

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**MİKROALG YETİŞTİRİCİLİĞİ YOLUYLA BACA GAZI KAYNAKLI
KARBONDİOKSİT AZALTIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Okan SAYANER

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**MİKROALG YETİŞTİRİCİLİĞİ YOLUYLA BACA GAZI KAYNAKLI
KARBONDİOKSİT AZALTIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Okan SAYANER
(301101029)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Adem TEKİN

HAZİRAN 2013

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301101029 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Okan SAYANER**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**MİKROALG YETİŞTİRİCİLİĞİ YOLUYLA BACA GAZI KAYNAKLI KARBONDİOKSİT AZALTIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Adem TEKİN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özgül ÖZCAN TAŞPINAR**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nilgün KARATEPE YAVUZ

İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **2 Mayıs 2013**

Savunma Tarihi: **6 Haziran 2013**

Şhitlerimize,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda görüş ve desteklerini esirgemeyen Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Adem TEKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Mikroalg çalışmalarına ilgi duymama vesile olan, beraber başladığımız bu tez çalışmamın her aşamasında emeği bulunan, desteklerini görevi sebebiyle yurt dışından da sunan Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Coşkun FIRAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Öğrencilik hayatım boyunca kaliteli bir öğrenim görmemi sağlayan ve beni her zaman destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2013

Okan Sayaner
İşletme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	3
1.2 Tezin Amacı ve Aşamaları	9
2. MİKROALG YETİŞTİRİCİLİĞİ.....	11
2.1 Mikroalg Yetiştirme Sistemleri	13
2.1.1 Açık sistemler	14
2.1.1.1 Karıştırmasız havuzlar.....	14
2.1.1.2 Dairesel havuzlar	15
2.1.1.3 Su kanallı havuzlar	16
2.1.2 Kapalı sistemler (Fotobiyoreaktörler).....	17
2.1.2.1 Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler	19
2.1.2.2 Düz panel fotobiyoreaktörler	22
2.1.2.3 Dikey sütun fotobiyoreaktörler	23
2.2 Mikroalg Gelişimine Etki Eden Unsurlar.....	25
2.2.1 Işık.....	25
2.2.2 Sıcaklık.....	27
2.2.3 pH.....	27
2.2.4 Karıştırma.....	28
2.2.5 Besinler	29
3. TERMİK SANTRAL KAYNAKLI KARBONDİOKSİT SALINIMLARININ AZALTILMASI.....	31
3.1 Yakma Öncesi Yakalama	35
3.2 Oksijenli Yakma İle Yakalama	36
3.3 Yakma Sonrası Yakalama	36
3.4 CO ₂ 'nin Nakliyesi Ve Depolanması	37
3.5 Karbon Yakalama Teknolojilerinin Maliyetleri.....	38
3.5.1 Gazlaştırma üniteli kombine çevrimli yakma öncesi CO ₂ yakalama maliyeti	39
3.5.2 Oksijenli yakma ile CO ₂ yakalama maliyeti	39
3.5.3 Yakma sonrası yakalama ile CO ₂ tutum maliyeti	40
4. TERMİK SANTRALLER VE BACA GAZI ANALİZİ	41
4.1 Türkiye’de Termik Santraller	41
4.2 Kömür Yakıtlı Termik Santraller	42
4.3 Termik Santrallerin Baca Gazı İçerikleri	43

5. MİKROALG ÜRETİMİ YOLUYLA TERMİK SANTRAL KAYNAKLI CO₂ AZALTIMI	47
5.1 Baca Gazının Mikroalgler Üzerine Etkileri.....	49
5.2 Fizibilite Değerlendirmesi	53
5.2.1 Uygun arazi seçimi.....	55
5.2.2 Su ihtiyacı.....	56
5.3 Su Kanallı Havuz Yapısı	57
5.3.1 Su çarkları	58
5.3.2 Karbondioksitin havuzlara beslenmesi.....	60
5.4 CO ₂ Miktarına Bağlı Mikroalgal Biyokütle Verimi Ve Maliyet Analizi	62
5.4.1 Mikroalgal biyokütle verim değerleri	62
5.4.2 CO ₂ derişiminin etkisi	63
5.4.3 Maliyet	64
6. MİKROALGAL BİYOKÜTLE HASADI VE MİKROALG KÖKENLİ ÜRÜNLER	67
6.1 Mikroalg Hasadı Ve Biyokütle Eldesi.....	67
6.1.1 Flokülasyon (Topaklanma)	68
6.1.2 Santrifüjleme	68
6.1.3 Süzme (Filtration)	69
6.1.4 Yüzdürme (Flotation).....	70
6.1.5 Yer çekimi ile çökeltme (Gravity sedimentation).....	71
6.2 Mikroalg Kökenli Ürünler.....	71
6.2.1 Enerji ürünleri	71
6.2.1.1 Biyodizel.....	71
6.2.1.2 Biyoetanol.....	73
6.2.1.3 Biyogaz (Biyometan).....	74
6.2.2 Enerji dışı ürünler.....	74
6.2.2.1 Beşeri tüketim.....	74
6.2.2.2 Hayvansal tüketim	78
6.2.2.3 Kozmetik	78
6.2.2.4 Gübre	78
7. KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRAL İLE BÜTÜNLEŞİK MİKROALG ÜRETİM TESİSİ.....	81
7.1 Yatağan Termik Santrali.....	81
7.2 Maliyet İncelemesi	85
7.2.1 İnşaat maliyeti	87
7.2.1.1 Mikroalg yetiştirme ünitesinin kurulma maliyeti	88
7.2.1.2 Arazi edinimi	88
7.2.1.3 Yol ve ofis inşası maliyeti	90
7.2.1.4 Ekipman maliyeti.....	90
7.2.2 CO ₂ maliyeti.....	90
7.2.3 Gübre (azot ve fosfor) maliyeti	91
7.2.4 Hasat maliyeti.....	92
7.2.5 İşçilik maliyeti.....	92
7.2.6 Teçhizat giderleri.....	93
7.2.7 İşletme ve bakım maliyeti	93
7.3 Tesis Yapısı Ve Mikroalgal Biyokütle Değeri	93
7.4 CO ₂ Tutumu.....	94
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR.....	99

KISALTMALAR

CAER	: Kentucky Üniversitesi Uygulamalı Enerji Araştırma Merkezi
CCS	: Carbon Capture and Storage
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
GKP	: Gönüllü Karbon Piyasası
IEA	: International Energy Agency
KYD	: Karbon Yakalama ve Depolama
LCA	: Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assesment/Analysis)
MEA	: Monoethanolamine-amin
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
TTK	: Türkiye Taş Kömürü Kurumu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Yakıt türlerine göre birim elektrik üretimi başına CO ₂ salınımı.....	33
Çizelge 4.1 : Türkiye'nin kömür yakıtlı santralleri.....	42
Çizelge 4.2 : Tipik bir kömür yakıtlı güç santralının baca gazı bileşimi.....	44
Çizelge 4.3 : Rutenberg Güç Santrali'nin ortalama baca gazı bileşimi, Ashkelon, İsrail.....	44
Çizelge 4.4 : Kombine çevrimli doğal gaz santralının baca gazı bileşimi, Regine, Kanada.....	44
Çizelge 4.5 : Wyodak Tozlaştırılmış Kömür Yakıtlı Güç Santrali'nin baca gazı içeriği, Wyoming Eyaleti, ABD.....	45
Çizelge 4.6 : Coronado Kömür Yakıtlı Güç Santrali'nin baca gazı içeriği (ortalama), Arizona Eyaleti, ABD.....	45
Çizelge 5.1 : Chlorella KR-1 türünün SO ₂ 'ye olan tepkisi.....	52
Çizelge 5.2 : Su kanallı havuzlar için mikroalg verim değerleri.....	63
Çizelge 5.3 : Scenedesmus obtusiusculus türünün farklı CO ₂ derişimleri için büyüme değerleri.....	64
Çizelge 5.4 : Christchurch atık su arıtma tesisinin su kanallı havuz maliyetleri.....	65
Çizelge 6.1 : Mikroalgler ve diğer biyodizel hammaddeleri.....	72
Çizelge 6.2 : Bazı mikroalg cinslerinin ve türlerinin yağ içerikleri.....	73
Çizelge 6.3 : Çeşitli mikroalglerin metan verimleri.....	74
Çizelge 6.4 : Mikroalg üretim miktarları.....	75
Çizelge 6.5 : Mikroalg kökenli önemli çoklu doymamış yağ asitleri.....	77
Çizelge 6.6 : Çeşitli mikroalglerde DHA üretimi.....	77
Çizelge 6.7 : Çeşitli mikroalglerde EPA üretimi.....	78
Çizelge 7.1 : Baca gazı temizleme verimleri.....	83
Çizelge 7.2 : Her bir ünitenin ham baca gazı verileri (maksimum yükte).....	83
Çizelge 7.3 : Her bir baca gazı ünitesindeki temiz gaz verileri.....	84
Çizelge 7.4 : Mikroalg üretim tesisinin maliyet bileşenleri ve değerleri.....	86
Çizelge 7.5 : Tesisin inşaat giderlerini oluşturan kalemler.....	87
Çizelge 7.6 : Mikroalglerin kaba kimyasal formüle göre besin ihtiyaçları.....	91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : CAER’de bulunan 250 m ² büyüklüğündeki mikroalg tesisinin iki farklı açıdan görüntüsü.	4
Şekil 1.2 : CAER tesisinden iki farklı fotobiyoreaktör.	4
Şekil 1.3 : Seambiotic firmasının mikroalg yetiştirme tesisi.	7
Şekil 1.4 : Seambiotic tesisinde CO ₂ kaynağı olan termik santral bacası ve üzerindeki ünite.	7
Şekil 1.5 : Niederaussem mikroalg yetiştirme tesisinde kullanılan fotobiyoreaktörler.	8
Şekil 2.1 : Ticari olarak yetiştirilen mikroalg türlerinin mikrografları: (1) Spirulina (Arthrospira platensis), (2) Dunaliella salina, (3) Chlorella vulgaris, (4) Haematococcus pluvialis.	11
Şekil 2.2 : Küme kültüründe mikroalg büyüme oranlarının (düz çizgi) ve besin derişimlerinin (kesikli çizgi) şematik gösterimi.	12
Şekil 2.3 : (a) Atık su arıtımı amaçlı oksidasyon havuzu (Napa, CA, 121 ha) (b) Dunaliella salina havuzları (Cognis-Betatene, SA, Avustralya, herbiri 40 ha).	15
Şekil 2.4 : Dairesel havuzlarda Chlorella üretimi (Chlorella Industries, Japonya) ..	15
Şekil 2.5 : ~0,4 hektar büyüklüğündeki Spirulina üretim havuzları, Earthrise Nutritionals, LLC, California.	16
Şekil 2.6 : Cyanotech firmasının mikroalg üretim tesisi, Hawaii, ABD.	17
Şekil 2.7 : Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlerin şematik gösterimi.	19
Şekil 2.8 : Dikey konumlu tüp şeklindeki fotobiyoreaktör (Haematococcus pluvialis üretimi, 100 metre uzunluk 5 cm çap, AlgaTech. Co., İsrail)...	20
Şekil 2.9 : Dikey konumlu tüp şeklinde fotobiyoreaktör, AlgaePARC.	21
Şekil 2.10 : Yatay konumlu tüp şeklinde fotobiyoreaktör, AlgaePARC.	21
Şekil 2.11 : 1.000 litrelik sarmal tüp şeklindeki fotobiyoreaktör (Murdoch Üniversitesi, Avustralya.).	22
Şekil 2.12 : Düz panel fotobiyoreaktör, Arizona Eyalet Üniversitesi.	22
Şekil 2.13 : Düz panel fotobiyoreaktör, AlgaePARC.	23
Şekil 2.14 : Kabarcıklı sütun fotobiyoreaktör.	24
Şekil 3.1 : Mavi Harita senaryosundaki CO ₂ salınımı azaltım teknolojilerinin payları.	34
Şekil 4.1 : 2012 yılı Nisan ayı itibarıyla termik santral kurulu gücünün yakıt türüne göre dağılımı.	41
Şekil 5.1 : İki farklı CO ₂ derişimine sahip hava ile beslenen mikroalg kültür ortamları.	50
Şekil 5.2 : Farklı CO ₂ derişimlerinde Nannochloopsis oculata türünün gelişimi ve kültür pH değerinin zamanla değişimi.	51
Şekil 5.3 : 15 °C ve üstü yıllık ortalama sıcaklık değerleri ile mikroalg yetiştiriciliği için uygun iklime sahip yerler.	54
Şekil 5.4 : 1971-2000 yılları Türkiye ortalama sıcaklık normallerinin dağılımı.	54

