

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

**LİPİT İÇEREN BAZI MİKRO ALGLERİN İLERİ ATIKSU
ARITIMINDA KULLANIMI VE BİYODİZEL
POTANSİYELLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Demet KILINÇ ÖZTÜRK

Anabilim Dalı: Çevre Mühendisliği

Programı: Çevre Bilimleri

Danışmanı: Doç. Dr. Yusuf SAATÇİ

ELAZIĞ - 2014

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

**LİPİT İÇEREN BAZI MİKRO ALGLERİN İLERİ ATIKSU
ARITIMINDA KULLANIMI VE BİYODİZEL
POTANSİYELLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Demet KILINÇ ÖZTÜRK

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 12.12.2013
Tezin Savunulduğu Tarih: 02.01.2014**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yusuf SAATÇİ

Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Özge HANAY

Yrd. Doç. Dr. Seher GÜR

OCAK-2014

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarında gösterdiği destek ve yardımlarından dolayı değerli danışman hocam Sn. Doç. Dr. Yusuf SAATÇI' ya ve yardımlarını esirgemeyen Sn. Yrd. Doç. Dr. Sibel ASLAN'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen yüksek lisans öğrencisi Sn. Esra İLHAN'a teşekkür ederim.

M.F. 11.46 No'lu proje ile bu çalışmaya desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP)'ne teşekkür ederim.

Çalışmalarımı destekleyen ve bugüne gelmemde büyük pay sahibi olan aileme ve her daim yanımda olan eşime de teşekkür ederim.

Demet KILINÇ ÖZTÜRK
ELAZIĞ-2014

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
RESİMLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	3
1.1.1. Biyodizel Eldesinde Mikroalglerin Kullanımı	3
1.1.1.1. Mikroalglerin Tanımı	3
1.1.1.2. Alg Teknolojisi	3
1.1.1.3. Biyodizel Üretimi için Mikroalglerin Uygunluğu	5
1.1.1.4. Mikroalglerin Lipit İçeriği ve Verimliliği	6
1.1.2. Alglerden Biyodizel Üretimi	8
1.1.2.1. Yer Seçimi	10
1.1.2.2. Alg Yetiştirme	11
1.1.2.3. Biyokütle Konsantrasyonu ve Hasat	13
1.1.2.4. Biyodizel Üretimi	14
1.1.3. Mikroalg Üretimine Etki Eden Parametreler	15
1.1.3.1. Işık	16
1.1.3.2. Sıcaklık	16
1.1.3.3. Havalandırma/Karıştırma	16
1.1.3.4. Besin	17
1.1.3.5. pH	18
1.1.4. Mikroalg Kültür Sistemleri	18
1.1.4.1. Açık Kültür Sistemleri ile Kapalı Kültür Sistemleri	18
1.1.4.2. Kesikli ve Sürekli İşletme	21
1.1.5. Mikroalglerden Elde Edilen Ürünler ve Diğer Uygulamalar	23
1.1.5.1. Çevresel Uygulamalar	23
1.1.5.1.1. Mikroalglerin Besin Olarak Baca Gazı CO ₂ 'i Emisyonunu Kullanması	23

1.1.5.1.2.	Mikroalg Kullanarak Atıksularda Azot ve Fosfor Giderimi	24
1.1.5.1.3.	Mikroalglerden Elde Edilen Değerli Kimyasallar ve Biyoaktif Bileşikler..	25
1.2.	Literatür Özeti	26
2.	MATERYAL VE METOT	29
2.1.	Mikroalg Türleri ve Kültür Ortamları	29
2.2.	Atıksu	30
2.3.	Foto-biyoreaktörlerin Dizaynı ve İşletilmesi.....	30
2.4.	Yapılan Analizler ve Analiz Yöntemleri	32
2.4.1.	Klorofil A Tayini	34
2.4.2.	Toplam Lipit Tayini	34
3.	BULGULAR	36
3.1.	Sentetik Atıksularla Yapılan Çalışmalar	36
3.1.1.	pH	36
3.1.2.	Mikroalglerin Algal Büyüme Hızı ve Lipit İçeriklerinin Belirlenmesi	37
3.1.3.	Nutrient Uzaklaştırma Verimi	42
3.1.3.1.	TOK Giderimi	43
3.1.3.2.	Toplam Fosfor (TP) Giderimi	44
3.1.2.3.	Amonyum Azotu (NH ₄ -N) Giderimi	46
3.2.	Eysel Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Suları ile Yapılan Çalışmalar	47
3.2.1.	pH	47
3.2.2.	Mikroalglerin Büyüme Hızı ve Lipit İçeriklerinin Belirlenmesi	49
3.2.3.	Nutrient Uzaklaştırma Verimi	54
3.2.3.1.	TOK Giderimi	54
3.2.3.2.	Toplam Fosfor (TP) Giderimi	56
3.2.3.3.	Toplam Azot (TN) Giderimi.....	58
4.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR	60
	KAYNAKLAR.....	66
	ÖZGEÇMİŞ	73

ÖZET

Bu çalışma biyodizel üretimi için potansiyel bir aday olarak atıksularda lipit içeren *Scenedesmus obliquus* ve *Chlorella protothecodites*' in mümkün olan gelişmelerini analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Aynı zamanda mikroalglerin bitki besin maddeleri giderim verimlilikleri de araştırıldı. Herbir deney laboratuvarında ortalama 25 °C sıcaklıkta 13 günlük periyotlar halinde yapıldı.

Bu şartlar altında sentetik atık sular için *Scenedesmus obliquus* ve *Chlorella protothecodites*'in lipit içeriklerinin biyomas kuru ağırlığı başına sırasıyla, %31-34, % 37-43 olduğu ortaya konuldu. Aynı zamanda gerçek atıksular kullanılarak yapılan çalışmalardan *Scenedesmus obliquus* ve *Chlorella protothecodites*' in biyomas kuru ağırlık başına sırasıyla % 26-29 ve % 32-36 lipit içerdiği ortaya çıkmıştır. Sonuçlar 13 günlük sürekli kültür çalışmaları ile sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda *Scenedesmus obliquus*'un amonyum azotu, toplam fosfor ve toplam organik karbonu sırasıyla %91-97, % 94-99 ve % 60-83 giderildiğini ve *Chlorella protothecodites* için amonyum azotu, toplam fosfor ve toplam organik karbonun sırasıyla %92-98, % 93-98 ve % 62-95 uzaklaştırılabileceğini gösterdi. Gerçek atıksularla yapılan çalışmalarda ise *Scenedesmus obliquus* ile toplam azot, toplam fosfor ve toplam organik karbonun giderim oranları sırasıyla %98, % 90-98 ve % 84-93 olarak belirlenmiştir. *Chlorella protothecodites* ise gerçek atıksulardan toplam azot, toplam fosfor ve toplam organik karbon sırasıyla %90, % 90-99 ve % 67-88 oranlarında uzaklaştırılabilmektedir.

Bulgularımıza göre *Scenedesmus obliquus* ve *Chlorella protothecodites* biyodizel üretimi için önemli miktarlarda lipit içermektedir. Aynı zamanda atık sulardan yüksek besin maddesi uzaklaştırma yeteneğine sahiptir. Bu sebeplerden dolayı bu türler hem atık suların üçüncül arıtımı için hemde biyodizel üretimi için kullanılabilirler.

Anahtar Kelimeler: Atık Su, Mikroalg, Biyodizel, Üçüncül Arıtım, Bitki Besin Maddeleri Giderimi, Lipit Üretimi

SUMMARY

Advanced Wastewater Treatment Containing Lipids of Some Microalgae Biodiesel use and Investigation of Potantial

This work aims to analyze the possibility of growing lipid containing microalgae *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella protothecoides* in wastewater as a potential candidate for biodiesel production. In this study, the growth performances of *S. obliquus* and *C. protothecoides* were determined in the laboratory with synthetic and municipal wastewater treatment plant (activated sludge) effluents. Nutrient removal efficiencies of microalgae were also investigated. Each trial was done for a period of 13 days in the laboratory at average 25 °C.

Under these conditions, results for synthetic wastewater revealed average lipid contents of *S. obliquus* and *C. protothecoides* 31-34 % and 37-43 % of dry-weight (dwt) biomass, respectively. Also, results for real wastewater revealed average lipid contents of *S. obliquus* and *C. protothecoides* 26-29% and 32-36 % of dwt biomass, respectively. The results showed that by the end of a 13-day continuous culture, *S. obliquus* could remove ammonia nitrogen, total phosphorus, and total organic carbon (TOC) by %91-97, % 94-99 and % 60-83 respectively from synthetic wastewater and the results also showed , *C. protothecoides* could remove ammonia nitrogen, total phosphorus, and total organic carbon (TOC) by 92-98%, 93-98% and 62-95 % respectively from synthetic wastewater. Our findings also showed that *S. obliquus* could remove total nitrogen, total phosphorus, and TOC by 98%, 90-98% and 84-93%, respectively from real wastewater while those were 90%, 90-99% ve 67-88%, respectively by *C. protothecoides*.

According to our findings, *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella protothecoides* contains significant amounts of lipids for biodiesel production. At the same time high nutrient removal from wastewater is provided. For this reasons, these species both for the tertiary treatment of wastewater and for biodiesel production can be used.

Key words: Wastewater, Microalgae, Biodiesel, Tertiary Treatment, Nutrient Removal, Lipid Production.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Biyodizel üretim zinciri.....	9
Şekil 1.2. Bir alg kültüründe zamana bağlı olarak besin maddesi konsantrasyonu (kesikli çizgi) ile alglerin büyüme hızı (düz çizgi) arasındaki ilişki.....	13
Şekil 1.3. Transesterifikasyon reaksiyonu.....	15
Şekil 2.1. Boru tipi foto- biyoreaktörün şematik görünümü	31
Şekil 2.2. a) <i>Chlorella protothecoides</i> , b) <i>Scenedesmus obliquus</i> türü algler için 658 nm dalga boyunda optimize edilen absorbans ile alg kütlesi kuru ağırlığı ilişkisi ...	33
Şekil 3.1. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince pH değişimi	37
Şekil 3.2. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince hücre yoğunluğu değişimi.....	38
Şekil 3.3. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince klorofil A değişimi	38
Şekil 3.4. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda <i>Chlorella protothecoides</i> için hücre yoğunluğu ile Klorofil A ilişkisi	39
Şekil 3.5. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda <i>Scenedesmus obliquus</i> için hücre yoğunluğu ile Klorofil A ilişkisi	39
Şekil 3.6. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda elde edilen lipit konsantrasyonları.....	41
Şekil 3.7. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda hücre yoğunluğuna bağlı lipit yüzdeleri.....	41
Şekil 3.8. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda <i>Chlorella protothecoides</i> için hücre yoğunluğu ile toplam lipit ilişkisi	42
Şekil 3.9. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda <i>Scenedesmus obliquus</i> için hücre yoğunluğu ile toplam lipit ilişkisi	42
Şekil 3.10. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK konsantrasyonundaki değişim.....	43
Şekil 3.11. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK verimi	44
Şekil 3.12. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP konsantrasyonundaki değişim.....	45
Şekil 3.13. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP verimi	45
Şekil 3.14. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince NH ₄ -N konsantrasyonundaki değişim.....	47
Şekil 3.15. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince NH ₄ -N verimi.....	47

Şekil 3.16. Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış sularıyla yapılan çalışmalarda işletme süresince pH değişimi.....	48
Şekil 3.17. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince hücre yoğunluğu değişimi.....	50
Şekil 3.18. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince klorofil A değişimi ..	50
Şekil 3.19. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda <i>Chlorella protothecoides</i> için hücre yoğunluğu ile Klorofil A ilişkisi.....	51
Şekil 3.20. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda <i>Scendesmus obliquus</i> için hücre yoğunluğu ile Klorofil A ilişkisi.....	51
Şekil 3.21. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda elde edilen lipit konsantrasyonları	53
Şekil 3.22. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda hücre yoğunluğuna bağlı lipit yüzdeleri	53
Şekil 3.23. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda <i>Chlorella protothecoides</i> için hücre yoğunluğu ile toplam lipit ilişkisi.....	54
Şekil 3.24. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda <i>Scendesmus obliquus</i> için hücre yoğunluğu ile toplam lipit ilişkisi.....	54
Şekil 3.25. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK konsantrasyonundaki değişim.....	55
Şekil 3.26. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK verimi	55
Şekil 3.27. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP konsantrasyonundaki değişim.....	57
Şekil 3.28. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP verimi.....	57
Şekil 3.29. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TN konsantrasyonundaki değişim.....	59
Şekil 3.30. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TN verimi	59

RESİMLER LİSTESİ

Resim 1.1. Kapalı ve açık kültür sistemleri	21
Resim 2.1. a) <i>Chlorella protothecoides</i> b) <i>Scenedesmus obliquus</i>	29
Resim 2.2. Lipit içeren mikroalglerin atıksu arıtımında kullanımı ve biyodizel potansiyellerinin araştırılması için kullanılan deney düzeneği.....	32

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı mikroalg türlerinin verimliliği ve yağ içerikleri	7
Tablo 1.2. Diğer biyodizel kaynaklarıyla mikroalglerin karşılaştırılması	8
Tablo 1.3. Mikroalg üretimine etki eden parametreler için genelleştirilmiş değerler	15
Tablo 1.4. Mikroalgler için açık ve kapalı kültür sistemlerinin karşılaştırılması	20
Tablo 2.1. Sentetik atıksuyun bileşenleri ve konsantrasyonu	30
Tablo 2.2. Foto-biyoreaktörde rutin olarak izlenmiş olan parametreler	33
Tablo 3.1. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince pH değişimi	36
Tablo 3.2. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince hücre yoğunluğu ve klorofil A değişimi	37
Tablo 3.3. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince elde edilen toplam lipit ve kuru ağırlık başına % lipit değişimleri	40
Tablo 3.4. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda TOK konsantrasyonları ve verimleri.....	43
Tablo 3.5. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP giderimi ve verimleri.....	45
Tablo 3.6. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince NH ₄ -N giderimi ve verimleri.....	46
Tablo 3.7. Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış sularıyla yapılan çalışmalarda işletme süresince pH değişimi.....	48
Tablo 3.8. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda hücre yoğunluğu ve klorofil A değişimi	49
Tablo 3.9. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince elde edilen toplam lipit ve kuru ağırlık başına % lipit değişimleri	52
Tablo 3.10. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK giderimi ve verimleri	55
Tablo 3.11. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP giderimi ve verimleri	56
Tablo 3.12. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TN giderimi ve verimleri	58

1. GİRİŞ

Enerji insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamada gereksinim duyduğu en önemli olgudur ve ekonomik kalkınmanın bir lokomotifidir. Sanayileşme ve nüfus artışı nedeniyle enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Bu enerjinin temel kaynakları petrol, doğalgaz, kömür, hidroelektrik ve nükleer santrallerdir. Dünyada enerji gereksiniminin %80'i kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil kaynaklı yakıtlarla karşılanmaktadır. 2010 yılında tüketilen 12 milyar ton eşdeğer petrol (TEP) enerjinin %34'ü petrol, %30'u kömür, % 24'ü doğal gaz ile karşılanmıştır. Yapılan araştırmalara göre: petrolün 41, doğalgazın 2, kömürün ise önümüzdeki 2018 yıl içinde tükeneyeceği belirlenmiştir (TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Enerji Verimliliği Raporu 2012). 1970'lerin başında yaşanan petrol krizi ve sonrasında gelen petrol ambargoları süreci gelişmiş batı ülkelerini enerji konusunda acil olarak önlemler almaya yöneltmiştir.

Fosil yakıtların neden olduğu çevre kirliliği göz ardı edilemez durumdadır. İçeriği petrol olan yakıtların kullanımı sonucunda NO_x, SO_x, CO, partikül madde ve uçucu organik bileşikler de dahil olmak üzere atmosferi kirleten sera gazı emisyonlarının açığa çıkmasına sebebiyet vermektedir.

Sera gazı emisyonları, sadece küresel ısınmaya katkıda bulunmaz, aynı zamanda diğer çevresel etkiler ve insan hayatını olumsuz etkiler. İnsan aktiviteleri sonucunda atmosferde seviyesi artan CO₂'in her yıl yaklaşık olarak 1/3'ü okyanusta absorbe edilir ve okyanusta çözünen CO₂'in miktarının artmasıyla su döngüsünde pH azalarak daha asidik duruma gelecektir (International Energy Agency, 2007). Bu pH azalması, mercan kayalıklarını ve okyanus yaşamını değiştirerek, deniz ekosisteminin biyolojik çeşitliliğini büyük ölçüde farklılaştırıp, dünya yaşamının hızla kaybına neden olabilir.

Problemlerden bir diğeri ise ham petrol rezervlerinin azalması, çıkarma güçlükleri ve işletim maliyetinin artışıdır (Laherrere, 2005). Bu durum, özellikle ileri taşımacılık sektöründe fosil yakıtlarla ilgili herhangi bir alternatif yakıtın olmamasının bir sonucudur. İnsanlık temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarını bulmak için orta ve uzun vadede önemli problemlerle karşı karşıya gelmektedir. Bununla ilişkili sorunlar başlangıç olarak ekonomik gelişme ve refah, yaşam kalitesi, küresel kararlılık, uzun vadeli stratejik taleplere bağlanmıştır. Örneğin birçok ülke ve dünyanın birçok bölgesi CO₂'i azaltmak amacıyla sürdürülebilir hedeflere ulaşmak için Kyoto Protokolünü kabul etmiştir. Bunun

sonucu olarak da çevre dostu ya da yeşil enerji türleri olarak adlandırılan kaynaklar, geleceğin enerji kaynakları olarak görülmektedir.

Biyo-yakıtların üretimi, geliri çeşitlendirmede ve yakıt kaynağı sağlamada, kırsal alanlarda istihdamı teşvik etmekte, fosil yakıtların uzun sürede yenilenmesini geliştirmektedir. Aynı zamanda, sera gazı emisyonlarını azaltılmasında, ulaşım yakıtlarının karbon gideriminin arttırılmasında ve enerji sağlamada yeni fırsatları sunmaktadır.

Günümüzde benzin ve dizel yakıtlarına alternatif olan yakıtlar etanol ve biyodizeldir. Etanol ve biyodizel biokütle veya yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmektedir. Eşdeğer güç çıkışı başına fosil yakıtlardan daha düşük yanma emisyonlarına katkıda bulunmaktadır. Bunlar, mevcut teknolojiler kullanılarak imal edilebilir ve mevcut dağıtım sistemi aracılığı ile dağıtılmaktadır. Bu sebepten dolayı, biyo yakıtlar şu andaki yakıtlara alternatif olarak takip edilmektedir.

Mikrobiyal yağlar biyodizel uygulamalarında iyi bir alternatiftir. Tek hücre yağı olarak adlandırılan mikrobiyal yağlar, su kültürü için besin desteği, ecza ve besin malzemeleri gibi ticari uygulamalara sahiptir. Biyodizelin transesleştirmeli yağlardan (trigliseritlerden) ve alkollerden üretimi, yenilenebilir olması ve çevresel açıdan herhangi bir kirlitici etkiye sebep olmaması onu çok cazip hale getirmiştir. Bitkisel yağlar biyodizel üretimi için hammadde olarak kullanıldığı gibi tek hücre yağı da hammadde olarak kullanılabilir. Çünkü mikrobiyal yağların genel yapıları ve bileşimleri bilinen bitkisel yağların genel yapıları ve bileşimine benzerdir.

Bazı alg türlerinin kullanımı ile atıksulardan azot ve fosfor uzaklaştırılabilmekte ve baca gazları karbondioksit kaynağı olarak kullanılabilir. Aynı zamanda lipit içeren mikroalglerde bu amaçlar için kullanılabilir. Böylece hava kirliliğine sebep olan karbondioksit elimine edilebildiği gibi, su kalitesi değişimlerine neden olan azot ve fosfor alg biyokütlesine dönüştürülebilir. Lipit içeren alglerin kullanılması halinde bu alglerden biyodizel üretiminde faydalanılabilir. Ayrıca hasat edilen biyokütle, tek hücre proteini olarak kullanılabilir. Böylece hem atık minimizasyonu sağlanmakta hem de ticari bir kazanç elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışmamızda, atıksuların ileri arıtımını gerçekleştirmek amacıyla lipit içeren *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler kullanılmış ve bu türlerin biyodizel üretiminde kullanılmak üzere toplam lipit düzeyleri araştırılmıştır.

1.1. Genel Bilgiler

1.1.1. Biyodizel Eldesinde Mikroalglerin Kullanımı

1.1.1.1. Mikroalglerin Tanımı

Mikroalgler prokaryotik veya ökaryotik fotosentetik mikroorganizmalardır. Mikroalgler tek hücreli veya basit çok hücreli yapısı nedeniyle zor şartlarda yaşarlar ve çok hızlı büyüyebilirler. Prokaryotik mikroorganizmaya örnek olarak *Cyanobacteria* (*Cyanophyceae*) ve ökaryotik mikroorganizmaya örnek olarak yeşil alg (*Chlorophyta*) ve *Bacillariophyta* verilmektedir (Li vd., 2008).

Mikroalglerin bütün dünya ekosisteminde sadece suda değil aynı zamanda karada da mevcudiyeti vardır. Çevre şartlarının geniş bir çeşitliliğinde türlerin yaşamı büyük bir çeşitlilik gösterir. Mikroalglerin 30.000'den daha fazla türlerinin olduğu düşünülmektedir. Fakat 50 tür için sınırlı sayıda çalışma ve analiz yapılmıştır (Richmond, 2004). Mikroalgler besin ürünleri olarak insan tüketimi, su ürünleri yetiştiriciliğinde yem ve eczacılıkta ilaç olarak çok geniş bir uygulama alanları vardır. Aynı zamanda yakıt üretimi için çok iyi bir adaydır.

Yağ içeriği bakımından zengin bazı alg türlerinin kendi kütlesinin % 50'sini yağ oluşturmaktadır. Diatomlar (*Amphora*, *Cymbella*, *Nitzschia*) ve yeşil algler (özellikle *Chlorella* cinsi) gibi özellikle hem tatlı suda hem de tuzlu suda yaşayan alglerden yaklaşık olarak 300 tür alg türü tespit edilmiştir. Moleküler biyoloji teknolojisi, algden lipit üretmenin yanı sıra, alglerin fotosentez verimlerini en uygun hale getirmek için de kullanılmaktadır. Aynı zamanda hidrojen sentezleme yeteneğine sahip olan diğer türler de başka bir araştırma konusudur.

1.1.1.2. Alg Teknolojisi

Alg teknolojisi, kömür yakıtlı termik santraller ve diğer karbon içerikli endüstriyel proseslerdeki sera gazı emisyonlarını azaltmak için önemli bir araçtır. Mikroalgler CO₂'i çok iyi bünyesine alarak hızla büyüyen bir canlıdır ve biyodizel elde etmek için kullanılan diğer bitkilerden daha fazla yakıt üretim potansiyeline sahiptir. Algler mikroskobik olarak basit organizmalardır. Tuzlu su veya tatlı suda yaşarlar ve

bünyesinde CO₂ dönüşümünü sağlamak için gün ışığını kullanırlar. Algler 4 ana grupta kategorize edilir. Bunlar; diatomlar, yeşil algler, mavi-yeşil algler ve altın alglerdir. Alglerin yapısına göre iki ana gurubu vardır. Bunlar ipliksi algler ve fitoplanktonlardır. Bu iki türden özellikle fitoplanktonda alg patlaması çok hızlı olmaktadır. Birçok mikroalg türü yüksek verimlilik ve büyüme sergileyerek, kuru biyokütlesinden genellikle % 60'tan daha fazla lipid miktarını bünyesinde biriktirebilmektedir.

Alg kültürleri için kapalı sistemler, açık sistemler ve foto-biyoreaktörler kullanılabilir. Foto-biyoreaktör ve kapalı sistemler için farklı tank türleri bulunmaktadır. Açık havuz sistemleri, alg üretimi sağlayan sığ göletlerdir. Bu göletlerdeki su ve besin maddeleri, evsel atık suyu arıtan arıtma sistemlerinden veya bu sistemlerin yakınından geçen sulardan sağlanabilir. Açık sistemlerin teknolojik ve biyolojik olarak gelişimini etkileyen bazı sınırlamaları olduğundan, kapalı fotobiyoreaktörün gelişimi daha hızlı olmuştur. Güneş enerjisi kullanarak açık veya kapalı havuzlarda veya yassı ve diğer tasarımları mevcut olan fotobiyoreaktörde mikroalg üretimi yapılabilmektedir. Kapalı sistemde, mikroalg üretimi çok pahalıdır. Bununla birlikte kapalı sistemler çok daha az ışık ve tarım arazisi gerektirir. Bünyelerinde yüksek miktarda yağ içeren mikroalgler, optimize edilmiş olan koşullarda yani fotobiyoreaktörde yılda 19.000-57.000 ton biyodizel üretim verimine sahiptir. Alglerden elde edilen biyodizel üretimi en iyi bitkilerden üretilen biyodizelden 200 kat daha fazladır.

Fotobiyoreaktörde alg üretimi yapılarak termik santral baca gazlarından CO₂ arındırılabilir ve atık sulardan da azot ve fosfor giderimi sağlanabilir. Alg biyokütlesi yakın gelecekte biyoyakıt ve gıda üretimindeki problemleri çözmede önemli bir rol oynayacaktır. Mikroalgler ulaşım yakıtları için küresel talebi karşılayabilecek yenilenebilir enerji olan biyodizelin kaynağı olabilir. Mikroalgler alg biyokütlesinde gün ışığını CO₂ ve H₂O çeviren fotosentetik mikroorganizmalardır.

Mikroalgler CO₂'in azaltılması ve biyodizel üretiminin yapılması gibi iki uygulamanın birleştirilerek, biyoenerji (biyodizel, biyometan, biyohidrojen) üretimi için de kullanılabilir. Mikroalgler CO₂ azaltılmasında karasal bitkilerden daha etkilidir ve fotosentetik verimi daha fazla olan küçük biyokimyasal fabrikalardır (Brown, 1993; Pirt 1986). Mikroalglerin en büyük üç sınıfı vardır bunlar diatom (*Bacillariophyceae*), yeşil alg (*Chlorophyceae*) ve altın alglerdir (*Chrysophyceae*).

