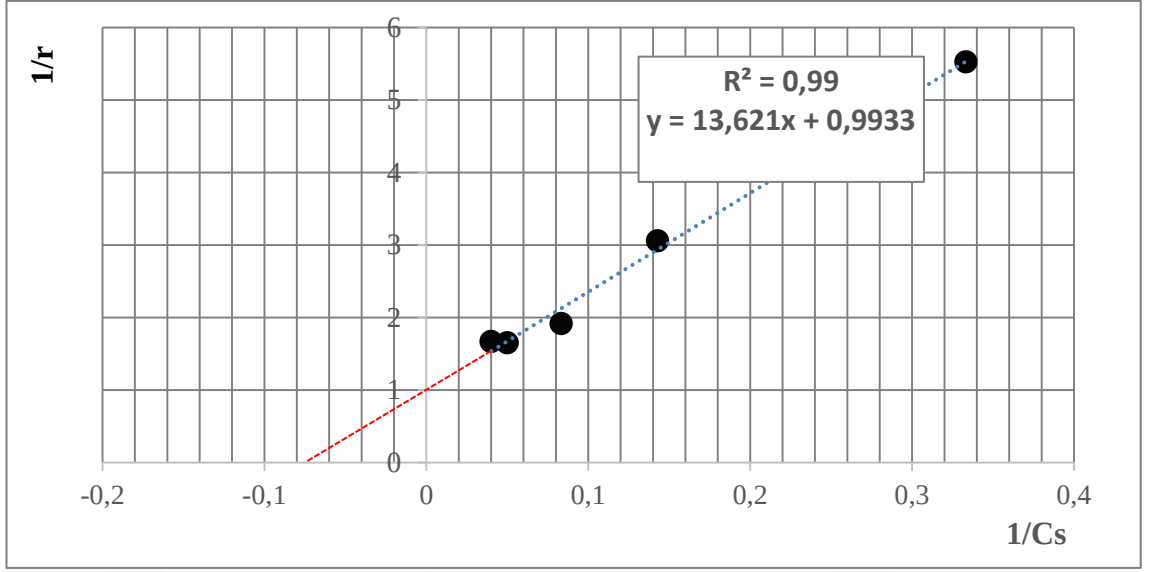


Şekil 4.28 *Chlorella vulgaris* için çoğalma hızının substrat miktarı ile değişimi (18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm)

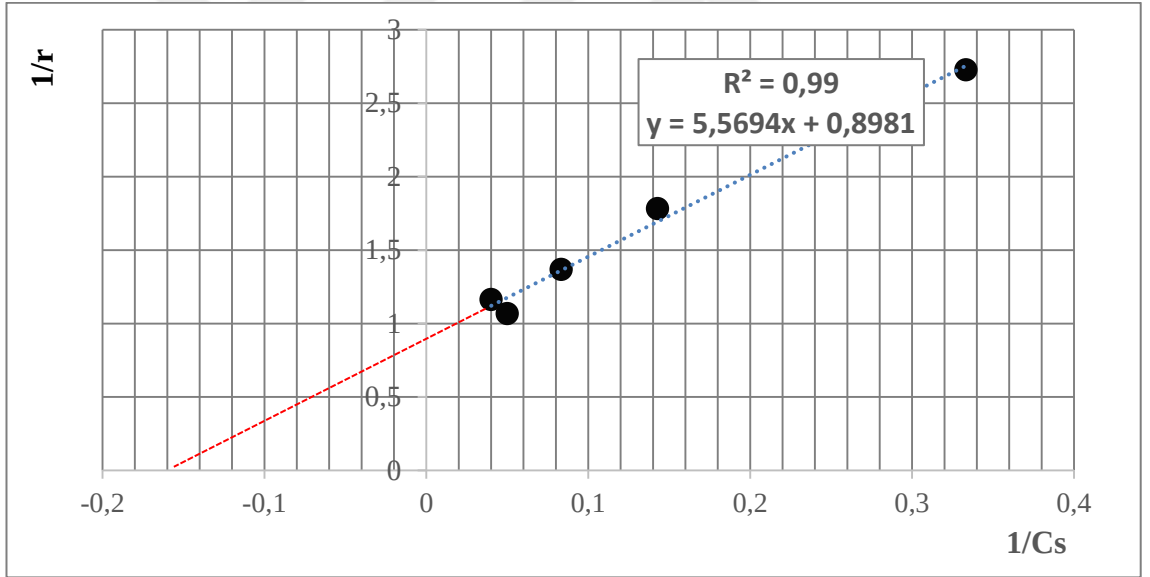


Şekil 4.29 *Scenedesmus obliquus* için çoğalma hızının substrat miktarı ile değişimi (18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm)

Lineweaver-Burk Eşitliğine (Eşitlik 2.5) göre inhibisyonlu ve inhibisyonlu enzimatik bir reaksiyon için $1/C_s$ 'ye karşılık $1/r$ grafiğe geçirilerek $1/K_{mgör}$ ve r_{max} belirlenmiş ve Çizelge 4.14'verilmiştir. Şekil 4.30'da *Ch. vulgaris* (211-11b), Şekil 4.31'de *Sc. obliquus* (376-3d) için $1/C_s - 1/r$ gösterilmektedir.



Şekil 4.30 *Chlorella vulgaris* için $1/r - 1/C_s$ değişimi (18:6 a:k periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm)



Şekil 4.31 *Scenedesmus obliquus* için $1/r - 1/C_s$ değişimi (18:6 a:k periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$, akış hızı : 3 vvm)

Çizelge 4.14 Substrat inhibisyonu durumunda görünür Michaelis Menten sabiti ve $r_{\max}$ değerleri (%25 CO₂, 18:6 a: periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)

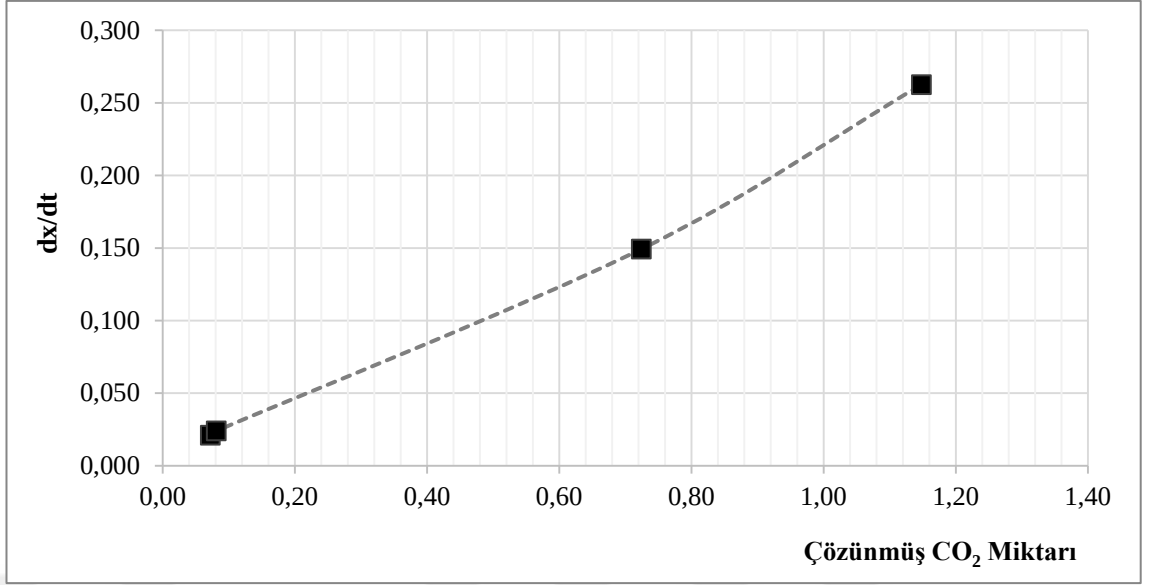
Alg	$r_{\max}$ gr L ⁻¹ gün ⁻¹	Km gör %
<i>S. obliquus</i> 276-3d	1.12	6.26
<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b	1.00	1.52

4.2.3 Kütle aktarım katsayısının (kLa) belirlenmesi

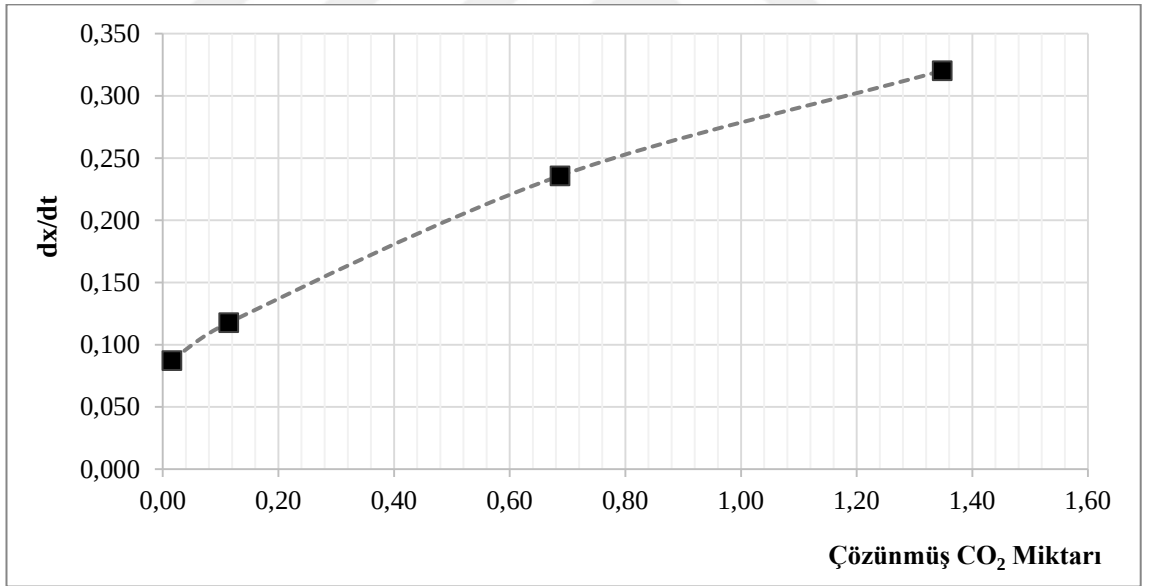
Alg çoğalma sistemlerinde CO₂ kütle aktarım katsayılarının belirlenmesi ile ilgili çok az literatür çalışması bulunmaktadır. Kütle aktarımı kullanılan fotobiyoreaktör sistemine ve CO₂ – hava karışımı hızına çok bağlıdır.

CO₂ – hava karışımı veya hava algal çoğalma ortamına gönderilirken kütle aktarımını arttırmak için gözenekli gaz dağıtıcı kullanılmıştır. HCO₃⁻'ın belirlenmesi için doğrudan bir analiz yöntemi bulunmamaktadır. Doktora çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde ortam pH'ı düzenli olarak takip edilmiş, her defasında 2 ölçüm alınmıştır.

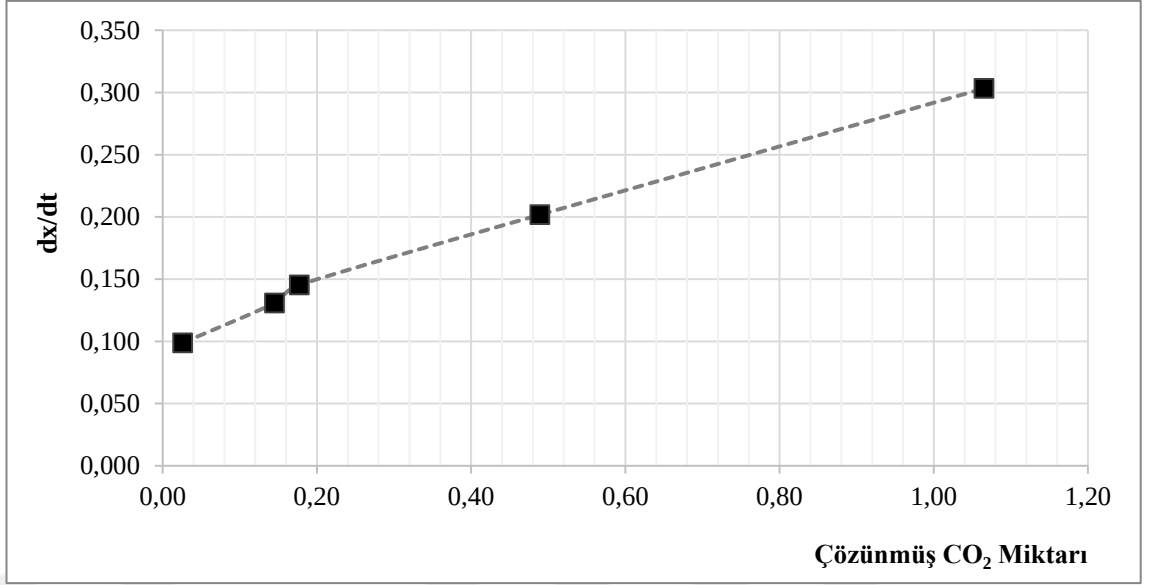
Algal çoğalma hızı ile çözünmüş CO₂ miktarı yaklaşık olarak doğrusaldır. Çoğalma süresince kontrol edilen pH değerlerinden 3.9 eşitliği ile hesaplanan HCO₃⁻ miktarlarına karşılık çoğalma hızları, algal çoğalma ortamına %3, %7, %12, %20, %25 CO₂ beslemesi için Şekil 4.32 – 4.36'da verilmiştir. CO₂ etkisinin belirlendiği bu deney setlerinde çoğalma ortamına NaHCO₃ eklenmemiş olduğu için ortamdaki HCO₃⁻'ın tamamının çözünmüş CO₂ olduğu düşünülebilir.