Şekil 5.5 : 1981-2010 yılları Türkiye Yıllık Referans Toplam Buharlaşma (ETo) Normal Haritası.....	55
Şekil 5.6 : 4 hektar büyüklüğündeki bir su kanallı havuzun üstten görünüşü.	57
Şekil 5.7 : Christchurch atık su arıtma tesisinde bir su kanallı havuz, Yeni Zelanda.....	58
Şekil 5.8 : Tipik bir su çarkı.	59
Şekil 5.9 : Christchurch atık su arıtımı havuzunda kullanılan su çarkı	59
Şekil 5.10 : Baca gazı besleme amaçlı kültür sütunu.	61
Şekil 5.11 : Christchurch atık su arıtma tesisindeki CO ₂ besleme ünitesi.	61
Şekil 7.1 : Yatağan Termik Santrali.....	81
Şekil 7.2 : Yıllara göre brüt elektrik üretim miktarları.	82
Şekil 7.3 : Yıllara göre emre amadelik ve kapasite kullanım oranları.....	82
Şekil 7.4 : Yatağan Termik Santrali'nin çevresinin Google Earth görüntüsü.	89
Şekil 7.5 : Santralin güney doğusundaki tek parça büyük arazi.	89

MİKROALG YETİŞTİRİCİLİĞİ YOLUYLA BACA GAZI KAYNAKLI KARBONDİOKSİT AZALTIMI

ÖZET

Atmosferdeki karbondioksit (CO₂) seviyesi, endüstri devrimiyle beraber artışa geçmiş ve günümüzün en büyük çevre sorunu olan küresel ısınmanın bir numaralı sebebi olmuştur. Ülkeler bu duruma karşı Kyoto Protokolü'nü imzalayarak CO₂ salınımlarının kontrolü için çeşitli kararlar almışlardır.

Küresel ısınma ile ilgili stratejiler daha ziyade sera gazı salınımlarının azaltımını içerir. Bu, diğer bazı yöntemlerin yanı sıra, fosil yakıt kullanımının azaltımı ve karbon yakalama ile gerçekleştirilebilir. Mikroalgler her iki strateji için de önemli bir rol oynayabilir.

CO₂ salınımlarını kontrol altına almak için yapılacak en etkili uygulama fosil yakıt kullanımını önemli derecede azaltmaktır. Fakat ekonomilerin büyük oranda fosil yakıtlara bağlı olması ve fosil yakıt kullanımına alternatif olan teknolojilere geçişin kısa ve orta vadede pek mümkün gözükmemesi, fosil yakıt kullanımının devam edeceğini göstermektedir. Bu durumda fosil yakıtların kullanıldığı termik santrallerin CO₂ salınımları kontrol altına alınmalıdır.

Karbon yakalama ve depolama (Carbon Capture and Storage, CCS) teknolojileri olarak isimlendirilen yöntemlerle fosil yakıt kaynaklı CO₂ salınımları büyük oranda azaltılabilir. Ticari olarak başlangıç aşamasında olan bu teknolojiler üzerinde çalışmalar devam etmekte ve pilot ölçekte CO₂ tutumu gerçekleştirilmektedir. Mevcut bu yöntemler ile fiziksel ve kimyasal süreçler sonucunda CO₂'nin tutumu sağlanır.

Bu alanda üzerinde en çok çalışılan uygulama yöntemlerinden biri de, mikroalg yetiştirme havuzlarında endüstri ve enerji tesislerinin baca gazının kullanımı yoluyla karbondioksit azaltımı yöntemidir. Bu organizmaların yüksek yağ içeriği biyodizel üretimi için de onları değerli kılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, mikroalglerle ilgili çeşitli bilimsel araştırmalar yoğun bir şekilde yürütülmektedir.

Mikroalg biyokütlesinden çok farklı ürünler elde edilebilir. Biyodizel, biyoetanol, biyogaz (biyometan) mikrolalglerden elde edilebilecek temel enerji ürünleridir. Mikroalgler, yüksek değerli çeşitli kimyasal bileşikler için, kullanılan mikroalg türüne bağlı olarak, önemli bir hammaddedir. Elde edilen bu değerli bileşikler, gerek doğrudan beşeri beslenmede gerekse ilaç gibi çeşitli alanlarda kullanılarak beşeri kullanıma hizmet etmektedir. Mikroalgler, gübre ve hayvansal yem olarak kullanıldığı gibi kozmetik sektöründe de kullanılan bir hammaddedir.

Ülkemizin küresel ısınmaya yaptığı CO₂ katkısı 2010 yılı için 326 Mt değerindedir. 2010 yılındaki enerji kaynaklı CO₂ salınımları, Türkiye kaynaklı tüm salınımların %85'ini oluşturmaktadır ve elektrik üretimi 106 Mt CO₂ salınımları ile toplam CO₂ salınımlarının yaklaşık %33'ünü oluşturmaktadır. 1990-2010 yılları arasında Türkiye'nin sera gazı

salınımındaki toplam artış oranı %114 olmuştur. Bu çerçevede CO₂ salınımı açısından Türkiye'nin geleceği riskli görünmektedir.

Mikroalgler mikron mertebesinde büyüklükte olan canlılardır. Fotosentetik olan mikroalg türleri tıpkı büyük bitkiler gibi fotosentez aracılığı ile CO₂'yi biyokütleyle dönüştürürler. Mikroalgleri CO₂ tutumu konusunda diğer bitkilerden üstün kılan en önemli özellikleri, türüne göre değişmekle beraber, bir gün gibi kısa sürede biyokütlelerini ikiye katlayabilmeleridir. Bu tez çalışmasında, termik güç santrali kaynaklı CO₂'nin azaltılması amacıyla, termik santral ile bütünleşik bir mikroalg yetiştirme tesisi teknik ve ekonomik açıdan teorik olarak ele alınmıştır. Çalışmada, Yatağan Termik Santrali ile bütünleşik bir teorik mikroalg üretim tesisi ele alınmış ve mikroalgal verim değeri 73 ton/ha-yıl (20g/m²-gün) olarak kabul edilmiştir. Böylece, bir yılda bir hektardan bir ton mikroalg biyokütlesi elde etme maliyeti 644,79 TL olarak hesaplanmıştır. Planlanan tesiste, yılda 238 bin 725 ton CO₂ salınımı azaltımının mümkün olabileceği ve buna göre de, 1 ton CO₂ salınımı azaltmanın maliyetinin 352,34 TL olduğu hesaplanmıştır. Kültür ortamına sağlanan CO₂'nin değerlendirilme (tüketim) oranının %80 olduğu göz önüne alındığında, kültür ortamına yılda 298 bin 406 ton CO₂'nin beslenmesi gerektiği gözlenmiştir.

Yapılan bütün irdelemeler ve hesaplamalar sonucunda, biyokütle elde etme amaçlı bütünleşik bir mikroalg yetiştirme tesisi vasıtasıyla, önemli ölçüde CO₂ azaltımının mümkün ve ayrıca ekonomik açıdan da avantajlı bir yöntem olabileceği gösterilmiştir.

CARBON DIOXIDE REMOVAL FROM FLUE GAS BY MICROALGAE CULTIVATION

SUMMARY

Atmospheric carbon dioxide (CO₂) level has been increased since the industrial revolution and become the number one reason of global warming which is the most significant environmental problem of today's world. The countries have taken several decisions to control CO₂ emissions by signing the Kyoto Protocol.

Global warming-related strategies involve the studies on reduction of greenhouse emissions rather than the other concerns. This can be performed with the reduction of fossil fuels usage and carbon capture as well as other methods. Microalgae can play an important role for both strategies.

The most effective treatment for controlling CO₂ emissions is to significantly reduce the fossil fuels usage. However, because the world's economies are largely dependent on fossil fuels and to transfer to alternative technologies of fossil fuels is unlikely in a short and medium term, it indicates that the use of fossil fuels will be continued. In this case, CO₂ emissions from thermal power plants using fossil fuels should be controlled.

CO₂ emission from fossil fuels can be greatly reduced by Carbon Capture and Storage (CCS) techniques. The studies on these technologies are in the initial stage commercially and still continue. Meanwhile the CO₂ capture has been carried out in pilot scale. Applying the present methods, CO₂ is captured using physical and chemical processes.

In this field, one of the most studied application method is CO₂ reduction using flue gases from industrial and power generation plant in microalgae cultivation. High fat content of these organisms makes them valuable for biodiesel production. Therefore, various scientific researches about microalgae have been carried out.

Different types of products can be obtained from microalgae biomass. Bio-diesel, bio-ethanol and bio-gas (bio-methane) are the main energy products which can be obtained from microalgae. For various high valuable chemical compounds, microalgae is an important raw material depending on its species used. These valuable compounds can be utilized either directly as human nutrition or in several areas such as pharmacy. Beside usage of microalgae as fertilizer and animal feed, microalgae are also a raw material in cosmetic industry.

In 2010, Turkey's contribution to global warming is 326 million tons of CO₂. In Turkey, CO₂ emission by energy production is 85% of the total emissions of the country and 106 Mt of CO₂ emission from electricity generation is approximately 33% of the country's total CO₂ emission in 2010. Between the years 1990-2010, total increase of greenhouse gases was in the ratio of 114 percent. Therefore, the future of the country seems risky in terms of CO₂ emissions.