Makro ve mikroalgler şu anda ağırlıklı olarak su ürünleri yetiştiriciliği için beslenme, biyo gübre, hayvan yemi ve gıda için kullanılmaktadır. Mikroalg biyokütlesinden su

kurutularak sağlıklı gıda ürünleri elde edilebilir. Ayrıca fermentasyon yoluyla biyometan üretimi yapılabilir veya piroliz yöntemiyle sıvı yakıt üretilir.

1.1.1.3. Biyodizel Üretimi İçin Mikroalglerin Uygunluğu

Birçok araştırma raporları ve makaleler mevcut diğer hammaddeler ile karşılaştırıldığında biyodizel üretimi için mikroalg kullanımının bir çok avantajını sunmaktadır (Sheehan vd., 1998; Chisti, 2007; Tsukahara ve Sawayama, 2005). Pratik açıdan bakıldığı zaman mikroalg yetiştirmek kolaydır. Kolay besin elde etmek için ve insan tüketimi için uygun olmayan sularda az veya hiç ilgilenmeden büyüebilirler.

Mikroalgler, güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürmek için fotosentezi kullanarak, birkaç günde büyüme döngüsünü tamamlayarak çoğalırlar (Sheehan vd., 1998). Mikroalgler, hemen her yerde büyüebilirler ve büyüme oranları yeterli havalandırma ve belirli beslenme ve bazı basit besinler gerektirmektedir (Aslan ve Kapdan, 2006; Renaud, 1999).

Farklı mikroalg türleri çeşitli çevre koşullarında yaşamaya adapte olabilir. Bu nedenle, belirli büyüme özellikleri veya yerel ortamlarda en iyi çalışan mikroalg türünü bulmak mümkündür. Mikroalgler, biyodizel, metan, hidrojen, etanol gibi yenilenebilir yakıtların birkaç türü için diğerleri arasında geri dönüşümlüdür. Biyodizel CO, hidrokarbon, SO_x ve partiküler maddenin emisyonlarını azaltırken, dizel yakıtlara göre kükürt içermez ve iyi bir performans sergiler. Biyoyakıt için mikroalgin kullanımı da başka amaçlara hizmet edebilir. Düşünülen bazı olasılıklar aşağıda listelenmiştir.

- Alg biyolojik bağlanması ile endüstrilerin baca gazlarından gelen CO₂ temizlenebilir (Wang vd., 2008). Biyodizel üretilirken şirket veya proseslerin sera gazı emisyonları azaltılır.

- Besin olarak su kirleticilerini kullanarak büyüyen alg NH₄, NO₃, PO₄ gidermesiyle atık su temizlenir (Wang vd., 2008).

- Yağ çıkarıldıktan sonra geride kalan yosun biyokütlesi, etanol, metan, mikroalglerde N:P oranı veya sadece enerji için yanması nedeniyle organik gübre olarak da kullanılabilir.

Sert koşullarda büyüebilirler ve besinlere olan ihtiyacı azdır. Mevsimsel hava değişimlerinden bağımsız, tarımsal amaçlar için uygun olmayan alanlarda büyüebilirler. Böylece ekilebilir arazi kullanımı için rakipsizdir ve kültür ortamı olarak tatlı su kullanımı gerektirmeyen atık sular kullanılabilir.

- Diğer bileşikler mikroalg türlerine bağlı olarak farklı sanayi sektörlerinde ki değerli uygulamaları ile, saf kimyasallar ve geniş bir ürün yelpazesi dahil olmak üzere yağlar gibi çoklu duymamış yağ asitleri, petrol, doğal boyalar, şekerler, pigmentler, antioksidanlar, yüksek değerlikli biyoaktif bileşikler ve diğer saf kimyasallar ve biokütleler elde edilebilir (Li vd., 2008; Raja vd., 2008).

- Yüksek değerlikli biyolojik türevlerinin bu çeşitliliği nedeniyle birçok ticari uygulamaların mümkün olmasıyla mikroalg kirliliğin önlenmesinde, biyoyakıt, kozmetik ile ilaç beslenme ve gıda katkı maddeleri de dahil olmak üzere biyoteknoloji alanlarında çok sayıda devrim yaratmaktadır (Rosenberg ve Oyler, 2008; Raja vd., 2008).

Mikroalglerin enerji kaynağı olarak metabolizmalarında, depo ürünlerinde, membran bileşenlerinde yağ asidi ve lipit mevcuttur. Alglerin biyodizel üretiminde bir hammadde olarak kullanılması durumu söz konusudur. Alglerden optimum bir verim elde etmek için havuzlarda veya biyoreaktörlerde büyük miktarda CO₂ olması gerekmektedir. Toplam baca gazı emisyonu ortalama olarak %13 olan bir termik santralin baca gazı emisyonu havuz ve biyoreaktörlerle birleştirilirse, CO₂ havuzlarda veya biyoreaktörlerde bulunan algler tarafından asimile edilebilir. Böylece kullanılan su ile aynı zamanda CO₂ geri dönüşümü yapılmış olur. Yeterli derecede güneş ışığının bulunduğu her yerde alg büyütülebilir. Bazı algler tuzlu suda da büyütülebilir. Bütün algler protein, karbonhidrat, lipit ve değişen oranlarda nükleik asitler içerirler. Alg bünyesinde bulunan yağ asitlerinin yüzdeleri alg türüne göre değişebilmekle beraber alg bünyesinde bulunan yağ asitleri kendi kütlelerinin % 40'ı kadarını oluşturabilmektedir. Alg yağının en önemli ayırt edici özelliği ise biyodizel verimidir. Bazı tahminlere göre ise alg yağının verimi bitkisel yağların veriminden 200 kat daha fazla olduğu yönündedir. Yaklaşık olarak alglerden 46 ton yağ/hektar/yıl elde edilebilir. Bazı tür alglerin ağırlığının % 50'si kadar biyodizel üretilebilir.

1.1.1.4. Mikroalglerin Lipit İçeriği ve Verimliliği

Mikroalg çok etkili bir güneş enerjisi dönüştürücüsüdür. Alg kültürü % 30-50 oranında yağ üretebilir. Yağ elde etmek için 47.000 - 308.000 ha/yıl alg kullanılarak üretildiği teorik olarak iddia edilmektedir. Algler tüm bitkiler gibi sistemlerinin işleyebilmesi için azot ve suya ihtiyaç duyarlar. Tanklardan alg hasadı, alglerden yağın çıkarılması ve bu yağdan enerji elde edilmesi oldukça yoğun bir süreçtir. Birçok mikroalg

türleri lipidlerin önemli miktarlarını biriktirebilme kapasitesine sahiptir. (Sheehan vd., 1998). Böylece yüksek yağ verimine katkıda bulunurlar. Ortalama lipid içeriği %1 ve %70 arasında değişir. Fakat bazı türlerde lipid içeriği belirli koşullar altında kuru ağırlığının % 80'ine ulaşabilir (Li vd., 2008; Chisti, 2007 , Spolaore vd., 2006).

Tablo 1.1. Farklı mikroalg türlerinin verimliliği ve yağ içerikleri

Deniz ve Tatlısu Mikro alg türleri	Yağ içeriği (% kuru ağırlık)	Yağ üretimi (mg/L/gün)	Hacimsel biyomas üretimi (g/L/gün)	Biyomasın alansal üretimi (g/m ² /gün)
<i>Ankistrodesmus sp.</i>	24,0–31,0	–	–	11,5–17,4
<i>Botryococcus braunii</i>	25,0–75,0	–	–	0,023,0
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33,6	21,8	0,07	–
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	14,6–16,4/39,8	17,6	0,04	–
<i>Chlorellae mersonii</i>	25,0–63,0	10,3–50,0	0,036–0,041	0,91–0,97
<i>Chlorella protothecoides</i>	14,6–57,8	1214	2,00–7,70	–
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19,0–22,0	44,7	0,23–1,47	–
<i>Chlorella vulgaris</i>	5,0–58,0	11,2–40,0	0,02–0,20	0,57–0,95
<i>Chlorella sp.</i>	10,0–48,0	42,1	0,02–2,5	1,61–16,47/25
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2,0	–	2,90–3,64	72,5/130
<i>Chlorella</i>	18,0–57,0	18,7	–	3,50–13,90
<i>Chlorococcum sp.</i>	19,3	53,7	0,28	–
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20,0–51,1	–	10	–
<i>Dunaliella salina</i>	6,0–25,0	116,0	0,22–0,34	1,6–3,5/20–38
<i>Dunaliella primolecta</i>	23,1	–	0,09	14
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16,7–71,0	–	0,12	–
<i>Dunaliella sp.</i>	17,5–67,0	33,5	–	–
<i>Ellipsoidion sp.</i>	27,4	47,3	0,17	–
<i>Euglena gracilis</i>	14,0–20,0	–	7,70	–
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25,0	–	0,05–0,06	10,2–36,4
<i>Isochrysis galbana</i>	7,0–40,0	–	0,32–1,60	–
<i>Isochrysis sp.</i>	7,1–33	37,8	0,08–0,17	–
<i>Monodus subterraneus</i>	16,0	30,4	0,19	–
<i>Monallanthus salina</i>	20,0–22,0	–	0,08	12
<i>Nannochloris sp.</i>	20,0–56,0	60,9–76,5	0,17–0,51	–
<i>Nannochloropsis oculata</i>	22,7–29,7	84,0–142,0	0,37–0,48	–
<i>Nannochloropsis sp.</i>	12,0–53,0	37,6–90,0	0,17–1,43	1,9–5,3
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29,0–65,0	90,0–134,0	–	–
<i>Nitzschia sp.</i>	16,0–47,0	–	–	8,8–21,6
<i>Oocystis pusilla</i>	10,5	–	–	40,6–45,8
<i>Pavlova salina</i>	30,9	49,4	0,16	–
<i>Pavlova lutheri</i>	35,5	40,2	0,14	–
<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	18,0–57,0	44,8	0,003–1,9	2,4–21
<i>Porphyridium cruentum</i>	9,0–18,8/60,7	34,8	0,36–1,50	25
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11,0–55,0	–	0,004–0,74	–
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,9–18,4	35,1	0,19	–
<i>Scenedesmus sp.</i>	19,6–21,1	40,8–53,9	0,03–0,26	2,43–13,52
<i>Skeletonema sp.</i>	13,3–31,8	27,3	0,09	–
<i>Skeletonema costatum</i>	13,5–51,3	17,4	0,08	–
<i>Spirulina platensis</i>	4,0–16,6	–	0,06–4,3	1,5–14,5/24–51
<i>Spirulina maxima</i>	4,0–9,0	–	0,21–0,25	25
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	20,6	17,4	0,08	–
<i>Tetraselmis suecica</i>	8,5–23,0	27,0–36,4	0,12–0,32	19
<i>Tetraselmis sp.</i>	12,6–14,7	43,4	0,30	–

Tablo 1.1 de farklı deniz ve tatlı su mikroalg türlerini hem lipid içeriğini hem de lipid ve biyokütle verimliliklerini sunmakta ve çeşitli türler arasındaki önemli farklılıkları göstermektedir (Chisti, 2007; Richmond, 2004; Renaud vd., 1999; Chisti vd., 2007; Rodolfi vd., 2009; Spolaore vd., 2006; Barclay, 1984, Zhu ve Lee, 1997).

Tablo 1.1’de gösterildiği gibi mikroalgde yağ içeriği kuru biyokütle ağırlığının % 75’ ne ulaşılabilir fakat düşük verimlilikleri ile ilişkilendirilmiştir (örneğin *Botryococcus braunii* için). Çoğunlukla algler %20 ve %50 arasında ki bir seviyede yağ içeriğine sahiptir (*Chlorella*, *Cryptocodinium*, *Cylindrotheca*, *Dunaliella*, *Lsochrysis*, *Nannochloris*, *Nannochloropsis*, *Neocloris*, *Nitzschia*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Schizochytrium*, *Jetraselmis*). Fakat daha yüksek verimliliğe ulaşılabilir.

Tablo 1.2 de gösterildiği gibi biyodizel üretiminde diğer bitkisel yağ bitkileri ve mikroalglerin arazi kullanımı ve verimlilikleri de dahil olmak üzere bir karşılaştırma yapılmıştır. Mikroalg yağ verimi türe bağımlı olmasına rağmen, diğer bitkisel yağ bitkilerinden çok daha büyüktür (Chisti, 2007; Teixeira vd., 2007; Kheira vd., 2008; Zappi vd., 2003). Yağ içerikli tohum bitkileri ve mikroalgler arasında benzerlik olmasına rağmen, biyodizel verimliliği ve yağ verimi elde edilmesi mikroalgler için net bir avantajdır. Biyokütle verimliliği üzerindeki önemli farklılıklar Tablo 1.2 de gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Diğer biyodizel kaynaklarıyla mikroalglerin karşılaştırılması

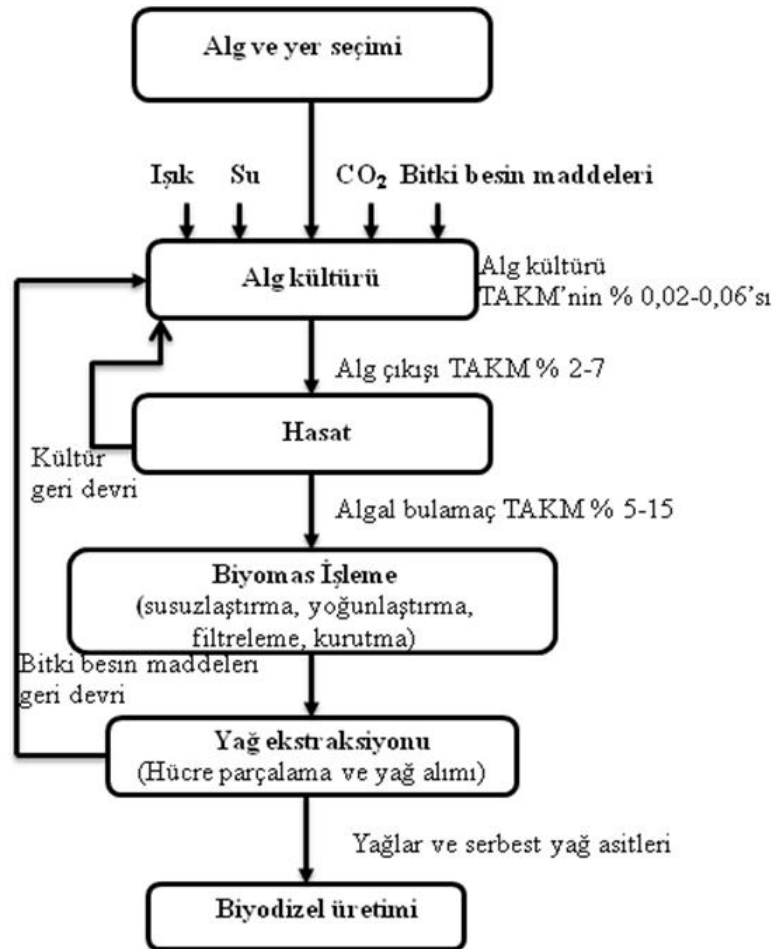
Bitki cinsi	Tohum yağ oranı (% yağ)*	Yağ verimi (L yağ/ha.yıl)	Alan kullanımı (m ² yıl/kg biyodizel)	Biyodizel üretimi (kg /ha yıl)
Mısır (<i>Zea mays</i> L.)	44	172	66	152
Kenevir (<i>Cannabis sativa</i> L.)	33	363	31	321
Soya (<i>Glycine max</i> L.)	18	636	18	562
Jatropha (<i>Jatropha curcas</i> L.)	28	741	15	656
Camelina (<i>Camelina sativa</i> L.)	42	915	12	809
Kanola (<i>Brassica napus</i> L.)	41	974	12	862
Ayçiçek (<i>Helianthus annuus</i> L.)	40	1070	11	946
Kastor (<i>Ricinus communis</i>)	48	1307	9	1156
Hurma (<i>Elaeis guineensis</i>)	36	5366	2	4747
Mikroalgler (düşük yağ içeriği)	30	58700	0,2	51927
Mikroalgler (orta yağ içeriği)	50	97800	0,1	86515
Mikroalgler (yüksek yağ içeriği)	70	136900	0,1	121104

*Kuru ağırlık

1.1.2. Alglerden Biyodizel Üretimi

Mikroalgden yağ üretimi ışık, karbondioksit, su ve inorganik besin maddesi gerektiren adımlardan oluşur. İkinci adım ise nitratlar, fosfatlar, demir ve bazı eser elementlerdir. Mikroalgin biyokütle kuru ağırlığının yaklaşık olarak yarısı CO₂’den türetilen karbondan oluşmaktadır. Bu nedenle alg biyokütlesinden 100 ton üretilirse yaklaşık olarak 183 ton CO₂ giderilmiş olur. Böylece alg tanklarına gündüz saatlerinde

sürekli olarak CO₂ beslemesi yapılması gerekmektedir. Bu CO₂ çok az maliyetlidir ve çoğu zaman zaten ortamda mevcuttur. Büyüme döneminde olan birçok mikroalg için optimal sıcaklık 19 ile 27 °C'dir. Bu aralığın dışındaki bir sıcaklık hücreleri öldürür veya zarar verebilir. Mikroalg büyümesi için belirli koşullara bağlı olarak mikroalg türlerinin seçimi ile başlayan ve tasarım veya yetiştirme sistemlerinin uygulaması ile devam eden alglerden biyodizel oluşum zincirinin aşamalarının şematik gösterimi Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Biyodizel üretim zinciri

Mikroalglerden verimli biyodizel üretmek için özellikle ekim, hasat ve işletme teknikleri dikkate alınmalıdır. Biyodizel üretimi için mevcut süreçler hücrelerin yetiştirme ortamı, büyüyen mikroalglerin hasat edilmesi ve sonra lipidlerin çıkarılmasını takip etmektedir. Sonra biyodizel, diğer biyoyakıtlar, biyoyakıt besin depoları için kullanılan teknolojiler ve var olan süreçlere benzer süreçlerle üretim yapılmaktadır. Son zamanlarda biyoyakıt üretimi için diğer olasılıklar, transesterifikasyon reaksiyonunun yerine termal

bozulma veya trigliseridin yarılanmasını içeren termal parçalama, diğer organik bileşikler, bazen moleküller, yeni alkanlar, alklenler, aromatikler ve karboksilik asitler olarak belirtilmektedir (Bahadır vd., 1995; Babu, 2008).

1.1.2.1. Yer Seçimi

Şu anda birçok araştırma, alg yetiştirme birimi üzerinde yoğunlaşmıştır. Çoğu durumda olduğu gibi, sonuçta sürecin ekonomik canlılığının belirlenmesi önemli bir aşamadır. Maxwell'e göre bir alg yetiştirme yer seçiminin uygulanması ve kaynak değerlendirmesi için çeşitli kriterler dikkate alınmalıdır (Maxwell vd., 1985).

- Su arz/talep, suyun tuzluluğu ve kimyası,
- Arazinin topografya, jeoloji ve mülkiyeti,
- İklim koşulları, sıcaklık, yalıtım, buharlaşma, yağış,
- Besin maddeleri ve karbon kaynaklarını kolayca sağlama

Eğer alg yetiştirme birimi beraber veya sürekli çalışacaksa ve üretim birimleri açık veya kapalı sistemler olacaksa, karar dikkatle alınmalıdır. Bu seçilen mikroalg türüne, mevcut olan çevresel koşullara, besinlerin mevcudiyetine ve diğer endüstri kontrol stratejilerinin birleştirilmesine bağlıdır. Örneğin gaz emisyonu bakımından CO₂ gidermek için veya bir atık sudan atık azot ve fosforu gidermek için mikroalg kullanılmasıdır.

Mikroalgleri çoğaltmak için ayrıca ekipmana ihtiyaç vardır. Mikroalglerin uygun tür ve soyların seçimine, yetiştirme şartlarına ve kullanılan besinlerin özelliklerine dikkat edilmelidir. Biyodizel üretiminin çoğunda mikroalglerin seçimi, yeterli lipid içeriği veya verimliliğine, mevcut olan tür ve soylara bağlıdır. Literatür bilgileri ve kültür tesislerinin üretim birimlerinden elde edilen bilgiler kullanılabilir. Ama bazı durumlarda, tek yaklaşım yeterli bir çözüm verimi sağlamayabilir. Bu durumda daha uygun mikroalg türleri için araştırma yapılmalıdır. Genellikle mikroalg kaynakları, üniversitelerden ya da diğer ulusal ve uluslararası kurumlardan, özellikle alg üretmek için çalışan firmalardan, farklı çevrelerden elde edilmiş su veya toprak mikroalg örnekleri ile var olan koleksiyonlarını içermektedir.

Özellikle besin kıtlığı ve diğer olumsuz koşullarda, temel şartlar veya endüstriyel atıksudaki gibi sert ortamlardan elde edilen algler kullanılabilir. Çünkü mikroalgler çevresel şartların çeşitli olduğu bir alanda yaşamak zorunda kalacaktır. Bu yolla eğer herhangi bir uygun seçenek tespit edilirse, mikroalgler sağlam ve muhtemelen daha iyi

koşullara adapte edilmiş olacaktır. Mikroalgler özel ekipmanlar gerektirmesi ve zaman alıcı olmasına rağmen, örnekleme ve seçim süresi iyi yapılmalıdır. Bu süreçte birçok strateji göz önünde bulundurulmalıdır. Bu süreçlerde aşağıdaki etkenler dikkate alınır:

- Büyüme oranı: Birim hacim ve birim zamanda biriken biyokütlenin toplam miktarı ile ölçülmektedir.
- Lipit içeriği: Toplam miktar kastedilmez, sadece biyodizel üretimiyle ilgili olabilecek serbest yağ asidi ve trigliserit dağılımıdır.
- Değişik çevre şartlarına olan direnç, özellikle sıcaklık, besin girişi, ışık, diğer mikroalg türleri veya bakterilerle rekabet.
- Besin durumu: Özellikle karbondioksit kaynağı hedef karbon ayırma olduğu zaman önemlidir.
- Biyokütle ayırma ve işletiminin kolaylığı.
- Diğer değerli kimyasalların elde edilebilmesi.

Listelenmiş olan kıstaslar, sadece mikroalglerin kendisi için değil aynı zamanda onların birimlerini de ele almaktadır. Böylece tüm deneylerin gerçek şartlara mümkün olduğu kadar benzemesi gerekmektedir. Çevreden elde edilmiş veya literatürde listelenmiş türler yeterli olmasa bile genetik mühendisliğinin kullanılması bir çözüm olabilir (Gressel, 2008). Bu şekilde süreç ve işletilen ürünler için lipit verimi ve kompozisyon verimliliğini geliştirmek için mikroalglerin özelliklerini ayarlama da mümkün olmaktadır. Ama biyolojik kirlenme korkusu, kısıtlayıcı mevzuat ve uygun doğal seçenekler hala genetik organizmaların geniş kullanımlarını engellemektedir.

1.1.2.2. Alg Yetiştirme

Algler, suyun olduğu her yerde yaşayan tek hücreli organizmalar ve basit çok hücreli canlılardır. Algler, temel olarak hücre yapısı, pigment bileşimi, depo besini ve kamçıların varlığı, sayısı ve yapısı bakımından farklılık gösterir. Alg büyümesi için en önemli inorganik besinler azot ve fosfordur, genel olarak sırasıyla nitrat veya amonyak ve fosfat olarak bulunurlar. Tek hücreli olarak, koloni olarak veya filamentler halinde bulunabilirler (Weher vd. 2003).

Biyosferde her yere yayılmışlardır ve çok çeşitli koşullarda yetişebilirler. Mikroalgler tatlı sulardan, çok tuzlu ortama kadar birçok sucul ortamda kültürlenebilirler. Mercan kayalıklarının temel bileşeni olarak bilinirler. Bu tür ekolojik gereklilikler,

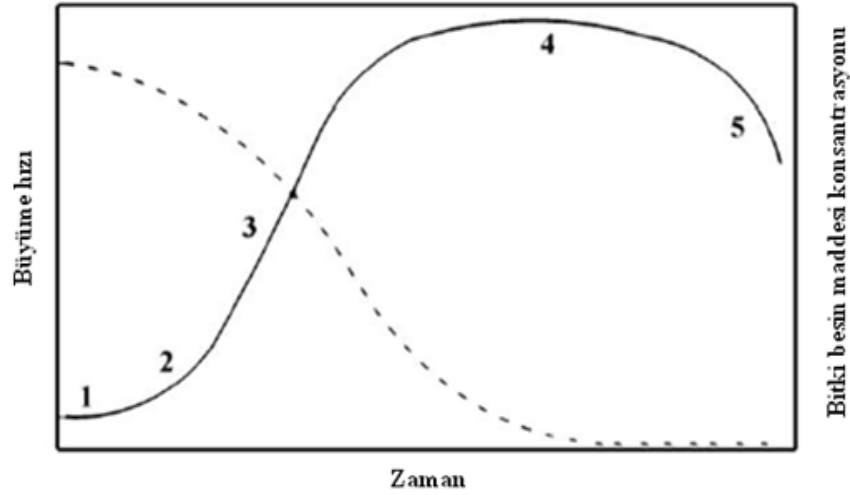
ürettikleri metabolik ürünlerin tanımlanmasında önemli rol oynar. Mikroalgler çevrelerindeki depolamış kaynakları elimine etmek veya kaynak kullanımında verimliliği arttırmak için çevreyi temizlemeye adapte edilmektedir. Genel olarak mikroalg büyütmek ve fotosentezi yürütmek için ışık veya karbon kaynağının yeterli miktarda olmalıdır (Moheimani, 2005; Kaewpintong, 2004). Mikroalglerin içyapısı değiştirilebilir veya ayarlanabilir (biyokimyasal veya fiziksel asimilasyon). Mikroalg metabolizmalarının çok çeşitlidir ve çevre koşullarının değişmesine karşın, metabolik değişim yeteneği bulunmaktadır (Chojnacka vd., 2004). Bunlar;

- Fotoototrofiksel olarak, tek bir enerji kaynağı olarak ışığı kullanarak fotosentetik reaksiyonlarla ışığı kimyasal enerjiye dönüştürürler.
- Heterotrofikler karbon ve enerji kaynağı olarak sadece organik bileşikleri kullanırlar.
- Hem fotoototrof hem heterotrofik olarak (Mixotrofi), başlıca enerji kaynağı olarak fotosentez performansı için hem organik bileşikler hem de CO₂ kullanırlar. Amphitrofi, Mixotrofinin bir alt tipidir. Bu organik bileşikler ve mevcut olan ışığın konsantrasyonuna bağlı olarak organizmalar hem ototrofik hem de heterotrofik olarak yaşayabilir.
- Fotoheterotrofiksel olarak, metabolizma ışık karbon kaynağı olarak organik bileşikler kullanmak için gereklidir. Fotoheterotrofik ve mixotrofik metabolizmalar iyi fark edilmeyebilir.