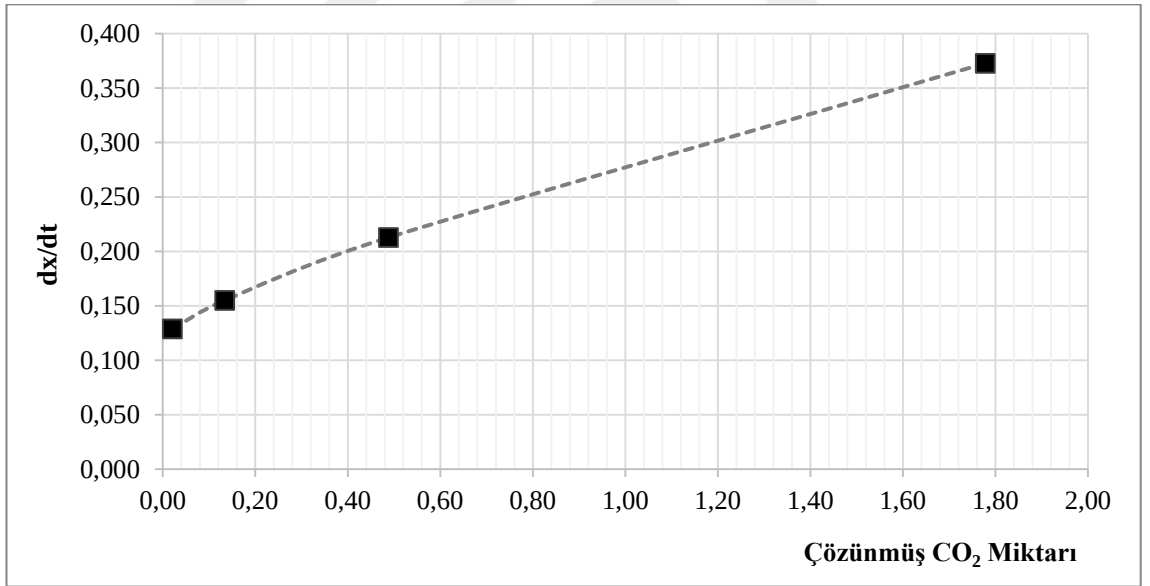
Şekil 4.32 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO₂ miktarı değişimi (pH 7, %3 CO₂, akış hızı : 3 vvm 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)



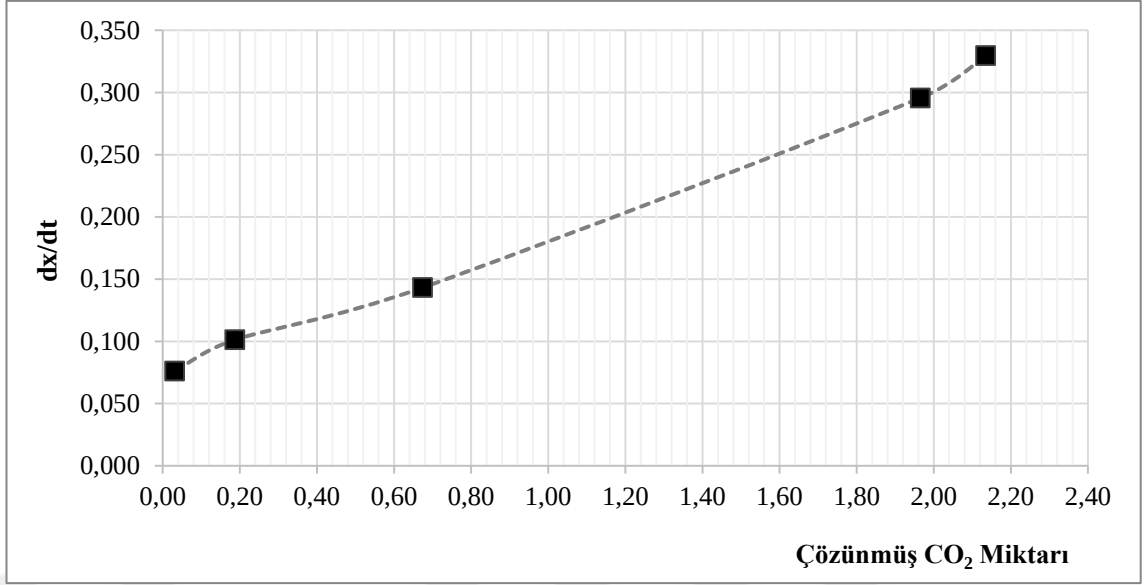
Şekil 4.33 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO₂ miktarı değişimi (pH 7, %7 CO₂, akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)



Şekil 4.34 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO₂ miktarı değişimi (pH 7, %12 CO₂, akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)



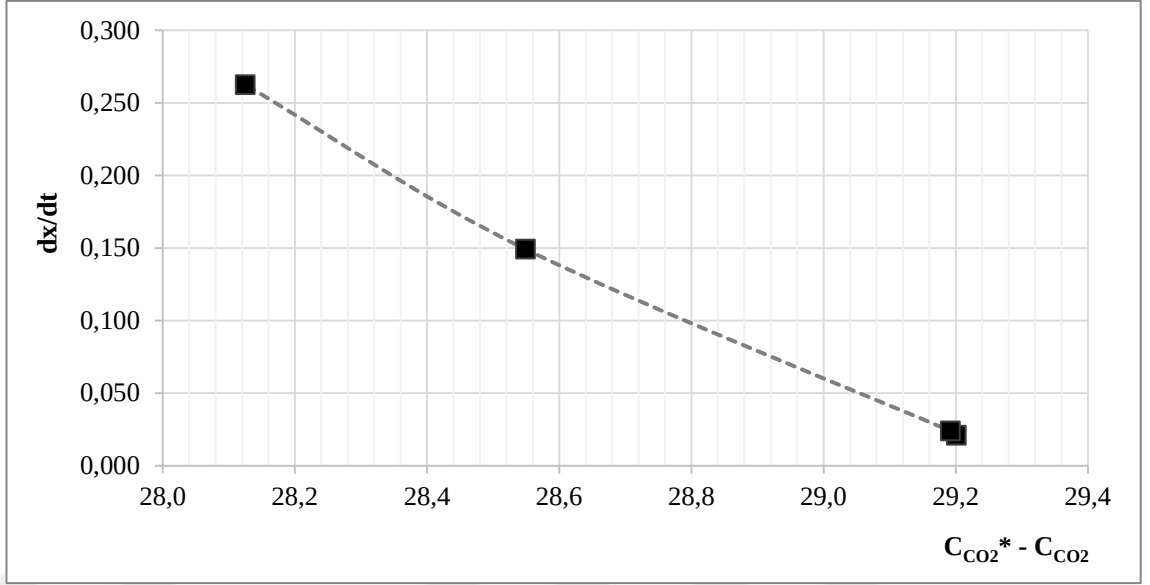
Şekil 4.35 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO₂ miktarı değişimi (pH 7, %20 CO₂, akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)



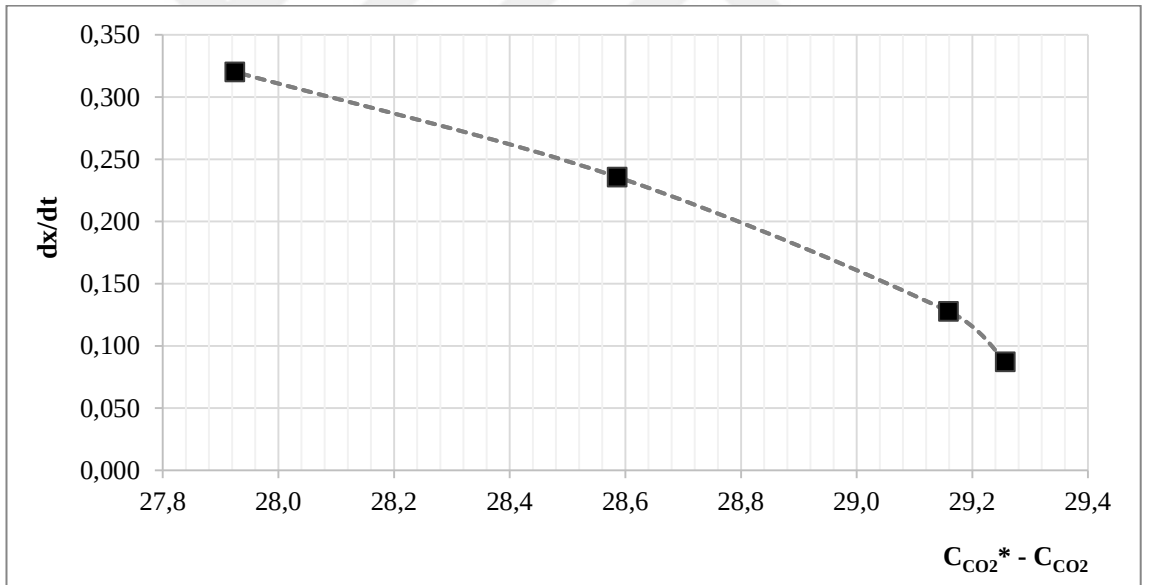
Şekil 4.36 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – Çözünmüş CO₂ miktarı değişimi (pH 7, %25 CO₂, akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ±2 °C)

Bölüm 3.'de verilen 3.21 eşitliği ile kla 'nın hesaplanabilmesi için ortamdaki doymuş substrat miktarının (C^*) bilinmesi gerekmektedir. Literatür araştırması yapılmış ve bu değer CO₂ için 29.27 mmol L⁻¹ olarak kabul edilmiştir (Maatschappij 1978, Diamond vd. 2003). Doymuş substrat miktarı " $C_{CO_2}^*$ " olarak gösterilmiştir.

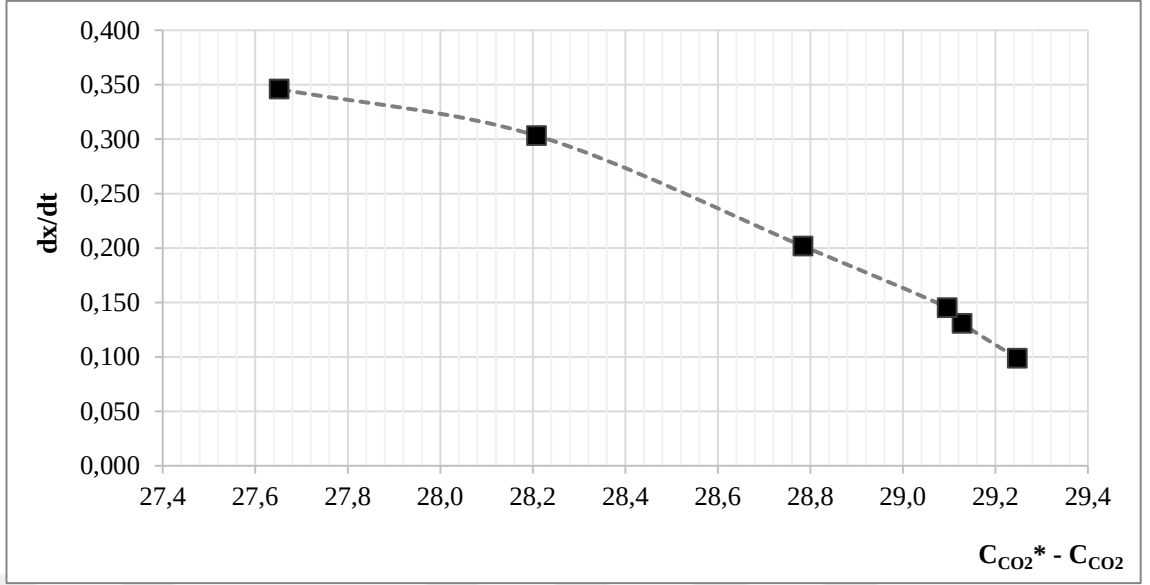
Tez çalışmaları kapsamında %3, %7, %12, %20, %25 CO₂ beslemesi ile algal çoğalma üzerine CO₂ etkisinin belirlenmesi için yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak farklı çözünmüş inorganik karbon derişimlerinde " $C_{CO_2}^* - C_{CO_2}$ " değerlerine karşılık " dx/dt " değerleri grafiğe geçirilmiştir (Şekil 4.37 – 4.41). " C_{CO_2} " sıvı fazda çözünmüş karbondioksit derişimidir.