Microalgae is a micron-sized living creature. Just like the other big plants, photosynthetic microalgal species convert CO₂ to biomass through photosynthesis. Depending on the species, the most important feature of microalgae which makes them superior in CO₂ capture over the other plants is the ability to double their biomass in two days. In this thesis study, for the purpose of reduction of CO₂ emission from a thermal power plant, a microalgae cultivation plant integrated to a thermal power plant are discussed and studied theoretically in technical and economic point of view. In the present study, a theoretical microalgae production plant integrated to Yatağan Thermal Power Plant is considered and microalgal yield is recognized as 73 t/ha-y (20 g/m²-d). Thus, the cost of harvesting a ton of microalgae biomass per hectare per year is calculated as 644.79 TL. In such a planned facility, the reduction of CO₂ emission per year is estimated to be 238,725 tons thus it is calculated that the cost of CO₂ reduction per ton is 352.34 TL. Given the consumption ratio of 80 % of supplied CO₂ to the culture medium, 298,406 tons of CO₂ per year should be fed into the medium.

As a result of all the considerations and calculations, it is shown that a significant amount of CO₂ reduction is possible and also economically an advantageous method by the way of an integrated microalgae cultivation plant for the purpose of obtaining biomass.

1. GİRİŞ

Endüstri devrimiyle beraber atmosferdeki karbondioksit seviyesi, fosil yakıtların kullanılması sebebiyle yükselmeye başlamıştır. Endüstri çağı öncesi yaklaşık 278 ppm olan CO₂ derişimi, Şubat 2013'te 396 ppm olarak hesaplanmıştır [1]. CO₂ seviyesindeki artış küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Küresel ısınma sebebiyle mevsimlerin özellikleri değişmekte ve günümüzün temel çevresel sorunu olan iklim değişikliği yaşanmaktadır. İklim değişikliği çevre sorunu olarak değerlendirilmekle beraber, ekonomi alanında da etki yaratmaktadır. Dünya ülkelerince imzalanan protokollerle CO₂ salınımları kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Bu durum karbon ticaretini de beraberinde getirmiştir. Rüzgar, güneş ve hidroelektrik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi, fosil yakıtların aksine CO₂ salınımı yaratmadığı için, salınımı engellenen CO₂ miktarına göre karbon kredisi kazandırmaktadır.

CO₂ salınımını kontrol altına almak için yapılacak en etkili uygulama fosil yakıt kullanımını önemli derecede azaltmaktır. Fakat ekonomilerin önemli oranda fosil yakıtlara bağlı olması ve fosil yakıt kullanımına alternatif olan teknolojilere geçişin kısa ve orta vadede pek mümkün gözükmemesi, fosil yakıtlara olan talebin devam edeceğini göstermektedir. Bu durumda fosil yakıtların kullanıldığı termik santrallerin CO₂ salınımları kontrol altına alınmalıdır.

Karbon yakalama ve depolama teknolojileri olarak isimlendirilen yöntemlerle fosil yakıtların CO₂ salınımı büyük oranda azaltılabilir. Yakma öncesi, yakma sonrası ve oksijenli yakma olmak üzere 3 ana başlıkta değerlendirilen karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanması teknik açıdan mümkündür. Fakat bu yöntemler ile CO₂ azaltımının maliyeti, hedeflenen rakamların uzağındadır. CO₂ azaltım maliyetleri kullanılan teknolojiye, santral özelliklerine ve uygulamanın yapıldığı ülkeye göre değişiklik göstermektedir. Ticari olarak başlangıç aşamasında olan bu teknolojiler üzerinde çalışmalar devam etmekte ve pilot ölçekte CO₂ tutumu gerçekleştirilmektedir.

Termik santral kaynaklı CO₂ azaltımı için biyolojik bir yöntem olarak mikroalg yetiştiriciliği de ileri sürülmektedir. Mikroalgler mikron mertebesinde büyüklükte olan canlılardır. Fotosentetik olan mikroalg türleri tıpkı büyük bitkiler gibi fotosentez aracılığı ile CO₂'yi biyokütleyle dönüştürürler. Mikroalgleri CO₂ tutumu konusunda diğer bitkilerden üstün kılan en önemli özellikleri, türüne göre değişmekle beraber, bir gün gibi kısa sürede biyokütlelerini ikiye katlayabilmeleridir. 1 kg mikroalg biyokütlesi ortalama olarak 1,83 kg CO₂ tutabilmektedir [2]. Toprakta yetişen bitkilerin güneş enerjisini biyokütleyle dönüştürme verimleri genel olarak %1'den azken, mikroalgler güneş enerjisinin %2-4'ünü biyokütleyle dönüştürebilmektedir [3]. Mikroalgler atmosferdeki CO₂ derişiminden (%0,039; Şubat 2013) daha yüksek CO₂ içeren gaz karışımlarıyla beslendiğinde daha iyi büyüme değerleri sergileyebilmektedir. Kömür yakıtlı termik santral baca gazları ortalama olarak %10-15 oranında CO₂ içermektedir. Yapılan çok sayıda çalışma ile bu derişim seviyelerinde CO₂'ye dayanabilen çeşitli mikroalg türleri olduğu tespit edilmiştir.

Baca gazı kullanımı amacıyla bir termik santral ile entegre edilmiş mikroalg yetiştirme sistemleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda simule edilmiş gaz veya direkt baca gazı kullanılmıştır. Termik santrallerde kömür, doğal gaz ve petrol kökenli yakıtlardan elektrik üretilmektedir. Baca gazındaki CO₂ derişimi en yüksek olan santraller kömür yakıtlı santrallerdir. Mikroalg yetiştiriciliğinde daha yüksek oranda CO₂ içeren kömür yakıtlı termik santrallerin kullanılması daha fazla CO₂ azaltımı sağlamanın yanında, maliyetleri de daha düşük seviyelere çekecektir.

Kömür yakıtlı termik santral baca gazları, mikroalg gelişimi için engelleyici olabilecek kükürt oksitler (SO_x) ve azot oksitler (NO_x) gibi bileşikler de içermektedir. SO_x ve NO_x gazlarının mikroalg gelişimi üzerine etkilerini tespit etmek amacıyla yapılan çalışmalarda, bazı mikroalg türlerinin bu bileşiklere karşı tolerans gösterdiği görülmüştür.

Mikroalglerden biyodizel, biyoetanol, biyogaz gibi enerji ürünleri elde edilmekle beraber gıda ürünleri, besin takviyeleri, ilaç hammaddeleri, hayvan yemleri, kozmetik ürünleri ve gübre gibi değişik sektörlere yönelik ürünler de elde edilmektedir. CO₂ salınımı azaltmak amacıyla yapılan mikroalg yetiştiriciliği,

üretileen biyokütleden yukarıda sayılan ürünlerin de elde edilmesiyle, ekonomik açıdan daha uygulanabilir olacaktır.

Termik santral kaynaklı CO₂ salınımlarını azaltmak için mikroalg yetiştiriciliğinin büyük ölçeklerde yapılması gerekmektedir. Büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği, CO₂ salınımı azaltımı amacının yanı sıra, biyodizel üretimi amacıyla da araştırılmaktadır. Yetiştirilen mikroalglerle biyodizel gibi yenilenebilir enerji kaynağı elde edilmesiyle, fosil yakıtların kullanımından da bir miktar kaçınılmış olacaktır.

1.1 Literatür Araştırması

Literatürde termik santral baca gazıyla bütünleştirilmiş mikroalg yetiştiriciliği üzerine önemli çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir.

Kentucky Üniversitesi Uygulamalı Enerji Araştırma Merkezi'nde (CAER), kömür yakıtlı termik santrallerden salınan CO₂'nin yakalanması amacıyla mikroalglerin kullanılmasının tekno-ekonomik fizibilitesi üzerine geniş çaplı araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırma merkezinde mikroalg yetiştiriciliği için uygun maliyetli fotobiyoreaktör tasarımı ile flokülasyon ve çökeltmeye dayalı mikroalg hasadı için düşük maliyetli bir yaklaşım geliştirmeye çalışmışlardır. CO₂ tutumu için geliştirdikleri bu yaklaşımın uygulanabilir olması durumunda, üstesinden gelmesi gereken diğer bir takım zorlukların neler olabileceğini belirlemişlerdir. Şekil 1.1'de gösterilen 250 m²lik sera içerisindeki CAER'de, 15 litrelik fotobiyoreaktörlerden 8500 litrelik fotobiyoreaktörlere kadar farklı fotobiyoreaktörler kullanılmıştır. Şekil 1.2'de CAER'de bulunan çeşitli fotobiyoreaktörlerden ikisi görülmektedir. CAER'deki sistem sürekli çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yüzden mikroalglerin sürekli hasat edilmesi ve besin ilavesinin sürekli yapılması gerekmektedir. Sürdürülebilir büyüme için optimal mikroalg derişimi ve mevcut biyokütlenin bir kısmının sürekli hasadı amacıyla optimal yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Akışkan dinamikleri, akış hızı ve/veya karıştırma etkinliğindeki değişikliklerle alakalı beklenmeyen sistem değişkenleri sebebiyle kültürde meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla farklı ölçeklerdeki fotobiyoreaktörler kullanılarak yetiştirme yapılmıştır [3].



Şekil 1.1 : CAER’de bulunan 250 m² büyüklüğündeki mikroalg tesisinin iki farklı açıdan görüntüsü [4].



Şekil 1.2 : CAER tesisinden iki farklı fotobiyoreaktör [4].

Sudhakar K. ve arkadaşları [5], Hindistan için mikroalgler ile CO₂ azaltımını değerlendirmişlerdir. Mikroalg yetiştiriciliği için önemli olan arazi bulunabilirliği, iklim uygunluğu ve CO₂ salınım kaynakları gibi değişkenler Hindistan için ele alınmıştır. Çalışmada 500 MW kapasiteli kömür yakıtlı bir termik santralin CO₂ salınımının mikroalg yetiştiriciliği ile azaltılması için bazı kabuller ışığında gerekli arazi miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca karbon ticaretinden elde edilebilecek gelire değinilmiştir. Hindistan yüzölçümünün %2’si kadar alanda yapılacak mikroalg yetiştiriciliğinden elde edilecek biyoyakıtın, Hindistan’da ulaşım amacıyla kullanılan fosil yakıtların yerini tamamen alabileceği bildirilmiştir.

Stepan ve arkadaşları [6], kömür yakıtlı termik santral ile bütünleştirilmiş bir mikroalg CO₂ azaltımı sisteminin anahtar tasarım kriterlerini, teknik fizibilitesini ve ön ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Laboratuvar ölçeğinde mikroalg tabanlı CO₂ azaltımı sistemi kurulmuş ve simule edilmiş baca gazı kullanılarak mikroalg büyüme yeteneklerini doğrulamak amacıyla işletilmiştir.