Mikroalgler, metabolizma ile ilgili büyüme stokiyometrisine bağlı olarak değişen pH'a göre de ayırt edilebilmektedir. *Chlorella vulgaris*, *Haematococcus pluviialis*, *Arthrospira (spirulina) platensis* heterotrofik, fotoheterotrofik, bunların yanı sıra mixotrofik şartlar altında büyümekte olan soyların örnekleridir. *Selenastrum caprycornutum* ve *Scenedesmus acutus* gibi diğer soylar ya fotoototrofik heterotrofiksel ya da fotoheterotrofiksel olarak büyüyebilirler (Chojnacka, 2004). Sadece organik karbon veya substrat (şeker, protein ve yağlar gibi karbon kaynakları), vitaminler, tuzlar ve besinler algleri büyütmek için değil, aynı zamanda işletme parametreleri arasındaki dengeler de algleri büyütmek için de önemlidir (oksijen, CO₂, pH, sıcaklık, ışık şiddeti veya ürün giderme) (Williams, 2002). Deneysel çalışmalar, kötü kültür şartlarında sık sık enfeksiyonların olduğunu göstermiştir (De Pauw vd., 1984). Yeterli besin ve uygun iklim koşulları altında mikroalgler hızlı bir şekilde büyüyebilirler (Şekil 1.2).

Üssel büyüme aşaması süresince 24 saat veya 3,5 saat içinde mikroalg biyokütlesi ikiye katlanır (Chisti, 2007). Şekil 1.2' de besin konsantrasyonu (kesikli çizgi) ve toplu

kültürde alg büyüme eğrisi (siyah çizgi) gösterilmektedir. Burada iyi tanımlanmış 5 büyüme evresi kabul edilebilir.



Şekil 1.2. Bir alg kültüründe zamana bağlı olarak besin maddesi konsantrasyonu (kesikli çizgi) ile alglerin büyüme hızı (düz çizgi) arasındaki ilişki [1) duraklama fazı, 2) üssel büyüme fazı, özel koşullar altında en yüksek büyüme oranını temsil eder, 3) doğrusal büyüme fazı, 4) sabit büyüme fazı, 5) düşüş veya ölüm fazı. Sabit faz ve sonrası boyunca kesikli eğrinin karşısındaki model besin tüketimini gösterir]

Algin büyük ölçekli yetiştiriciliğinde önemli bir engel ise seçilen türleri büyütmek için önemli miktarda yüzlerce metreküpünün yetersizliğidir. Su kültüründe kullanılan *Chlorella* ve *Spirulina* istisnalara bir örnektir.

1.1.2.3. Biyokütle Konsantrasyonu ve Hasat

Alg hasadı toplam biyokütle üretim maliyetinin %20-30'unu oluşturan kültür ortamından biyokütle alınmasından ibarettir (Grima vd., 2003). Büyük alg biyokütle hacimleri ve suyun büyük miktarları için uygun hasat yöntemi bir veya daha fazla adım içerebilir ve istenilen katı sıvı ayrımını yapmak için çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik yollar kullanılır. Deneyler evrensel bir hasat yönteminin olmadığını göstermiştir.

En yaygın hasat yöntemleri sedimantasyon, santrifüj, filtrasyon, ultrafiltrasyon, bazen ek bir yumaklaştırma adımı veya yumaklaştırma-yüzdürmenin bir kombinasyonunu içermektedir. Yumaklaştırma, toplam mikroalg hücrelerinin etkili parçacık boyutunu arttırmak için kullanılmaktadır. Böylece sedimantasyon, santrifüj, kurutma ve filtrasyonu

kolaylaştırır. Weissman ve Goebel (1987), biyoyakıt üretim amacı için ilk önce hasat yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Mikro gergiler, cazip bir hasat metodudur. Çünkü basit mekanik aksama sahiptirler ve büyük alanlara uygulanabilirler. Son zamanlarda çok ince gözenekli poliester perdelerin mevcut olması mikroalg hasadı için kullanılmasında gündeme gelmiştir. Sonraki çalışmalarda poliester perdeler mikro gergilerden önce konularak yüzen hücreleri alması için kullanılmıştır.

Yöntemlerde potansiyel yoğunluğu ayarlama veya sonraki süreçte optimum doğru konsantrasyon neticesinde nem seviyesi hasat yöntemini seçmek için temel bir kriterdir (Richmond, 2004; Grima vd., 2003). Yer çekimi ile çökelen çamur daha düşük ürünü hasat etmede ekonomiyi önemli ölçüde etkiler. Yer çekimiyle çökelmiş çamur genellikle santrifüjle hasat edilmiş biyokütlelerden daha çok seyreli olmaktadır. Toplam üretim maliyetini azaltmak için daha katı konsantre içerik, hasat sonrasında kolayca biyokütleyi susuzlaştırmak için gereklidir. Çünkü termal kurutmanın maliyeti mekanik kurutmadan daha yüksektir. Ortalama alg biyokütle kültürünün sonraki ayırımı (kuru ağırlığının %15) sadece birkaç saat sıcak havada bırakılarak hızlı işletme gerektirir.

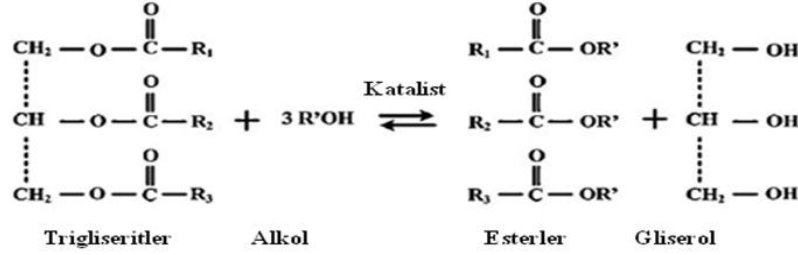
1.1.2.4. Biyodizel Üretimi

Biyodizel, bitkisel yağlar veya hayvansal yağların monoalkali esteri olarak tanımlanmaktadır. Biyodizel temel olarak yağ transesterifikasyonu veya petrodizele bir viskozite sağlamak için üretilmektedir. Biyodizel bitkisel yağlardan veya hayvan yağlarının transesterifikasyonu ile elde edilen yağ asidi alkil esterlerinin karışımıdır. Bu lipid besin depoları trigliseridlerin (ağırlığının) %90-98, mono ve digliseridlerin küçük miktarlarından, serbest yağ asitlerinden (%1-5) ve fosfolipitlerin kalıntı miktarlarından, fosfatidler, karoten, su tokoferol ve kükürt bileşiklerinden oluşmaktadır.

Transesterifikasyon üç tersinir adım içeren birçok basamaklı reaksiyondur. Trigliserid, digliseridlere dönüştürülür sonra digliseridler monogliseritlere dönüştürülür ve monogliseridler sonra esterlere ve gliserole dönüştürülür. Genel transesterifikasyon reaksiyonu yağ asitleri olarak bilinen uzun zincirli hidrokarbonları temsil eden üç radikal Şekil 1.3' de sunulmuştur.

Kısa zincirli alkol (genelde metanol) ve hayvan yağı veya besin yağı transesterifikasyonu reaksiyonu için katalizörlerin (NaOH) varlığında reaktifler olarak kullanılmaktadır. Alkol: yağ oranı 3:1 olmasına rağmen, 6:1 molar oranı genellikle doğru

reaksiyonu tamamlamak için kullanılır. Hammadde kütlesinin girişi ve biyodizel kütlesinin çıkışı arasındaki ilişki teorik olarak 1:1'dir yani yağın 1 kg'dan biyodizelin 1 kg elde edilmektedir.



Şekil 1.3. Transesterifikasyon reaksiyonu

Transesterifikasyon reaksiyon hızını arttırmak için homojen veya heterojen, asit veya baz termal katalizörler kullanılabilir. Bazı süreçler için kritik akışkanlar kullanılmasına rağmen (metanol, etanol) katalizör kullanımı gerekli de olmayabilir (Warabi vd., 2004). Endüstriyel işlemlerde en yaygın olarak homojen alkali katalizörler (NaOH veya KOH) veya karıştırmalı reaktörler kullanılabilir.

1.1.3. Mikroalg Üretimine Etki Eden Parametreler

Algal büyümeyi düzenleyen en önemli parametreler; besin kalitesi ve miktarı, ışık, pH, türbülans, tuzluluk ve sıcaklıktır. Optimum parametreler ve tolerans aralıkları türe özgüdür. Bazı önemli parametreler Tablo 1.3'de verilmiştir. Bir ortam koşulunda optimum olan parametre, başka bir ortam için optimum olmayabilir (Coutteau, 1996).

Tablo 1.3. Mikroalg üretimine etki eden parametreler için genelleştirilmiş değerler

Parametreler	Aralık	Optimum
Sıcaklık (C)	16-40	18-24
Tuzluluk (g/l)	12-40	20-24
Işık yoğunluğu (lux)	1000-10000	2500-5000
Fotoperiyot (gündüz/gece saat)	-	16:8 (en az) ve 24:0 en fazla)
pH	7-9	8.2-8.7

1.1.3.1. Işık

Işık yoğunluğu çok önemli bir rol oynar. Kùltürlerin bulunduğu tankın derinliği ve kùltür yoğunluğu da çok etkili bir rol oynamaktadır. Kùltürlerin bulunduğu tankın yüksekliği fazla olursa ve hücre konsantrasyonu yoğun olursa ışık yoğunluğunu arttırmak gerekmektedir. Işık kaynağı doğal veya yapay olabilir. Yapay aydınlatma sağlanarak mikroalg büyütülecekse aydınlatma süresi günlük minimum 18 saat olmalıdır (Coutteau, 1996). Işık miktarının aşırı artması ile fotosentetik organizmaların büyüme hızları da artar. Işık miktarı doygunluk seviyesine ulaştıktan sonra, hücreler ürettikleri enerjiyi ısı olarak açığa çıkarmaya başlar. Bu durum devam ederse organizmanın dengesi bozulur ve üretilen bu yüksek miktarda enerji nedeniyle inhibisyon meydana gelir ve fotoinhibisyon durumunda geri dönölmez zararlar oluşabilir. Işık inhibisyonu, etkisini birkaç dakika içerisinde göstermeye başlar ve bazı kùltürlerde 15-20 dakika içerisinde % 50'yi aşan hasarlar verebilir (Torzillo ve Vonshak, 2003; Pulz, Gross W. 2004, Tanaka vd., 1996).

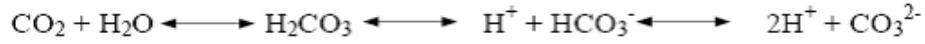
1.1.3.2. Sıcaklık

Mikroalgler metabolizmalarına ve fizyolojik aktivitelerine doğrudan etkili olabilecek sıcaklık değişimlerine hemen tepki gösterirler. Bu nedenle, üretimi yapılacak türün optimum sıcaklık değişimlerine hemen tepki gösterirler ve bu sebepten dolayı uygun sistemde üretimi yapılmalıdır. Sıcaklığın etkisi hücre solunumu sırasında görülür. Sıcaklık arttığında solunum hızı artar, artan solunum ise biyokütle kayıplarını artırır. Sıcaklık, mikroalglerin kimyasal kompozisyonları üzerinde de etkili olur.

1.1.3.3. Havalandırma/Karıştırma

Mikroalg tanklarında sıcaklık, ışık gibi parametrelerin optimum seviyelerinin sağlanması için karıştırma çok önemli bir rol üstlenmektedir. Karıştırma, alglerin sedimantasyonunu önleyerek, reaktör içindeki mikroalg hücrelerinin homojen dağılımını sağlar. Böylece mikroalglerin reaktörler içindeki tüm hücreleri ışık ve besin maddelerinden eşit oranda faydalanmasını sağlar ve termal tabakalaşma önlenmiş olur. Aynı zamanda kùltür ortamı ve hava arasındaki gaz transferinin düzenlenmesini sağlar (özellikle açık gölet kùltürlerinde). Karıştırma, kùltür sisteminin ölçeğine bağlı olarak, günlük olarak elle,

havalandırma ile çarklı pedallar ve pompalar ile gerçekleştirilir. Hava içerisindeki doğal CO₂ konsantrasyonu (%0,003), optimum büyüme ve yüksek verimlilik için yeterli değildir. Düşük tuzluluk ve nötrale yakın pH' da yapılan alg kültürlerinde, yeterli büyümenin olabilmesi için hava CO₂ ile zenginleştirilmelidir. CO₂ su içerisinde, pH, sıcaklık ve besin elementlerinin konsantrasyonuna bağlı olarak aşağıdaki formda bulunulur.



Hızlı üreyen alglerde ortamdaki CO₂ veya bikarbonatların hızlı asimilasyonu, algler tarafından OH⁻ iyonlarının salgılanmasından dolayı, yukarıdaki denklem sonucunda pH artışına neden olur. Yoğun kültürlerde pH, kültürü yapılan algin optimum değerleri arasında tutulması ve ortamdaki karbonun tükenmesini engellemek için dengelenmelidir (Becker, 1994).

1.1.3.4. Besin

Mikroalglerin fototrofik üretimlerinde gerekli olan besinler; makro elementler, mikro elementler ve vitaminlerdir. Her türün üretiminde, farklı konsantrasyonlarda çeşitli maddelere gereksinim duyduğu bilinen bir gerçektir. Alg üretimi için besin ortamlarının geliştirilmesindeki faktörler aşağıda özetlenmiştir.

- Toplam tuz konsantrasyonu: Algin orijinal yapısına bağlıdır.
- Karbon kaynağı: Algal biyokütlenin %50'si karbondan oluştuğundan dolayı, iyi bir üretim için yeterli miktarda karbon sağlanması hayati önem taşır. Karbon, inorganik substrat olarak, gaz CO₂ ya da bikarbonat formunda sağlanır. Organik karbon kaynağı olarak genelde şekerler ya da asetat kullanılır.
- Uygun ve ekonomik azot kaynağı seçimi: Nitrat, amonyak ve üre en çok kullanılan azot kaynağı olup, türe ve optimum pH'a bağlıdır. Azot, algal biyokütlenin %10'undan daha fazlasını oluşturduğundan, en önemli elementlerdendir. Azot kaynağındaki değişim algin metabolik yollarının üzerinde etki gösterir ve sonuçta organizmanın kompozisyonu değişir.
- Potasyum, magnezyum, sodyum, sülfat ve fosfat gibi diğer majör elementlerin konsantrasyonu.

- Ortamda bulunması zorunlu iz elementler: Genellikle az miktarda bulunması gerektiği için, stok çözeltileri hazırlanır. Bazı elementlerin, özellikle demirin çözünürlüğünü arttırmak için EDTA gibi şelatlayıcı ajanlar kullanılır.

- Organikler ve büyümeyi destekleyici maddeler (vitaminler, hormonlar gibi).

Teorik olarak, mikroalgler ototrofik, heterotrofik ve mikсотrofik (foto-heterotrofik) olarak yaşayabilmekle birlikte, her türün endüstriyel üretiminde tüm bu beslenme çeşitleri kullanılmayabilir (Borowitzka, 1999; Becker, 1994).

1.1.3.5. pH

Mikroalg üretimine etki eden diğer bir parametre ise pH'dır. Her tür, spesifik olarak belirli bir pH aralığında üreyebilir. Bir çok alg kültüründe pH 7-9 aralığındadır. Optimum aralık ise 8,2-8,7 arasında değişir. Kültür için uygun pH'nın sağlanamaması, hücrelerin parçalanarak içeriğinin bulunduğu ortama geçmesiyle kültür ölümlerine yol açar. Bu sorun kültürün havalandırılmasıyla aşılabılır. Çok yoğun olan kültürlerde, zamanla pH artışı meydana gelir. Bu durumda pH dengesi, havalandırma/karıştırma kısmında anlatıldığı gibi uygun miktarda eklenen CO₂ ile ayarlanabilir (Coutteau, 1996).

1.1.4. Mikroalg Kültür Sistemleri

1.1.4.1. Açık Kültür Sistemleri ile Kapalı Kültür Sistemleri

Mikroalg kültürleri göl veya göletler gibi açık kültür sistemleri ve yüksek kontrollü kapalı kültür sistemleri olarak adlandırılan fotobiyoreaktörlerde yetiştirilebilir (Resim 1.1). Biyoreaktörler biyolojik dönüşümlerin elde edildiği sistem olarak tanımlanabilir. Böylece fotobiyoreaktör ototroflar (mikroalg, alg veya bitki hücreleri) için üretilmektedir veya fotobiyolojik reaksiyonları sürdürmek için kullanılan bir reaktördür. Açık kültür sistemlerinin inşası ve işletmesi genellikle daha az masraflıdır ve kapalı sistemlere göre büyük üretim sistemine sahip ve büyük kapalı reaktörlerden daha sağlamdır. Ama Richmond'a (2004) göre havuzlarda homojen besinler elde etmek için daha fazla enerji kullanılır ve büyümek için yeterince güneş enerjisi almada mikroalg için su seviyesi 15 cm' den (veya 150L/m²) daha düşük olmaması gerektiğini söylemiştir.

Genellikle havuzlarda hava şartları daha müsaittir. Fakat suyun sıcaklığı, buharlaşması ve ışığın kontrolü yapılamaz. Ayrıca havuzlarda mikroalglerin büyük miktarları üretebilir. Ancak daha geniş araziye ihtiyaç duyulur ve diğer bakteri veya mikroalgden oluşan kirlenmeye karşı hassastır. Üstelik kütle transferinde ki sınırlama mikroalg hücre büyümesini yavaşlatması beklenmektedir. Çünkü atmosfer, sadece % 0,003-0,006 CO₂ içerir.

Foto-biyoreaktör sistemleri esnekler çünkü alg türlerinin yetiştirilmesinin fizyolojik ve biyolojik özelliklerine göre reaktör en uygun hale getirilir. Kapalı havuzlarda büyüyemeyen alg türlerini yetişmesine müsaade eder. Foto-biyoreaktörlerde gazların doğrudan değiş tokuşu ve ekilmiş hücreler arasındaki kirleticilerden ve atmosferden sınırlandırılmıştır. Ayrıca ışığın büyük bir oranı doğrudan kültür yüzeyine vurmaz. Fakat ışık şeffaf reaktör duvarlarını geçer.

Mikroalglerin şekline ve tasarımlarına bağlı olarak foto-biyoreaktörler açık havuzlara göre üzerinde çeşitli avantajlara sahip olduğu kabul edilmektedir. Kültür koşulları ve büyüme parametreleri (pH, sıcaklık, karıştırma, CO₂ ve O₂) kararlıdır. Buharlaşma önlenir, CO₂ kayıpları azalır, yüksek mikroalg yoğunluğu veya yüksek hücre konsantrasyonuna izin verir. Yüksek hacimsel verimlilikler elde edilir. Daha güvenli ve korumalı çevre sunmaktadır. Rakip mikroorganizmalar tarafından bulaşmayı en aza indirir veya kirliliği önler.

Foto-biyoreaktörlerin avantajlarına rağmen açık havada kanal havuzlarında elde edilebilen algler daha ekonomiktir. Foto-biyoreaktörün herhangi bir ürün veya süreç üzerinde gelecekte önemli bir etkiye sahip olması beklenemez. Foto-biyoreaktörler çözülmesi ve dikkate alınması gereken bazı engellerden dolayı zarar görmektedir. Başlıca sınırlamalar ise şunlardır: aşırı ısınma, biyolojik zorluklar, oksijen birikimi, inşaa maliyetinin yüksekliği, yüksek ölçeklendirme zorlukları, alg biyokütlelerin ekimi ve işletimi, kayma gerilmesi ile oluşan hücre hasarı ve fotosentez aşaması için kullanılan malzemenin bozulmasıdır. Tablo 1.4.'de çeşitli kültür şartları ve büyüme parametreleri için Foto-biyoreaktör ve havuzlar arasındaki karşılaştırmayı gösterilmektedir (Borowitzka, 1999; Piccolo, 2008).

Tablo 1.4. Mikroalgler için açık ve kapalı kültür sistemlerinin karşılaştırılması

Mikroalgler için Kültür sistemleri	Kapalı sistemler (Foto-biyoreaktör)	Açık sistemler (Havuzlar)
Kirlilik kontrolü	Kolay	Zor
Kirliliğin bulaşma riski	Azaltılmış	Yüksek
Temizlik	Başarılmış	Başarılamamış
Proses kontrolü	Kolay	Zor
Türlerin kontrolü	Kolay	Zor
Karıştırma	Çok	Az
Operasyon rejimi	Toplu veya yarı sürekli	Toplu veya yarı sürekli
Gerekli boşluk	Verimli olan bir madde	Fotobiyoreaktör - Havuzlar
Alan/hacim oranı	Yüksek(20–200 m ₁)	Düşük (5–10 m ₁)
Nüfus yoğunluğu (alg hücreleri)	Yüksek	Düşük
Yatırım	Yüksek	Düşük
İşletme giderleri	Yüksek	Düşük
Havuzlarda Sermaye/ işletme maliyeti	Havuzlardan 3-10 kat daha düşük	Fotobiyoreaktör ler> Havuzlar
Işık kullanım verimliliği	Yüksek	Düşük
Sıcaklık kontrolü	Daha düzgün sıcaklık	Zor
Verimlilik	3-5 kat daha verimli	Düşük
Su kayıpları	Soğutma tasarımına bağlı	Fotobiyoreaktör-havuz
Alg üzerinde hidrodinamik gerilim	Düşük-yüksek	çok düşük
Ortalama büyüklükte	Düşük	Yüksek
Buharlaşma gaz iletim kontrolü	Yüksek	Düşük
CO ₂ kaybı	pH, alkalinite vb. bağlı,	Foto-biyoreaktör-Havuzlar
O ₂ inhibiasyonu	Fotobiyoreaktörde problem	Fotobiyoreaktör >Havuzlar
Biyokütle konsantrasyonu	Foto-biyoreaktörde 3-5 kat	Foto-biyoreaktör > Havuzlar
Ölçeklendirme	Zor	Zor

Foto-biyoreaktörde biyokütle üretiminin maliyeti, havuzlardaki maliyetten daha yüksek olabilir. Bazı durumlarda mikroalg türü ve uygulamalarında su ürünlerinde kullanmak için cazibesi düşük olabilir. Diğer durumlarda foto-biyoreaktörde daha yüksek hücre konsantrasyonu ve daha yüksek verimlilik elde edilmesi foto-biyoreaktörün daha yüksek sermaye ve işletme maliyeti için telafi edilmeyebilir.

Foto-biyoreaktör ve açık havuzlar ile elde edilenler performanslarının karşılaştırılmasını yapmak kolaylık sağlamayabilir. Çünkü alg türlerinin yetiştirilmesi ve verimliliğin hesabı için kabul edilen yöntemler arasında pek çok faktöre bağlı olarak değerlendirmeler yapılmaktadır (Richmond, 2004).



Resim 1.1. Kapalı ve açık kültür sistemleri

Alg üretim birimlerinde verimliliği değerlendirmek için yaygın olarak üç parametre kullanılmaktadır:

- Hacimsel verim (VP) : Reaktör hacmi birim başına verimlilik (g/gün)
- Bölgesel verimlilik (AP) : Reaktör tarafından işgal edilmiş alanın birimi başına verimlilik ($\text{g/m}^2 \cdot \text{gün}$)
- Işıklandırılmış yüzeyin verimliliği (ISP) : Reaktörün ışık alan yüzeyinin birimi başına verimlilik ($\text{g/m}^2 \cdot \text{gün}$).

Richmond (2004) belirttiği gibi bölgesel verimlilik açısından kapalı sistemler hiçbir avantaj sunmamasına rağmen kapalı sistemlerdeki hacimsel verimlilik (8 kat daha yüksek) ve hücresel konsantrasyon (16 kat daha yüksek) açısından büyük ölçüde açık havuzlardan daha üstündür. Sonuçta foto-biyoreaktör ve açık havuzların rakip teknolojiler olarak görülmemesi gerekir (Richmond, 2004; Gressel, 2008).

1.1.4.2. Kesikli ve Sürekli İşletme

Foto-biyoreaktörler hem tasarım hem de çalışma şekli dikkate alınarak sınıflandırılabilir. Bu sistemlerle ilgili birçok tasarım geliştirilmiştir ve ana kategoriler şunlardır: 1) Düz levha tipi, 2) Eğik, dikey, yatay veya spiral 3) Yılan şeklinde dağıtım

borusu. Bundan dolayı yüksek reaktörler farklı açılardan hareket ettirildiğinde odaklanabilir ve ışığın yansımaları ve dağıtılması kullanılabilir (Ugwu vd., 2008).

Foto-biyoreaktörler, çeşitli ışık yolları ile inşa edilebilir ve pompalar veya hava kabarcıkları tarafından karıştırılabilir. Burada asıl mesele güneş enerjisinin kullanımının çok yüksek verimliliklerine ulaşmaktır. Fotosentez aşaması için kullanılan malzemelerin türü uygun foto-biyoreaktör yapıları için temelde önemlidir. Plastik veya cam levha gibi malzemeler, katlanabilir veya borular esnemez ve toksik olmamalı, yüksek şeffaflığa, yüksek mekanik mukavemete, yüksek dayanıklılığa, kimyasal kararlılığa ve düşük maliyete sahip olmalıdır (Richmond, 2004). Açıkta korunmasız plastik şeffaf malzeme kirlenmesi ve temizliğinin kolaylığı işletmede düşünülmesi gereken diğer kriterlerdir.