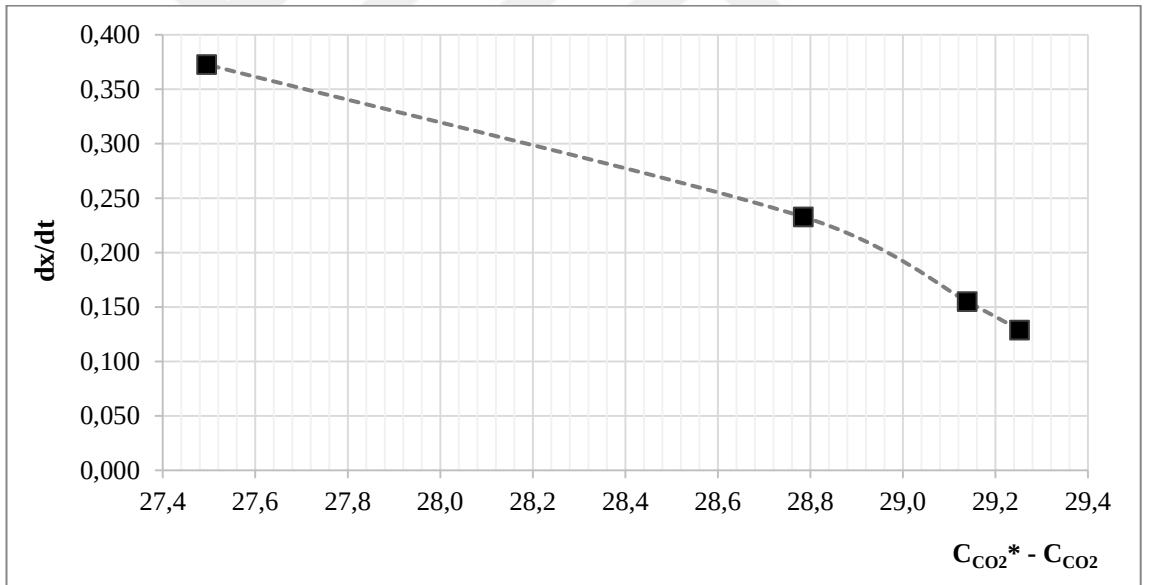
Şekil 4.37 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – “ $C_{CO_2}^* - C_{CO_2}$ ” değişimi (pH 7, %3 CO_2 , akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ C$)



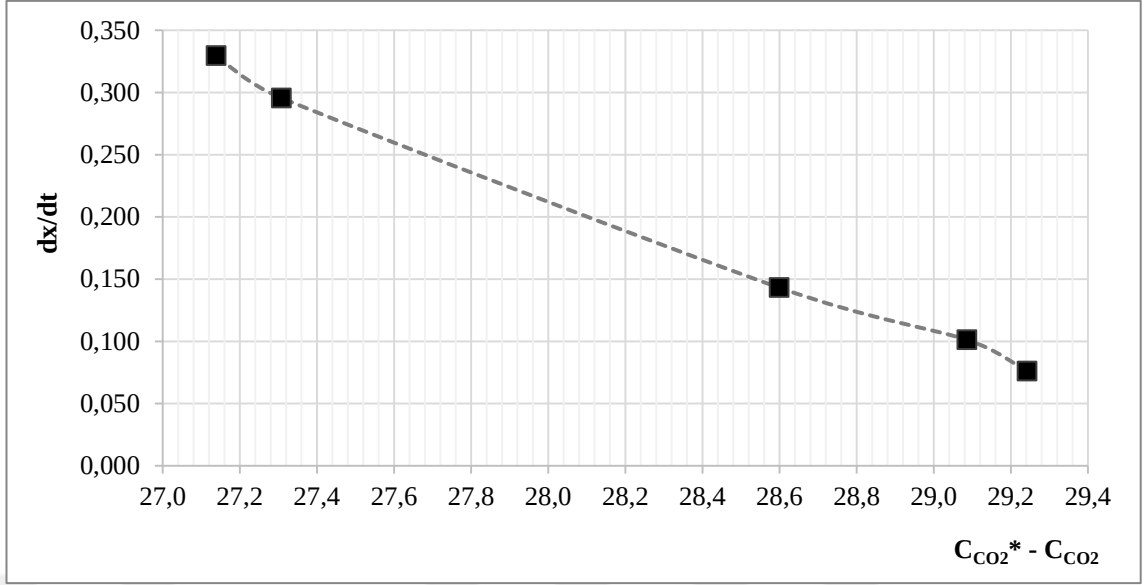
Şekil 4.38 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – “ $C_{CO_2}^* - C_{CO_2}$ ” değişimi (pH 7, %7 CO_2 , akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ C$)



Şekil 4.39 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – “ $C_{CO_2^*} - C_{CO_2}$ ” değişimi (pH 7, %12 CO_2 , akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ C$)



Şekil 4.40 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – “ $C_{CO_2^*} - C_{CO_2}$ ” değişimi (pH 7, %20 CO_2 , akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ C$)



Şekil 4.41 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – “ $C_{CO_2}^* - C_{CO_2}$ ” değişimi (pH 7, %25 CO_2 , akış hızı : 3 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ C$)

Çizelge 4.15’de algal çoğalma üzerine CO_2 etkisinin (%3, %7, %12, %20, %25 CO_2) belirlenmesi için yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak farklı çözünmüş inorganik karbon derişimlerinde hesaplanan kla değerleri verilmektedir.

Her bir deney seti için Y_{Calg/CCO_2} Eşitlik 3.20 kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.37 – 4.41’de verilen grafiklerde eğim, $kla * Y_{Calg/CCO_2}$ değerini vermektedir. Elde edilen veriler ile kla teorik olarak Eşitlik 3.21 kullanılarak hesaplanmıştır.

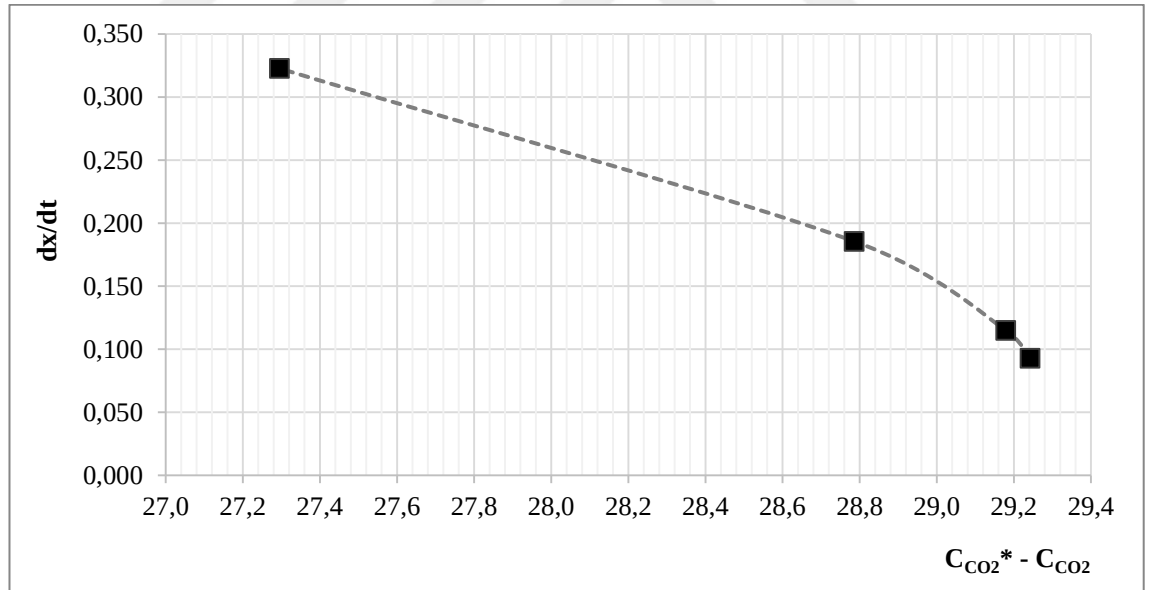
Çizelge 4.15 *Scenedesmus obliquus* farklı CO_2 derişimlerinde kla karşılaştırması (18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ C$, ışık şiddeti: $180 \mu mol m^{-2} s^{-1}$, pH : 7)

	%3 CO_2	%7 CO_2	%12 CO_2	%20 CO_2	%25 CO_2
Eğim	0.068	0.156	0.156	0.222	0.117
Y_{Calg/CCO_2}	0.705	1.368	1.225	1.389	0.962
$kla, gün^{-1}$	0.096	0.114	0.127	0.160	0.121

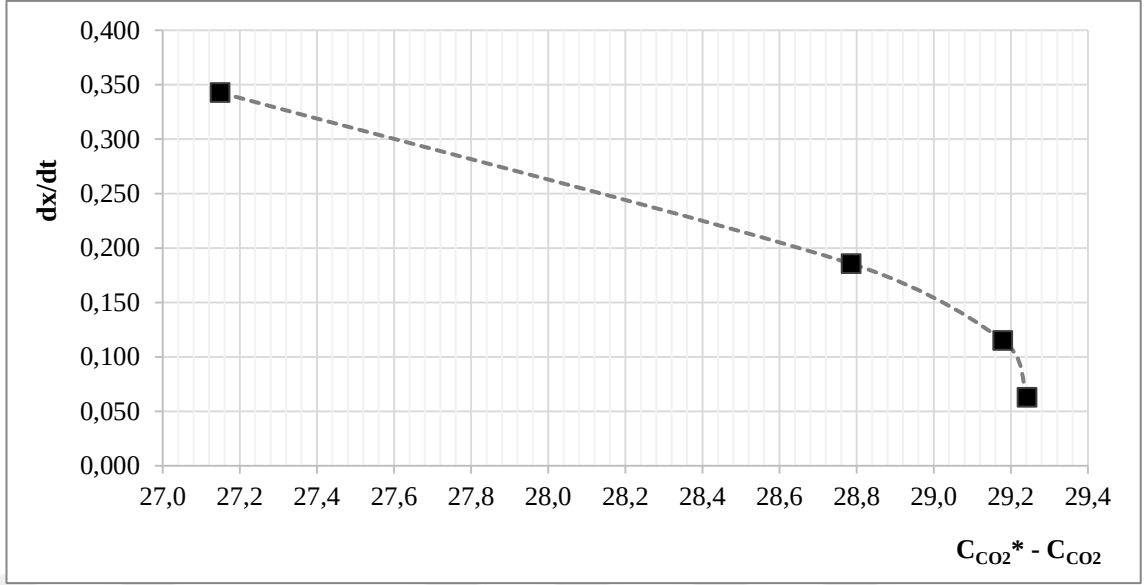
Algal çoğalma ortamına %20 CO_2 verildiğinde kütle aktarım katsayısının daha yüksek olduğu görülmekte olup $0.160 gün^{-1}$ ’dir. Hava ile birlikte %3 CO_2 gönderildiği durumda

elde edilen kütle aktarım katsayısı 0.096 gün^{-1} 'dir. Bununla birlikte, kla üzerinde çoğalma ortamındaki substrat miktarının etkisi akış hızı ve kabarcık boyutu gibi parametreler ile karşılaştırıldığında düşüktür. Çalışmalarda gaz dağıtıcı sabit olarak kullanılmış olduğundan kla değişimini gözlemlemek için farklı akış hızlarının çalışıldığı deney setine ait veriler kullanılmıştır. Kütle aktarımını en çok etkileyen parametre akış hızıdır. Kütle aktarımının yüksek olması istenen bir durum olmakla birlikte hava – CO_2 akış hızının optimum değer üzerinde olması, hem proses maliyetini arttıracak hem de algal hücrelerin kayma gerilimi nedeniyle zarar görmesine neden olabilecektir.