Simule edilmiş baca gazında, 550 MW kapasiteli kömür yakıtlı Coal Creek Termik Santrali (Underwood, North Dakota) baca gazının ortalama bileşimi olan %12,1 CO₂, %5,5 O₂, 423 ppm SO₂, 124 ppm NO_x ve 50 mg/m³ uçan kül değeri esas alınmıştır. Yeşil ve mavi-yeşil mikroalg kültürlerinin karışımından oluşan kültürde, mikroalg büyümesinin SO₂ varlığında önemli ölçüde engellendiği görülmüştür. Bu projenin sonuçları ile kömür yakıtlı termik santrallerin CO₂ salınımlarının mikroalgler ile biyolojik tutumunun uygulanabilir olduğu doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar büyük bir teknolojik buluşa gerek kalmadan mikroalg sisteminin gerçekleştirilebilir olduğunu göstermiştir. Fakat CO₂ kütle transferi, mikroalg büyüme hızları ve hasat edilmiş biyokütleden gelir akışı sağlamak amacıyla strateji geliştirilmesi gibi daha ileri gelişmeler için anahtar tasarım kriterlerinin uygulanması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan ön ekonomik değerlendirme ekipman, işletim ve bakım maliyetlerini karşılamak için hasat edilen biyokütlenin tonunun yaklaşık 97 \$ değerinde olması gerektiğini göstermektedir.

“CSP Solutions” ve “Waste Handling and Management” firmaları, Melbourne’de bulunan “Western Treatment Plant” tesisindeki atık su arıtımı prosesinden geriye kalan biyokatıların (biyolojik katı maddelerin) ıslahı ve geri dönüşümü için proses geliştirmektedirler. Bu iki firma, biyokatıların piroliz gazlarının mikroalg biyokütle ile azaltılması için sürdürülebilir bir çözüm aramaktadırlar. Larsson ve Lindblom [7], gaz ve su temizleme performanslarını belirleme amacıyla, teknik bir çözüm tasarlayarak kurdukları sistemleri test etmişlerdir. Çalışmada temel mikroalg türü olarak, dayanıklı ve yüksek büyüme oranına sahip olması sebebiyle *Chlorella vulgaris* seçilmiştir. Deneyler Western Treatment Plant tesisindeki AGL Biyogaz Güç Santrali’nde yapılmıştır. Arıtılmamış baca gazı soğutma, filtrasyon ve sıkıştırma sisteminden geçirilerek iki farklı mikroalg yetiştirme sistemine gönderilmektedir. Her biri 25 litrelik yedi adet plastik dikey sütun fotobiyoreaktör ve 250 litrelik açık havuz sistemleri kullanılmıştır. Sistemler, açık havuzda mekanik karıştırıcı kullanılmasının yanı sıra, baca gazı girişinden hava kabarcıkları sağlanarak karıştırılmıştır. Mikroalgler kısmen arıtılmış atık suda yetiştirilmiştir. Biyokütle verimleri dikey sütun fotobiyoreaktör ve açık havuz için sırasıyla 0,43g/l-gün ve 0,26 g/l-gün olarak gözlenmiştir. Sudan çekilen azot miktarı dikey sütun fotobiyoreaktör için 54,62 mg/l-gün, açık havuz için 19,86 mg/l-gün olmuştur. Baca gazının değerlendirilme verimlilikleri CO₂ için %44, NO_x için %70, ve SO₂ için %100

olmuştur. Çalışmada ağır metaller de dikkate alınmıştır. İki günlük büyümenin ardından atık sudaki bakır derişimi %85, çinko derişimi %93; 4 günlük büyümenin ardından ise nikel derişimi %50 oranında azalmıştır. Toplam 78 hektar büyüklüğündeki bir açık havuz sistemi ile baca gazında %7,4 oranında CO₂ içeren AGL biyogaz güç santralının CO₂ salınımının tümünün tutulabileceği öne sürülmüştür.

Kadam [8], mikroalg üretimi için termik santral kaynaklı CO₂ kullanılmasının çevresel faydalarını belirlemek için bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yapmıştır. Sadece kömür kullanarak elektrik üretimi, kömür ve mikroalglerin birlikte yakıldığı elektrik üretim süreciyle karşılaştırılmıştır. Mikroalg ve kömürün beraber yakıldığı durumda, SO_x, NO_x, partikül, CO₂ ve metan (CH₄) salınımlarının ve fosil enerji kullanımının net değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. Karbonmonoksit (CO) ve hidrokarbonların (CH₄ hariç) salınımlarının istatistiki açıdan benzer olduğu bulunmuştur. Fakat mikroalg ile kömürün beraber yakıldığı durumda, su ile taşınan salınımlar, daha yüksek değerlerde olmuştur.

Büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği akademik çevreden olduğu kadar endüstriyel çevreden de yoğun ilgi görmektedir. Endüstriyel firmalar gerek biyodizel gibi enerji ürünü eldesi amacıyla gerekse de enerji dışı yüksek değerli (ek besinler gibi) ürünlerin eldesi amacıyla mikroalg yetiştiriciliği ile ilgilenmektedirler.

Kömür yakıtlı termik santrallerin CO₂ salınımlarını mikroalg yetiştiriciliğinde değerlendiren ilk firma 2003 yılında İsrail’de kurulan Seambiotic firmasıdır. İlk olarak mikroalglerden omega 3 yağ asitleri üretmek amacıyla kurulan firma şimdilerde biyoyakıtlar için de çalışma yapmaktadır. Seambiotic, araştırma ve geliştirme faaliyetlerini, Ashkelon’daki Israel Electric Corporation Termik Santrali’nde yer alan, Şekil 1.3’de gösterilen, toplam yaklaşık 1000 m²lik havuzlarda yürütmektedir. Santralden alınan baca gazları boru hattıyla direkt olarak açık havuzlara beslenmektedir. Şekli 1.4’te santralin bacasına eklenen üniteyi de içeren tesis resmi verilmektedir. Seambiotic pilot ölçekten büyük ölçekli endüstriyel mikroalg yetiştiriciliğine geçmektedir. Seambiotic tesislerinde, biyodizel ve biyoetanol üretimi için yağ ve karbonhidrat içeriği yüksek az sayıda ototrofik deniz mikroalgi türleri yetiştirilmektedir. Havuzlarda su çarkları ile karıştırma yapılmakla beraber verimliliği artırabilecek ve enerji tüketimini düşürebilecek alternatif karıştırma yöntemleri de araştırılmaktadır [9, 10].



Şekil 1.3 : Seabiotic firmasının mikroalg yetiştirme tesisi [9].



Şekil 1.4 : Seabiotic tesisinde CO₂ kaynağı olan termik santral bacası ve üzerindeki ünite [10].

RWE Power AG firması, Jacobs Üniversitesi, Forschungszentrum Jülich GmbH ve Phytolutions GmbH firmaları ile iş birliği yaparak, 3 yıl boyunca (2008-2011) kömür (linyit) yakıtlı termik santral baca gazı ile beslenen mikroalg yetiştiriciliği yapmışlardır. Niederaussem Güç Santrali'nin baca gazı, santralin bitişiğinde kurulan mikroalg yetiştirme tesisine borular ile taşınmıştır. Baca gazındaki su buharının borular içinde yoğuşmamasını sağlamak ve böylece borularda oluşabilecek korozyonu engellemek için, taşınacak baca gazı kurutulmuştur. Kurutulan baca gazı mikroalg üretim tesisine fan aracılığı ile taşınmıştır. Baca gazlarının güç santralinden, mikroalg üretim tesisine taşınması için 750 m uzunluğunda boru hattı kullanılmıştır. Tesiste Şekil 1.5'de gösterilen dikey kabarcık sütunu fotobiyoreaktörler kullanılmıştır. Büyüme şartlarının optimizasyonu için fotobiyoreaktörler sera içerisine alınmıştır. 1000 m² büyüklüğünde alana sahip olan tesisin ilk olarak 600 m²'si fotobiyoreaktörlere ayrılmıştır. Tesiste yıllık 6 ton mikroalg biyokütlesi (kuru bazda) üretilmiştir. 6 ton mikroalg biyokütlesinin tuttuğu CO₂ miktarı ise 12 ton olarak belirtilmiştir. RWE alg projesi, linyit yakıtlı güç santrallerinden sağlanan CO₂ ile yapılan mikroalg yetiştirmenin saf CO₂ kadar başarılı olabileceğini göstermiştir [11, 12].



Şekil 1.5 : Niederaussem mikroalg yetiştirme tesisinde kullanılan fotobiyoreaktörler [11].

1.2 Tezin Amacı ve Aşamaları

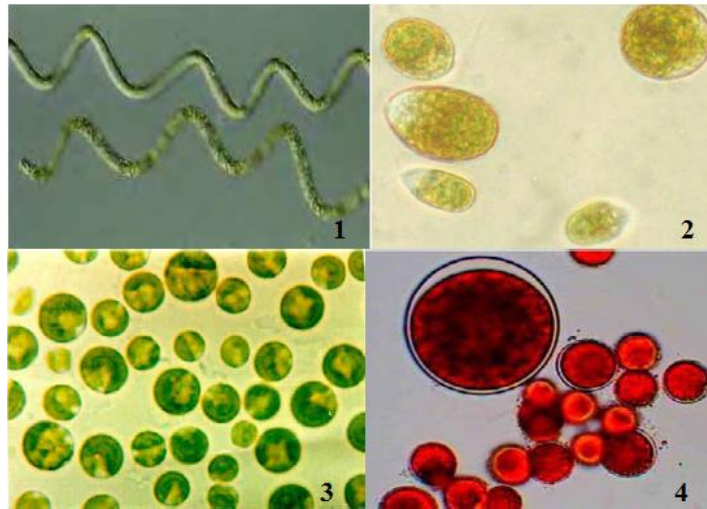
Bu çalışmada termik santral kaynaklı CO₂ salınımının azaltımında büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği bir yöntem olarak ele alınmış ve ayrıca mikroalg yetiştiriciliği ile Yatağan Termik Santrali'nin CO₂ salınımının azaltımına dair teknik ve ekonomik bir inceleme yapılmıştır. Bu tez çalışması aşağıdaki şekilde planlanmıştır:

2. bölümde mikroalgler ve mikroalg yetiştirme sistemleri ele alınmış, mikroalg gelişimine etki eden unsurlar kapsamlı şekilde incelenmiştir.
3. bölümde termik santral kaynaklı CO₂ salınımının azaltılmasında kullanılan karbon yakalama ve depolama yöntemleri ele alınmıştır.
4. bölümde Türkiye'nin elektrik üretiminde termik santrallerin öneminden bahsedilmiş ve termik santral baca gazlarının bileşenleri incelenmiştir.
5. bölümde mikroalg yetiştiriciliği ile kömür yakıtlı termik santrallerin CO₂ salınımlarının azaltılması detaylı şekilde ele alınmıştır. Bu çerçevede baca gazının mikroalg gelişimi üzerindeki etkileri, mikroalgal biyokütle verim değerleri ele alınmış ve fizibilite değerlendirilmesi yapılmaya çalışılmıştır.
6. bölümde mikroalg biyokütlesinin hasadı ve mikroalg biyokütlesinden elde edilebilecek ürünler incelenmiştir.
7. bölümde Yatağan Termik Santrali'nin CO₂ salınımının mikroalg yetiştiriciliği ile azaltılması senaryosu kurgulanmış, gereken hesaplamalar ve değerlendirmeler yapılmıştır.