Dikey plakalı foto-biyoreaktör hava kabarcıklı işletimin kolaylığı ve verimliliği açısından kabarcıklı kolonlardan daha iyi verim elde edilmesi nedeniyle hava kabarcıklı işletim ile karışım sağlanmaktadır. Düz plakalar büyük bir aydınlatma yüzey alanı sağlar, dışarıdaki kültür için uygundur, yosun bağlanması ekonomiktir, kolayca kıvama gelen ve kolayca temizlemek için çok idealdir. 1000-2000 L hacimde dikey düz tabaka uzun süreçler için başarıyla çalıştırılabilirdiği kanıtlanmıştır. Böylece bu sistemler ile algi arttırmak için büyük bir potansiyele sahip olduğunu söylenebilir. Hava kabarcıkları ile karıştırılan paketlenmiş düz paneller güneş ışığının levha haline getirilmesi sayesinde çok yüksek toplam alansal zemin verimlilikleri elde edilebilir.

Foto-biyoreaktörler kesikli ve sürekli madda işletilebilir. Kesikli işletmeye karşı olarak sürekli karıştırılmalı biyoreaktörün kullanılmasının birçok avantajı vardır (Williams, 2002):

- Sürekli çalışan biyoreaktörler kesikli biyoreaktöründe yapılan kontrolden daha yüksek derecede kontrol sağlar.
- Uzun süreler için büyüme oranlarına bakılabilir ve ayarlanabilir ve de biyokütle konsantrasyonu değişen seyreltme oranları ile kontrol edilebilir.
- Biyoreaktörlerin sürekli kararlı durumları nedeniyle ve istenilen ürün kalitesi daha kolay elde edilebilir ve daha güvenilir ve kolay yenilenebilir.
- Sistemi incelemek ve analiz etmek için artmış olan fırsatlar reaksiyonun sürekliliği için önerilir.

Bu süreçte biyoreaksiyonların bazı tipleri için uygun hale getirilmesi özünde olan bir dezavantajdır. Bu nedenle sürekli süreç genellikle kesikli besin kültürünü ve sürekli bir besin kaynağını gerektirir. Hücre ve hücre duvarının büyümesi yıkıma neden olur veya

optimum kararlı durumda büyümeyi engelleyebilir. Diğer bir sorun da eğer hızlı büyüyen taraftan diğer tarafa geçilmemişse, orijinal ürün sayısı zaman içinde kaybolabilir.

1.1.5. Mikroalglerden Elde Edilen Ürünler ve Diğer Uygulamalar

1.1.5.1. Çevresel Uygulamalar

Eğer atıksu ve baca gazı arıtımı gibi süreçlerle mikroalg birleştirilirse, mikroalgden diğer biyolojik ürünler ve biyodizelin üretimi çevresel olarak daha da sürdürülebilir, düşük maliyetli ve kararlı olabilir. Aslında çeşitli çalışmalar çevresel uygulamalar ile birleştirilmiş değerli ürünlerin üretimi mikroalgin kullanımını kanıtlamaktadır (Bilanovic vd., 2009; Jacob-Lopes vd., 2009).

1.1.5.1.1. Mikroalglerin Besin Olarak Baca Gazı CO₂'i Emisyonunu Kullanması

Normalde iki ana CO₂ giderme stratejisi kullanılmaktadır; biyolojik hafifletme ve kimyasal reaksiyon tabanlı yaklaşımlardır. Bir yandan da kimyasal reaksiyona dayalı CO₂ giderim yaklaşımları enerji tüketir, pahalı süreçler kullanılır ve bertaraf sorunlarına sahiptir. Çünkü fotosentez sayesinde CO₂ bağlanma sürecinde biyokütle enerjisinin üretimine yol açmaktadır (Pulz vd., 2004).

Tesislerden enerji elde etmek için oluşan baca gazlarından kaynaklanan CO₂ emisyonları dünya toplamının % 7'sinden daha fazladır (Kadam, 1997). Ayrıca endüstriyel egzoz gazları %15'den fazla CO₂ içerir, mikroalg kültürü için zengin CO₂ kaynağı sağlar ve CO₂ biyolojik bağlanması için potansiyel olarak daha verimlidir. Bu nedenle mikroalg üretimi için CO₂ kaynağı olarak endüstriyel işlem biriminden baca gazı emisyonları kullanmak, büyük bir potansiyele sahip olan CO₂ azaltmak için önemlidir ve sera gazı emisyonunu azaltma stratejisi için çok umut verici bir alternatiftir.

Zeiler (1995) tarafından yürütülen laboratuvar çalışmalarında, yeşil alg *monoruphidiumminutum* kullanılmıştır. Çünkü bu alg önemli miktarda biyokütle üretmek için hammadde olarak yüksek miktarda CO₂ kullanır ve bunun yanı sıra kükürt ve azot oksitlerden verimli bir şekilde yararlanabilmektedir (Zeiler vd., 1995). Çalışmalarda üretim için birçok önemli parametre ve besin seviyelerinin içeriği tespit edilmiştir (Iwasaki vd.,

1988). Yeşil alg *Chlorophyta* kullanma karasal bitkilerden 10-15 kat daha büyük güneş enerjisini bünyesine alır ve CO₂ alma yeteneğine de sahip olduğu gözlenmiştir.

Bu nedenden dolayı mikroalgden yararlanılarak baca gazlarındaki yüksek seviyede bulunan CO₂ artırılabilir. *Chlorococcum littorale* deniz algi % 40'dan daha fazla CO₂ konsantrasyonunu iyi bir şekilde giderebildiği gözlemlenmiştir (Sakai vd., 1995). Mikroalg *S. obliquus* ve *C.kessleri* Persidente Medici termik santralinde havuzlarda atıksuyu arıtmada kullanılmış ve yüksek CO₂ içeriğine iyi bir şekilde tolerans göstermiştir (De Morais vd., 2007; De Morais vd., 2007).

Karbon tasarrufu açısından biyodizel üretimi için mikroalg kullanılarak karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltılmaktadır. Çünkü CO₂, algin fotosentez ve büyüme sürecinde tutularak bünyeye alınır. Böylece hem CO₂ emisyonları azaltılır hem de mikroalgin büyümesi sağlanarak mikroalgin biyodizele dönüşümü yapılır.

1.1.5.1.2. Mikroalg Kullanarak Atıksularda Azot ve Fosfor Giderimi

Su arıtma sistemlerinde mikroalg üretimi ve atık suda (örneğin amino asit, enzim veya besin endüstrisi artık suları) biyolojik arıtma için mikroalg büyümesinin birleştirilmesi ile mikroalg yetiştiriciliği umut verici görülmektedir. Bu sayede organik bileşikler içeren ama ağır metal içermeyen bazı atık suların kullanılması ile mikroalg büyütülebilir. Ek olarak mikroalg kanalizasyona deşarj edilen ve balık yetiştiriciliği gibi azotlu atıkların yoğun bulunduğu endüstriyel atık suların etkisini azaltabilir ve aynı zamanda biyolojik çeşitliliğe katkıda bulunur. Üstelik mikroalgin atık sudan azot ve karbon arıtımı da su ortamındaki ötrofikasyonun azalmasına yardımcı olabilir.

Yapılan çalışmalarda tek hücreli tatlısu mikroalgi *Chlorella vulgaris*'in biyosorpsiyon ile atıksudan azot ve fosfor gideriminde yüksek bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir (Corelli, 1999; Aksu 2002; Dönmez vd., 1999).

Yeşil besinlerin tümü içinde, *Chlorella* en yüksek nükleik asit miktarına sahiptir. *Chlorella vulgaris* başta azot ve fosfor bileşikleri olmak üzere ağır metallerin giderilmesinde, atıksu arıtma için kullanılır.

Şimdiye kadar yapılan bu tip bir çalışmada; bir evsel atık su arıtma tesisinin ikincil arıtımından çıkan su alg yetiştirme besi yeri olarak kullanılmış ve *Botryococcus braunii*'nin bu sularda azot giderimin de etkili olduğu ve büyümesini sürdürdüğü açıklanmıştır (Sawayama vd, 1999). Yüksek verimli alg kültürü elde etmek için en uygun

azot-fosfor oranı araştırılması yapılmış ve baskın olan türlerin *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Monoraphidium* olduğu görülmüştür (Mostert vd., 1987). Patil (2005), *Ankistrodesmus falcatus* ve *Scenedesmus quadricauda* alglerinin atık su arıtımındaki rollerini araştırmıştır. Sonuçlara göre sekiz gün sürede *Scenedesmus quadricauda* % 85 ile % 95 fosfat giderimi, % 70 ila % 80 civarında $\text{NH}_3\text{-N}$ giderimi, % 70 civarında BOI giderimi sağlamıştır. *A. falcatus* ise % 80 fosfat giderimi, % 60 civarında $\text{NH}_3\text{-N}$ giderimi, % 70 civarında BOI giderimi sağlamıştır.

Voltolina ve ark (1998) yaptıkları çalışmada *Scenedesmus sp.*'ni sentetik atık suda üreterek atık sudaki $\text{NH}_4\text{-N}$ 'ün % 79,4 oranında giderimini başarmışlardır. Bu çalışmada sıcaklığa ve hidrolik bekletme süresine bağlı olarak alglerin sentetik atık su içerisinde kontrollü bir ortamda gerçekleştirdiği büyüme potansiyeli ortaya çıkarılmıştır.

Genel bir kabul olarak 1 μg Klorofil a oluşumu için 1 μg P ve 10 μg N gerektiği şeklinde bir kabul yapılırsa $\text{N/P} < 10$ durumunda fitoplankton büyümesi azot tarafından $\text{N/P} > 10$ durumunda sistem fosfor tarafından sınırlandırılıyor denilebilir. $\text{N/P} = 10$ durumunda sistem ikisi tarafından da sınırlandırılmaz. Bu oranlar tüm fitoplanktonlar için genişletilirse $\text{N/P} > 20$ durumunda fosfor sınırlayıcı $\text{N/P} < 5$ durumunda azot sınırlayıcı olarak kabul edilmesi daha emniyetli bir yaklaşım olur (Muslu, 2001).

Aslan ve Kapdan (2006), su ortamından azot ve fosforu arıtmak için *C. vulgaris* kullanarak azot için % 72 ve fosfor için de % 28 giderme verimi elde etmişlerdir (8 mg/ L NH_4 'den 3 mg/ L NH_4 'e ve 1,5-3,5 mg/ L PO_4). Besin giderimi için yaygın olarak kullanılan diğer mikroalg kültürleri *Chlorella*, *Scenedesmus* ve *Spirulina* türleridir (Gonzales vd., 1997; Lee vd., 2001). *Nannochlois*, *Botryococcus brauni* ve siyanobakter *Phormidium bohneri* besin giderim kapasiteleri de incelenmiştir (Martinez vd., 2000; Olguin vd., 2003; Jimenez-Perez vd., 2004; An vd., 2003; Dumas vd., 1998; Laliberte vd., 1997).

1.1.5.1.3. Mikroalglerden Elde Edilen Değerli Kimyasallar ve Biyoaktif Bileşikler

Mikroalg türlerine bağlı olarak farklı endüstriyel sistemlerde (örneğin ilaç, kozmetik, nutrasötikler, fonksiyonel gıdalar, biyoyakıtlar) büyük ölçüde kullanılan pigmentler, antioksidanlar, B-karotenler, polisakkaritler, trigliseritler, yağ asitleri, vitaminler ve biyokütleler gibi yüksek değerlikli kimyasal bileşikler ayrılmış olabilir. Ayrıca alg hidrokolloidler, aljinat, agar ve yosunlardan (özellikle mikroalg) üretilmektedir (Barrow ve

Shahidi, 2008). Çünkü mono kültürlerin kullanımında istenen biyoaktif kimyasallar ve ince değerli kimyasalların üretimi ve en yüksek üretim ve üretim verimliliği için kültür sistemlerini kontrol etmede kullanılır bu da büyük ölçekli foto-biyoreaktör sistemlerinin gelişmesine yol açmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Algden biyodizel üretimi, büyük ölçekli yetiştirme ve alan başına birim maliyeti azaltarak mikroalglerin hasat edildiği sistemlerdir. Büyük ölçeklerde alg büyütme koşullarının çok dikkatli kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu tür süreçler diğer proses endüstrileri uygulamak için yüksek değerlikli bileşiklerin ekstraksiyon ve atık su arıtma süreçleri ile baca gazından CO₂ arıtımının birleştirilmesiyle çok büyük bir ekonomi sağlanmaktadır.

Chiu ve dig. (2009), *Nannochloropsis oculata* kültürlerinin havalandırılmasında, CO₂ konsantrasyonunun artışı ile lipit birikimi ve biyokütle üretiminde bir artış olduğunu belirtmişlerdir (Chiu vd., 2009).

Benzer sonuçlar De Moraes ve Costa tarafından *Scenedesmus obliquus* ve *Chlorella* kesleri kültürü için elde edilmiştir. Brezilya'daki kömürle çalışan termik santralin havuzlarının arıtımı için bu türler ayrılmıştır, sonuçta bu mikroalglerin termik santrallerde CO₂'nin biyofiksasyonu için bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir (De Moraes ve Costa, 2007).

Algal büyümeyi düzenleyen en önemli parametreler; besin kalitesi ve miktarı, ışık, pH, türbülans, tuzluluk ve sıcaklıktır. Optimum parametreler ve tolerans aralıkları türe özgüdür. Çalışmalarda oluşturulan ortam koşulunda optimum olan parametre, başka bir ortam için optimum olmayabilir (Coutteau, 1996).

Krohn ve diğ. (2011), vahşi alg, *D. tertiolecta*, *N. Oculate* alg türlerinin aralığını arttırmak ve bu türlerdeki lipit içeriğini bulmak için birtakım deneyler yapmışlardır. Deneyler 2009 yılı Mayıs ayının başından Haziran ayının sonuna kadar 73 cm ile 70 cm arasında bir kültür derinliğinde iki yüksek yoğunluklu polietilen kılıf içinde yapılmıştır. Hava 200-300 ml/dak. düzeyinde verilmiştir ve CO₂ akışı geceboyunca 9 saat kapatılmıştır. Konsantrasyonun pH ve sıcaklık aralığı 7,6 °C (r = 0,5) ve 18,1 °C (r = 3,3) dir. *Dunaliella tertiolecta* kültürleri 2009 Haziran ayından Temmuz ayının sonuna kadar yetiştirilmiştir. *D. tertiolecta* stok kültürleri bulunduğu kaplara ortalama 6,8 oranında pH

elde etmek için 200-300 ml/dak kültüre hava verilmiştir ($r = 0,5$). CO_2 akışı ise gece boyunca 9 saat kapatılmıştır. Kùltürlerin sıcaklığı ortalama $20,7^\circ\text{C}$ dir ($r = 3,1$) . *N. Oculate* $29,4^\circ\text{C}$ sıcaklıkta pH 8’de, doğal ışık ortamında ve açık havuzlarda üretilmiştir. Doğal deniz suyunda f/2 beslenmiştir böylece filtre edilmiş karbon, UV ışını muamele edilmiş, ozonlanmış ve klorlanmış bazal ortam oluşturulmuştur. Nötral lipidler vahşi, *D.tertiolecta* ve *N. oculata* biyokütlesinde sırasıyla % 4.5, % 5.6 ve % 9.0 olurken toplam lipidlerde sırasıyla % 15.8, % 19.0ve % 18.0oluşturmuştur. Nötral yağlar vahşi alg, *D.tertiolecta* için yaklaşık olarak % 30 oluşurken *N. Oculata* için % 50 toplam lipid oluşmaktadır.

Volkman ile Vanitha ve arkadaşları alg türlerinin geniş yelpazesi içinde bulunan nötral lipidlerin toplam lipidlerin % 35’i olduğunu bildirmişlerdir.

Diğer bir çalışmada ise azot ve fosforu arıtmada mikroalg etkinliği belirlenmiştir. Aslan ve Kapdan (2006) su ortamından azot ve fosforu arıtmak için *C. vulgaris* kullanarak azot için % 72 ve fosfor için de % 28 giderme verimi elde etmişlerdir (8 mg/ L NH_4 ’den 3 mg/ L NH_4 ’e ve 1,5-3,5 mg/ L PO_4) (Aslan ve Kapdan, 2006).

Voltolina ve ark (1998) yaptıkları çalışmada *Scenedesmus sp.*’nin sentetik atık suda üreterek atık sudaki $\text{NH}_4\text{-N}$ ’ün % 79,4 oranında giderimini başarmışlardır. Bu çalışmada sıcaklığa ve hidrolik bekletme süresine bağlı olarak alglerin sentetik atık su içerisinde kontrollü bir ortamda gerçekleştirdiği büyüme potansiyeli ortaya çıkarılmıştır.

Patil (1990), *Ankistrodesmus falcatus* (Corda) Ralfs ve *Scenedesmus quadricauda* alglerinin atık su arıtımındaki rollerini araştırmıştır. Sonuçlara göre sekiz gün sürede *Scenedesmus quadricauda* % 85 ile % 95 fosfat giderimi, % 70 ila % 80 civarında $\text{NH}_3\text{-N}$ giderimi, % 70 civarında BOI giderimi sağlamıştır. *A. falcatus* ise % 80 fosfat giderimi, % 60 civarında $\text{NH}_3\text{-N}$ giderimi, % 70 civarında BOI giderimi sağlamıştır.

Birçok mikroalg kendi optimum sıcaklığında 15°C daha düşük sıcaklıkları tolere edebilir. Fakat sadece $2\text{-}4^\circ\text{C}$ olan optimum sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklık toplam kültür kaybına neden olabilir. Ayrıca, kapalı kültür sistemlerinde sıcaklık bazı günlerde reaktör içinde 55°C ’ye ulaşabilir. Bu da aşırı ısınma problemlerini meydana getirir (Moheimani, 2005).

Bir başka çalışmada ise Wissman ve Goebel’e göre, alkali sularda CO_2 ’in absorpsiyonu, iki önemli katalizlenmeyen reaksiyon yolları ile hızlandırılabilir (Wissman ve Goebel, 1987). CO_2 ’in bikarbonat iyonu ile hidrasyonu ve bikarbonattan hidroksil iyonu ile CO_2 ’in doğrudan reaksiyonu için asit - baz reaksiyonudur. Bu yazarlar, ilk reaksiyon

hızının $\text{pH} < 8$ iken önemli olduğunu, ikinci baskın durumun ise $\text{pH} > 10$ iken görüldüğünü ve $\text{pH} = 8-10$ aralığında da önemli olabileceğini belirtmişlerdir.

Macedo ve Alegre (2001)'ya göre, *Spirulina* için azot içeriğinin azalması ve sıcaklığın düşüşü ile lipit içeriği hemen hemen 3 kat artmaktadır. Yazarlar azot konsantrasyonundaki azalmanın sıcaklıktan daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Sobczuk ve arkadaşları (2000) *C. Vulgaris* hücrelerinde CO_2 konsantrasyonunun yağ içeriğine, yağ bileşimine ve üretime etkisini CO_2 konsantrasyonu çeşitlendirerek araştırmışlardır. İlk aşamada kültür CO_2 eklenmeksizin 6 L/dk lık orandaki hava akımı altında havalandırılmıştır. Bir sonraki aşamada aynı hava akımı oranı altında 20,50,100 ve 200 ml/dk saf CO_2 gazı yada sırasıyla % 0,33, % 0,83 , % 1,67 ve % 3,33 lük oranlarda eklenmiştir. Enjekte edilen gazdaki CO_2 daha az ise O_2 üretim oranının, CO_2 tüketim oranından daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Mikroalg *C. Vulgaris*'in düşük pH'lar da yaşayabildiğini, fakat gelişimin yavaş olduğunu belirtmişlerdir.

Iwasaki ve arkadaşları (1998) ani CO_2 konsantrasyonu artışı altında *Chlorococcum littorale* yeşil alginin de benzer davranışları gösterdiğini belirtmiştir. Algin aktivitesi geçici olarak düşmüştür ve birkaç gün sonra iyileşmiştir.

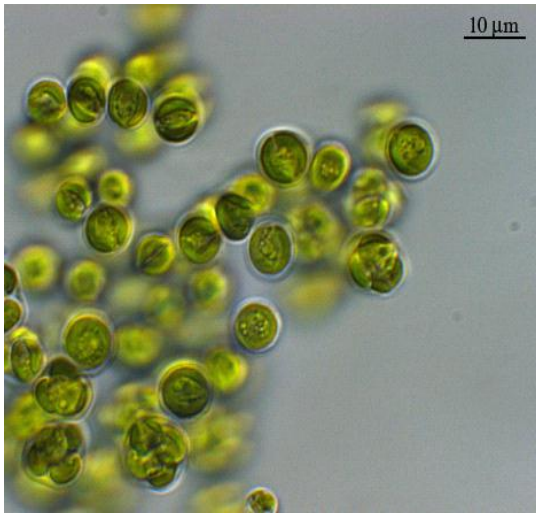
Başka bir çalışmada ise çevre kirliliğini azaltmak için atıksu arıtma tesislerinde *Chlorella sp.* ve *Scenedesmus sp.* üzerinde araştırma yapılmıştır. Bu kültürler çeşitli inorganik azot, CO_2 ve tuzluluk kaynakları ile laboratuvar BG11 ortamında 29-50 gün yetiştirilmiştir (Stainier ve ark., 1971). Alg türleri günlük yaklaşık olarak 8 saat boyunca floresan lambaların aydınlatması altında 28°C sıcaklıkta kontrollü olarak yetiştirilmiştir. Ortamda bulunan 0,75 g-N/L miktarı, 0,1235 g-N/L miktarı ile sonuçlanmıştır. CO_2 'in 4 farklı konsantrasyonunun (6, 12, 18 veya % 24 CO_2) alg biyokütlesinin büyümesi üzerinde araştırma yapılmıştır. Ortamda NaNO_3 konsantrasyonundaki azalma ve alg metabolizma ürünlerindeki artış biyokütle sayısında hafif bir azalmaya yol açmıştır. Ancak N-N konsantrasyonunun artışı hücrelerin lipit muhtevidatının azalmasına yol açar (Hsieh ve Wu 2009; Yeesang ve Chirsilp 2011). Hsieh ve Wu (2009) kritik üre konsantrasyonunu $0,1 \text{ g L}^{-1}$ olarak gözlemlemiştir. Bu miktarda biyokütle yoğun olarak büyümüş ve daha yüksek yağ içeriği yeterli azot miktarı ile var olmaktadır. Ayrıca ürenin *Chlorella* kültürlerinde en iyi azot kaynağı olduğu bildirilmiştir (Becker, 1994). Biyokütlenin yüksek olduğu konsantrasyon %24 CO_2 konsantrasyonu olarak belirlenmiş olup sırasıyla *Chlorella sp.* ve *Scenedesmus sp.* $0,2 \text{ g L}^{-1}$ ve $0,12 \text{ g L}^{-1}$ miktarında en fazla biyokütleyle ulaşılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Mikroalg Türleri ve Kültür Ortamları

Chlorella protothecoides (CCAP No: 211/54) ile *Scenedesmus obliquus* (CCAP No: 276/10) alg kültürleri, Culture Collection of Algae and Protozoa'dan (İngiltere) temin edildi. (<http://www.ccap.ac.uk>). Her iki mikroalg kültürü, aşağıdaki kimyasalları ve konsantrasyonları verilen BG11 ortamında zenginleştirildi (<http://www.ccap.ac.uk>). BG11 çözeltisi, NaNO_3 (15 g/L), $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (0,004 g/L), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,075 g/L), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,036 g/L), Na_2CO_3 (0,02 g/L), sitrik asit (0,006 g/L), demir amonyum sitrat (0,006 g/L), EDTA (0,001 g/L) ve A5+Co çözeltisi (1 ml/L)'den oluşmaktadır. Kullanılan A5+Co közeltisi ise aşağıdaki çözeltilerden oluşturulmuştur: H_3BO_3 (2,86 g/L), $\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (1,81 g/L), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,222 g/L), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,079 g/L), $\text{Na}_2\text{MO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,390 g/L ve $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,049 g/L)

Alg kültürleri hacimce % 20 oranında alınarak içerisinde 100 ml BG11 besi yeri bulunan erlenmayerlere aşılandı. Alg kültürleri içeren erlenmayerler soğuk flöresan ışıkla (3000 lüks ışıklandırma şartlarında) 30 °C de çalışan ve 20 devir/dk karıştırma hızına sahip inkübatörde yerleştirilerek, çoğaltıldı. Üstsel büyüme hızını tamamlayan ve durgun faza ulaşan alg kültürleri, kolon şeklindeki havalandırmalı foto-biyoreaktörlerin aşılmasında kullanıldı. Kullanılan mikroalgler Resim 2.1 (a) ve (b)'de görülmektedir.



Resim 2.1. a) Chlorella protothecoides



b) Scenedesmus obliquus

2.2. Atıksu

Deneyde kullanılan atıksu, gerçek atıksu özelliklerindeki dalgalanmaları minimize etmek için ilk önce laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanmıştır. Tablo 2.1 de sentetik atıksuyun bileşenleri ve konsantrasyonu verilmiştir. Bu çözeltiye 1 ml/L A5+Co çözeltisi ilave edilmiştir. Çözelti 105 °C de 20 dakika sterilize edildikten sonra oda sıcaklığına getirilerek kullanılmıştır. Sentetik atıksuyun pH değeri 7,0-8,0 aralığında olup, toplam organik karbon (TOK), toplam fosfor (TP) ve amonyum azotu konsantrasyonları ise sırasıyla ortalama 78 mg/L, 3,8 mg/L ve 20 mg/L olarak bulunmuştur.

Tablo 2.1. Sentetik atıksuyun bileşenleri ve konsantrasyonu

Bileşenler	Miktar (g/L)
Glikoz	0,4125
NH ₄ Cl	0,078
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,013
KH ₂ PO ₄	0,018
CaCl ₂ .2H ₂ O	0,043
FeSO ₄ . 7H ₂ O	0,005

Bu çalışmanın ikinci aşamasında ise Elazığ Belediyesine ait Atıksu Arıtma Sistemi (aktif çamur sistemi) son çökeltim havuzu çıkış suları kullanılmıştır. Kullanılan gerçek atıksular da sentetik atıksular gibi sterilize edilmiştir. Arıtma tesisine ait son çökeltim havuzu çıkış sularında 7 adet numunede izlenen parametreler ve konsantrasyonları ise TOK, TP ve TN sırasıyla 96-105 mg/L, 1,7-2,1 mg/L ve 68-7,16 mg/L aralıklarında ölçülmüştür. Bu suların pH'ı ise 7,45-8,52 aralığında ölçülmüştür.