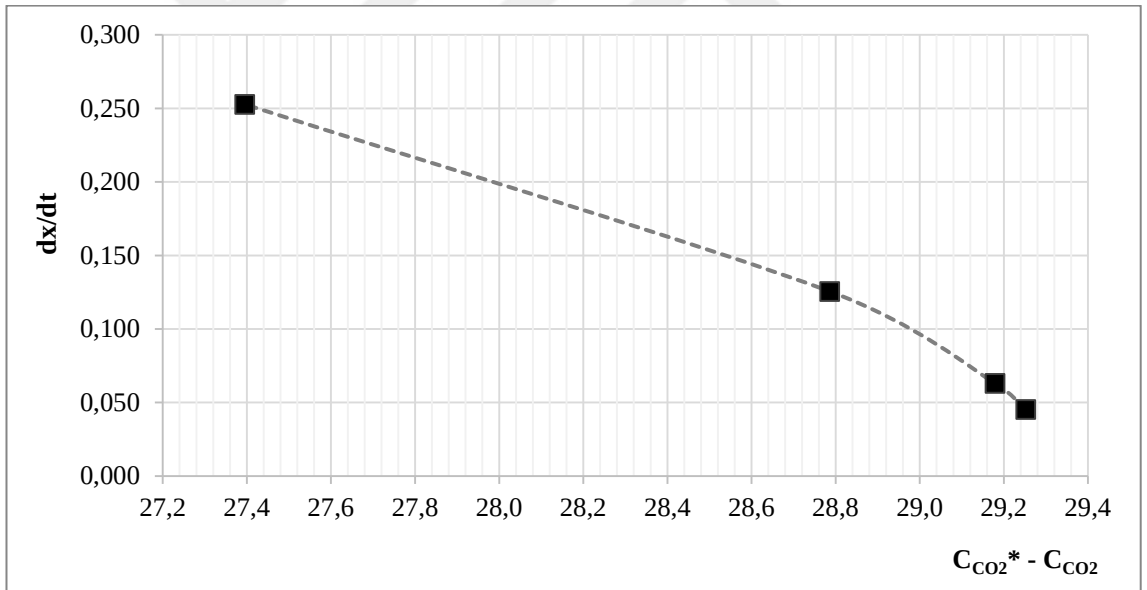
Tez çalışmaları kapsamında 1 vvm, 3 vvm ve 5.2 vvm beslemesi ile algal çoğalma üzerine akış hızı etkisinin belirlenmesi için yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler ile Eşitlik 3.20 kullanılarak $Y_{\text{Alg}/\text{CCO}_2}$ hesaplanmış ve aynı veriler ile " $\text{C}_{\text{CO}_2^*} - \text{C}_{\text{CO}_2}$ " değerlerine karşılık " dx/dt " değerleri grafiğe geçirilmiştir (Şekil 4.42 – 4.44). Grafiklerden elde edilen veriler ve Eşitlik 3.21 kullanılarak kla hesaplanmıştır.



Şekil 4.42 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – " $\text{C}_{\text{CO}_2^*} - \text{C}_{\text{CO}_2}$ " değişimi (Akış hızı: 1 vvm, pH 7, %20 CO_2 , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ\text{C}$)



Şekil 4.43 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – “ $C_{CO_2}^* - C_{CO_2}$ ” değişimi (Akış hızı: 3 vvm, pH 7, %20 CO_2 , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ C$)



Şekil 4.44 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – “ $C_{CO_2}^* - C_{CO_2}$ ” değişimi (Akış hızı: 5.2 vvm, pH 7, %20 CO_2 , 18:6 aydınlık:karanlık periyot, $28 \pm 2^\circ C$)

Şekil 4.32 – 4.44’de verilen grafiklerde eğim, $kla * Y_{Calg/CCO_2}$ değerini vermektedir. Elde edilen veriler ile teorik olarak Eşitlik 3.21 kullanılarak hesaplanan kla değerleri Çizelge 4.16’da verilmektedir.

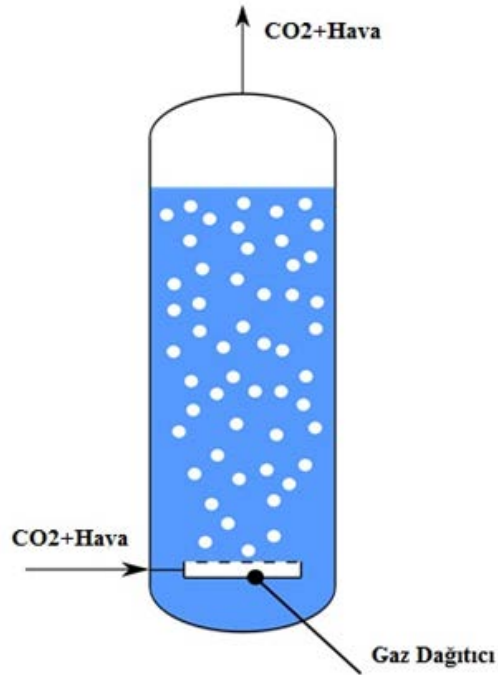
Çizelge 4.16 *Scenedesmus obliquus* 276-3d farklı akış hızlarında (1 vvm, 3 vvm, 5.2 vvm) kla değerlerinin karşılaştırması (18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)

	1 vvm	3 vvm	5.2 vvm
Eğim	0.112	0.121	0.108
Y_{Calg/CCO2}	1.57	1.43	1.23
kla, gün⁻¹	0.072	0.084	0.087

Algal çoğalma ortamına gönderilen CO₂'nin sudaki çözünürlüğü çok düşüktür (1.45 g L⁻¹, 25°C, 1 atm (Devgoswami vd. 2011)). Çözünürlük ise ortama beslenen hava – CO₂ akış hızı ve kabarcıklanma ile ilgilidir. *S. obliquus* 276-3d ile çoğalma üzerine akış hızının etkisinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar göstermiştir ki optimum akış hızının üzerinde, CO₂'nin sıvı fazda kalma süresinin azalmasına bağlı olarak algal çoğalma azalmaktadır. 1 vvm, 3 vvm ve 5.2 vvm akış hızları için kütle aktarım katsayısı (kla) sırasıyla 0.072 gün⁻¹, 0.084 gün⁻¹ ve 0.087 gün⁻¹ olarak bulunmuştur. Hesaplanan kla değerleri değerlendirildiğinde en yüksek kla değeri 5.2 vvm akış hızında elde edilmiş olup (0.087 gün⁻¹) bu değer 1 vvm akış hızında elde edilen değerden %17.2 yüksektir.

4.3 Kabarcık Kolon Reaktör Sisteminde Algal Çoğalma

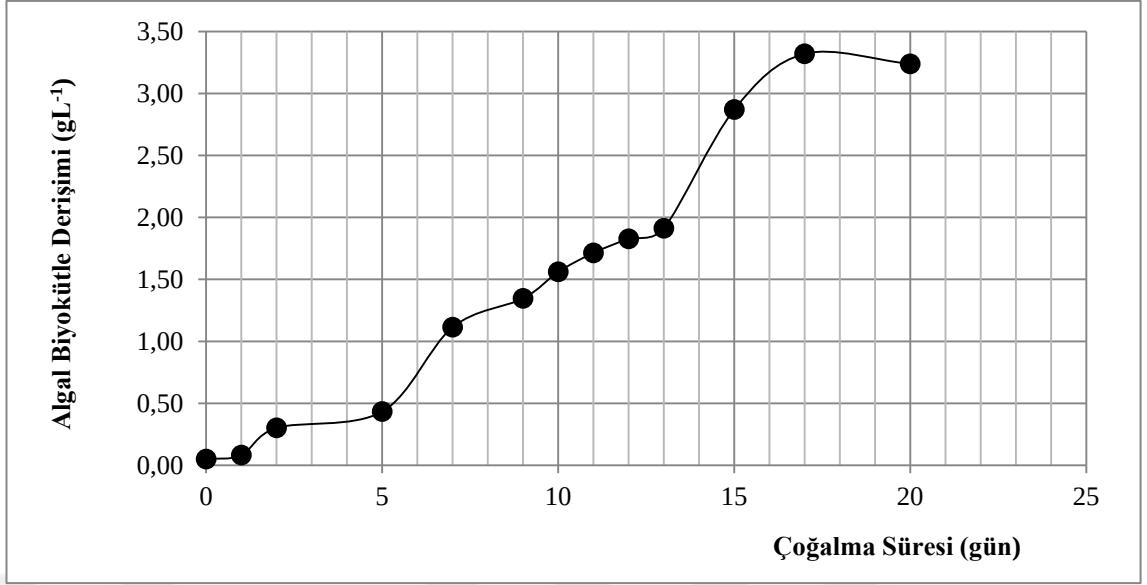
Doktora tez çalışmalarının bu aşamasında, küçük ölçekte yapılan çalışmalarda belirlenen optimum koşullarda kabarcık kolon fotobiyoreaktörde *Scenedesmus obliquus* 276-3d ile çalışılmasına karar verilmiş, algal çoğalma ve CO₂ giderilmesi gözlenmiştir. Şekil 4.45'de kabarcık kolon sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



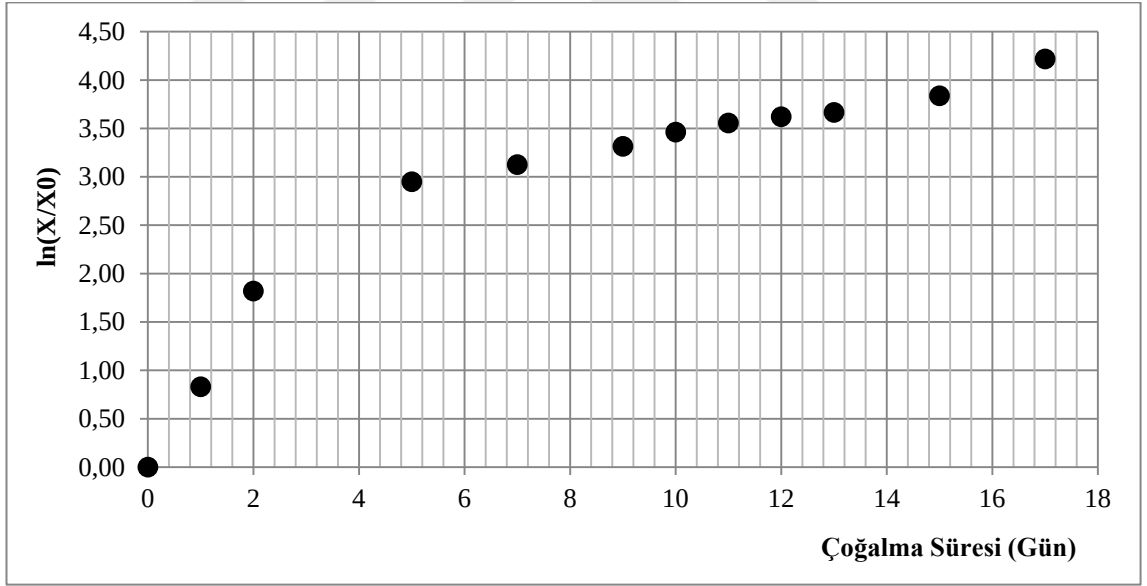
Şekil 4.45 Kabarcık kolon fotobiyoreaktör sistemi

Scenedesmus obliquus 276-3d ile ulaşılan biyokütle miktarını gösteren sonuçlar Şekil 4.46'da verilmiştir. Beklendiği gibi daha yüksek biyokütle miktarına ulaşılmıştır. Bunun sebebi olarak gaz dağıtıcının çok daha homojen bir şekilde CO₂ ve havayı çoğalma ortamına dağıtması gösterebilir.

Zamana karşı $\ln(X/X_0)$ değerleri Şekil 4.47'de verilmekte olup, kabarcık kolon fotobiyoreaktör deneyine ait kinetik parametreler Çizelge 4.17'de yer almaktadır.