2. MİKROALG YETİŞTİRİCİLİĞİ

Algler, makroalgleri (su yosunları) ve mikroalgleri içeren damarsız canlılardır [13]. Mikroalgler, tek hücreli veya basit çok hücreli yapıları sayesinde, çabucak büyüyen ve ağır şartlarda yaşayabilen, prokaryotik (hücre zarı olmayan ve çekirdeksiz, mavi-yeşil algler) veya ökaryotik (hücre zarı olan, bir ya da birkaç çekirdekli, yeşil ve kırmızı algler) mikroorganizmalardır [14]. Mikroalgler birkaç mikron ila 100 mikron büyüklükte olup çıplak gözle görülemezler. Mikroalgler tipik olarak havuzlarda, göllerde, okyanuslarda ve kesintili de olsa nemin uygun olduğu her yerde büyüyen mikroskopik bitkilerdir [13]. Mikroalgler bitkilerin en ilkel biçimidir.

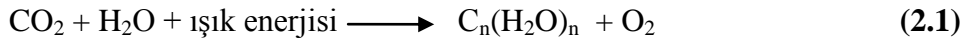
Biyologlar, mikroalgleri, esasen pigmentasyonuna (renklenme), yaşam çevrimine ve temel hücre yapısına göre ayırarak çeşitli sınıflara koymaktadırlar [15]. Birçok aileye, sınıfa, takıma ve cinse ait on binlerce mikroalg türü tanımlanmıştır. Mikroalg türleri, büyük bitki türlerinden sayıca daha fazladır. Bunlardan yeşil algler, diatomlar ve siyanobakteriler en önemlileridir. Yeşil algler ve diatomlar ökaryot, siyanobakteriler prokaryotturlar [13]. Şekil 2.1'de ticari olarak üretilen mikroalg türlerinin mikrografları verilmektedir. Spirulina bir siyanobakteri iken diğer üç tür yeşil alglerdendir (Chlorophyceae).



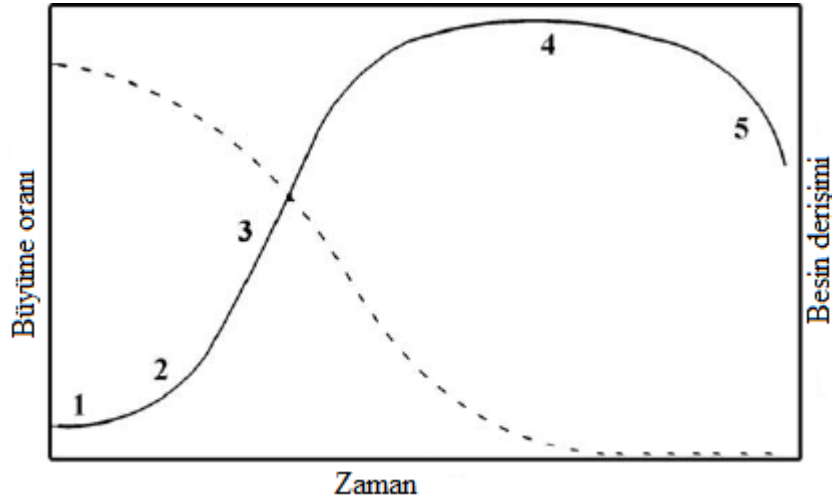
Şekil 2.1 : Ticari olarak yetiştirilen mikroalg türlerinin mikrografları: (1) Spirulina (*Arthrospira platensis*), (2) *Dunaliella salina*, (3) *Chlorella vulgaris*, (4) *Haematococcus pluvialis* [13].

Algler, fototropik, heterotropik ve mikstotropik büyüme teknikleri kullanılarak yetiştirilebilir. Heterotropik büyüme, ışıktan daha ziyade organik karbonun hücrel tüketimine, mikstotropik büyüme ise enerji kaynaklarının (ışık ve organik karbon) kombine kullanımına dayanır [16].

CO₂ azaltımı amacıyla yapılacak mikroalg yetiştiriciliğinde fototropik teknik kullanılmaktadır. Fotosentez sürecinde (Denk. 2.1), ışık enerjisi kullanılarak CO₂, hidrokarbonlara (C_xH_y) sabitlenir ve oksijen (O₂) açığa çıkar.



Şekil 2.2’de kültür ortamında mikroalg büyüme eğrisinin ve besin derişiminin zamanla değişimi verilmektedir. Şekilde beş ayrı büyüme evresi görülmektedir: (1) gecikme (lag) evresi; (2) özel koşullar altında en yüksek büyüme oranını ifade eden üstel (eksponansiyel) büyüme evresi; (3) doğrusal büyüme evresi; (4) sabit büyüme evresi; (5) düşüş veya ölüm evresi. Genel olarak üstel büyüme evresindeki mikroalg kültürleri daha çok protein içerirken, sabit evrede daha çok karbonhidratlar ve glikojen bulunmaktadır [14]. CO₂ salınımı azaltmak gibi amaçlar için sürekli yetiştirme tekniği uygulanır. En iyi mikroalg biyokütle verimine ulaşmak için, kültür ortamının sürekli üstel büyüme evresi koşullarını taşıması sağlanmalıdır.



Şekil 2.2 : Küme kültüründe mikroalg büyüme oranlarının (düz çizgi) ve besin derişimlerinin (kesikli çizgi) şematik gösterimi [14].

Mikroalgler genellikle 24 saat içinde kütlelerini ikiye katlarlar. Üstel büyüme sırasında bu süre 3,5 saate inmektedir. 1 ton mikroalg biyokütlesi kabaca 1,83 ton karbondioksit bağlar [2].

Açık havuzlarda mikroalg yetiştirme girişimi ilk defa Almanlar tarafından 2. Dünya Savaşı sırasında yapılmıştır. O zamanlarda, algler esas olarak gıda takviyesi amaçlı üretilmiştir [17]. Mikroalgler, 50 yılı aşkın süredir dünya genelinde, gıda ve yem üretimi, biyoyakıt üretimi, besin takviyesi ve atık su arıtımı gibi amaçlarla araştırılmaktadır. Günümüzde bu alanlara mikroalgler ile sera gazı azaltımı da eklenmiştir. Mikroalgler ile termik güç santrallerinden CO₂ yakalama konusunda çalışmalar hala devam etmektedir.

Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan, Çin gibi ülkelerde hızla büyüyen alg endüstrisinde, çoğu açık havuzlarda olmak üzere ağırlıklı olarak ek besin eldesi (nutritional supplements) amacıyla yıllık 10 bin tonun üzerinde mikroalg biyokütlesi üretilmektedir [18]. Ek besinler gibi yüksek değerli yan ürünler, şu an için temel ticari mikroalg ürünleridir. Bu ürünlerin pazarları büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği için çok küçük kalmaktadır. Ek besin olarak endüstriyel ölçekte üretilen ilk cins olan Chlorella, esas olarak Japonya ve Tayvan olmak üzere dünya genelinde yaklaşık 5.000 ton kadar üretilmekte ve tonu yaklaşık 20 bin dolara satılmaktadır. 1960'larda Afrika'daki alkali Çad Gölü'nün çevresinde yaşayan insanların geleneksel yiyeceği olarak keşfedilen Spirulina, 1970'lerin başlarında üretilmeye başlandı. Dunaliella salina, yüksek β -karoten içeriği için üretilmekte ve hipersalin (tuz miktarı 100g/l, deniz suyunun üç katından yüksek) büyüme ortamlarında yetiştirilmektedir. %4-5 oranında β -karoten içeren Dunaliella cinsinin dünya genelinde yılda yaklaşık 1.000 ton kadar üretildiği tahmin edilmektedir. Haematococcus pluvialis türünün üretiminde tatlı su kullanılmakta, %2 astaksantin içeriği ile tonu 100.000 \$'ın üzerinde satılmaktadır [13].

2.1 Mikroalg Yetiştirme Sistemleri

Mikroalgler çeşitli amaçlar için yetiştirilebilmektedir. Mikroalg yetiştiriciliği, mikroalg çalışmaları için başlangıç noktasıdır. Mikroalgler her ne kadar bitki olarak ele alınsa da, klasik tarım bitkilerinin yetiştirilme tekniğinden farklı tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Mikroalg biyokütlesi üretmek, bitki yetiştirmekten genellikle daha pahalıdır [2, 19]. Yetiştirme sistemi tercihi, mikroalglerle ilgili sonraki aşamaları şekillendirmesi sebebiyle, ayrı bir önem taşımaktadır.

Yetiştirme sistemleri genel itibarıyla açık sistemler ve kapalı sistemler olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir. Açık sistemler, açık havuzlar olarak, kapalı sistemler ise

fotobiyoreaktörler olarak isimlendirilebilmektedir. Açık havuz sistemi durumunda, iklim koşulları açık havuz üzerinde önemli rol oynamaktadır. Fotobiyoreaktörler ile yetiştirme durumunda ise maliyet unsuru öne çıkan husus olmaktadır.

2.1.1 Açık sistemler

Açık sistemler mikroalg yetiştiriciliğinin temel tekniğidir. Ticari mikroalg biyokütlesinin %98'inden fazlasının üretimi açık havuzlarda gerçekleşmektedir [20]. Açık sistemlerde, mikroalglerin doğal yaşamlarına benzer bir süreç söz konusudur.

Açık sistemin çeşitli üstünlükleri ve zayıflıkları bulunmaktadır. Başlangıç ve işletme maliyetlerinin düşük olması açık havuz sistemlerinin önde gelen üstünlükleridir. Açık havuz yetiştiriciliğinde sistem kontrolü zayıftır. İstenilen sonuçlara ulaşmak da bu sebepten zor olmaktadır. Sisteme olan hakimiyetin yetersizliği, istenilen miktarda mikroalgin üretilmemesi ve istenmeyen türlerin çoğalması gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Açık havuz sisteminde tek kültür yetiştirmek, uç değerlere sahip kültür ortamının korunmasıyla mümkün olmaktadır.

Hücrelerin ışıktan faydalanmalarının düşük olması, buharlaşma kayıpları, CO₂'nin atmosfere yayılması (diffusion) ve geniş arazi gereksinimleri açık havuz sistemlerinin temel kısıtlamalarını oluşturmaktadır [17].

Açık sistemlerde biyokütle verimi de düşüktür. Yetiştirilen mikroalgin en uygun büyüme şartlarını sağlamak, iyi bir verim için muhakkak gereklidir. Fakat mikroalgin büyümesine etki eden faktörleri optimize etmek, açık sistemlerde tam olarak başırlanamamaktadır. Sıcaklık ve ışık etmenlerinin tam yönetilememesi ve yetersiz karıştırma mekanizmaları, düşük biyokütle verimliliğine yol açmaktadır [17].

Farklı açık sistem mikroalg yetiştirme teknikleri mevcuttur. Her tekniğin birbirlerine göre verim, maliyet, sürdürülebilirlik gibi alanlarda üstünlükleri ve zayıflıkları bulunmaktadır. Açık havuz sistemleri karıştırmaz (unmixed), dairesel (circular) ve su kanallı (raceway) havuzlar olmak üzere 3 kategoride incelenebilir.