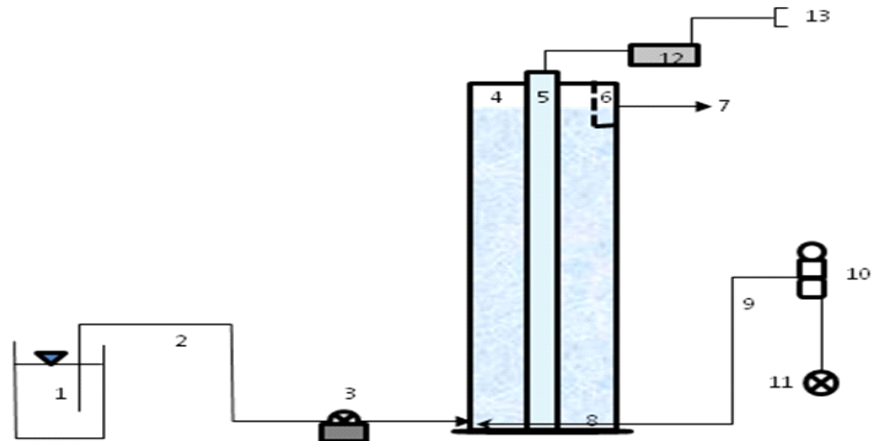
2.3. Foto-biyoreaktörlerin Dizaynı ve İşletilmesi

Bu çalışma kapsamında fleksiglas malzemeden imal edilen ve 6,0 L etkili hacme sahip, laboratuvar ölçekli 4 adet havalandırılmalı boru tipi foto-biyoreaktör kullanılmıştır (Şekil 2.1). Reaktör 1 ve 2 (*Secenedesmus obliquus*) ve Reaktör 3 ve 4 (*Chlorella protothecoides*) ile işletilmiştir (Resim 2.2). Sistem bir besleme tankı, 4 adet foto-biyoreaktör, hava besleme hatları gaz akışı kontrol sistemleri (4 adet flowmeter), kontrol

vanaları ve atıksu besleme hatları ile aydınlatma tertibatından oluşmaktadır. Besleme suyu kanallı bir peristaltik pompa (Watson Marlow, 205S/CA12) vasıtasıyla verilmiştir. Sisteme verilen hava laboratuarda kurulu bulunan merkezi kompresör tarafından sağlanmıştır. Verilen hava sterilize edilmiştir. Verilen hava, algler için gerekli oksijen ile karbondioksiti sağlamak ve karışımı sürdürmek amacıyla, reaktörün birim hacmi başına hacimce 0,5 L/dakika olacak şekilde ayarlanmıştır.

Kültür ortamında çoğaltılmış olan tam karışımli algal biyokütleden 0,5 g/L (reaktörün birim hacmi başına) alınarak sterilize edilmiş olan atıksuya aşılama yapılmıştır. Alg içeren foto-biyoreaktörler led aydınlatmalı soğuk ışıkla (3000 lüks ışıklandırma şartlarında) 30 °C de ve 12 saat karanlık 12 saat aydınlık dönem uygulamasıyla işletmeye alınmıştır. Foto-biyoreaktörler, hidrolik bekleme süresi (HBS) = 2 gün olacak şekilde sürekli günlük hazırlanan atıksu ile beslenmiştir. Sistemlere atıksu besleme debisi 125 ml/saat olacak şekilde ayarlanmıştır. Sistem 13 gün süreyle işletilmiştir. Tüm deneyler iki kez yapılmış ve ortalamaları alınmıştır.

- 1) Besleme tankı
- 2) Su Giriş hattı
- 3) Peristaltik pompa
- 4) Foto-Biyoreaktör
- 5) Led aydınlatma
- 6) Mikro ızgara
- 7) Çıkış suyu
- 8) Difüzör
- 9) Hava hattı
- 10) Gaz yıkama ve debi ölçer
- 11) Kompresör
- 12) Adaptör
- 13) Elektrik hattı



Şekil 2.1. Boru tipi foto- biyoreaktörün şematik görünümü



Resim 2.2. Lipit içeren mikroalglerin atıksu arıtımında kullanımı ve biyodizel potansiyellerinin araştırılması için kullanılan deney düzeneği

2.4. Yapılan Analizler ve Analiz Yöntemleri

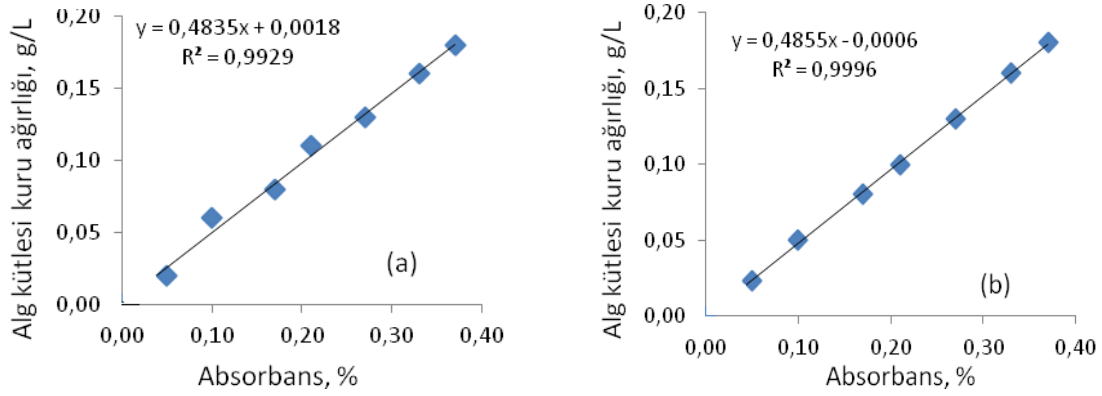
Örnekler foto-biyoreaktörlerden günlük olarak alındı. Alg hücrelerinin spektrofotometrede optimize edilen şartlarda absorbanları ölçüldü ve bu değerler günlük hücre yoğunluğu olarak hesaplandı. Şekil 2.2 (a) ve (b) de alg türleri kuru ağırlıkları ile absorbans değerleri arasındaki doğrusal ilişki verildi. Şekil 2.2 de görülen denklemlerden;

Chlorella protothecoides için, Kuru ağırlık (g/L) = $0,4835 \times A_{658} + 0,0018$

$R^2=0,9929$ ve

Scenedesmus obliquus için, Kuru ağırlık (g/L) = $0,4855 \times A_{658} - 0,0006$ $R^2=0,9929$

olarak bulunmuştur.



Şekil 2.2. a) *Chlorella protothecoides*, b) *Scenedesmus obliquus* türü algler için 658 nm dalga boyunda optimize edilen absorbans ile alg kütlesi kuru ağırlığı ilişkisi

Reaktör çıkışından alınan numunelerde, TOK, TP, TN ve $\text{NH}_4\text{-N}$ konsantrasyonlarını belirlemek için örnekler 10 dakika süre ile 10000 devir/dk hızda santrifüjlendi. Çalışma süresince TN (Kit no: 14537), $\text{NH}_4\text{-N}$ (Kit no :14752), TP (Kit no : 14543) konsantrasyonları testkitleri kullanılarak spektrofotometre ile belirlendi. Çalışmada pH ve sıcaklık değerleri multi parametre cihazı (Metler Toledo – Seven Multi) ile ölçüldü. Çözünmüş oksijen değerleri Oxi 3301 Set (WTW) cihazı ile ölçüldü. TOC tayini için TOC – VCPN ve TNM – 1 (Shimadzu) ile oto örnekleyici (ASI – V, Shimadzu) kullanıldı. Çalışma süresince kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıktadır. Bu çalışmada sistemin girişi, çıkışı ve foto-biyoreaktörlerden alınan numunelerde Tablo 2.2’ de belirtilen analizler yapıldı.

Sürekli çalışan biyoreaktörde kesikli biyoreaktörde yapılan kontrolden daha yüksek derecede kontrol sağlandığından ve biyokütle konsantrasyonu değişen seyreltme oranları ile kontrol edilebildiğinden (Williams, 2002) sistem sürekli beslemeli olarak işletilmiştir.

Tablo 2.2. Foto-biyoreaktörde rutin olarak izlenmiş olan parametreler

Reaktöre beslenen suda	Debi (L/gün), TOK, TP, TN (gerçek atıksular için), amonyum azotu (sentetik atıksu için), pH.
Reaktörde	Klorofil A, hücre yoğunluğu, TOK, TP, TN veya amonyum azotu, pH, Sıcaklık.
Çıkış suyunda	TOK, TP, TN veya amonyum azotu, pH

2.4.1. Klorofil A Tayini

Kültürlerin bulunmuş olduğu sentetik atıksu ile beslenen iki reaktör ve evsel atıksu ile beslenen iki reaktörden 10 ml numuneler alınmış tüplere konulmuştur. Tüpler 3000 rpm de 25 °C sıcaklıkta ve 1 dk süresince santrifuj edilmiştir. Tüplerin üzerinde kalan fazla su alınmış olup tüpe 5 ml % 100 aseton konulmuştur. Standart metotlara göre (APHA, AWWA and WPCF, 1989) hazırlanan örneklerin absorbansları 664, 647 ve 630 nm dalga boyunda UV spektrofotometre kullanılarak belirlenmiş ve aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (Toyub vd., 2008);

$$\text{Korofil A (mg/l)} = 11.85 (A_{664}) - 1.54 (A_{647}) - 0.08 (A_{630})$$

2.4.2. Toplam Lipit Tayini

Alg hücreleri hasat edildikten sonra 4 °C de 10 dakika süre ile 10000 devir/dk hızda santrüflendi. Üstteki duru sıvı boşaltıldı ve hücre peletleri deiyonize su ile yıkandı ve sonra 80 °C de kurutuldu. Alg hücreleri içerisinde bulunan toplam lipidlerin ekstraksiyonu ve miktarını belirlemek için aşağıdaki işlemler yapılmıştır (Cristie, 1990; Kates, 1988; Saatci vd., 2003);

1. 50 mg alg biyokütlesi örneğine 10 ml metanol ilave edilerek 1 dakika süre ile karışım homojenleştirildi.
2. Bu karışıma 20 ml kloroform ilave edilerek 2 dakika bekletildi.
3. Karışım bir Buchner hunisinden Nuçe erlenine çift kat mavi bant filtre kağıdı kullanılarak hafif vakum altında süzüldü.
4. Filtre kağıdı tam olarak kurumadan (2:1 v/v) 20 ml kloroform- metanol karışımı ile yıkandı.
5. Süzme işleminden sonra, toplam süzüntü 100 ml lik ayırma hunisine alındı. Erlen içerisinde kalan bulaşmalar 10 ml kloroform-metanol (2:1 v/v) ile yıkanarak ayırma hunisine aktarıldı.
6. Ayırma hunisi içerisindeki lipid ekstraktının % 25'i kadarına % 0.088 lik potasyum klorür çözeltisi ilave edilerek iyice karıştırıldı. Berrak iki fazın ayrılması için 12 saat dinlendirmeye bırakıldı.

7. Alttaki kloroform fazının bulanık olması durumunda, ekstakt tekrar (1:1 v/v) metanol + % 0.88 lik potasyum klorür çözeltisi ile yıkandı ve 12 saat bekletildi.
8. Alttaki kloroform fazı temiz 100 ml'lik rodajlı bir erlene alınarak susuz sodyum sülfat ile muamele edildi. Böylece eser miktardaki su uzaklaştırıldı.
9. Tamamıyla saf lipit bileşenlerden ibaret olan kloroform fazı bir cam huniden Whatman No:1 filtre kağıdı ile süzüldü.
10. Daha sonra kloroform fazı 40 °C de hafif vakum altında kuruluğa kadar buharlaştırıldı ve hacmi taze kloroform ile 50 ml ye tamamlanarak, 50 ml lik balonjojeler ile gerekli analizler yapılana kadar -25 °C de muhafaza edildi.

Toplam lipit miktarını belirlemek için 50 ml hacimdeki lipit ekstraktından 20 ml alınarak, darası alınmış alüminyum tartı kabına (Mettler) konuldu ve çözücüsü azot akımı altında tamamen uçuruldu. Daha sonra içerisinde fosfor pentaoksit (P_2O_5) bulunan desikatör içerisinde 1 saat süre ile bekletilerek sabit tartıma getirildi. Sabit tartıma gelen alüminyum kaplar hassas terazide tartılarak ve kabın darası çıkartılarak 20 ml çözücüdeki lipit miktarı miligram olarak belirlendi. Daha sonra litre atıksudaki toplam lipit miktarı aşağıdaki formüle göre hesaplandı.

$$\text{Toplam lipit, mg/L} = (50 \times A / 20) \times 1000 / 100 \text{ veya,}$$

$$\text{Toplam lipit, mg/L} = 25 \times A$$

Burada A: Alınan 20 ml ekstrakt içerisindeki mg olarak tartılan toplam lipit miktarıdır.

3. BULGULAR

3.1. Sentetik Atıksularla Yapılan Çalışmalar

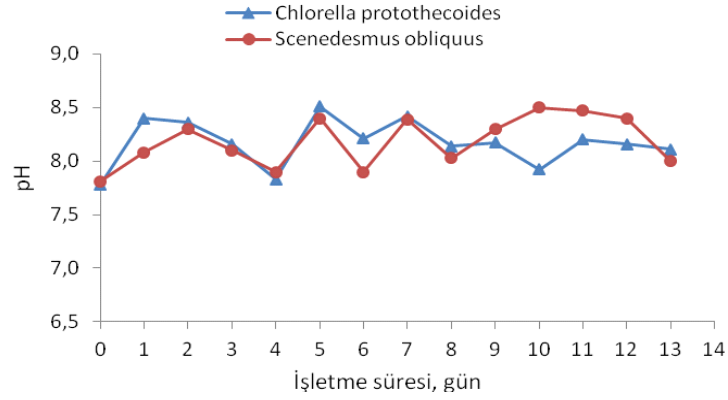
3.1.1. pH

Çalışmanın ilk aşamasında besi yerlerinde çoğaltılmış olan algler fotobiyoreaktörde sentetik atıksuya aşılanarak işletmeye alınmıştır. İşletme süresince pH, hücre yoğunluğu, klorofil A, biyokütlede toplam lipit ve alglerin % lipit içerikleri izlenmiştir. *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler için 13 gün işletme periyodu uygulanmış ve günlük olarak izlenen parametreler değerlendirilmiştir. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalar süresince, her iki alg türü için fotobiyoreaktördeki pH değişimleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince pH değişimi

Günler	<i>C. protothecoides</i>	<i>S. obliquus</i>
0	7,78	7,81
1	8,40	8,08
2	8,36	8,30
3	8,16	8,10
4	7,83	7,90
5	8,51	8,40
6	8,21	7,90
7	8,42	8,39
8	8,14	8,03
9	8,17	8,30
10	7,92	8,50
11	8,20	8,47
12	8,16	8,40
13	8,11	8,00

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda başlangıç pH değerleri 7,7-7,8 iken çalışma süresince 8,0-8,5 aralığında seyretmiştir (Şekil 3.1). *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler için pH değişimleri incelendiğinde, pH değişimini alg türünden ziyade reaktör şartlarının etkilediği söylenebilir.



Şekil 3.1. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince pH değişimi

3.1.2. Mikroalglerin Algal Büyüme Hızı, Klorofil A ve Lipit İçeriklerinin Belirlenmesi

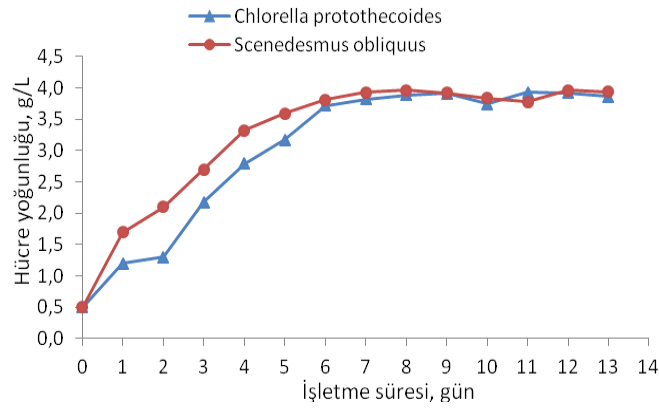
Chlorella protothecoides ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin algal büyüme hızı ile klorofil A konsantrasyonunu belirlemek için alınan günlük alg numunelerinde, hücre yoğunluğu ve buna bağlı olarak klorofil A içerikleri Tablo 3.2. de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince hücre yoğunluğu ve klorofil A değişimi

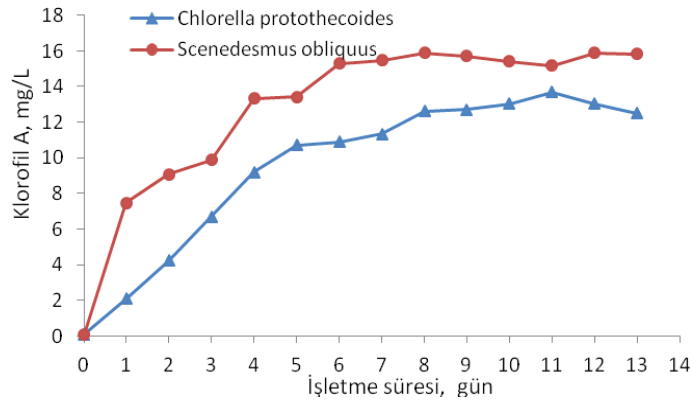
Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	Hücre yoğunluğu, g/L	Klorofil A, mg/L	Hücre yoğunluğu, g/L	Klorofil A, mg/L
0	0,50	0,10	0,50	0,10
1	1,20	2,10	1,70	7,48
2	1,30	4,22	2,10	9,08
3	2,18	6,70	2,70	9,88
4	2,79	9,20	3,32	13,33
5	3,17	10,70	3,59	13,41
6	3,72	10,90	3,81	15,30
7	3,82	11,34	3,93	15,48
8	3,89	12,63	3,96	15,90
9	3,91	12,70	3,92	15,70
10	3,74	13,02	3,84	15,42
11	3,93	13,70	3,78	15,18
12	3,92	13,04	3,96	15,90
13	3,86	12,50	3,94	15,82

Başlangıçta *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler 0,5 g/L miktarlarda aşılanmıştır. Her iki alg türünün 0,5 g/L'lik hücre yoğunluğundaki klorofil A konsantrasyonları 0,10 mg/L olarak tespit edilmiştir.

Her iki türün ilk 5 günlük süreçte hızlı bir büyüme gerçekleştirdiği, 6-8. günlerde büyüme hızının yavaşladığı, 9-13. günlerde ise büyüme hızının azaldığı tespit edilmiştir. *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin işletme süresince hücre yoğunlukları karşılaştırıldığında, *Scenedesmus obliquus* türü mikroalglerin başlangıç periyodunda daha hızlı geliştiği görülmektedir (Şekil 3.2). Her iki mikroalg türünün klorofil A konsantrasyonlarının günlük değişimleri ise hücre yoğunluk değişimlerinden daha farklı olarak gerçekleşmiştir (Şekil 3.3).

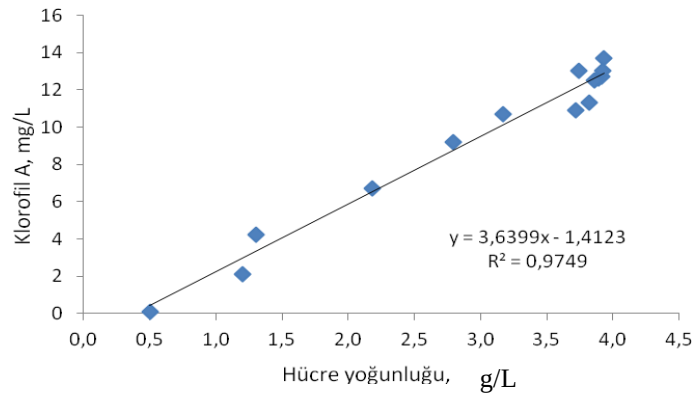


Şekil 3.2. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince hücre yoğunluğu değişimi

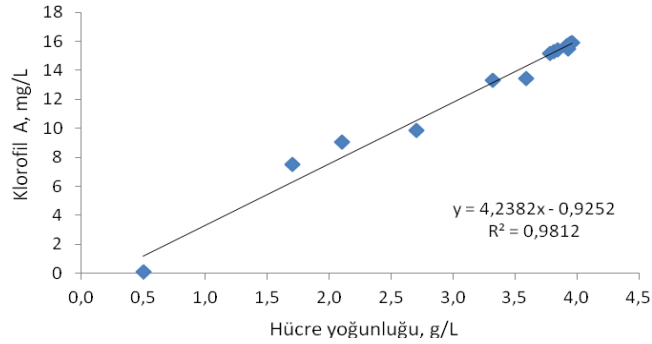


Şekil 3.3. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince klorofil A değişimi

Çalışmanın ilk 6 günlük döneminde her iki tür mikro alglerin bulunduğu fotobiyorektörde de hücre yoğunluğuna paralel şekilde klorofil A konsantrasyonları yüksek oranda artış göstermiştir. Ancak, çalışma süresince *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin Klorofil A konsantrasyonlarının *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerden daha yüksek oldukları saptanmıştır. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda her iki mikro alg türü için günlük hücre yoğunlukları ile klorofil A ilişkileri araştırılmış ve sonuçlar Şekil 3.4 ile Şekil 3.5'te verilmiştir. Elde edilen bulgular, hücre yoğunlukları ile klorofil A konsantrasyonları arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.4. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda *Chlorella protothecoides* için hücre yoğunluğu ile Klorofil A ilişkisi



Şekil 3.5. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda *Scenedesmus obliquus* için hücre yoğunluğu ile Klorofil A ilişkisi

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince hasat edilen alglerin toplam lipit içerikleri belirlenmiş ve kuru ağırlık başına lipit yüzdeleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda birim hacim başına elde edilen toplam lipit miktarları tespit edilmiştir. Elde

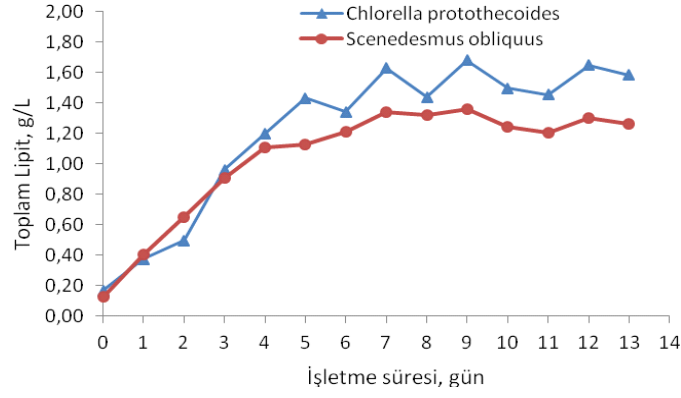
edilen sonuçlar Tablo 3.3 de görülmektedir. Bulgularımıza göre her iki mikro algin lipit konsantrasyonu reaktördeki hücre yoğunluğunun artışı ile paralel olarak artış göstermesine karşın, 5. günden sonra üretilen lipit konsantrasyonu hemen hemen sabit düzeyde kalmıştır. Bu durum, yukarıda da açıklandığı gibi uzun işletme dönemlerinde reaktörde hücre yoğunluğunun artışının yavaşlaması ve dolayısıyla birim hacimden elde edilebilecek lipit konsantrasyonunun da benzer şekilde gerçekleştiği şeklinde yorumlanabilir.

İşletme periyodunun 5. gününün üzerindeki uzun işletme dönemlerinde reaktörün birim hacmi başına üretilen lipit miktarları kararlı halde sürdürülmesine karşın, mikroalglerin kuru ağırlıkça lipit yüzdeleri farklılıklar göstermiştir. Başlangıçta *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* için kuru ağırlıkça % lipit içerikleri sırasıyla % 33 ve % 25,60 iken, 5. günün sonunda bu değerler sırasıyla ortalama % 45 ve %30 değerlerine kadar yükselmiştir. Daha sonraki dönemlerde ise lipit içerikleri *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* için sırasıyla ortalama % 37-43 ve % 31-34 oranlarında belirlenmiştir.

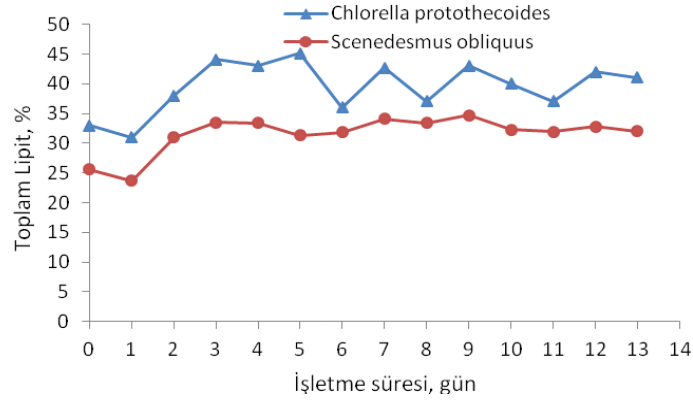
Tablo 3.3. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince elde edilen toplam lipit ve kuru ağırlık başına % lipit değişimleri

Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	T. Lipit, g/L	%	T. Lipit, g/L	%
0	0,17	33,00	0,13	25,60
1	0,37	31,00	0,40	23,70
2	0,49	38,00	0,65	31,00
3	0,96	44,04	0,90	33,50
4	1,20	43,00	1,11	33,40
5	1,43	45,11	1,12	31,30
6	1,34	36,02	1,21	31,80
7	1,63	42,67	1,34	34,10
8	1,44	37,00	1,32	33,39
9	1,68	43,00	1,36	34,70
10	1,50	40,00	1,24	32,30
11	1,45	37,00	1,21	31,90
12	1,65	42,00	1,30	32,80
13	1,58	41,00	1,26	32,00

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* için elde edilen lipit konsantrasyonları ile hücre yoğunluğuna bağlı lipit yüzdeleri Şekil 3.6 ile Şekil 3.7 de görülmektedir.