Şekil 4.46 Kabarcık kolon fotobiyoreaktörde *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması (18:6 aydınlık:karanlık periyot, akış hızı : 1 vvm, %20 CO₂, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)



Şekil 4.47 Kabarcık kolon fotobiyoreaktörde ln(X/X0) – Çoğalma Süresi (akış hızı: 1 vvm, 18:6 aydınlık:karanlık periyot - %20 CO₂ , 28 ± 2 °C, Işık Şiddeti : 180 µmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)

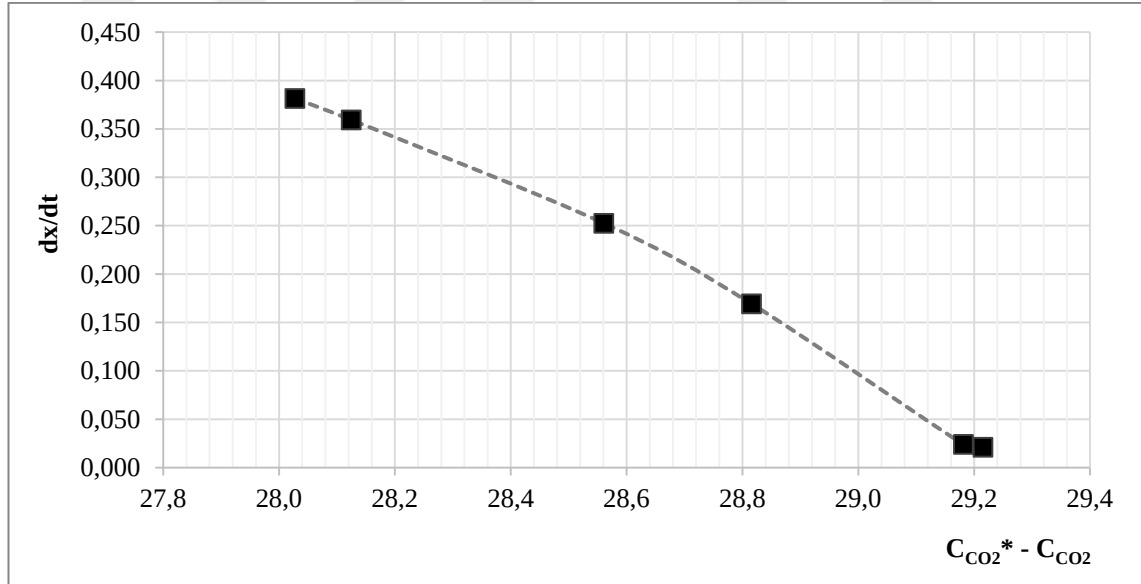
Çizelge 4.17 Kabarcık kolon fotobiyoreaktörde *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalmasında hesaplanan kinetik parametreler (18:6 aydınlık:karanlık periyot, akış hızı : 1 vvm, %20 CO₂, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)

μ , gün ⁻¹	C_{alg} , g L ⁻¹	* R_{CO_2} , g L ⁻¹ gün ⁻¹	** R_{CO_2} , hesap, g L ⁻¹ gün ⁻¹	P , g L ⁻¹ gün ⁻¹
0.37	3.32	0.30	0.35	0.19

* Eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır. ** Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Maksimum spesifik çoğalma hızı (μ) sırasıyla 0.37 gün⁻¹ olarak bulunmuş, 3.32 g L⁻¹ kuru biyokütle miktarına ulaşılmıştır. Maksimum CO₂ tutma hızı (R_{CO_2}) ise 0.35 g L⁻¹gün⁻¹ olarak, algal prodüktivite (P) ise 0.19 g L⁻¹gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.48’de verilen grafikte eğim, kla * Y_{Calg/CCO_2} değerini vermektedir (Çizelge 4.18). Elde edilen veriler ile Eşitlik 3.21 kullanılarak hesaplananan kla değeri 0.112 gün⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.48 Kabarcık kolon fotobiyoreaktör *Scenedesmus obliquus* 276-3d Çoğalma Hızı – “ $C_{CO_2}^* - C_{CO_2}$ ” değişimi (Akış hızı : 1 vvm, pH 7, %20 CO₂, 18:6 aydınlık:karanlık periyot, 28 ± 2°C)

Çizelge 4.18 *Scenedesmus obliquus* 276-3d kabarcık kolon fotobiyoreaktörde k_{la} (18:6 aydınlık:karanlık periyot, akış hızı : 1 vvm, %20 CO₂, 28 ± 2°C, ışık şiddeti : 180 µmol m⁻² s⁻¹, pH : 7)

Eğim	0.308
Y_{Calg/CCO2}	2.754
k_{la}, gün⁻¹	0.112

Deney setinde fotobiyoreaktör giriş ve çıkışlarından gaz örnekleri alınmış, içerdikleri karbondioksitin belirlenmesi amacıyla Gaz Kromatografi cihazında analiz edilmiştir. Ölçüm sonuçlarındaki karbondioksit miktarları arasındaki fark değerlendirildiğinde çoğalmanın 15. gününde alınmış olan örneklerle göre % CO₂ giderimi %32.3'dir (giriş %20.1 CO₂, çıkış %13.6 CO₂).

4.4 Algal Biyokütleden Lipid Ekstraksiyonu

Lipidler yağ, sterol, monogliseritler, digliseritler, trigliseritler, vitaminler gibi organik çözücülerde çözünebilen biyolojik moleküllerin toplamına verilen isimdir. Bir çok lipid yağ asidi içerirken bazıları ise yağ asidi içermez ve yağ asidi içermeyen lipidler ise biyodizel üretiminde kullanılamaz. Algal yağ asitleri 12-22 karbon zincirlidir ve doymuş yada doymamış halde olabilirler Medina vd. (1998). Alglerin içerdikleri lipid oranı türlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yapılan çalışmalar alglerin kuru kütlelerinin %5-77'si oranında lipid içerdiklerini göstermiştir (Chisti 2007).

Doktora tez çalışmasının bu aşamasında farklı lipid ekstraksiyon ve YAME dağılımı inceleme metodları araştırılmış ve kullanılabilecek en uygun metod seçilmek istenmiştir.

Algal biyokütleden lipid elde edilmesi ve analizi 2 aşamalı olarak tez çalışmaları kapsamında değerlendirilmiştir;

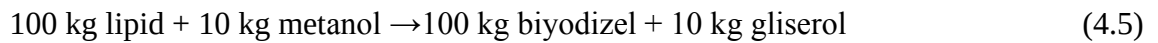
o Lipid ekstraksiyonu

O Yağ asidi metil esterleri dağılımı

Literatürde biyokütleden lipid ekstraksiyonu ile ilgili çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Folch vd. (1957), hayvansal sıvılardan lipid ekstraksiyonu amacıyla geliştirdiği ve algal biyokütleden lipid ekstraksiyonunda en çok yararlanılan yöntemde kloroform:metanol 2:1 oranında olup lipid olmayan kısmın ayrılmasında su kullanılmaktadır. Literatürde sıklıkla adı geçen diğer bir yöntem Bligh ve Dyer (1959) tarafından ilk kez kullanılmıştır. Burada kloroform:metanol 1:2 dir. Lee vd. (1998) farklı solvent ile ekstraksiyon üzerine çalışmışlar (kloroform–metanol 2:1, hekzan–izopropanol 3:2, dikloroetan–etanol 1:1, aseton–dichloromethane 1:1) ve algal biyokütleden lipid ekstraksiyonu için en uygun çözücü olarak kloroform–metanol (2:1) ikilisini belirlenmişlerdir. Ryckebosch vd. (2011) yaptıkları çalışmada algal biyokütleden farklı lipid ekstraksiyon metodlarını ve çözücülerini incelemişler ve kloroform:metanol (1:1) karışımında en yüksek toplam lipid miktarına ulaşmışlardır.

Kloroform sağlığa oldukça zararlı bir çözücü olduğu için kullanımı tercih edilmemekle birlikte hekzan gibi polar olmayan çözücüler ile karşılaştırıldığında çok daha yüksek verimler elde edilmektedir

Yağ asidi esterleri lipidler içerisindeki yağ asitlerinin metanol, etanol, butanol gibi bir alkol ile reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Eğer reaksiyonda metanol kullanılırsa meydana gelen bileşikler yağ asidi metil esterleri (YAME) olarak adlandırılır. Patil (2011)’e göre YAME reaksiyonunda aşağıdaki Eşitlik 4.5 geçerlidir;



Yağ asidi metil esterlerinin ticari olarak bilinen ve kullanılan ismi Biyodizeldir. Transesterifikasyon reaksiyonunda reaksiyonu hızlandırmak için H_2SO_4 gibi bir asit veya NaOH, KOH gibi bir baz kullanılabilir (Christi 2007).

Yapılan literatür araştırmasına göre kullanılmak üzere bir metod oluşturulmuştur. Algal çoğalmanın tamamlandığı ve duraklama döneminin henüz başlangıç aşaması olan 12. günde algal süspansiyon 1000 rpm de 20 dk santrifüjlenmiştir. Katı faz ayrılmış, 5 mg biyokütle üzerine 10 mL kloroform:metanol (1:1) karışımı ile lipid ekstraksiyonu gerçekleştirilmiştir. Bu işlem maksimum verim elde edebilmek amacıyla ardışık olarak dört kez tekrar edilmiştir. Ardından distile su ile yıkama işlemi yapılmıştır. Sıvı faz lipid olmayan protein gibi lipid olmayan bileşikleri içerirken organik faz lipidleri içermektedir. Gözle görülür şekilde meydana gelen katmanlar birbirlerinden fiziksel olarak ayrılmış ve çözücüler buharlaştırılarak uzaklaştırılmıştır (Maghraby ve Fakhry 2015, Zonouzi vd. 2016). Etüvde 60°C'de sabit tartıma gelene kadar bekletilen lipid fraksiyonu tartım yapılarak sonra mg olarak Eşitlik 3.23 kullanılarak belirlenmiştir.

Lipid ekstraksiyonu üzerine ultrasonifikasyon etkisi incelenmiş ve 5 mg katı faz üzerine 10 mL kloroform:metanol (1:1) eklendikten sonra karışım 30 dk süresince buz banyosu içerisinde ultrasonik banyoda bekletilmiştir. Bu işlem yukarıda detaylı anlatılan her 4 tekrarda da yapılmıştır.

Sonuçlara bakıldığında toplam lipid (TL) miktarı (Eşitlik 3.23) ultrasonifikasyon yapıldığında %16.8, yapılmadığında ise %17.4 olarak belirlenmiştir. Literatürde *Scenedesmus obliquus* ile yapılan çalışmalarda daha yüksek TL seviyelerine ulaşıldığı görülmüştür. Örneğin Hanaa vd. (2012) *Scenedesmus obliquus* yaptıkları çalışmada çoğalma ortamına 20 mg L⁻¹ Fe³⁺ eklediklerinde toplam lipid miktarını %33.1 olarak bulmuştur. Choi vd. (2009) *Scenedesmus obliquus* ile toplam lipid oranını belirlemek için yaptıkları çalışmada % 11.2 değerini elde etmişken, Darki vd. (2017) *Scenedesmus obliquus* toplam lipid içeriği üzerine besin maddesi etkisini inceledikleri çalışmada %32 toplam lipid elde etmişlerdir. Shao vd. 2017 yılında *Scenedesmus obliquus* ile yaptıkları çalışmada toplam lipid miktarını doktora tez çalışmalarda elde edilen miktar olan %17.4'e yakın olarak %20 bulmuşlar, çoğalma ortamında azot kısıtlaması yaparak mikoalgler hücrelere stres faktörü uyguladıkları çalışmalarında ise toplam lipid miktarını %30.8'e yükseltmişlerdir.

Lipidlerin yağ asidi metil esteri olarak tanımlanması için elde edilen lipidlerin asidik koşullarda transesterifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Cam bir tüp içerisinde 1 mg örnek üzerine 0.5 mL %3 H₂SO₄ içeren metanol eklenmiş, karışım 1 dk boyunca vortekslenmiştir. Reaksiyon 60°C'de 4 saat devam ettirildikten sonra yağ asidi metil esteri (YAME) analizi gaz kromatografi cihazında gerçekleştirilmiştir. C16 ile C20 arasında değişen yağ asitleri, doymuş yağ asitleri çoğunlukla (C16:0 - palmitik asit), doymamış yağ asitleri (C16:1 - palmitoleik metil ester, C18:1 - oleik asit ve C18:2 linoleik asit) olarak gruplanmıştır. Çizelge 4.19'da yağ asidi metil esteri dağılımı verilmiştir.

Çizelge 4.19 Yağ asidi metil esteri profili

YAME	%YAME
C16:0	39.4
C16:1	10.8
C16:2	17.3
C18:1	20.2
C18:2	6.8
C20:5	5.5

Çalışma yeterli algal yağ bulunmadığı için tekrarlanamamış, algal yağ ve YAME profili üzerine farklı parametrelerin etkisi incelenmemiştir.

5. SONUÇLAR

Mikroalgler ile yapılan çalışmalar son yıllarda gittikçe önem kazanmaktadır. Fotosentezin aydınlık ve karanlık ortam reaksiyonlarının iki anahtar parametresi olan ışık ve CO₂ ise algal çoğalmayı en çok etkileyen faktörler olmakla birlikte, literatür incelendiğinde çoğalma üzerine farklı parametrelerin etkisinin araştırıldığı çalışmalar görülmektedir.