2.1.1.1 Karıştırmaz havuzlar

Karıştırmaz havuzlar kontrol edilemeyen bir yapıdadır. Bu havuzlara CO₂ temini verimli bir şekilde sağlanamaz. Şekil 2.3'te iki adet örneği gösterilen bu sistemler düşük verimlidirler. Avustralya'da β-karoten eldesi amacıyla mikroalg üretiminde ve

Meksika'daki Spirulina üretiminde kullanılan bu sistemler için arazinin müsait olması verimliliği sorun olmaktan çıkartmaktadır [13].



Şekil 2.3 : (a) Atık su arıtımı amaçlı oksidasyon havuzu (Napa, CA, 121 ha) (b) Dunaliella salina havuzları (Cognis-Betatene, SA, Avustralya, herbiri 40 ha) [20].

2.1.1.2 Dairesel havuzlar

Dairesel havuzlar, ticari alg üretiminde kullanılan ilk tasarımlardır. Merkezi pivot karıştırıcının kullanışsız hale gelmesinden ötürü dairesel havuzlar 1000 m²'nin üzerinde inşa edilmemektedir. Bu durum onları büyük ölçekli üretim için namüsait kılmaktadır. Şekil 2.4'te görülen, dairesel havuzlar, Japonya ve Uzak Doğu'da Chlorella üretimi için kullanılmaktadır [13].



Şekil 2.4 : Dairesel havuzlarda Chlorella üretimi (Chlorella Industries, Japonya) [20].

2.1.1.3 Su kanallı havuzlar

Su kanallı havuzlar genellikle derinliği 30 cm olan kapalı çevrim kanallarından yapılmıştır. Karıştırma ve dolaşım bir çark tarafından sağlanır. Kanallar betondan veya sıkıştırılmış topraktan yapılır. Kanallar beyaz plastik malzeme ile de kaplanabilir. Kanaldaki kültürün okelmesini engellemek için çark her zaman çalıştırılır.

Su kanallı havuzlar *Spirulina* (*Arthrospira platensis* ve *A. maxima*), *D. salina*, *Chlorella vulgaris* ve *Haematococcus pluvialis* (astaxanthin için) türlerinin üretiminde ve bazı atık su arıtma tesislerinde kullanılmaktadır [21].

En yaygın kullanılan açık sistem su kanallı havuzlardır. Su kanallı havuzlar tek olarak veya birkaçının seri bağlandığı şekilde işletilebilir. şekil 2.5'te, ek besin amaçlı mikroalg üretiminin yapıldığı, her biri yaklaşık 0,4 hektar byklğindeki su kanallı havuz tesisi görülmektedir. şekil 2.6'te Cyanotech firmasının *Spirulina* retimi yaptığı su kanallı havuzlardan oluşan üretim tesisi görülmektedir.



şekil 2.5 : ~0,4 hektar byklğindeki *Spirulina* retim havuzları, Earthrise Nutritionals, LLC, California.



Şekil 2.6 : Cyanotech firmasının mikroalg üretim tesisi, Hawaii, ABD [22].

2.1.2 Kapalı sistemler (Fotobiyoreaktörler)

Kapalı sistemler fotobiyoreaktör ismiyle de anılmaktadır. Fotobiyoreaktörler isminden de anlaşılacağı üzere mikroalglerin fotosentez ile büyümelerine imkan tanıyan yapılardır.

Fotobiyoreaktörler mikroalg kültürleri için korumalı bir ortam sunmaktadır. Fotobiyoreaktörlerin açık sistemlere karşı en büyük avantajı, sistem şartlarının çok daha iyi kontrol edilmesini sağlaması ve kirlenmelere karşı yetiştirme ortamını korumasıdır. Kirlenme, istenilen mikroalg türünün gelişimini olumsuz etkileyecek bileşenlerin sisteme girmesi ve yetiştirilmesi düşünülmeyen türlerin sistemde çoğalmasıdır. Açık havuzların aksine, fotobiyoreaktörler tek tür mikroalg kültürünün daha uzun süre var olmasını mümkün kılmaktadır.

Açık havuzlarla kıyaslandığında, fotobiyoreaktörler daha yüksek fotosentetik verim, biyokütle üretkenliği ve biyokütle derişimi sağlamaktadır. Fotobiyoreaktör sistemlerinin daha iyi çevre kontrolü ve hasat veriminden dolayı yüksek verimlilik potansiyeline sahip olması bu sistemler için bir üstünlüktür.

Fotosentez sonucu oluşan ürünlerden biri de oksijendir. Açık sistemlerde oluşan oksijen doğrudan atmosfere salınmakta iken fotobiyoreaktörlerde çözünmüş oksijen seviyesinin düzenlenmesi mikroalg gelişimi için önemli bir unsurdur. Haddinden

fazla çözülmüş oksijen fotosentezi engellemektedir [23]. Bu sebepten dolayı çözülmüş oksijenin bertarafı, fotobiyoreaktörlerde aşılması gereken bir problemdir. Bu durum fotobiyoreaktörlerin büyük ölçekte inşası açısından sıkıntı yaratmaktadır.

Aşırı ısınma, hücre hasarı, ışıklandırma aşamasında kullanılan malzemelerin bozunumu fotobiyoreaktör kullanımının diğer dezavantajları arasında yer almaktadır. Açık havuz sistemlerinde buharlaşma ile aşırı sıcaklık artışı engellenmekte iken, fotobiyoreaktörlerin kapalı yapısı buna imkan tanımamaktadır. Yetiştirme ortamı sıcaklığının belirli değerin üzerine çıkması verimi çok düşürmekte veya mikroalg gelişimini tamamen durdurabilmektedir. Mikroalg üretiminin devamını sağlamak için, sistemin aşırı ısınması durumunda soğutulması gerekmektedir. Teknik açıdan zahmetli olacak bu süreç aynı zamanda enerji girdisi de yaratarak maliyet kalemlerine bir yenisini ekleyecektir. Fotobiyoreaktör sistemlerinde oluşan yüksek kesme gerilimi mikroalg hücrelerinin hasar görmesine neden olmaktadır. Fotosentez için gerçekleştirilen ışıklandırma aşamasında, güneş ışınlarına maruz kalan malzemelerde bozunma gerçekleşmektedir.

Fotobiyoreaktörlerle küçük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği üzerine yapılan laboratuvar çalışmalarına dayanan yüzlerce yayına karşılık, ticari fotobiyoreaktör alg üretim sistemlerinin tasarımı, işletmesi, verimi ve diğer önemli açıları hakkında neredeyse hiç bilgi bulunmamaktadır. Fotobiyoreaktörlerin açık havuzlara olan üstünlüklerine rağmen, büyük ölçekli ticari uygulamalarda tercih edilmemesi dikkat edilmesi gereken bir husustur. Ticari üretime yönelik çalışmalar ve pilot tesisler mikroalg yetiştiriciliğinde fotobiyoreaktörlerin önünü açmada anahtar rolü üstlenecektir. Fotobiyoreaktörlerle büyük ölçekli mikroalg üretimine geçiş, mikroalglerin hizmet ettiği sektörler ve amaçlar için büyük bir kilometre taşı olacaktır.

Fotobiyoreaktörlerin boyları, yükseklikleri, çapları veya kültür sisteminin bölümlerinin sayısı artırılarak büyük ölçekli fotobiyoreaktör sistemi kurulabilir. En uygun ışık, sıcaklık, karıştırma ve kütle transferinin korunmasındaki zorluklar büyük ölçek çalışmalarını uğraştırıcı hale getirmektedir. Işık dağılımı ve karıştırma fototrofik kültürlerin verimliliğini etkileyen iki temel değişkendir ve fotobiyoreaktör tasarımında belirleyici rol oynamaktadır.

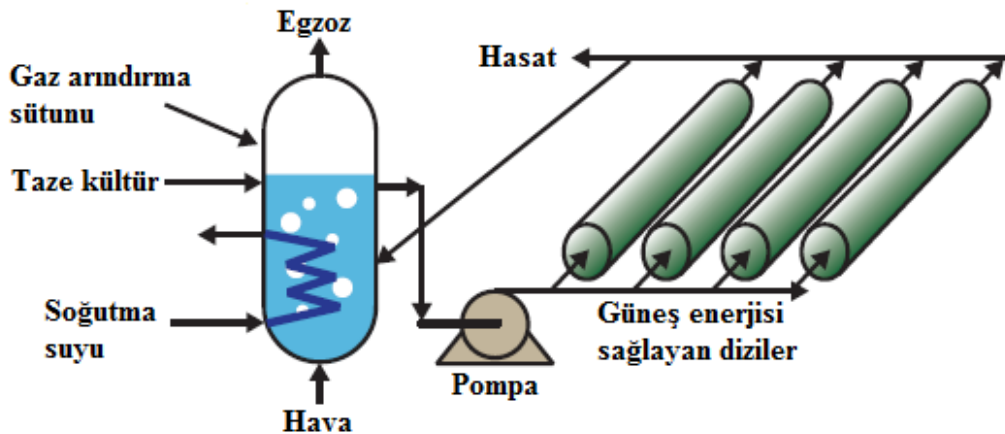
Fotobiyoreaktörler tasarımlarına ve çalışma şekillerine göre de sınıflandırılabilir. Çalışma şekline göre hava veya pompa karıştırmalı ve tek fazlı veya iki fazlı reaktörler olarak sınıflandırılabilir. Tek fazlı reaktörlerde gaz değişimi ayrı bir gaz değiştiricisinde gerçekleşir. İki fazlı reaktörlerde gaz kütle transferi reaktörün kendisinde gerçekleşir. Kullanılan yapı malzemeleri de cam veya plastik ve sert veya esnek olmak üzere ayrı sınıflar yaratabilir [24].

Reaktörler, geometrilerine göre tüp şeklinde, düz panel ve dikey sütun olarak da sınıflandırılabilir.

2.1.2.1 Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler

Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler değişik modellerde yapılmış saydam tüp dizilerini içermektedir. Bu diziler düz, kıvrık veya sarmal yapıda olabilir. Yüksek biyokütle verimliliğini sağlamak için genellikle 10 cm veya daha düşük çaplı tüpler gerekmektedir [25]. Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler dikey, yatay ve eğik dizilişlerde konumlandırılabilir.

Tüp şeklindeki fotobiyoreaktör temel olarak şu bileşenleri içermektedir: mikroalg gelişimi için güneş enerjisi sağlayan dizi, algleri süspansiyondan ayıran hasat ünitesi, gaz değişimi ve soğutma/ısıtma için gazdan arındırma kolonu ve sirkülasyon pompası. Şekil 2.7’de tüp şeklinde fotobiyoreaktörler için şematik bir gösterim verilmektedir.



Şekil 2.7 : Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlerin şematik gösterimi [26].

Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlerin en büyük kısıtlarından biri düşük kütle transferidir. Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlerin büyük ölçekli uygulamalarda

kullanılması durumunda kütle transferi (oksijen birikimi açısından) problem oluşturmaktadır [17].

Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler, önerilen fotobiyoreaktörler içerisinde açık hava mikroalg üretimi için en uygun tiplerdir. Tüp şeklindeki dış mekan fotobiyoreaktörlerinin çoğu genellikle cam veya plastik tüplerden yapılmıştır ve kültürleri pompa veya tercihen hava taşımalı (airlift) sistem ile devir ettirilmektedir [17].

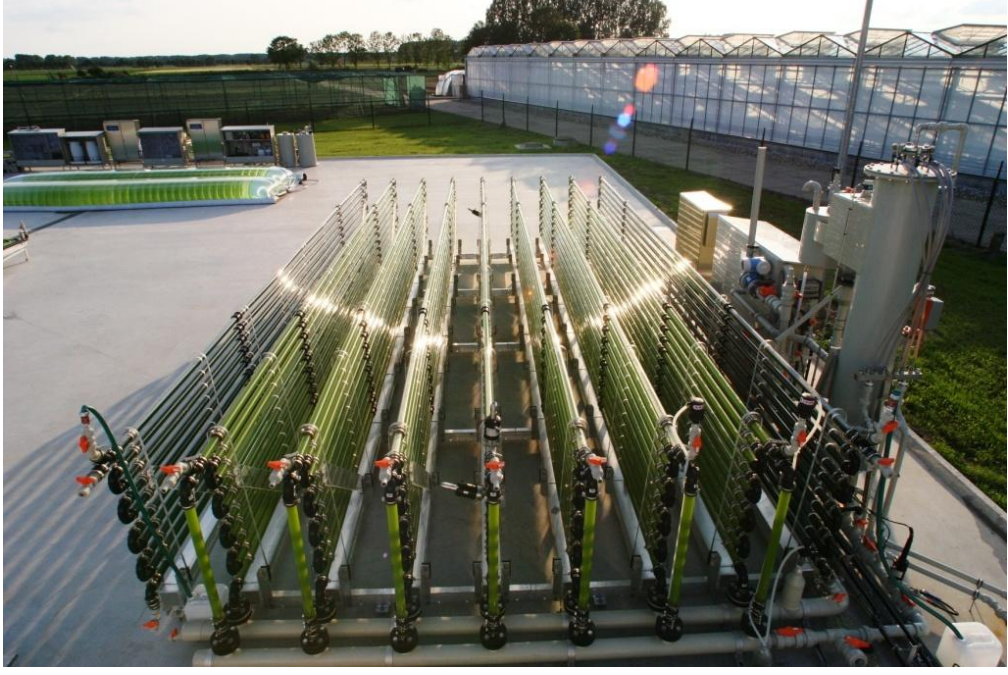
Tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlerde karıştırma, kültür ortamının devridaimi ile sağlanır. Gaz kütle transferi katsayısını artıran debinin yükseltilmesi, bu devridaimi sağlar. Kesme hızının artışının hücrelere zarar vermesi nedeniyle yüksek hızlar genellikle uygulanabilir değildir [25].

Optik yoğunluk ve gaz gidericilerin kapasitesine bağlı olarak, biyokütle üretimi yılda hektar başına 20 ile 60 ton arasındadır [27].

Yatay konumlu tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler dikey konumlu olanlara göre daha büyük yüzey alanı-hacim oranı sunmaktadır. Bunun sebebi yatay konumlandırmada tüp çapının azaltılmasının yapısal bütünlüğü bozmamasıdır. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da dikey konumlu, Şekil 2.10'da ise yatay konumlu tüp şeklindeki fotobiyoreaktörler gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Dikey konumlu tüp şeklindeki fotobiyoreaktör (*Haematococcus pluvialis* üretimi, 100 metre uzunluk 5 cm çap, AlgaTech. Co., İsrail) [20].



Şekil 2.9 : Dikey konumlu tüp şeklinde fotobiyoreaktör, AlgaePARC [28].



Şekil 2.10 : Yatay konumlu tüp şeklinde fotobiyoreaktör, AlgaePARC [28].

Şekil 2.11’de bir örneği gösterilen sarmal fotobiyoreaktörler, çapı küçük ve genellikle esnek tüplerden oluşur. Tüpler dikey bir yapı üzerine sarılmış şekildedir [24]. Sarmal fotobiyoreaktörler, kültürün yüzey alanı/hacim oranını artırmak için geliştirilmiştir. Böylece, hem kültür ortamına daha fazla ışık sağlanmış hem de yer gereksinimi giderilmiş olmaktadır [7].



Şekil 2.11 : 1.000 litrelik sarmal tp Şeklindeki fotobiyoreaktör (Murdoch Üniversitesi, Avustralya) [2].

2.1.2.2 Düz panel fotobiyoreaktörler

Düz panel fotobiyoreaktörler, kısa ışık yolu olan ve aydınlatılan yüzey ile hacim oranının yüksek olduğu fotobiyoreaktrlerdir. Bu sistemler güneş enerjisinden en yüksek miktarda faydalanmak iÇin gelen ıŐın aŐısına göre konumlandırılabilir (sun tracking). Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’de iki farklı düz panel fotobiyoreaktör gösterilmektedir.



Şekil 2.12 : Düz panel fotobiyoreaktör, Arizona Eyalet Üniversitesi [29].



Şekil 2.13 : Düz panel fotobiyoreaktör, AlgaePARC [28].

Tüp şeklindeki reaktörler için söz konusu olmayan, havalandırma sebebiyle yüksek gerilim oluşumunun hücrelere zarar vermesi düz panel fotobiyoreaktörler için bir zayıflık oluşturmaktadır [16].

Düz panel fotobiyoreaktörler, Sierra ve arkadaşlarına göre [30], fotosentetik mikroorganizmaların seri üretimi için önemli avantajlar içermektedir ve çeşitli mikroalg türlerinin seri üretimi için standart reaktör türü olabilir. Yüksek aydınlanma yüzey alanı sayesinde düz panel fotobiyoreaktörler, fotosentetik mikroorganizmaların yetiştirilmesinde bir hayli dikkat çekmektedir [17].

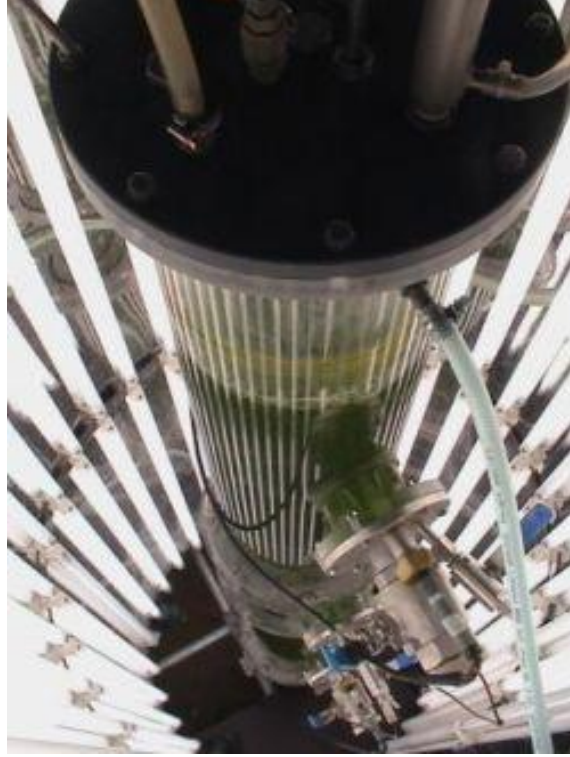
Güneş enerjisinden en üst düzeyde faydalanmak için düz panel fotobiyoreaktörlerde genellikle saydam malzemeler kullanılmaktadır. Yatay konumlu tüp şeklindeki fotobiyoreaktörlere kıyasla çözünmüş oksijen birikimi daha azdır [17].

2.1.2.3 Dikey sütun fotobiyoreaktörler

Hava taşımali ve kabarcık sütunu (bubble column) reaktörler dikey sütun reaktörlerin iki ana türüdür. Hava taşımali reaktörlerde, kültür ortamı, mekanik pompalama veya hareket eden parçalar olmadan dolaştırılmaktadır. Bu sayede kirlenme potansiyeli ve kesme kaynaklı hücre hasarları azalmaktadır [16].

Fotobiyoreaktörlerin kullanım süreleri, arızalanma durumları fotobiyoreaktör seçiminde bir ölçüt olarak değerlendirilebilir. Kabarcık sütunu ve hava taşımali

fotobiyoreaktörlerin inşalarının basit oluşu ve mekanik parçalara sahip olmayışları, uzun dönemli sürekli mikroalg yetiştiriciliği için önemli olan teknik arıza ihtimalini düşürmektedir. Hareketli parçaların olmaması ve kompaktlık, kabarcıklı dikey fotobiyoreaktörlerin bakım ve işletim maliyetlerini düşük tutmaktadır [31]. Şekil 2.14'te, kabarcıklı dikey bir fotobiyoreaktör gösterilmiştir.



Şekil 2.14 : Kabarcıklı sütun fotobiyoreaktör [32].

Dikey reaktörler, diğer reaktörlere göre daha az yer kaplar ve daha yüksek fotosentetik verimlilik sunarlar. Bununla birlikte ticari ölçekli uygulamalarda fotobiyoreaktör seçimi hususunda, dikey sütun fotobiyoreaktörler ölçeklenebilirlik zorluğuna en çok hassas olan fotobiyoreaktör tipidir [16].

Eğilmez (rigid) dikey fotobiyoreaktörler genel itibarıyla 40 santimetreye kadar çapa ve 4 metreye kadar yüksekliğe sahiptirler. Sütunların çapı küçüldükçe yüzey-hacim oranları artmaktadır. Yükseklik sınırlaması, gaz transferi hususu ve sütunların inşasında kullanılan saydam malzemelerin mukavemeti, sütunların yüksekliğini sınırlandırmaktadır [25]. Dikey sütun fotobiyoreaktörlerde çok miktarda ışık alma amacıyla karanlık bölgeyi küçük tutma çabası daha da zor olmaktadır.

Hava taşımalı fotobiyoreaktörlerin yüksek karıştırma özelliği nispeten büyük çaplı sütunlarda ve yüksek hücre yoğunluğunda bile hücrelerin ışıktan iyi bir şekilde

istifade etmelerini mümkün kılmaktadır [25]. En etkili karıştırma, en yüksek hacimsel gaz transfer oranları ve gelişme şartlarının en iyi kontrolü dikey sütun fotobiyoreaktörleri ön plana çıkarmaktadır. Deneysel fotobiyoreaktörler çoğunlukla dikey sütun olarak tasarlanmaktadır.