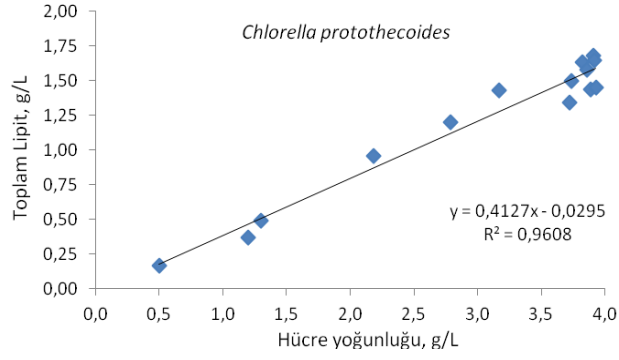
Şekil 3.6. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda elde edilen lipid konsantrasyonları



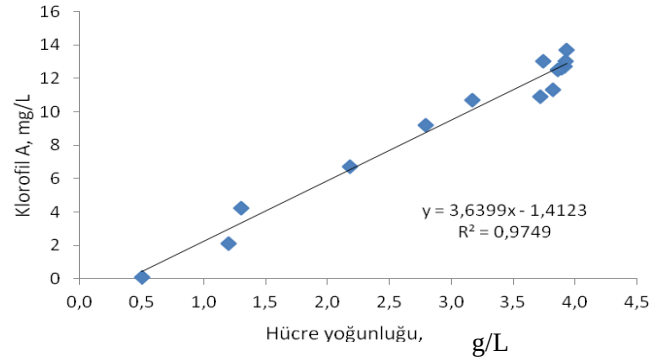
Şekil 3.7. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda hücre yoğunluğuna bağlı lipid yüzdeleri

Her iki şekilden de görüleceği üzere sistemde üretilen toplam lipid ve mikroalg hücresi içeriğindeki lipid yüzdesi açısından *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerin bariz şekilde üstünlüğü bulunmuştur. Bu sonuçlardan *Scenedesmus obliquus*'un daha iyi büyüme gösterdiği, *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerin ise daha yüksek oranda lipid içerdiği söylenebilir. Her iki mikroalg türü, fotobiyoreaktördeki hücre yoğunluğunun yüksek düzeylere ulaşmasından sonra lipid içeriklerini artırmıştır. Bu durum yüksek biyokütle yoğunluğunun alglerin lipid biriktirme kapasitesini artırdığı şeklinde yorumlanabilir.

Çalışma süresince elde edilen bulgulardan, üretilen günlük biyokütleyle bağlı olarak mikroalglerin lipid içeriği ilişkisi araştırılmış ve sonuçlar Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da verilmiştir.



Şekil 3.8. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda *Chlorella protothecoides* için hücre yoğunluğu ile toplam lipit ilişkisi



Şekil 3.9. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda *Scenedesmus obliquus* için hücre yoğunluğu ile toplam lipit ilişkisi

Chlorella protothecoides türü mikroalglerin hücre yoğunluğu ile birim hacimden üretilebilecek toplam lipit miktarı arasında doğrusal bir ilişkinin ($y = 0,417x - 0,0295$) bulunduğu ve aralarında yüksek düzeyde bir korelasyon ($R = 0,98$) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.8). *Scenedesmus obliquus* türü mikroalgler de ise bu ilişki ($y = 0,3531x - 0,0962$) şeklinde olup daha güçlü bir korelasyon ($R = 0,99$) bulunmuştur (Şekil 3.9).

3.1.3. Nutrient Uzaklaştırma Verimi

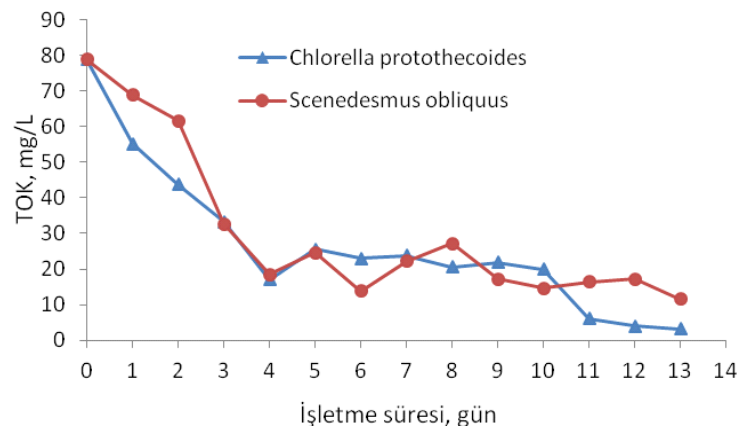
Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda foto-biyoreaktörde organik madde ve bitki besin maddelerinin giderimi incelenmiştir. Bu kapsamda *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikroalglerin toplam organik karbon (TOK), toplam fosfor (TP), toplam azot (TN) ve amonyum azotu (NH₄-N) uzaklaştırma verimleri günlük olarak izlenmiştir.

3.1.3.1. TOK Giderimi

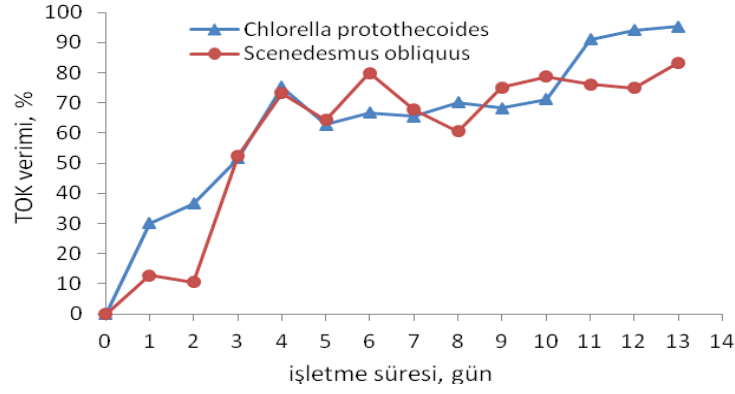
Chlorella protothecoides ve *Scenedesmus obliquus* türü mikroalglerin bulunduğu reaktörlerde başlangıç TOK konsantrasyonu 78,84 mg/L olacak şekilde sentetik atıksu ile sistem işletmeye alınmıştır. Her iki mikroalg türü için TOK konsantrasyonlarının günlük değişimi ile TOK verimleri Tablo 3.4 ile Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda TOK konsantrasyonları ve verimleri

Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %
0	78,84	0,00	78,84	0,00
1	55,16	30,04	68,84	12,68
2	43,72	36,49	61,62	10,49
3	33,28	51,66	32,66	52,56
4	17,02	75,27	18,44	73,21
5	25,60	62,81	24,58	64,29
6	22,92	66,71	13,84	79,89
7	23,72	65,54	22,20	67,75
8	20,56	70,13	27,20	60,49
9	21,84	68,27	17,12	75,13
10	19,86	71,15	14,64	78,73
11	6,15	91,07	16,37	76,22
12	4,04	94,13	17,27	74,91
13	3,25	95,28	11,49	83,31



Şekil 3.10. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK konsantrasyonundaki değişim



Şekil 3.11. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK verimi

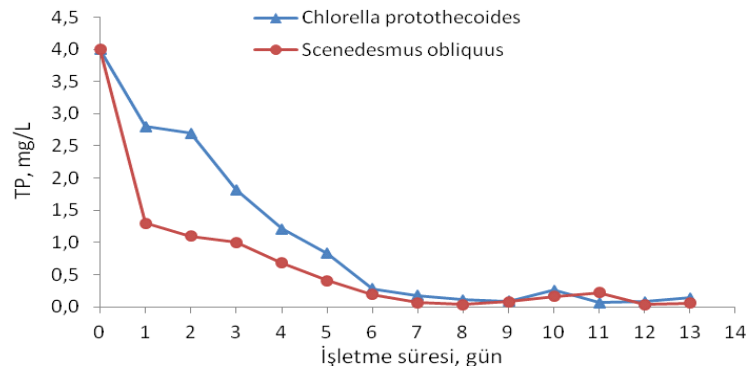
Elde edilen bulgulara göre çalışma süresince, her iki mikroalgin hücre yoğunluğu artışına paralel olarak önemli oranda TOK giderimi sağladıkları tespit edildi. Çalışma başlangıcının ilk birkaç günü TOK giderimi yüksek düzeyde gerçekleşmemiştir. Fakat TOK verimi sürekli artış göstermiştir. Bu durum reaktörlerde hücre yoğunluğu konsantrasyonunun yeterli olmamasından kaynaklanmış olabilir. Kararlı işletme şartlarında oldukça yüksek verimler elde edilmiştir. *Chlorella protothecoides* türü mikroalgler, *Scenedesmus obliquus* türü mikroalgler göre daha iyi TOK verimi sağlamışlardır. Her iki alg türü için TOK verimleri sırasıyla % 62-95 ve % 60-83 oranlarında gerçekleşmiştir.

3.1.3.2. Toplam Fosfor (TP) Giderimi

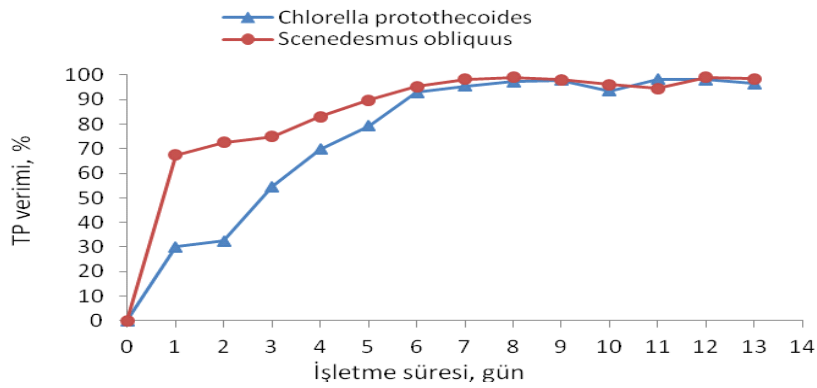
Foto-biyoreaktörler çıkışından günlük olarak alınan numunelerde alg türlerinin fosfor giderme verimleri belirlenmiştir. Çalışma süresince sentetik atıksuyun fosfor konsantrasyonu 4 mg/L olacak şekilde sabit tutulmuştur. Çıkış sularından alınan numunelerin fosfor konsantrasyonları ile her iki alg türünün fosfor giderim verimleri Tablo 3.5 ile Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te toplu olarak verilmiştir. İşletme safhasının ilk 5 gününde fosfor giderimi her iki alg türünde de kademeli olarak artış göstermiş, 6. günden itibaren istenilen düzeye ulaşmıştır. Kararlı işletme şartlarında (6-13. gün aralığında) *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin toplam fosfor (TP) verimi sırasıyla % 93-98 ve % 94-99 aralığında gerçekleşmiştir.

Tablo 3.5. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP giderimi ve verimleri

Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %
0	4,00	0,00	4,00	0,00
1	2,80	30,00	1,30	67,50
2	2,70	32,50	1,10	72,50
3	1,82	54,50	1,00	75,00
4	1,21	69,75	0,68	83,00
5	0,83	79,25	0,41	89,75
6	0,28	93,00	0,19	95,25
7	0,18	95,50	0,07	98,25
8	0,11	97,25	0,04	99,00
9	0,09	97,75	0,08	98,00
10	0,26	93,50	0,16	96,00
11	0,07	98,25	0,22	94,50
12	0,08	98,00	0,04	99,00
13	0,14	96,50	0,06	98,50



Şekil 3.12. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP konsantrasyonundaki değişim



Şekil 3.13. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP verimi

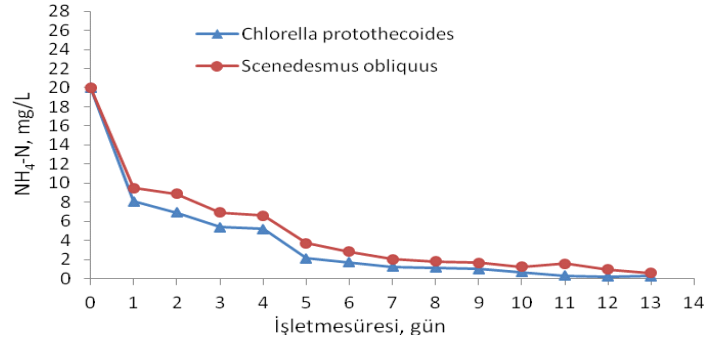
İlk 5 günlük işletme süresince hücre gelişimine paralel olarak düşük oranlarda TP giderimi sağlanmış ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin klorofil A değerlerine paralel olarak daha iyi fosfor giderimi sağladığı görülmektedir. Ancak, fosfor giderme verimi açısından bu kapsamda *Chlorella protothecoides* ile *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin benzerlik gösterdiğini ve her iki alg türünün % 95'in üzerinde fosfor uzaklaştırma yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Aynı zamanda fosforun uzaklaştırma veriminin sistemdeki biyokütle artışıyla paralelliği arz ettiği görülmektedir.

3.1.3.3. Amonyum Azotu (NH₄-N) Giderimi

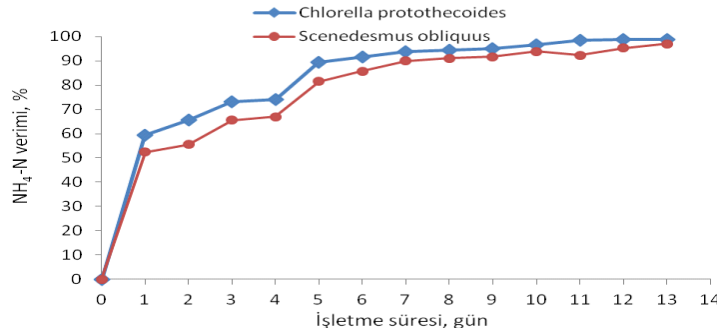
Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince NH₄-N giderimi ve verimleri Tablo 3.6 ile Şekil3.14 ve Şekil 3.15'te görülmektedir. Amonyum azotu giderme verimi de toplam fosfor gibi başlangıçtaki düşük biyokütle nedeniyle düşük düzeyde gerçekleşmiştir.

Tablo 3.6. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince NH₄-N giderimi ve verimleri

Gün	<i>Chlorella protothecoides</i>		<i>Scenedesmus obliquus</i>	
	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %
0	20,00	0,00	20,00	0,00
1	8,10	59,50	9,50	52,50
2	6,90	65,50	8,90	55,50
3	5,40	73,00	6,90	65,50
4	5,20	74,00	6,61	66,95
5	2,10	89,50	3,69	81,55
6	1,69	91,55	2,84	85,80
7	1,23	93,85	2,02	89,90
8	1,13	94,35	1,79	91,05
9	1,00	95,00	1,66	91,70
10	0,69	96,55	1,22	93,90
11	0,32	98,40	1,54	92,30
12	0,23	98,85	0,95	95,25
13	0,25	98,75	0,60	97,00



Şekil 3.14. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince $\text{NH}_4\text{-N}$ konsantrasyonundaki değişim



Şekil 3.15. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince $\text{NH}_4\text{-N}$ verimi

İşletme aşamasının 5. gününden itibaren beklenen verimler elde edilmiştir. *Chlorella protothecoides* ile *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin uygun hücre yoğunluklarında amonyum azotu giderme verimleri sırasıyla %92-98 ve %91-97 oranında gerçekleşmiştir. Amonyum azotu giderme verimleri açısından her iki alg türü arasında önemli bir farkın olmadığı söylenebilirse de *Chlorella protothecoides* türü mikro algler başlangıç safhasında biraz daha etkili giderim sağlamıştır.

3.2. Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularıyla Yapılan Çalışmalar

3.2.1. pH

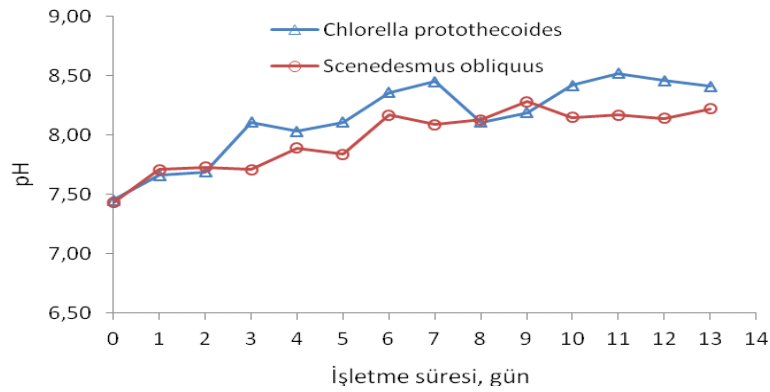
Çalışmanın ikinci aşamasında ise besi yerlerinde çoğaltılmış olan algler, foto-biyoreaktörde evsel atıksu arıtma tesisi çıkış sularına aşılanarak sistem işletmeye alınmıştır. Bu aşamada da işletme süresince pH, hücre yoğunluğu, klorofil A, biyokütlede toplam lipit ve alglerin % lipit içerikleri izlenmiştir. Sentetik atıksularla paralellik

göstermesi açısından, *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler için 13 gün işletme periyodu uygulanmıştır. Günlük olarak izlenen parametreler değerlendirilmiştir. Çalışmalar süresince, her iki alg türü için fotobiyoreaktördeki pH değişimleri Tablo 3.7’de görülmektedir.

Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suları ile yapılan çalışmalarda, numunelerin pH değerleri 7,4-7,6 iken çalışma süresince kısmen yükselerek 8,1-8,4 aralıklarında bulunmuştur (Şekil 3.16). *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler için pH değişimleri incelendiğinde, pH değişiminin her iki alg türü için benzerlik sergilediği görülmektedir.

Tablo 3.7. Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suları ile yapılan çalışmalarda işletme süresince pH değişimi

Günler	<i>C. protothecoides</i>	<i>S. obliquus</i>
0	7,45	7,43
1	7,66	7,71
2	7,69	7,73
3	8,11	7,71
4	8,03	7,89
5	8,11	7,84
6	8,36	8,17
7	8,45	8,09
8	8,11	8,13
9	8,19	8,28
10	8,42	8,15
11	8,52	8,17
12	8,46	8,14
13	8,41	8,22



Şekil 3.16. Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suları ile yapılan çalışmalarda işletme süresince pH değişimi

3.2.2. Mikroalglerin Büyüme Hızı ve Lipit İçeriklerinin Belirlenmesi

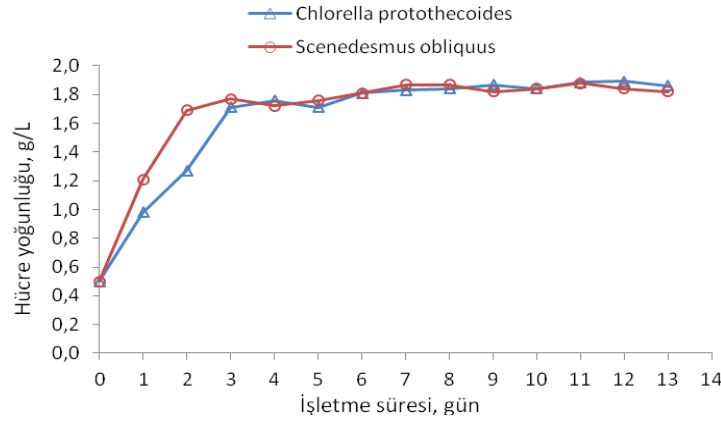
Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suları ile yapılan çalışmalarda *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin algal büyüme hızı ile klorofil A konsantrasyonunu belirlenmiştir. İşletme safhasında, reaktörlere *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler 0,5 g/L konsantrasyonda aşılanmıştır. Her iki alg türünün 0,5 g/L'lik hücre yoğunluğundaki klorofil A konsantrasyonları 0,10 mg/L olarak tespit edilmiştir. Reaktörlerdeki biyo kütle ve buna bağlı olarak klorofil A gelişimini belirlemek amacıyla, reaktörlerden alınan günlük numuneler analiz edilmiş ve sonuçlar Tablo 3.8 ile Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de sunulmuştur.

Tablo 3.8. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda hücre yoğunluğu ve klorofil A değişimi

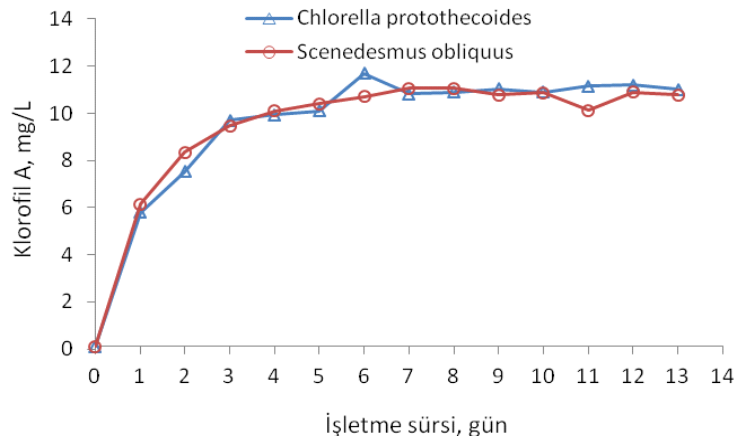
Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	Hücre yoğunluğu, g/L	Klorofil A, mg/L	Hücre yoğunluğu, g/L	Klorofil A, mg/L
0	0,50	0,10	0,50	0,10
1	0,98	5,80	1,21	6,15
2	1,27	7,51	1,69	8,35
3	1,71	9,71	1,77	9,47
4	1,76	9,94	1,72	10,10
5	1,71	10,11	1,76	10,40
6	1,81	11,70	1,81	10,71
7	1,83	10,83	1,87	11,06
8	1,84	10,89	1,87	11,07
9	1,87	11,04	1,82	10,77
10	1,84	10,89	1,84	10,88
11	1,89	11,15	1,88	10,12
12	1,89	11,20	1,84	10,89
13	1,86	11,01	1,82	10,77

Alglerin çoğalma hızı açısından sentetik atıksularla yapılan çalışmalara göre daha erken logaritmik büyüme fazına ulaşılmıştır. Her iki türün ilk 3 günlük süreçte hızlı bir büyüme gerçekleştirdiği ve çalışma süresince reaktörlerde logaritmik fazın korunduğu tespit edilmiştir. *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin işletme süresince hücre yoğunlukları karşılaştırıldığında, önemli bir fark görülmemiştir

(Şekil 3.17). Her iki mikroalg türünün klorofil A konsantrasyonlarının günlük değişimleri ise hücre yoğunluklarının paralelinde gerçekleşmiştir (Şekil 3.18).

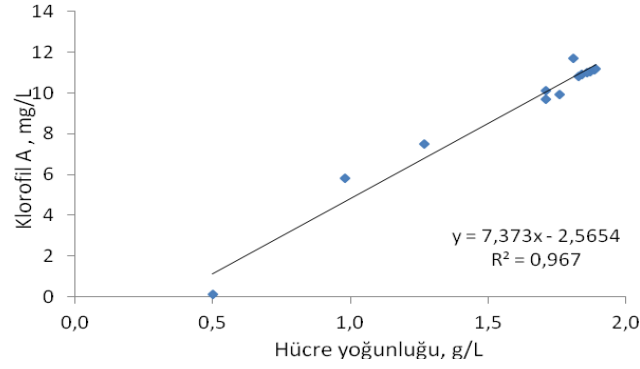


Şekil 3.17. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince hücre yoğunluğu değişimi

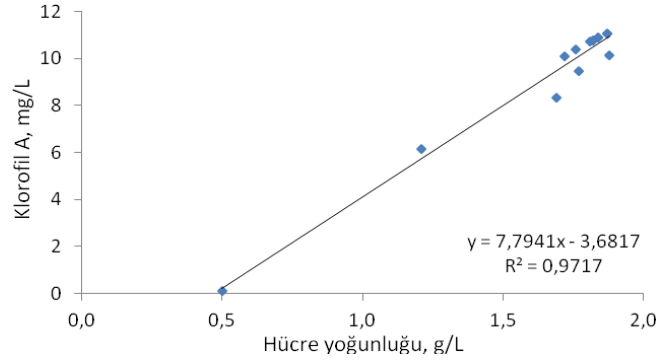


Şekil 3.18. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince klorofil A değişimi

Çalışmanın ilk 3 günlük döneminde her iki tür mikro alglerin bulunduğu fotobiyorektörde de hücre yoğunluğuna paralel şekilde klorofil A konsantrasyonları logaritmik olarak artış göstermiştir. Yapılan çalışmalarda her iki mikro alg türü için günlük hücre yoğunlukları ile klorofil A ilişkileri Şekil 3.19 ile Şekil' 20de görülmektedir. Elde edilen bulgular, hücre yoğunlukları ile klorofil A konsantrasyonlara arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.19. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda *Chlorella protothecoides* için hücre yoğunluğu ile Klorofil A ilişkisi



Şekil 3.20. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda *Scenedesmus obliquus* için hücre yoğunluğu ile Klorofil A ilişkisi

Arıtma tesisi çıkış sularıyla yapılan çalışmalarda, işletme süresince hasat edilen *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin toplam lipid içerikleri belirlenmiş ve kuru ağırlık başına lipid yüzdeleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.9’da sunulmuştur. Her iki mikro algin lipid konsantrasyonu reaktördeki hücre yoğunluğunun artışı ile paralel olarak artmıştır. 3. günden sonra sistemlerde biyo kütle artışı dengelenmiş ve üretilen lipid konsantrasyonu hemen hemen sabit düzeyde kalmıştır.