Chlorella vulgaris 211-11b, *Spirulina maxima* 49.88 ve *Scenedesmus obliquus* 276-3d kullanılarak detaylı bir literatür araştırması sonrasında başlatılan doktora çalışmalarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- *Chlorella vulgaris* 211-11b, *Spirulina maxima* 49.88 ve *Scenedesmus obliquus* 276-3d alglerinden çalışmalar için en uygun olanı *Scenedesmus obliquus* 276-3d olarak belirlenmiştir.
- *Scenedesmus obliquus* 276-3d çoğalması üzerine %CO₂ miktarı etkisi incelenmiş (%0, %3, %7, %12, %20,%25) ve çoğalma ortamına %20 CO₂ - %80 Hava beslendiği durumda spesifik çoğalma hızı (μ) sırasıyla 0.37 gün⁻¹ , maksimum kuru kütle miktarı 2.53 g L⁻¹ , CO₂ tutma hızı (R_{CO_2}) ise 0.30 g L⁻¹gün⁻¹ , algal prodüktivite ise (P) ise 0.17 g L⁻¹gün olarak bulunmuştur. CO₂ giderimi bu koşullarda %32.5'dir.
- *Scenedesmus obliquus* 276-3d karbon kaynağı olarak gaz formdaki CO₂'yi ve/veya katı formdaki NaHCO₃'ü kullanabilmektedir. Bu anlamda çoğalma üzerine NaHCO₃'ün etkisini incelenmiştir. NaHCO₃ miktarının artmasıyla birlikte çoğalma istatistiksel olarak farklı değildir, en uygun koşul 20 ppm NaHCO₃ içeren ortama hava ile karıştırılmış %20 CO₂ gönderilmesi olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda maksimum kuru kütle miktarı (C_{alg}), spesifik çoğalma hızı (μ), maksimum CO₂ tutma hızı (R_{CO_2}) ve algal prodüktivite (P) sırasıyla 3.10 g L⁻¹, 0.38 gün⁻¹ , 0.38 g L⁻¹gün⁻¹, ve 0.22 gL⁻¹gün⁻¹ olarak

bulunmuştur.

- Algal çoğalma üzerine pH (5, 7, 10) etkisi deneyleri yapılmış ve kinetik parametreler incelendiğinde en iyi sonuçlara pH 7’de ulaşıldığı görülmüştür. Maksimum spesifik çoğalma hızı (μ) 0.34 gün^{-1} , maksimum CO_2 tutma hızı (R_{CO_2}) $0.38 \text{ g L}^{-1}\text{gün}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. pH 7 olan çoğalma ortamında elde edilen *Scenedesmus obliquus* (276-3d) biyokütlesi (3.01 g L^{-1}), pH 10 olan çoğalma ortamında elde edilenden 4 kat daha yüksektir (0.72 g L^{-1}). %30.2 CO_2 giderimi gerçekleşmiştir.
- *Scenedesmus obliquus* (276-3d) ile farklı aydınlık:karanlık periyotlar için yapılan çalışmada en uygun çalışma koşulunun 18(aydınlık):6(karanlık) periyodu olduğu belirlenmiştir. Maksimum kuru biyokütle 2.57 g L^{-1} , maksimum spesifik çoğalma hızı (μ) 0.29 gün^{-1} , CO_2 tutma hızı (R_{CO_2}) ise $0.33 \text{ g L}^{-1}\text{gün}^{-1}$, algal prodüktivite ise (P) ise $0.17 \text{ g L}^{-1}\text{gün}^{-1}$ olarak bulunmuş, CO_2 giderimi ise %31.1 olarak hesaplanmıştır.
- Aydınlatma şiddetinin algal çoğalma üzerine etkisi doktora çalışmaları kapsamında incelenmiştir. $180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda *Scenedesmus obliquus* (276-3d) ile en yüksek biyokütle miktarına (3.09 g L^{-1}) ulaşılmıştır. Bu değer $42 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde ulaşılan biyokütle miktarının yaklaşık 2.8 katıdır. Spesifik çoğalma hızına (μ , gün^{-1}) 0.37 gün^{-1} olarak bulunmuştur. $180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde %28.2 olan CO_2 giderimi ışık şiddetinin azalması ile birlikte düşmekte olup $42 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde %17.4 olarak hesaplanmıştır.
- En uygun hava – CO_2 akış hızını belirleyebilmek için 1 vvm, 3 vvm ve 5.2 vvm akış hızlarında *Scenedesmus obliquus* (276-3d) çoğalması incelenmiştir. 1 vvm akış hızında 3.10 g L^{-1} biyokütle miktarına ulaşılmış olup bu akış hızında spesifik çoğalma hızı (μ) 0.20 gün^{-1} , CO_2 tutma hızı (R_{CO_2}) ise $0.40 \text{ g L}^{-1}\text{gün}^{-1}$, algal prodüktivite ise (P) ise $0.22 \text{ g L}^{-1}\text{gün}^{-1}$ bulunmuş olup, CO_2 giderimi %30.8’dir.

- Monod çoğalma modeli, kültür ortamındaki substrat derişimine göre alglerin çoğalma hızını tahmin etmek için kullanılmıştır. *Scenedesmus obliquus* (276-3d) için çoğalma ortamına %20 CO₂ beslendiğı durumdaki hesaplanan maksimum spesifik çoğalma hızı (μ_{max}) 0.36 gün⁻¹, çoğalma ortamında 20 ppm NaHCO₃ bulunduğu durumda ulaşılan maksimum spesifik çoğalma hızı (μ_{max}) olan 0.29 gün⁻¹ 1.2 kat daha yüksektir.
- 1 vvm, 3 vvm ve 5.2 vvm akış hızları için kütle aktarım katsayısı (kla) sırasıyla 0.072 gün⁻¹, 0.084 gün⁻¹ ve 0.087 gün⁻¹ olarak bulunmuştur. Kabarcık kolon fotobiyoreaktörde yapılan deney setinde elde edilen veriler kullanılarak kla hesaplanmış ve 0.112 gün⁻¹ olarak bulunmuştur.
- %3, %7, %12, %20, %25 CO₂ oranlarında hava – CO₂ gönderilen deneylerdeki kütle aktarım katsayısı (kLa) teorik olarak hesaplanmıştır. Çoğalma ortamına %20 CO₂ verildiğinde kütle aktarım katsayısının daha yüksek olduğu görülmekte olup 0.160 gün⁻¹'dir. Bununla birlikte, kla üzerinde çoğalma ortamındaki substrat miktarının etkisi akış hızı ve kabarcık boyutu gibi parametreler ile karşılaştırıldığında düşüktür.
- Gerçekleştirilen çalışmalar ile belirlenen optimum koşullarda *Scenedesmus obliquus* (276-3d) çoğalması ve CO₂ giderimi kabarcık kolon fotobiyoreaktörde (PHB) gözlenmiştir. Maksimum spesifik çoğalma hızı (μ) sırasıyla 0.37 gün⁻¹ olarak bulunmuş, 3.32 g L⁻¹ kuru biyokütle miktarına ulaşılmıştır. Maksimum CO₂ tutma hızı (R_{CO_2}) ise 0.35 g L⁻¹gün⁻¹ olarak, algal prodüktivite (P) ise 0.19 g L⁻¹gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Tez kapsamında gerçekleşen çalışmalardaki en yüksek CO₂ giderimi olan %32.2 değeri elde edilmiştir.
- Algal biyokütleden lipid ekstraksiyonu ve ekstraksiyon verimi üzerine ultrasonifikasyon etkisi incelenmiştir. Beklendiğinin aksine toplam lipid (TL) miktarı ultrasonifikasyon yapıldığında %16.8, yapılmadığında ise %17.4 olarak belirlenmiştir. Algal biyokütleden lipid ekstraksiyonu farklı bir çalışmanın konusu olabilecek geniş bir alandır.

Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar, artan yenilenebilir enerji ihtiyaı, küresel ısınma gibi konular ile birlikte gelecekte hayatımızda daha çok yer alacak algler ile ilgili aydınlatılması gereken alanlara ışık tutmaktadır.



KAYNAKLAR

- Akın, G. 2006. Küresel ısınma, nedenleri ve sonuçları. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi, 46(2), 29-43.
- Bailey, J., E., Ollis, D., F., 1986. Biochemical Engineering Fundamentals, McGraw Hill, 2. baskı, New York.
- Bisht, D. S., Singh, S., Hopke, P. K. 2016. Sources of chemical species in rainwater during monsoon and non-monsoonal periods over two mega cities in India and dominant source region of secondary aerosols. Environ Sci Pollut Res.,146:90-99.
- Bisht, D. S., Srivastava, A. K., Joshi, H., Singh, N., Naja, M., Srivastava, M. K., Tiwari, S. 2017. Chemical characterization of rainwater at a high- high-altitude site "Nainital" in the central Himalayas. Environ Sci Pollut Res, 24, 3959-3969.
- Bligh, E. G., Dyer W.J. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 37(8), 911-917.
- Borowitzka, M.A. 1998. Limits to growth, in Wastewater treatment with algae, Y.-S. Wong and N.F.Y. Tam, Editors. Springer Verlag. 203–226.
- Borowitzka, M.A., Moheimani, N.R.. 2013. Algae for Biofuels and Energy, Cilt 5, Springer, 978-94-007-5479-9.
- Carvalho, P. A., 2006. Microalgal reactors: a review of enclosed systems design and performances. Biotechnol. Prog., 22, 1490–1506.
- Carvalho, P. A., Silva, O. S., Baptista, M. Jo., Malcata, F. X. 2011. Light Requirements in Microalgal Photobioreactors: An Overview of Biophotonic Aspects. Applied Microbiol. Biotechnology, 89, 1275–1288.
- Chen, Y., Zhang, L., Xu, C., Vaidyanathan, S. 2016. Dissolved inorganic carbon speciation in aquatic environments and its application to monitor algal carbon uptake, Science of The Total Environment, 541, 1282-1295.
- Chinnasamy S., Ramakrishnan, B., Bhatnagar, A., Das Keshav C. 2009. Biomass production potential of a wastewater alga *Chlorella vulgaris* ARC 1 under elevated levels of CO₂ and temperature. Int J. Molecular Science, 10, 518–532.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from algae. Biotechnology Advances, 25(3), 294-306.

- Choi, K. J., Nakhost, Z., Barzana, E., Karel, M. 2009. Lipid content and fatty acid composition of green algae *Scenedesmus obliquus* grown in a constant cell density apparatus. Food Biotechnology, 1, 117-128.
- Christie, W.W. 2003. Lipid analysis: isolation, separation, identification and structural analysis of lipids, 3rd edn. Oily Press, Bridgewater.
- Cohen, P. 1989. The ASME Handbook on Water Technology for Thermal Power Systems. The American Society of Mechanical Engineers.
- Darki, B., Seyfabadi, J., Fyazi, S. 2017. Effect of nutrients on total lipid content and fatty acids profile of *Scenedesmus obliquus*. Braz. Arch. Biol. Technol, 60, 1648 – 1654.
- Devgoswami, C.R., Kalita M.C., Talukdar J., Bora R., Sharma P. 2011. Studies on the growth behavior of *chlorella*, *haematococcus* and *scenedesmus* sp. in culture media with different concentrations of sodium bicarbonate and carbon dioxide gas. African Journal of Biotechnology, 10, 13128–13138.
- Doran, P.M., Bioprocess Engineering Principles. 1995. Academic Press.
- Folch, J., Lees M., Stanley G.H.S. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. The Journal of Biological Chemistry, 226, 497–509.
- Hanaa, H. A. E. B., El-Baroty G.S., Bouaid A., Martinez M., Aracil, J. 2012. Enhancement of lipid accumulation in *Scenedesmus obliquus* by Optimizing CO₂ and Fe³⁺ levels for biodiesel production. Bioresource Technology, 119,429-32.
- Hanagata, N. Takeuchi, T. and Fukuju, Y. 1992. Tolerance of Microalgae to High CO₂ and High Temperature, Phytochemistry, 31(10).
- Hodaifa, G., Eugenia M., Sánchez S. 2009. Influence of pH on the culture of *Scenedesmus obliquus* in olive-mill wastewater, Biotechnology and Bioprocess Engineering, 14, 854-860.
- Hu, Q. 2004. Environmental effects on cell composition. In: Richmond, A. (Ed.), Handbook of Microalgal Culture. Blackwell Science Ltd., 83–93 (Chapter 5). Oxford, UK.
- Jacobs-Lopes, E. and Franco, T. T. 2010, Microalgae-based systems for carbon dioxide sequestration and industrial biorefineries, In: Momba, M., and Bux, F., Biomass, Sciyo Croatia, 136-146.

- Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embiruçu, M., and Ghirardi, M. L., 2010. "Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors", *Bioresource Technology*, 101, 1406–1413.
- Kargi, F., Shuler, M.L. 1997. *Bioprocess Engineering*. New Jersey, 162-166.
- Lam, M. K., Teong, K. L. 2013. Effect of carbon source towards the growth of *Chlorella vulgaris* for CO₂ bio-mitigation and biodiesel production. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 14, 169–176.
- Lee, J. H., J. S. Lee, C. S. Shin, S. C. Park, and S. W. Kim. 2000. Effects of NO and SO₂ on growth of highly-CO₂-tolerant microalgae. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 10(3), 338-342.
- Lee, S. J., Yoon, B. D., Oh, H. M. 1998. Rapid method for the determination of lipid from the green alga *Botryococcus braunii*. *Biotechnology Techniques*, 12, 553–556.
- Liu, H., Ji, H. W., Xin, M. 1998. The carbon dioxide system in Jiaozhou Bay. *Marine Sciences*, 6, 44–47.
- Maatschappij, B. V. 1978. *Physical and Engineering Data*, January 1978 ed. The Hague: Shell Internationale Petroleum.
- Martinez, M. E., Jimenez, J. M., Yousfi, F. El. 1999. Influence of phosphorus concentration and temperature on growth and phosphorus uptake by the microalga *Scenedesmus obliquus* *Bioresource Technology*, 67(3), 233-240.
- Michał, A., Janusz, L., Agnieszka, S. 2016. CO₂ Biofixation and Growth Kinetics of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis gaditana*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 179(7), 1248–1261.
- Mohanakrishnan, L., Joseph, K. 2016. Chemical Scrubbing for removal of CO₂ from Biogas using Algae and H₂S using Sponge Iron. *International Journal of Renewable Energy and Environmental Engineering*. ISSN 04:03.
- Naderi, G., Tade, M. O., Znad, H. 2015. Evaluation of a modified photobioreactor performance for bio-fixation of carbon dioxide by *Chlorella vulgaris* at different light intensities. *Chemical Engineering & Technology*. 38 (8),1371-1379.
- Ono, E., Cuello, J. L., 2007. Carbon dioxide mitigation using thermophilic cyanobacteria. *Biosystems Eng.*, 96, 129-134.
- Oonk H., Van Harmelen T. 2005. Microalgae biofixation processes; Applications and potential contributions to green house gas mitigation options.

- Ota, M., Kato, Y., Watanabe, H., Watanabe, M., Sato, Y., L., R., I., Hiroshi. Effect of Inorganic Carbon on Photoautotrophic Growth of Microalga *Chlorococcum littorale*
- Pakawadee, K., Prayoon E., TzeYen C. 2012. The effect of CO₂ and salinity on the cultivation of *Scenedesmus obliquus* for biodiesel production. Biotechnology Bioprocess Engineering, 17, 591–7.
- Patil, P. R. 2011. Development of a biodiesel production plant, Our Global Future Current Microalgal Lipid Research, Microbial Cell Factories, 13(14), 1-9.
- Pushparaj, B., Pelosi, E., Tredici, M. R., Pinzani, E. and Materssi, R. 1997. An integrated culture system for outdoor production of microalgae and cyanobacteria. J. Appl. Phycol., 9, 113–119.
- Richmond, A. 1990. Large scale microalgal culture and applications, in Progress in Phycological Research. Biopress Ltd: Bristol., 269–330.
- Ryckebosch, E., Cuéllar-Bermúdez S.P., Termote-Verhalle, R., Bruneel, C., Muylaert, K., Parra-Saldivar, R., Foubert, I. 2014. Influence of extraction solvent system on the extractability of lipid components from the biomass of *Nannochloropsis gaditana*. Journal of Applied Phycology, 26(3), 1501–1510.
- Ryckebosch, E., Muylaert, K., Foubert, I. 2011. Optimization of an Analytical Procedure for Extraction of Lipids from Microalgae. J. Am. Oil Chem. Soc, 89, 189-198.
- Sánchez Mirón A, Cerón García M-C, Contreras Gómez A, García Camacho F, Molina Grima E, Chisti Y. Shear stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricornutum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors. Biochem Eng J 2003, 16:287–97.
- Sforza, E., Grisa B., Silvaa C., Morosinotto T., Bertuccoa A. 2014. Effects of Light on Cultivation of *Scenedesmus Obliquus* in Batch and Continuous Flat Plate Photobioreactor, Chemical Engineering Transactions, 38, 211-216.
- Shao, Y., Fang, H., Zhou, H., Wang, Q., Zhu, Y., & He, Y. 2017. Detection and imaging of lipids of *Scenedesmus obliquus* based on confocal Raman microspectroscopy. Biotechnology for Biofuels, 10:1.
- Shenping, X., Xiaoshu, Z., Chao, L., Qingsheng, Y., 2014. Effects of CO₂ enrichment on photosynthesis and growth in *Gerbera jamesonii*. Scientia Horticulturae, 177, 77-84

- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H.L. 2008. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, NY, USA Impacts of Europe's changing climate indicator-based assessment Joint EEA-JRC-WHO report.
- Sung, K. D., Lee J.S., Shin C.S., Park S.C., Choi M.J. 1998. CO₂ fixation by KR-1 and its cultural characteristics. *Bioresource Technology*. 8(3), 269-73.
- Szep, R., Mateescu, E., Nechifor, A. C. 2017. Chemical characteristics and source analysis on ionic composition of rainwater collected in the Carpathians "Cold Pole," Ciuc basin, Eastern Carpathians, Romania. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(35), 27288-27302.
- Tan, X., Kong, F., Yu, Y. 2009. Effects of Enhanced Temperature on Algae Recruitment and Phytoplankton Community Succession. *China Environmental Science*, 29(6), 578—582.
- Tang, D., Han W., Penglin L., Xiaoling M., Jianjiang Z. 2011. CO₂ biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO₂ levels. *Bioresource Technology*, 102(3), 3071–3076.
- Thimijan, R.W., Heins R. D. 1982. Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion. *HortScience* 18, 818-822.
- Ugwu, C. U., Aoyagi, H., and Uchiyama, H., 2008, “Photo bioreactors for mass cultivation of algae”, *Bioresource technology*, 99, pp. 4021-4028.
- Williams, P. J. I. B. and Laurens L. M. 2010. Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy & Environmental Science* 3(5), 554.
- Wurts, W. A., Durborow, R. M. 1992. Interactions of pH, Carbon Dioxide, Alkalinity and Hardness in Fish Ponds Southern Regional Aquaculture Center, 464,1-4.
- Xu, H., X. Miao, Q. Wu. 2006. High quality biodiesel production from a microalga *chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *Journal of Biotechnology*, 126, 499-507.
- Yang, Y., and Gao. K. 2013. Effects of CO₂ concentrations on fresh water microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* (chlorophyta), *Journal of applied Phycology*, 00, 1-11.

<http://www.zeroemissionsplatform.eu/library/publication/95-zep-report-on-long-term-ccs-rad.html>

Erişim Tarihi : 19.06.2018

17/05/2014 tarihli ve 29003 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik

<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/05/20140517-3.htm>

Erişim Tarihi : 25.11.2018

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fifth Assessment Report (AR5) <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>

Erişim Tarihi : 25.07.2017

<https://www.pwtag.org.uk/reference/?download=174>

Erişim Tarihi : 15.01.2019

[https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Microbiology/Book%3A_Microbiology_\(Boundless\)/5%3A_Microbial_Metabolism/5.12%3A_Biosynthesis/5.12C%3A_The_Calvin_Cycle](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Microbiology/Book%3A_Microbiology_(Boundless)/5%3A_Microbial_Metabolism/5.12%3A_Biosynthesis/5.12C%3A_The_Calvin_Cycle)

Erişim Tarihi : 12.03.2019

EKLER

EK - 1 Alg Çoğalması Kalibrasyon Grafikleri

EK - 2 ANOVA Testi Verileri

EK - 3 ANOVA Testi Verileri

EK - 4 ANOVA Testi Verileri

EK - 5 ANOVA Testi Verileri

EK - 6 ANOVA Testi Verileri

EK - 7 Gaz Analizi Kromatogram Örneği

EK - 1 Alg oğalması Kalibrasyon Grafikleri

Kuru ağırlık, 50 mL gerekleştiiği çoğalmanın besi ortamının alınarak Whatman filtreden süzölüp 3 saat 105°C’de kurutulmasıyla belirlenmiştir. Bu ağırlık bize 50 mL örnekteki biyokütle miktarını vermekte olup buradan 1 mL deki algal biyokütle miktarına geçilmiş ve UV spektroskopisinden alınan sonuçlarla birlikte kalibrasyon (Absorbans – Derişim) grafikleri çizilmiştir. Ölçülen absorbans değerlerinden algal biyokütle derişimine aşığıdaki Eşitlikler (1, 2, 3) kullanılarak geçilmiştir.

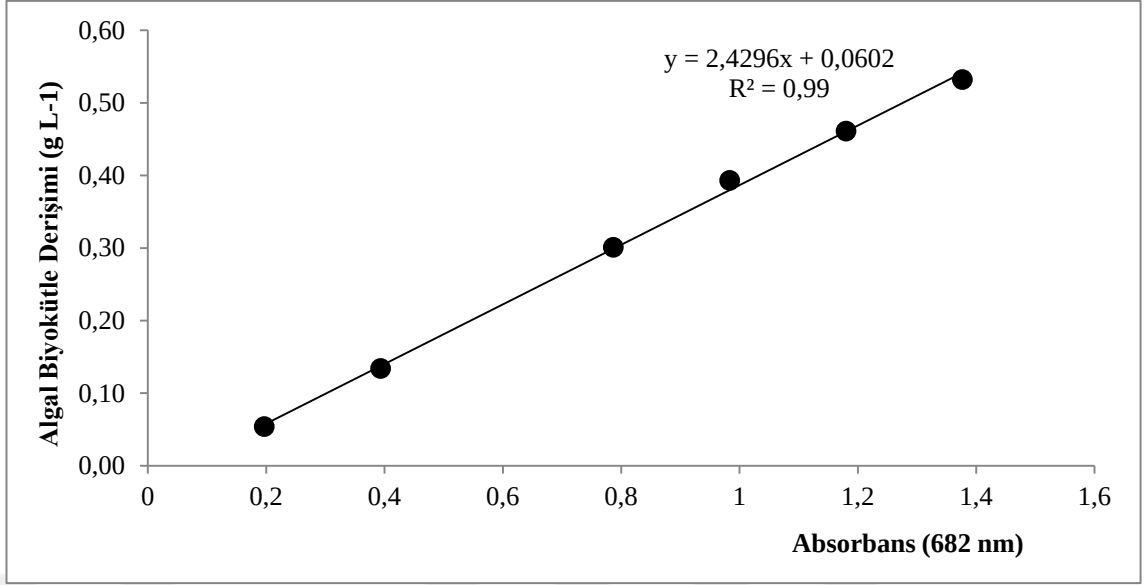
Algal Biyokütle Derişimi-oğalma Süresi değişimi Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3’deki gibi oluşturulmuş ve aşığıdaki kalibrasyon Eşitlikleri elde edilmiştir.

$$X = 2.43OD682 + 0.06 \quad R^2 = 0.99 \text{ (} Scenedesmus obliquus \text{ - 276-3d)} \quad (1)$$

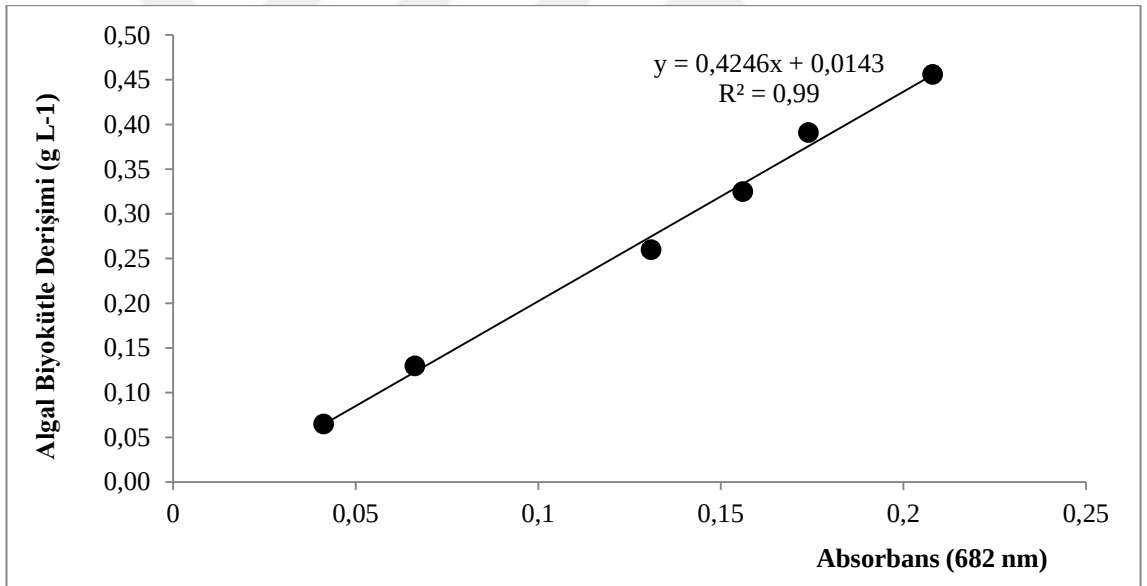
$$X = 0.42OD682 + 0.01 \quad R^2 = 0.99 \text{ (} Spirulina maxima \text{ – 49.88)} \quad (2)$$

$$X = 2.45OD682 - 0.05 \quad R^2 = 0.99 \text{ (} Chlorella vulgaris \text{ - 211-11b)} \quad (3)$$