İşletme periyodunun 3. gününün üzerindeki uzun işletme dönemlerinde reaktörün birim hacmi başına üretilen lipid miktarları kararlı halde sürdürülmüştür. Ancak mikroaglerin kuru ağırlıkça lipid yüzdeleri farklılıklar göstermiştir. Başlangıçta *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* için kuru ağırlıkça % lipid içerikleri sırasıyla % 33 ve % 23,00 iken, 3. günün sonunda bu değerler sırasıyla ortalama % 36,30 ve % 26,80

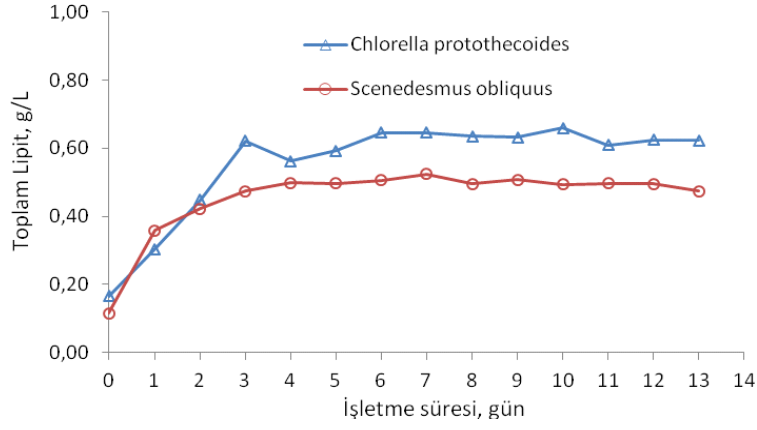
değerlerine kadar yükselmiştir. Daha sonraki dönemlerde ise *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* için lipit içerikleri sırasıyla ortalama % 32-36 ve % 26-29 oranlarında gerçekleşmiştir.

Tablo 3.9. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince elde edilen toplam lipit ve kuru ağırlık başına % lipit değişimleri

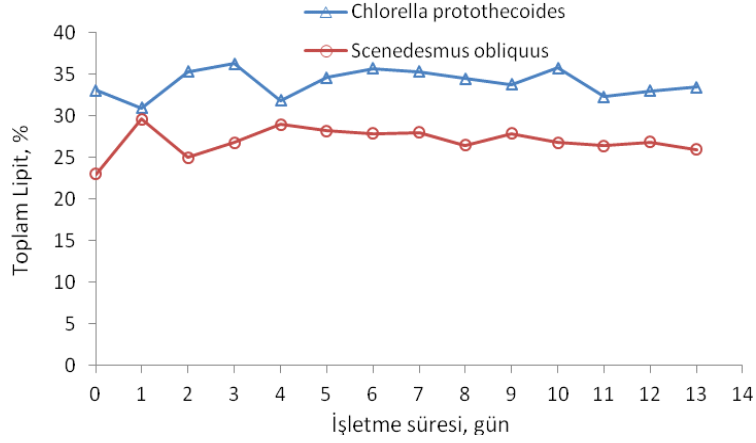
Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	T. Lipit, g/L	%	T. Lipit, g/L	%
0	0,17	33,10	0,12	23,00
1	0,30	31,00	0,36	29,60
2	0,45	35,30	0,42	25,00
3	0,62	36,30	0,47	26,80
4	0,56	31,90	0,50	29,00
5	0,59	34,60	0,50	28,20
6	0,65	35,70	0,50	27,90
7	0,65	35,30	0,52	28,00
8	0,63	34,50	0,50	26,50
9	0,63	33,80	0,51	27,90
10	0,66	35,80	0,49	26,80
11	0,61	32,30	0,50	26,40
12	0,62	33,00	0,49	26,90
13	0,62	33,50	0,47	26,00

Chlorella protothecoides ve *Scenedesmus obliquus* için elde edilen lipit konsantrasyonları ile hücre yoğunluğuna bağlı lipit yüzdeleri Şekil 3.21 ile Şekil 3.22’de görülmektedir. Görüldüğü gibi, sitemde üretilen toplam lipit ve kuru mikroalg hücresi içeriğindeki lipit yüzdesi açısından *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerin daha iyi verimler sağlamıştır.

Elde edilen bulgularımızdan, *Scenedesmus obliquus* ve *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerin büyüme verimleri arasında önemli bir farkın olmadığı, ancak *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerin daha yüksek oranda lipit içerdiği ortaya konulmuştur.

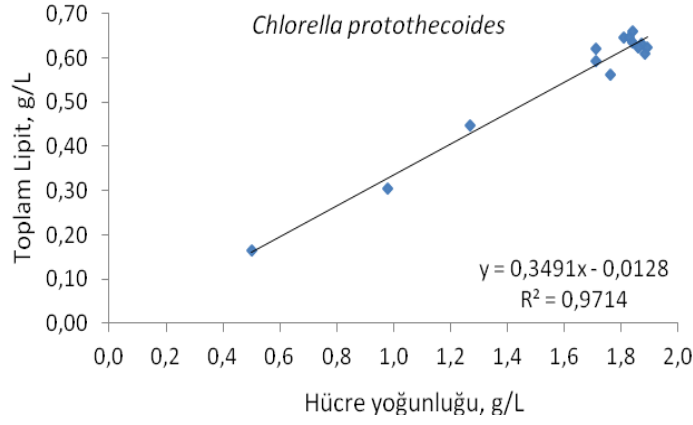


Şekil 3.21. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda elde edilen lipit konsantrasyonları

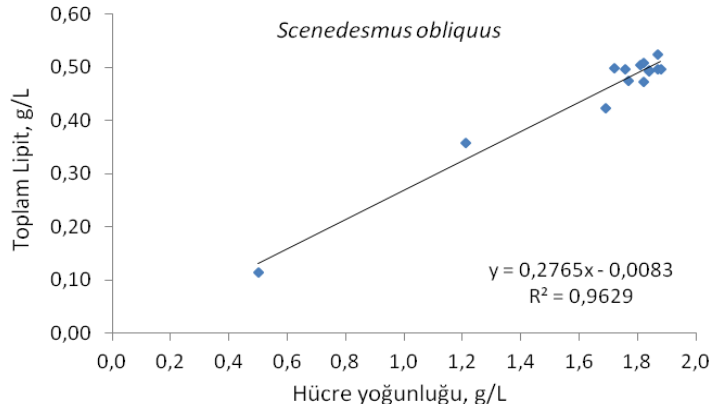


Şekil 3.22. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda hücre yoğunluğuna bağlı lipit yüzdeleri

Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış sularıyla yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlardan, üretilen günlük biyokütle konsantrasyonu ile mikroalglerin lipit içeriği ilişkisi araştırılmıştır (Şekil 3.23 ve Şekil 3.24). *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerin hücre yoğunluğu ile birim hacimden üretilebilecek toplam lipit miktarı arasında doğrusal bir ilişki ($y = 0,3491x - 0,0128$) bulunmuş ve aralarında yüksek düzeyde bir korelasyon ($R = 0,985$) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.23). *Scenedesmus obliquus* türü mikroalgler de ise bu ilişki ($y = 0,2765x - 0,0083$) şeklinde olup korelasyon iyi bir ($R = 0,981$) bulunmuştur (Şekil 3.24).



Şekil 3.23. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda *Chlorella protothecoides* için hücre yoğunluğu ile toplam lipid ilişkisi



Şekil 3.24. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda *Scenedesmus obliquus* için hücre yoğunluğu ile toplam lipid ilişkisi

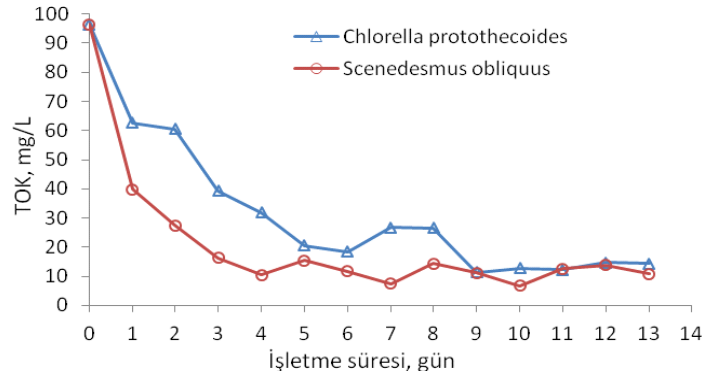
3.2.3. Nutrient Uzaklaştırma Verimi

3.2.2.3. TOK Giderimi

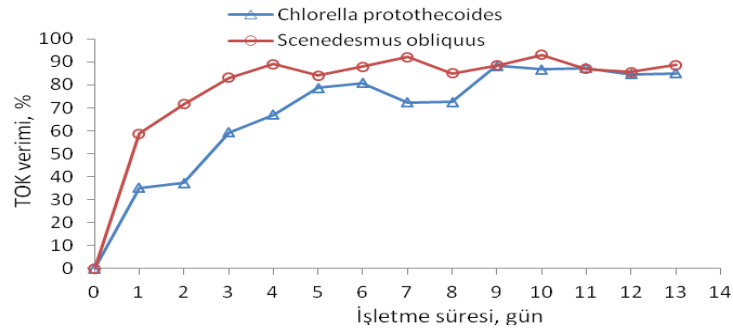
Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış sularıyla yapılan çalışmalarda, *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikroalglerin bulunduğu foto-biyoreaktörler başlangıç TOK konsantrasyonu 96,42 mg/L olan atıksu ile beslenmiştir. Her iki mikroalg türü için sistem çıkışındaki TOK konsantrasyonları ve TOK giderme verimleri Tablo 3.10 ile Şekil 3.25 ve Şekil 3.26’da görülmektedir.

Tablo 3.10. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK giderimi ve verimleri

Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %
0	96,42	0,00	96,42	0,00
1	62,62	35,05	39,88	58,64
2	60,48	37,27	27,40	71,58
3	39,32	59,22	16,33	83,06
4	31,82	67,00	10,54	89,07
5	20,52	78,72	15,34	84,09
6	18,42	80,90	11,69	87,87
7	26,74	72,27	7,56	92,16
8	26,52	72,50	14,44	85,02
9	11,37	88,21	11,14	88,45
10	12,77	86,76	6,71	93,04
11	12,16	87,39	12,66	86,87
12	14,74	84,71	13,79	85,70
13	14,45	85,01	10,87	88,73



Şekil 3.25. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK konsantrasyonundaki değişim



Şekil 3.26. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TOK verimi

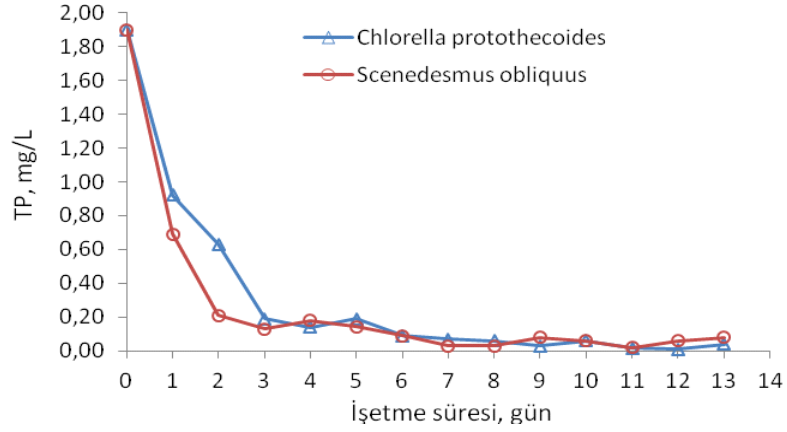
Elde edilen bulgularımıza göre, her iki mikroalgin biyomas artışına bağlı olarak yüksek düzeylerde TOK giderimi sağladıkları tespit edilmiştir. Çalışma başlangıcının ilk üç günü TOK giderimi yüksek düzeyde gerçekleşmemiştir. Fakat kararlı işletme şartlarında yüksek verimler elde edilmiştir. Sentetik atıksularla yapılan çalışmaların aksine *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella protothecoides* türü mikroalgler göre daha iyi TOK verimi sağlamışlardır. Optimum işletme şartlarında (4-13. günlerde) *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerin % 67-88 oranında TOK giderimi gerçekleştirdiği, *Scenedesmus obliquus* türü mikroalgler ise % 84-93 oranlarında TOK verimine ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 3.26).

3.2.3.2. Toplam Fosfor (TP) Giderimi

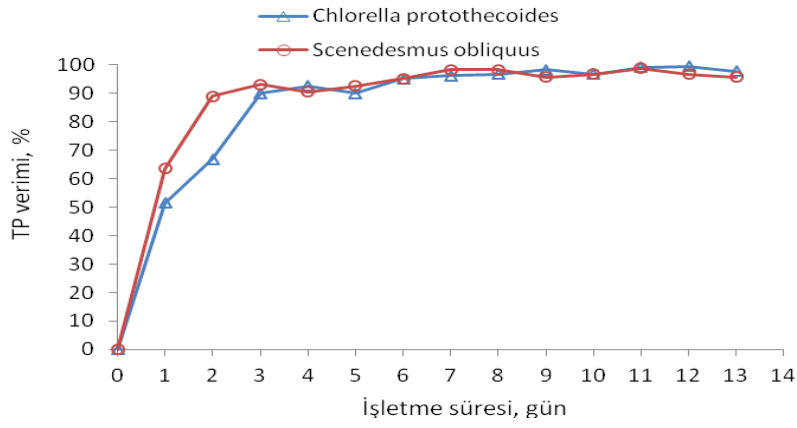
Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda, işletme süresince foto-biyoreaktörlerin çıkış suyundan alınan numunelerde fosfor giderme verimleri tespit edilmiştir. Çalışma süresince evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suyunun fosfor konsantrasyonu ortalama 1,9 mg/L düzeyinde olup, çıkış sularından alınan numunelerin fosfor konsantrasyonları ile her iki alg türünün fosfor giderim verimleri Tablo 3.11 ile Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 3.11. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP giderimi ve verimleri

Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %
0	1,90	0,00	1,90	0,00
1	0,92	51,58	0,69	63,68
2	0,63	66,84	0,21	88,95
3	0,19	90,00	0,13	93,16
4	0,14	92,63	0,18	90,53
5	0,19	90,00	0,14	92,58
6	0,09	95,26	0,09	95,26
7	0,07	96,32	0,03	98,42
8	0,06	96,84	0,03	98,42
9	0,03	98,42	0,08	95,79
10	0,06	96,84	0,06	96,84
11	0,02	99,21	0,02	98,95
12	0,01	99,58	0,06	96,84
13	0,04	97,89	0,08	95,79



Şekil 3.27. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP konsantrasyo-nundaki değişim



Şekil 3.28. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TP verimi

Çalışmaların ilk gününde fosfor giderimi her iki alg türünde de önemli düzeyde artış göstermiş ve toplam fosfor verimleri %50'nin üzerine çıkmıştır. Karalı şartlarda ise *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin toplam fosfor (TP) verimi sırasıyla % 90-99 ve % 90-98 aralığında gerçekleşmiştir.

İlk üç günlük işletme süresince foto-biyoreaktörlerdeki hücre artışına paralel olarak TP giderimi artmıştır. Fosfor giderme verimi açısından *Chlorella protothecoides* ile *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler benzerlik göstermiştir. Aynı zamanda fosforun uzaklaştırma verimi, sistemdeki klorofil A artışıyla paralellik arz etmektedir.

3.2.3.3. Toplam Azot (TN) Giderimi

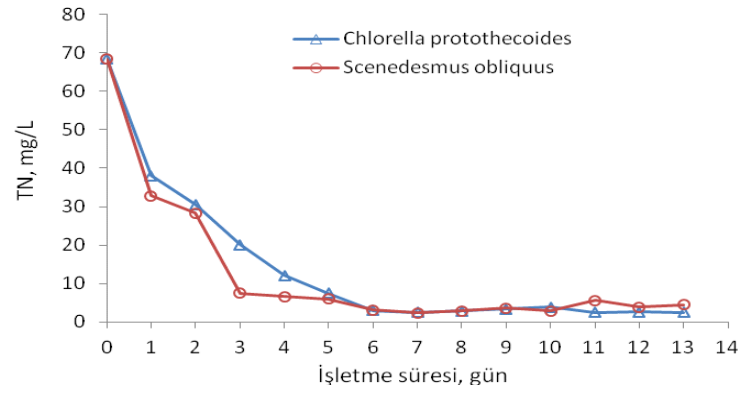
Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince her iki sistemden elde edilen TN giderimi ve verimleri Tablo 3.12 ile Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'de verilmektedir.

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalara göre her iki alg türü de TN ve TP giderme verimine daha kısa sürelerde ulaşmışlardır. İşletmeye alma periyodunun ilk günü sonunda % 80'in üzerinde TN verimine ulaşmıştır.

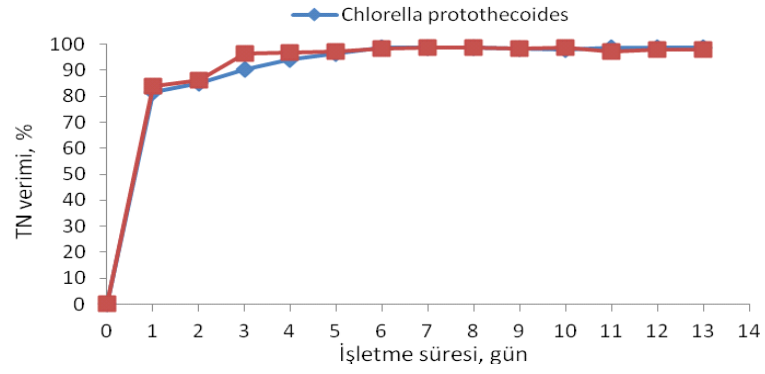
İşletme aşamasının ilk gününden itibaren beklenen verimler elde edilmesine karşın, *Chlorella protothecoides* ile *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin uygun hücre yoğunluklarında toplam azot giderme verimleri sırasıyla ortalama %90-98 oranında gerçekleşmiştir. Amonyum azotu giderme verimleri açısından her iki alg türü arasında önemli bir farkın olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 3.29 ve Şekil 3.30).

Tablo 3.12. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TN giderimi ve verimleri

Gün	<i>C. protothecoides</i>		<i>S. obliquus</i>	
	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %	Konsantrasyon, mg/L	Verim, %
0	68,44	0,00	68,44	0,00
1	38,00	81,46	32,84	83,98
2	30,58	85,08	28,26	86,22
3	20,06	90,21	7,49	96,35
4	12,10	94,10	6,54	96,81
5	7,44	96,37	5,97	97,09
6	2,92	98,58	3,11	98,48
7	2,45	98,80	2,41	98,82
8	2,84	98,61	2,87	98,60
9	3,40	98,34	3,56	98,26
10	3,81	98,14	2,91	98,58
11	2,45	98,80	5,56	97,29
12	2,59	98,74	3,89	98,10
13	2,54	98,76	4,53	97,79



Şekil 3.29. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TN konsantras-yonundaki değişim



Şekil 3.30. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince TN verim

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Lipit içeren *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin atıksuların ileri arıtımında kullanılabilirliği ve biyogaz üretim potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla yürütülen çalışmalar 13 günlük aşama halinde iki aşamalı olarak yürütülmüştür. Besi yerlerinde çoğaltılmış olan algler çalışmanın ilk aşamasında foto-biyoreaktörde sentetik atıksuya ikinci aşamasında ise gerçek atıksu arıtma tesisi çıkış sularına aşılanarak sistemler işletmeye alınmıştır. Şimdiye kadar yapılan bu tip çalışmalarda; bir evsel atık su arıtma tesisinin ikincil arıtımından çıkan su alg yetiştirme besi yeri olarak kullanılmış ve *Botryococcus braunii*'nin bu sularda azot gideriminde etkili olduğu ve büyümesini sürdürdüğü açıklanmıştır (Sawayama ve diğ, 1992).

Çalışmamızın her iki aşamasında başlangıçta *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler, reaktörlere aynı miktarlarda (0,5 g/L) aşılanmıştır. Her iki alg türünün 0,5 g/L'lik hücre yoğunluğundaki ortalama klorofil A konsantrasyonları 0,10 mg/L olarak tespit edilmiştir.

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda başlangıç pH değerleri 7,7-7,8 iken çalışma süresince 8,0-8,5 aralığında seyretmiştir. *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro algler için pH değişimleri incelendiğinde, pH değişimi arasında önemli farklar görülmemiştir. Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış sularıyla yapılan çalışmalarda ise, numunelerin pH değerleri 7,4-7,6 iken çalışma süresince kısmen yükselerek süresince 8,1-8,4 aralıklarında gerçekleşmiştir. Chojnacka (2004)'ya göre mikroalgler, metabolizma ile ilgili büyüme stokiyometrisine bağlı olarak değişen pH'a göre de ayırt edilebilmektedir. *Chlorella vulgaris*, *Haematococcus pluuiialis*, *Arthrospira (spirulina) platensis* heterotrofik fotoheterotrofik, bunların yanı sıra mixotrofik şartlar altında büyüeyebilen türlerdir. Williams (2002) ise sadece organik karbon veya subsrat, vitaminler, tuzlar ve besinler algleri büyütmek için değil, aynı zamanda oksijen, CO₂, pH, sıcaklık, ışık şiddeti gibi işletme parametreleri arasındaki dengelerin alg gelişiminde etkili olduklarını vurgulamıştır. Coutteau (1996), her türün spesifik bir pH aralığında üreyebileceğini ve bir çok alg kültürünün pH 7-9 aralığında gelişim gösterdiğini belirtmektedir. Ancak, optimum parametreler ve tolerans aralıkları türe özgü olduğunu savunmuştur. Çalışmalarda oluşturulan ortam koşulunda optimum olan parametre, başka bir ortam için optimum olmayabilir. Aynı araştırmacı uygun pH aralığının ise 8,2-8,7 arasında değiştiğini, çok yoğun olan kültürlerde zamanla pH artışı meydana gelebileceğini ve bu sorunun kültürün

havalandırılmasıyla aşılabileceğini belirtmektedir. Sobczuk ve arkadaşları (2000) ise, çalışmalarında, mikro alg *C. Vulgaris*'in düşük pH'larda yaşayabildiğini, fakat gelişimin yavaş olduğunu belirtmişlerdir.

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarımızda, her iki türün ilk 5 günlük süreçte hızlı bir büyüme gerçekleştirdiği, 6-8. günlerde büyüme hızının yavaşladığı, 9-13. günlerde ise büyüme hızının azaldığı tespit edilmiştir. *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin işletme süresince hücre yoğunlukları karşılaştırıldığında, *Scenedesmus obliquus* türü mikroalglerin başlangıç periyodunda daha hızlı geliştiği görülmektedir. Her iki mikroalg türünün klorofil A konsantrasyonlarının günlük değişimleri ise hücre yoğunluk değişimlerinden daha farklı olarak gerçekleşmiştir. Çalışma süresince *Scenedesmus obliquus* türü mikroalglerin Klorofil A konsantrasyonlarının da *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerden daha yüksek oldukları saptanmıştır. Gerçek atıksularla yapılan çalışmalarda ise, alglerin çoğalma hızı açısından sentetik atıksularla yapılan çalışmalara göre daha erken logaritmik büyüme fazına ulaşılmıştır. Her iki türün ilk 3 günlük süreçte hızlı bir büyüme gerçekleştirdiği ve çalışma süresince reaktörlerde logaritmik fazın korunduğu tespit edilmiştir. *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin işletme süresince hücre yoğunlukları karşılaştırıldığında, önemli bir fark görülmemiştir. Her iki mikroalg türünün klorofil A konsantrasyonlarının günlük değişimleri ise hücre yoğunluklarının paralelinde gerçekleşmiştir. Çalışmanın ilk 3 günlük döneminde her iki tür mikro alglerin bulunduğu foto-biyoreaktörde de hücre yoğunluğuna paralel şekilde klorofil A konsantrasyonları logaritmik olarak artış göstermiştir.

Arıtma tesisi çıkış sularıyla yapılan çalışmalarda, işletme süresince hasat edilen *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* türü mikro alglerin lipit konsantrasyonu reaktördeki hücre yoğunluğunun artışı ile paralel olarak artmıştır. 3. günden sonra sistemlerde biyokütle artışı dengelenmiş ve üretilen lipit konsantrasyonu hemen hemen sabit düzeyde kalmıştır. İşletme periyodunun 3. gününün üzerindeki uzun işletme dönemlerinde reaktörün birim hacmi başına üretilen lipit miktarları kararlı hale ulaşmıştır. Ancak mikro alglerin kuru ağırlıkça lipit yüzdeleri farklılıklar göstermiştir. Başlangıçta *Chlorella protothecoides* ve *Scenedesmus obliquus* için kuru ağırlıkça % lipit içerikleri sırasıyla % 33 ve % 23,00 iken, 3. Günün sonunda bu değerler sırasıyla ortalama % 36,30 ve % 26,80 değerlerine kadar yükselmiştir. Daha sonraki dönemlerde ise *Chlorella*

protothecodies ve *Scendesmus obliquus* için lipit içerikleri sırasıyla ortalama % 32-36 ve % 26-29 oranlarında gerçekleşmiştir. Elde edilen bulgularımızdan, *Scendesmus obliquus* ve *Chlorella protothecodies* türü mikro alglerin büyüme verimleri arasında önemli bir farkın olmadığı, ancak *Chlorella protothecodies* türü mikro alglerin daha yüksek oranda lipit içerdiği ortaya konulmuştur. *Chlorella protothecodies* türü mikroalglerin hücre yoğunluğu ile birim hacimden üretilebilecek toplam lipit miktarı arasında doğrusal bir ilişki ($y = 0,3491x - 0,0128$) bulunmuş ve aralarında yüksek düzeyde bir kolerasyon ($R = 0,985$) olduğu tespit edilmiştir. *Scendesmus obliquus* türü mikroalgler de ise bu ilişki ($y = 0,2765x - 0,0083$) şeklinde olup kolerasyon iyi bir ($R = 0,981$) bulunmuştur. Brain ve diğ. (2010) vahşi alg, *D. tertiolecta*, *N. Oculate* alg türlerini arttırmak ve bu türlerdeki lipit içeriğini bulmak için birtakım deneyler yapmışlardır. Vahşi alg iki ay süre 73 cm ile 70 cm arasında bir kültür derinliğinde iki yüksek yoğunluklu polietilen kılıf içinde yetiştirilmiştir. Hava 200-300 ml/dakika düzeyinde verilmiştir. Sistemde pH ve sıcaklık aralığı sırasıyla 7,6 ve 18,1 °C dir. Kuru alg hücresindeki nötral yağlar *D.tertiolecta* için yaklaşık olarak % 30 ve *N. Oculata* için % 50 oranında bulunmuştur.

Genel bir kabul olarak 1 µg Klorofil a oluşumu için 1 µg P ve 10 µg N gerektiği şeklinde bir kabul yapılırsa $N/P < 10$ durumunda fitoplankton büyümesi azot tarafından $N/P > 10$ durumunda sistem fosfor tarafından sınırlandırılıyor denilebilir. $N/P = 10$ durumunda sistem ikisi tarafından da sınırlandırılmaz. Bu oranlar tüm fitoplanktonlar için genişletilirse $N/P > 20$ durumunda fosfor sınırlayıcı $N/P < 5$ durumunda azot sınırlayıcı olarak kabul edilmesi daha emniyetli bir yaklaşım olur (Muslu, 2001).

Yüksek verimli alg kültürü elde etmek için en uygun azot-fosfor oranı araştırılması yapılmış ve baskın olan türlerin *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Monoraphidium* olduğu görülmüştür (Mostert ve ark, 1987). Yapılan bir dizi çalışmalarda, tek hücreli tatlısu mikroalgi *Chlorella* türlerinin biyosorpsiyon ile atıksudan azot ve fosfor gideriminde yüksek bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür (Corelli, 1999; Aksu 2002; Dönmez ve diğ., 1999).

Patil (1990), *Ankistrodesmus falcatus* ve *Scenedesmus quadricauda* alglerinin atık su arıtımındaki rollerini araştırmıştır. Sonuçlara göre sekiz gün sürede *Scenedesmus quadricauda* % 85 ile % 95 fosfat giderimi, % 70 ila % 80 civarında NH_3-N giderimi, % 70 civarında BOI giderimi sağlamıştır. *A. falcatus* ise % 80 fosfat giderimi, % 60 civarında NH_3-N giderimi, % 70 civarında BOI giderimi sağlamıştır. Voltolina ve ark (1998) yaptıkları çalışmada *Scenedesmus sp.*'ni sentetik atık suda üreterek atık sudaki NH_4-N 'ün

% 79,4 oranında giderimini başarmışlardır. Bu çalışmada sıcaklığa ve hidrolik bekletme süresine bağlı olarak alglerin sentetik atık su içerisinde kontrollü bir ortamda gerçekleştirdiği büyüme potansiyeli ortaya çıkarılmıştır. Aslan ve Kapdan (2006), su ortamından azot ve fosforu arıtmak için *C. vulgaris* kullanarak azot için % 72 ve fosfor için de % 28 giderme verimi elde etmişlerdir (8 mg/ L NH₄'den 3 mg/ L NH₄'e ve 1,5-3,5 mg/ L PO₄). Besin giderimi için yaygın olarak kullanılan diğer mikroalg kültürleri *Chlorella*, *Scenedesmus* ve *Spirulina* türleridir (Gonzales ve diğ., 1997; Lee ve diğ., 2001). *Nannochlois*, *Botryococcus brauni* ve siyanobakter *Phormidium bohneri* besin giderim kapasiteleri de incelenmiştir (Martinez ve diğ., 2000; Olguin ve diğ., 2003; Jimenez-Perez ve diğ., 2004; An ve diğ., 2003; Dumas ve diğ., 1998; Laliberte ve diğ., 1997). Diğer bir çalışmada ise azot ve fosforu arıtmada mikroalg etkinliği belirlenmiştir. Aslan ve Kapdan su ortamından azot ve fosforu arıtmak için *C. vulgaris* kullanarak azot için % 72 ve fosfor için de % 28 giderme verimi elde etmişlerdir (8 mg/ L NH₄'den 3 mg/L NH₄'e ve 1,5-3,5 mg/ L PO₄) (Aslan ve Kapdan, 2006). Voltolina ve ark (1998) yaptıkları çalışmada *Scenedesmus sp.*'nin sentetik atık suda üreterek atık sudaki NH₄-N'ün % 79,4 oranında giderimini başarmışlardır. Bu çalışmada sıcaklığa ve hidrolik bekletme süresine bağlı olarak alglerin sentetik atık su içerisinde kontrollü bir ortamda gerçekleştirdiği büyüme potansiyeli ortaya çıkarılmıştır. Patil (1990), *Ankistrodesmus falcatus* (Corda) Ralfs ve *Scenedesmus quadricauda* alglerinin atık su arıtımındaki rollerini araştırmıştır. Sonuçlara göre sekiz gün sürede *Scenedesmus quadricauda* % 85 ile % 95 fosfat giderimi, % 70 ila % 80 civarında NH₃-N giderimi, % 70 civarında BOI giderimi sağlamıştır. *A. falcatus* ise % 80 fosfat giderimi, % 60 civarında NH₃-N giderimi, % 70 civarında BOI giderimi sağlamıştır. Macedo ve Alegre (2001)'ya göre, *Spirulina* için azot içeriğinin azalması ve sıcaklığın düşüşü ile lipid içeriği hemen hemen 3 kat artmıştır. Azot konsantrasyonundaki azalmanın sıcaklıktan daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Başka bir çalışmada ise çevre kirliliğini azaltmak için atıksu arıtma tesislerinde *Chlorella sp.* ve *Scenedesmus sp.* üzerinde araştırma yapılmıştır. Bu kültürler çeşitli inorganik azot, CO₂ ve tuzluluk kaynakları ile laboratuvar BG11 ortamında 29-50 gün yetiştirilmiştir (Stainier ve diğ., 1971). Diğer bir çalışmada ortamda NaNO₃ konsantrasyonundaki azalma ve alg metabolizma ürünlerindeki artış, biyokütle sayısında hafif bir azalmaya yol açmıştır. Ancak N konsantrasyonunun artışı hücrelerin lipid muhteviyatının azalmasına yol açmıştır (Hsieh ve Wu 2009; Yeesang 2011). Hsieh ve Wu (2009) kritik üre konsantrasyonunu 0,1 g/L olarak gözlemlemiştir. Bu miktarda biyokütle

yoğun olarak büyümekte ve daha yüksek yağ içeriği var olmaktadır. Ayrıca üre *Chlorella* kültürlerinde en iyi azot kaynağı olduğu bildirilmiştir (Becker, 1994).

Sentetik ve gerçek atıksularla yapılan çalışmalarımızda foto-biyoreaktörde organik madde ve bitki besin maddelerinin giderimi incelenmiştir. Bu kapsamda *Chlorella protothecoides* ve *Scendesmus obliquus* türü mikroalglerin toplam organik karbon (TOK), toplam fosfor (TP), toplam azot (TN) ve amonyum azotu (NH₄-N) uzaklaştırma verimleri günlük olarak izlenmiştir. Bu çalışmamızda, *Chlorella protothecoides* ve *Scendesmus obliquus* türü mikroalglerin bulunduğu reaktörlerde başlangıç TOK konsantrasyonu 78,84 mg/L olacak şekilde sentetik atıksu ile sistem işletmeye alınmıştır. Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suları ile yapılan çalışmalarda, *Chlorella protothecoides* ve *Scendesmus obliquus* türü mikroalglerin bulunduğu foto-biyoreaktörler ise başlangıç TOK konsantrasyonu 96,42 mg/L olan atıksu ile beslenmiştir. Sentetik atıksularla yapılan çalışmalar süresince, her iki mikroalgin biyomas artışına paralel olarak önemli oranda TOK giderimi sağladıkları tespit edilmiştir. Çalışma başlangıcının ilk birkaç günü TOK giderimi yüksek düzeyde gerçekleşmemiştir. Fakat TOK verimi sürekli artış göstermiştir. Bu durum reaktörlerde biyokütle konsantrasyonunun yeterli olmamasından kaynaklanmış olabilir. Kararlı işletme şartlarında oldukça yüksek verimler elde edilmiştir. *Chlorella protothecoides* türü mikroalgler, *Scendesmus obliquus* türü mikroalglerle göre daha iyi TOK verimi sağlamışlardır. Her iki alg türü için TOK verimleri sırasıyla % 62-95 ve % 60-83 oranlarında gerçekleşmiştir. Evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suları ile yapılan çalışmalarda ise çalışma başlangıcının ilk üç günü TOK giderimi yüksek düzeyde gerçekleşmemiştir. Fakat kararlı işletme şartlarında yüksek verimler elde edilmiştir. Sentetik atıksularla yapılan çalışmaların aksine *Scendesmus obliquus*, *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerle göre daha iyi TOK verimi sağlamışlardır. Optimum işletme şartlarında (4-13. günlerde) *Chlorella protothecoides* türü mikroalglerin % 67-88 oranında TOK giderimi gerçekleştirdiği, *Scendesmus obliquus* türü mikroalgler ise % 84-93 oranlarında TOK verimine ulaştığı tespit edilmiştir.

Foto-biyoreaktörler çıkışından günlük olarak alınan numunelerde alg türlerinin fosfor giderme verimleri belirlenmiştir. Sentetik atıksuyun ile yapılan çalışmalarda giriş fosfor konsantrasyonu 4 mg/L olacak şekilde sabit tutulmuştur. Kararlı işletme şartlarında (6-13. gün aralığında) *Chlorella protothecoides* ve *Scendesmus obliquus* türü mikro alglerin toplam fosfor (TP) verimi sırasıyla % 93-98 ve % 94-99 aralığında gerçekleşmiştir. *Scendesmus obliquus* türü mikro alglerin klorofil A değerlerine paralel

olarak daha iyi fosfor giderimi sağladığı görülmektedir. Ancak, fosfor giderme verimimi açısından *Chlorella protothecoides* ile *Scendesmus obliquus* türü mikro alglerin benzerlik göstermiş ve her iki alg türü % 95'in üzerinde fosfor uzaklaştırma verimi sağlamıştır. Evsel atıksularla yapılan çalışmalarda ise, çalışma süresince fosfor konsantrasyonu ortalama 1,9 mg/L'dir. Çalışmaların ilk gününde fosfor giderimi her iki alg türünde de önemli düzeyde artış göstermiş ve toplam fosfor verimleri % 50'nin üzerine çıkmıştır. Karalı şartlarda ise *Chlorella protothecoides* ve *Scendesmus obliquus* türü mikro alglerin toplam fosfor (TP) verimi sırasıyla % 90-99 ve % 90-98 aralığında gerçekleşmiştir.

Sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda işletme süresince $\text{NH}_4\text{-N}$ verimleri de toplam fosfor gibi başlangıçtaki düşük biyokütle nedeniyle düşük düzeyde gerçekleşmiştir. İşletme aşamasının 5 gününden itibaren beklenen verimler elde edilmiştir. *Chlorella protothecoides* ile *Scendesmus obliquus* türü mikro alglerin uygun hücre yoğunluklarında amonyum azotu giderme verimleri sırasıyla % 92-98 ve % 91-97 oranında gerçekleşmiştir. Amonyum azotu giderme verimleri açısından her iki alg türü arasında önemli bir farkın olmadığı söylenebilirse de *Chlorella protothecoides* türü mikro algler başlangıç safhasında daha etkili giderim sağlamıştır. Gerçek atıksularla yapılan çalışmalarda, sentetik atıksularla yapılan çalışmalara göre her iki alg türü de TN ve TP giderme verimine daha kısa sürelerde ulaşmışlardır. İşletmeye alma periyodunun ilk günü sonunda % 80'in üzerinde TN verimine ulaşılmıştır. *Chlorella protothecoides* ile *Scendesmus obliquus* türü mikro alglerin uygun hücre yoğunluklarında toplam azot giderme verimleri sırasıyla ortalama %90-98 oranında gerçekleşmiştir. Amonyum azotu giderme verimleri açısından her iki alg türü arasında önemli bir farkın olmadığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, *Chlorella protothecoides* ile *Scendesmus obliquus* türü mikro algler ile yapılan foto-biyorektör çalışmalarında çok yüksek oranlarda TOK, azot ve fosfor verimleri sağlanmıştır. Hasat edilen alglerden kuru ağırlıklarının % 25-30'u kadar lipid elde edilmiştir. Bu alg türlerinin kullanımı ile atıksular ileri arıtımı gerçekleştirilmiş ve aynı zamanda biyodizel üretimi için lipid elde edilmiştir. İleri çalışmalarda baca gazları karbondioksit kaynağı olarak kullanılabilir. Böylece hava kirliliğine sebep olan karbondioksit elimine edilebildiği gibi, su kalitesi değişimlerine neden olan azot ve fosfor alg biyokütlesine dönüştürülebilir. Lipit içeren alglerin kullanılması halinde bu alglerden biyodizel üretiminde faydalanılabilir. Ayrıca hasat edilen biyokütle, tek hücre proteini olarak kullanılabilir. Böylece hem atık minimizasyonu sağlanmakta hem de ticari bir kazanç elde edilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- An, J.Y., Sim, S.J., Lee, J.S., Kim, B.K.,** 2003, Hydrocarbon production from secondarily treated piggery wastewater by the green algae, *Botryococcus braunii*. *Journal of Applied Phycology*, 15:185–91.
- Aslan S., Kapdan I.K.,** 2006. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecological Engineering*;28(1): 64–70.
- APHA, AWWA and WPCF,** 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation; (Clesceri, L. S., Greenberg, A. E. and Trussell, R. R.) New York. USA, pp. 92-1110.
- Babu B.V.,** 2008. Biomass pyrolysis: a state-of-the-art review. *Biofuels Bioproducts Biorefinin*; 2(5):393–414.
- Bahadur N.P., Boocock D.G.B., Konar S.K.,** 1995. Liquid hydrocarbons from catalytic pyrolysis of sewage sludge lipid and canola oil: evaluation of fuel properties. *Energy Fuels*; 9:248–56.
- Barclay B.,** 1984. Microalgae Culture Collection 1984–1985. Microalgal Technology Research Group (MTRG). SERI/SP-231-2486.
- Barrow C., Shahidi F.,** 2008. Marine nutraceuticals and functional foods. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Becker, E.W.,** 1994. Microalgae: Biotechnology and Microbiology. Cambridge University Press, p. 304. ISBN- 13: 978-0521350204
- Bilanovic D., Andargatchew A., Kroeger T., Shelef G.,** 2009. Freshwater and marine microalgae sequestering of CO₂ at different C and N concentrations response surface methodology analysis. *Energy Conversion and Management*;50:262–7.
- Borowitzka M.A.,** 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology*;70(1–3):313–21.
- Brown L.M., Zeiler B.G.** 1993. Aquatic biomass and carbon dioxide trapping. *Energy Convers Manage* 1993;34:1005–13.
- Chisti Y.,** 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*;25(3): 294–306.
- Chiristie, W.W.,** 1990. Gas Chromatography and Lipids, The Oily Press, Glasgow, 302 p.

- Chiu S.Y., Kao C.Y., Tsai M.T., Ong S.C., Chen C.H., Lin C.S., 2009.** Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresource Technology*;100:833–8.
- Chojnacka K., Marquez-Rocha F.J., 2004.** Kinetic Stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae. *Biotechnology*;3(1):21–34.
- Corelli D. L., 1999.** Phosphorus: A Rate Limiting Nutrient in Surface Waters, *Poultry Science*, 78: 674–682.
- Coutteau, P., 1996.** Micro-algae, p. 7-48. *In*: Lavens, P. & Sorgeloos, P. (Eds.). Manual on the production and use of live food for aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper 361. FAO, Rome.
- De Morais M.G., Costa J.A.V., 2007.** Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. *Biotechnology Letters*; 29(9):1349–52.
- De Morais M.G., Costa J.A.V., 2007.** Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*; 48(7):2169–73.
- De Pauw N., Morales J., Persoone G., 1984.** Mass culture of microalgae in aquaculture systems: progress and constraints. *Hydrobiologia*; 116/117: 121–34.
- Dönmez, G., Aksu, Z., 2002.** Removal of chromium(VI) from saline wastewaters by *Dunaliella* species. *Process Biochem.* 38, 751–762.
- Dumas A., Laliberte G., Lessard P., Noue J., 1998.** Biotreatment of fish farm effluents using the cyanobacterium *Phormidium bohneri*. *Aquaculture Engineering* ;17:57–68.
- Gressel J., 2008.** Transgenics are imperative for biofuel crops. *Plant Science*;174(3):246–63.
- Grima M.E., Belarbi E.H., Fernandez F.G.A., Medina A.R., Chisti Y., 2003.** Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*; 20(7-8):491–515.
- Hsieh, C.H., Wu W.T., 2009.** Cultivation of microalgae for oil production with a cultivation strategy of urea limitation. *Bioresource Technology* 100 (17), 3921–3926.

- International Energy Agency (IEA) 2007. World Energy Outlook 2007. China and India Insights, Paris, France.
- Iwasaki I., Hu Q., Kurano N., Miyachi S.,** 1998. Effect of extremely high-CO₂ stress on energy distribution between photosystem I and photosystem II in a ‘high- CO₂’ tolerant green alga. *Chlorococcum littorale* and the intolerant green alga *Stichococcus bacillaris*. *Journal of Photochemistry and Photobiology* ; B44:184–90.
- Jacob-Lopes E., Scoparo C.H.G., Lacerda L.M.C.F., Franco T.T.,** 2009. Effect of light cycles (night/day) on CO₂ fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors. *Chemical Engineering and Processing*; 48(1): 306–10.
- Jimenez-Perez M.V., Sanches-Castillo P., Romera O., Fernandez-Moreno D., Perez-Martinez C.,** 2004. Growth and nutrient removal in free and immobilized planktonic green algae isolated from pig manure. *Enzyme and Microbial Technology*; 34:392–8.
- Kadam K.L.,** 1997. Power plant flue gas as a source of CO₂ for Microalgae cultivation: economic impact of different process options. *Energy Conversion and Management*;38(Suppl.):505–10.
- Kaewpintong K.** Cultivation of *Haematococcus pluvialis* in Airlift Bioreactor. Master thesis in Chemical Engineering. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University; 2004.
- Kates, M.,** 1988. *Techniques of Lipidology; Isolation, Analysis and Identification of Lipids*, 2. nd Revised Edition, Newyork, 278.
- Kheira A.A.A., Atta N.M.M.,** 2008. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficit: yield, water use efficiency and oilseed characteristics. *Biomass and Bioenergy*; in press. doi:10.1016/j.biombioe..05.015.
- Krohn B., McNeff C.V., Yan B., Nowlan D.,** 2011. Production of algae-based biodiesel using the continuous catalytic Mcgyan process *Bioresource Technology* 102 94–100.
- Laherrere J.,** 2005. Forecasting production from discovery. In: ASPO.
- Laliberte G., Lessard P., Noue J., Sylvestre S.,** 1997. Effect of phosphorus addition on nutrient removal from wastewater with the cyanobacterium *Phormidium bohneri*. *Bioresource Technology* ;59:227–33.

- Li Y., Horsman M., Wu N., Lan C.Q., Dubois-Calero N.,** 2008. Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress*.
- Li Y., Wang B., Wu N., Lan C.Q.,** 2008. Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid production of *Neochloris oleoabundans*. *Applied Microbiology and Biotechnology*.
- Macedo R.V.T., Alegre R.M.,** 2001. Influência do Teor de Nitrogênio no Cultivo de *Spirulina Maxima* em Dois Níveis de Temperatura – Parte II. Produção de Lipídios. *Ciência e Tecnologia Alimentar Campinas*;21(2):183–6.
- Martinez M.E., Sanchez S., Jimenez J.M., El Yousfi F., Munoz L.,** 2000. Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*. *Bioresource Technology*;73(3):263–72.
- Maxwell E.L., Folger A.G., Hogg S.E.,** 1985. Resource evaluation and site selection for microalgae production systems. SERI/TR-215-2484; May.
- Moheimani N.R.,** 2005. The culture of Coccolithophorid Algae for carbon dioxide bioremediation. PhD thesis. Murdoch University.
- Mostert, E.S.,** 1987, The Influence of Nitrogen and Phosphorus on Algal Growth and Quality in Outdoor Mass Algal Cultures, *Biomass*. 13, 219- 233.
- Muslu, Y.,** “Göl ve Haznelerde su Kalitesi Yönetimi”, İSKİ, 2001.
- Olguin E.J., Galicia S., Mercado G., Perez T.,** 2003. Annual productivity of *Spirulina* (*Arthrospira*) and nutrient removal in a pig wastewater recycle process under tropical conditions. *Journal of Applied Phycology*; 15:249–57.
- Patil, H.S.,** 1990. The role of *Ankistrodesmus falcatus* and *Scenedesmus quadricauda* in Sewage Purification, *Bioresource Technology*; 37, 121-126.
- Piccolo T.,** 2008. Aquatic biofuels. *Globe Fish-FIIU*, Available at: <http://www.globefish.org/files/Aquaticbiofuels638.pdf>.
- Pirt S.J.,** 1986. The thermodynamic efficiency (quantum demand) and dynamics of photosynthetic growth. *New Phytol* 1986;102:3–37.
- Pulz O., Gross W.,** 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*;65(6):635–48.
- Raja R., Hemaiswarya S., Kumar N.A., Sridhar S., Rengasamy R.,** 2008. A perspective on the biotechnological potential of microalgae. *Critical Reviews in Microbiology*;34(2):77–88.

- Renaud S.M., Thinh L.V., Parry D.L.,** 1999. The gross chemical composition and fatty acid composition of 18 species of tropical Australian microalgae for possible use in mariculture. *Aquaculture*;170:147–59.
- Richmond A.,** 2004. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. Blackwell Science Ltd.
- Rodolfi L., Zittelli G.C., Bassi N., Padovani G., Biondi N., Bonini G., et al.,** 2009. Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering* 102(1):100–12.
- Rosenberg J.N., Oyler G.A., Wilkinson L., Betenbaugh M.J.,** 2008. A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. *Current Opinion in Biotechnology*; 19(5):430–6.
- Saatci, Y., Arslan, E.I., Konar, V.,** 2003. Removal of Fatty Materials (Total Lipid and Fatty Acids) in UASB Reactor, *Bioresource Technology*, 87, 269-272.
- Sakai N., Sakamoto Y., Kishimoto N., Chihara M., Karube I.,** 1995. Chlorella strains from hot springs tolerant to high temperature and high CO₂. *Energy Conversion and Management*;36(6–9):693–6.
- Sawayama S., Minowa T., Yokoyama S.Y.,** 1999. Possibility of renewable energy production and CO₂ mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae. *Biomass and Bioenergy*;17(1):33–9.
- Sheehan J., Dunahay T., Benemann J., Roessler P.,** 1998. A look back at the U.S. Department of Energy's aquatic species program: biodiesel from algae. NREL/TP-580-24190, National Renewable Energy Laboratory, USA.
- Sobczuk T.M., Camacho F.G., Rubio F.C., Fernandez F.G.A., Grima E.M.,** 2000. Carbon dioxide uptake efficiency by outdoor microalgal cultures in tubular airlift photobioreactors *Biotechnol. Bioeng.* 67/4, p.465.
- Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A.,** 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*;101(2): 87–96.
- Stainier R. Y., Kunisawa R., Mandel M., Choen B.,** 1971. Purification and properties of a unicellular bluegreen alga (order *Chroococcales*). *Bacteriological Reviews*, Vol. 35, pp. 171-205.

- Tanaka, H., Ogonna, J.C., Yada, H. and Masui, H.,** 1996. A novel internally illuminated stirred tank photobioreactor for large-scale cultivation of photosynthetic cells, *Journal of fermentation and bioengineering*, 82, 61-67.
- Teixeira C.M., Morales M.E.,** 2007. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. *Revista: Biodiesel o Novo combustível do Brasil*. pp. 91–6.
- Tsukahara K., Sawayama S.,** 2005. Liquid fuel production using microalgae. *Journal of the Japan Petroleum Institute*; 48(5):251–9.
- Torzillo G., Pushparaj B., Masojidek J., Vonshak A.,** 2003. Biological constraints in algal biotechnology. *Biotechnol Bioprocess Eng*;8:338–48.
- Toyub, M. A., Miah, M. I., Habib, M. A. B. and Rahman, M. M.,** 2008. Growth Performance and Nutritional Value of *Scenedesmus Obliquus* Cultured in Different Concentrations of Sweetmeat Factory Waste Media, *Bang. J. Anim. Sci.* 37 (1) : 86 – 93.
- Ugwu C.U., Aoyagi H., Uchiyama H.,** 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*; 99(10):4021–8.
- Vanitha, A., Narayan K., Murthy N.C., Ravishankar G.A.,** 2007. Comparative study of lipid composition of two halotolerant algae, *Dunaliella bardawil* and *Dunaliella salina*. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 58, 373–382.
- Volkman J.K., Jeffery S.W., Nichols P.D., Rogers G.I., Garland C.D.,** 1989. Fatty acid and lipid composition of 10 species of microalgae. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 128, 219–240.
- Voltolina D., Cordero B., Nieves M., Soto L.,** 1998. Growth of *Scenedesmus* sp. in artificial wastewater, *Bioresource Technology*, 68, p265-268.
- Yeesang C. and Cheirsilp B.,** 2011. Effect of nitrogen, salt, and iron content in the growth medium and light intensity on lipid production by microalgae isolated from freshwater sources in Thailand, *Bioresource Technology*, 102, (3),3034-3040.
- Wang B., Li Y., Wu N., Lan C.Q.,** 2008. CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*; 79(5):707–18.
- Warabi Y., Kusdiana D., Saka S.,** 2004. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. *Bioresource Technology*;91(3): 283–7.
- Weher D.J., Sheath R.G.,** 2003. Freshwater Habitats of Algae, *Freshwater Algae of North America*, 11-57.

- Weissman J.C., Goebel R.P.,** 1987. Design and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels: a subcontract report. US DOESERI.
- Williams J.A.,** 2002. Keys to Bioreactor selection. CEP Magazine; 34–41.
- Zappi M., Hernandez R., Sparks D., Horne J., Brough M., Swalm D.C., et al.,** 2003. A review of the engineering aspects of the biodiesel industry. MSU E-TECH Laboratory Report ET-03-003.
- Zeiler K.G., Heacox D.A., Toon S.T., Kadam K.L., Brown L.M.,** 1995. Use of microalgae for assimilation and utilization of carbon dioxide from fossil fuel-fired power plant flue gas. Energy Conversion and Management;36(6–9):707–12.
- Zhu C.J., Lee Y.K.,** 1997. Determination of biomass dry weight of marine microalgae. Journal of Applied Phycology; 9.189–94.

ÖZGEÇMİŞ

01.05.1984 tarihinde doğdu. İlk ve Orta Öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2003 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde öğrenim görmeye hak kazandı. 2007 bahar döneminde öğrenim gördüğü üniversiteden mezun oldu. 2009-2010 eğitim-öğretim yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliğinde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2010 yılında Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğünde Çevre Mühendisi olarak göreve başladı. 2013 yılında Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Ankara da görevine devam etmektedir. Evli olan Demet Kılınç Öztürk, İngilizce bilmektedir.