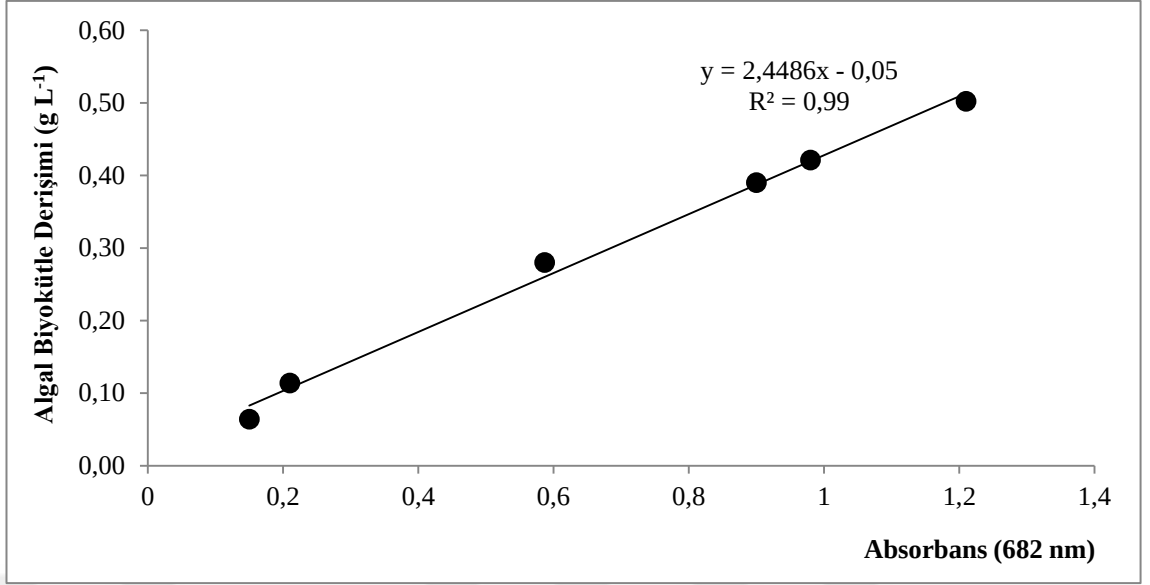
Hava ile %3 ve %7 CO₂ karışımının beslendiği ortamlarda en hızlı oğalma *S. obliquus* 276-3d’ta gözlenmiş olup çoğalma 17. gün tamamlanmıştır. En uzun sürede çoğalan ise 21 gün ile *Spirulina maxima* 49.88’dır (Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6).



Şekil 1 *Scenedesmus obliquus* 276-3d Absorbans – Alg derişimi kalibrasyon grafiğı



Şekil 2 *Spirulina maxima* 49.88 Absorbans – Alg derişimi kalibrasyon grafiğı



Şekil 3 *Chlorella vulgaris* 211-11b Absorbans – Alg derişimi kalibrasyon grafiği

EK - 2 ANOVA Testi Verileri

	% 7 CO ₂	
Gün	<i>Sc. Obliquus</i> 276-3d	<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b
0	0.043	0.045
1	0.048	0.056
2	0.057	0.062
3	0.123	0.163
4	0.152	0.197
5	0.309	0.311
6	0.565	0.466
7	0.641	0.658
8	0.786	0.787
9	0.964	0.803
10	1.296	1.265
11	1.401	1.295
12	1.481	1.436
13	1.643	1.521
14	1.711	1.583
15	1.691	1.619
16	1.727	1.629
17	1.702	1.678

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	18	16.3362	0.907567	0.457918
Column 2	18	15.573	0.86515	0.403507

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.016193021	1	0.016193	0.037596	0.847411	4.13001
Within Groups	14.6442231	34	0.430712			
Total	14.66041612	35				

EK - 3 ANOVA Testi Verileri

	<i>Sc. obliquus</i> 276-3d	
Gün	% 3 CO ₂	% 7 CO ₂
0	0.048	0.039
1	0.078	0.061
2	0.087	0.070
3	0.099	0.303
4	0.129	0.496
5	0.137	0.692
6	0.177	0.746
7	0.341	1.061
8	0.476	1.315
9	0.641	1.647
10	1.001	1.811
11	1.074	2.336
12	1.187	2.430
13	1.227	2.470
14	1.310	2.520
15	1.285	2.532
16	1.270	2.400
17	1.270	2.300

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	18	11.833	0.657389	0.277887
Column 2	18	25.22827	1.401570	0.949602

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	4.984255689	1	4.984256	8.12106	0.00738	4.130018
Within Groups	20.86731335	34	0.613745			
Total	25.85156904	35				

EK - 4 ANOVA Testi Verileri

Gün	Sc. Obliquus 276-3d	
	%0 CO ₂ - Kontrol	20 mg/L NaHCO ₃ +CO ₂ %20
0	0.050	0.027
1	0.053	0.250
2	0.044	0.529
3	0.035	0.703
4	0.060	0.726
5	0.055	0.732
6	0.064	1.085
7	0.069	1.361
8	0.063	1.615
9	0.066	1.847
10	0.064	2.251
11	0.068	2.336
12	0.072	2.762
13	0.079	3.087
14	0.081	3.085
15	0.089	3.102
16	0.093	2.969
17	0.091	2.920

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	18	1.195464	0.066414649	0.000258
Column 2	18	31.38551	1.743639709	1.199

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	25.31775512	1	25.317756	42.222	1.96E-07	4.1300
Within Groups	20.38739613	34	0.5996292			
Total	45.70515125	35				

<i>Sc. Obliquus</i> 276-3d		
Gün	%20 CO ₂	20 mg/L NaHCO ₃ +CO ₂ %20
0	0.039	0.027
1	0.061	0.250
2	0.070	0.529
3	0.303	0.703
4	0.496	0.726
5	0.692	0.732
6	0.746	1.085
7	1.061	1.361
8	1.315	1.615
9	1.647	1.847
10	1.811	2.251
11	2.336	2.336
12	2.430	2.762
13	2.470	3.087
14	2.520	3.085
15	2.532	3.102
16	2.400	2.969
17	2.300	2.920

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	18	25.228268	1.40157	0.949602
Column 2	18	31.38551476	1.74364	1.199

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1.053102435	1	1.053102	0.980267	0.329127	4.1300
Within Groups	36.52623993	34	1.074301			
Total	37.57934237	35				

EK - 5 ANOVA Testi Verileri

Gün	<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b	
	%0 CO ₂ - Kontrol	20 mg/L NaHCO ₃ +CO ₂ %20
0	0.050	0.030
1	0.053	0.057
2	0.044	0.146
3	0.035	0.249
4	0.060	0.496
5	0.055	0.523
6	0.064	1.173
7	0.069	1.229
8	0.063	1.264
9	0.066	1.378
10	0.069	1.560
11	0.054	1.664
12	0.075	1.781
13	0.073	1.987
14	0.077	2.010
15	0.081	2.102
16	0.083	2.090
17	0.089	2.070

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	18	1.159364	0.064409093	0.000204
Column 2	18	21.80781	1.211544948	0.588307

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	11.84328603	1	11.84328	40.24829	3.09E-07	4.1300
Within Groups	10.00469265	34	0.294256			
Total	21.84797868	35				

<i>Ch. vulgaris</i> 211-11b		
Gün	%20 CO ₂	20 mg/L NaHCO ₃ +CO ₂ %20
0	0.041	0.030
1	0.075	0.057
2	0.127	0.146
3	0.289	0.249
4	0.557	0.496
5	0.929	0.523
6	1.173	1.173
7	1.249	1.229
8	1.294	1.264
9	1.431	1.378
10	1.541	1.560
11	1.634	1.664
12	1.761	1.781
13	1.821	1.987
14	1.879	2.010
15	1.816	2.102
16	1.908	2.090
17	1.888	2.070

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	18	21.41203	1.189557	0.468219
Column 2	18	21.80781	1.211545	0.588307

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.004351234	1	0.004351	0.008237	0.928218	4.130018
Within Groups	17.96093839	34	0.528263			
Total	17.96528962	35				

EK - 6 ANOVA Testi Verileri

	<i>S. obliquus</i> 276-3d	
Gün	24(a):00(k)	18(a):06(k)
1	0.041	0.045
2	0.128	0.176
3	0.164	0.154
4	0.494	0.52
5	0.721	0.691
7	1.134	1.098
9	1.893	1.793
11	2.348	1.983
12	2.438	2.143
13	2.69	2.58
14	2.77	2.55
15	2.83	2.57

Anova: Single Factor

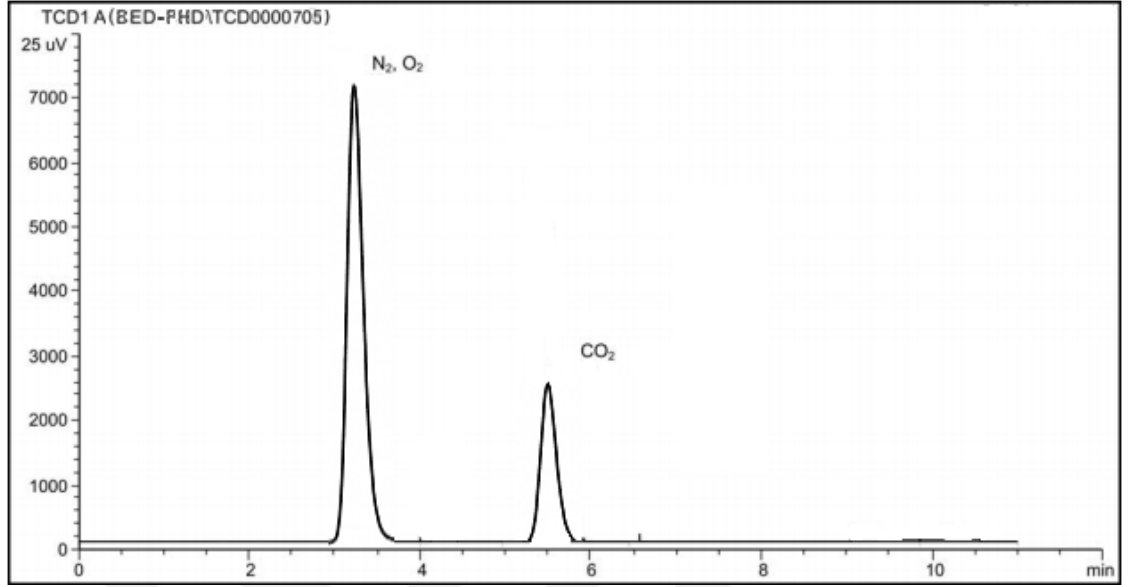
SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	12	17,651	1,470917	1,280904
Column 2	12	16,298	1,358167	1,032047

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0,076275	1	0,076275	0,065955	0,799706	4,30095
Within Groups	25,44245	22	1,156475			
Total	25,51873	23				

EK - 7 Gaz Analizi Kromatogram Örneği



Şekil 7 Çoğalma ortamına gönderilen Hava – CO_2 karışımı gaz analizi (%20 CO_2)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Berçem ELDELEKLİOĞLU DÜZOL
Doğum Yeri : KAYSERİ
Doğum Tarihi : 11.07.1982
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca, İtalyanca

Eğitim Durumu

Lise : TED Kayseri Koleji – Kayseri, (1997-2000)

Lisans : Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Kimya Mühendisliği Bölümü, (2000-2005)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Bölümü, (2007-2009)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi 2010 – 2016
SOCAR Türkiye STAR Rafineri 2016 – devam ediyor