Mikroalg yetiştiriciliğinin yapılacağı sistemler birim mikroalg biyokütlesinin maliyetinde önemli paya sahiptirler. Şu ana kadar yapılan araştırmalar genel itibarıyla, düşük maliyet hedefine uygun olan sistemlerin açık bir sistem olan su kanallı havuzlar olduğunu göstermektedir. Su kanallı havuzlar, fotobiyoreaktörlere göre, daha düşük ilk yatırım maliyetine sahiptir ve enerji gereksinimleri daha düşüktür. Bununla birlikte, su kanallı havuzlar ile fotobiyoreaktörlerin ekonomik açıdan incelendiği bazı çalışmalarda, fotobiyoreaktörler ile mikroalg eldesinin daha düşük maliyetler ile gerçekleştirilebileceği öne sürülmüştür [33]. Kapalı sistemler olarak değerlendirilen fotobiyoreaktörler, birim alandan daha yüksek verim elde edilmesi sebebiyle mikroalg eldesinin maliyetlerini aşağıya çekme potansiyeline sahiptir. Fakat ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması fotobiyoreaktörlerin zayıf noktasıdır. Bununla birlikte fotobiyoreaktörler genellikle laboratuvar ölçeğinde test edilen yetiştirme sistemleridir. Alabi ve arkadaşlarının çalışmasında [34], fotobiyoreaktörler ile mikroalg yetiştiriciliğinin enerji üretimi için ekonomik olarak uygun olmadığı belirtilmiştir.

Küresel ısınmayla mücadele için çok büyük miktarlarda CO₂ azaltımının gerekli olmasından ötürü, büyük ölçekli tesislerin kurulması gerekmektedir. Fotobiyoreaktörler üzerine çok sayıda çalışma olmasına rağmen büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliğinde açık havuz sistemleri tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen sebeplerden ötürü düşük maliyetli mikroalg yetiştiriciliğinde su kanallı havuzlar tercih edilecektir.

2.2 Mikroalg Gelişimine Etki Eden Unsurlar

2.2.1 Işık

Işık, fotosentez sürecinde, mikroalg gelişimindeki en önemli unsurdur. Fotosenteze etki eden 3 farklı ışık değişkeni vardır [35]: ışık şiddeti, ışık periyodu ve ışık kısıtlaması.

“Işık şiddeti” kültür ortamına gelen ışık enerjisi miktarıdır. Işık her ne kadar istenen bir girdi olsa da fazlası mikroalg kültürü için zararlıdır. Gereğinden fazla ışık şiddeti, hücrelere zarar vererek mikroalg gelişimi için engelleyici unsur olmaktadır [35, 36]. Işığın şiddeti ile birlikte ışığın spektral kalitesi de mikroalg gelişimi ve metabolizması için önemlidir [37]. Fotosentez için aktif ışınım, güneş ışınımı spektrumunun görünür bölgesini oluşturan 400 ile 700 nm dalga boyundaki ışınımlardır. Aynı zamanda insan gözünün görebildiği bu dalga boyundaki ışınlar, güneş ışığı spektrumunun toplam enerjisinin %43'üne denk gelmektedir [27]. Işık miktarı belirli bir noktaya kadar arttıkça mikroalg büyümesi de artar. Bu noktaya doyma noktası denir. Doyma noktasının üzerindeki ışık şiddetleri mikroalg gelişiminin hızını artırmamaktadır. Hatta belirli bir şiddetten sonra ışık, mikroalg büyümesini yavaşlatmaktadır. Bu ışık şiddeti ise inhibisyon şiddeti olarak isimlendirilmektedir. Doyma ve inhibisyon şiddetleri sıcaklık, CO₂ seviyesi ve besin takviyesi gibi çevresel faktörlere bağlıdır [38].

“Işık periyodu”, büyük ölçekli üretimlerde dikkate alınması gereken ve hücrelerin ne kadar süre ışığa maruz kaldığıyla ilgili bir kavramdır. Yapay ışıklandırmada, ışık kaynağının kontrolü mümkündür. Işığın bir açılıp bir kapanması flaş olarak isimlendirilmektedir. Yüksek yoğunluklu mikroalg kültürlerinde, spesifik oksijen üretim oranları dikkate alındığında, flaş ışıklandırma sürekli ışıklandırmadan daha başarılıdır [35]. Özellikle yüksek şiddetli ışıklar için kısa flaşlar arasında karanlık periyotların olması fotosentezin verimliliğini artırmaktadır [37].

Gün ışığının kullanıldığı yetiştirme sistemlerinde flaş ışıklandırma söz konusu değildir. Bu durumlarda ışık periyodu gündüz ve gece süreleri olarak değerlendirilebilir. Eduardo Jacob-Lopes ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [39], ışıklandırma süresinin azalmasıyla biyokütle üretimindeki azalma arasında 12:12 ışıklandırma periyodu hariç doğrusal bir ilişki görülmüştür. Yine aynı çalışmada günde 24 saat aydınlatma ile 22 saat aydınlatma arasında biyokütle üretimi konusunda kayda değer bir fark görülmemektedir.

“Işık kısıtlaması” ışınların hücrelere ulaşamaması ile ilgili bir kavramdır. Kültür ortamının üst yüzeyindeki mikroalgler ışık görmektedir. Fakat kültür ortamının derinliklerine doğru gidildikçe, hücreler ışık görmemeye başlamaktadır. Bu durum hücrelerin birbirlerini gölgelemelerinden kaynaklanmaktadır. Işık alg kültürüne nüfuz ettikçe, ışık şiddeti, hücrelerin birbirini gölgelemesinden ötürü dramatik bir

şeklde azalmaktadır [40]. Difüze olan ışının oranı anlamına gelen optik derinlik mikroalg yetiştirme ortamı tasarımlarında dikkate alınmalıdır [41]. Işık kısıtlamasını bertaraf etmenin en kolay yolu, kültür ortamının derinliğini azaltmaktır [42]. Mikroalgler fotobiyoreaktörlerde yetiştirilecekse, kullanılan malzemelerin geçirgenliği ve sistemin yüzey-hacim oranı ışığın yakalanmasında etkili olmaktadır [25]. Açık havuz yetiştirme sistemlerinde sığ havuzlar tercih edilerek ışık kısıtlaması bir miktar engellenebilir.

2.2.2 Sıcaklık

Sıcaklık, ışıktan sonra açık ve kapalı yetiştirme sistemleri için en önemli kısıtlayıcı etkendir [14]. Her mikroalg türü için en uygun bir sıcaklık değeri vardır. Mikroalgler yaşadıkları sıcaklık aralıklarına göre 3 grupta değerlendirilebilir: 0 °C'un altı gibi çok düşük sıcaklıklarda yaşayan psikrofilikler, 75 °C gibi sıcaklıklarda yaşayan termofiller ve bu iki grubun arasında kalan mezofilik mikroalgler [27]. Mikroalgler optimal sıcaklığın 15 °C altına kadar tolerans gösterebilirken, optimal sıcaklığın sadece 2-4 °C üstü biyokütle kaybına sebep olabilmektedir [14]. Endüstriyel açıdan dikkat çeken çoğu mikroalg türü için en uygun sıcaklık 25 °C'tur [27].

Sıcaklık ve ışık unsurlarının mikroalg kültürü üzerindeki etkileri birbirlerinden tam bağımsız olarak incelenemez. En uygun ışık değeri, sıcaklık ile değişmekte olup iyi bir yıllık üretkenlik için, yetiştirilen türe ait ışık-sıcaklık ilişkisi tam olarak bilinmelidir [27]. Sıcaklık, kültür üzerinde olumsuz etki yaratabileceğinden ötürü kontrol edilmelidir. Kapalı sistemler olan fotobiyoreaktörlerde sıcaklık, çevre sıcaklığının 10-30 °C üstüne çıkabilmektedir [25]. Sıcak iklimlerin egemen olduğu bölgelerde kültür ortamındaki sıcaklık artışı gerçekten mücadele edilmesi gereken bir konudur. Özellikle kış aylarında kültür ortamının sıcaklığı, mikroalg gelişimi için uygun sıcaklık aralığının altında kalabilmektedir. Soğuk iklimlerin görüldüğü bölgelerde daha çok öne çıkan bu sıkıntı, termik santrallerinin baca gazlarının atık ısıları ile bertaraf edilebilir [21]. CO₂ azaltımı amacıyla baca gazının hem içeriğinden hem de atık ısısından faydalanılarak yetiştirilecek mikroalgler termofilik türlerden seçilirse soğutma maliyetleri açısından üstünlük sağlanmış olur.

2.2.3 pH

Yetiştirilen mikroalg türleri için en uygun pH değerleri 7-9 aralığında yer almaktadır. Bazı türler için en uygun pH değeri daha asidik bölgede veya daha bazik bölgede yer

almaktadır. Mikroalgler fotosentezde CO₂ kullanarak ortamdan karbon çekerler. Bu sebepten ötürü karbon azalmasıyla birlikte kültür ortamının pH değeri yükselmektedir [40].

En iyi verimi alabilmek için en uygun pH değeri sağlanmalıdır. Mikroalglerin gelişimi için uygun pH değerinin sürdürülebilmesi amacıyla ticari kontrol aygıtlarının kullanılması gerekmektedir [40]. Aşırı pH değerlerinde, hücresel işlemlerin bozulması sebebiyle, kültürün tümünden çökme tehlikesinden ötürü kültür pH değerini en uygun aralıkta tutmak hayati önem taşımaktadır [25].

Yetiştirme sisteminin kendisi de pH değeri üzerinde etkili olmaktadır. Aynı kaynaktan beslenen, hemen hemen aynı miktar biyokütle üretimi sağlayan su kanallı havuz ve bir tür fotobiyoreaktör ortamlarında pH değerleri ortalama olarak sırasıyla 8 ve 10 olmuştur [43].

2.2.4 Karıştırma

Mikroalgler doğal habitatlarında yaklaşık 10³ hücre/ml yoğunluğunda yaşarlar ve hücreler arası uzaklık 1000 µm değerinden daha fazladır[25, 44]. Fakat yüksek yoğunluklu mikroalg kültürlerinde hücre yoğunluğu 10⁹ hücre/ml değerine ulaşmaktadır. Bu yüksek yoğunluk ışık iletimini azaltır, çözülmüş CO₂ tüketimini, çözülmüş oksijen birikimini ve kültür sıcaklığını artırır [25].

Karıştırma, sağladığı şu etkilerden ötürü mikroalg gelişiminde önemli rol oynamaktadır [25]:

- Mikroalg hücrelerinin çökmesini engeller,
- Ortamdaki her hücrenin ışık ve besin öğeleri ile buluşmasını sağlar,
- Isı transferine olanak sağlayıp termal tabakalaşmayı engeller,
- Kültür ile hava arasındaki gaz değişimini geliştirir.

Besinsel büyüme ihtiyaçları temin edildikten ve çevresel faktörlerin sınırlayıcılığı ortadan kalktıktan sonra, karıştırma kritik bir etmen olmaktadır.

Karıştırma, mikroalg yetiştirme sistemlerindeki üretkenlik üzerinde kilit bir değişkendir. Zayıf karıştırma, ışığın ve besinlerin yeteri kadar olmadığı durgun bölgelerin oluşmasına sebep olur ve üretkenliğin düşmesiyle sonuçlanan anoksik/anaerobik koşullar etkili olur [41]. Yüksek mikroalg derişimlerinde, ışığın

hemen hemen hepsi ince bir tabaka oluşturan en üstteki hücreler tarafından emilir [34]. Karıştırma ile bu tabakadaki hücrelerin kültür ortamındaki diğer hücreler ile yer değiştirmesi sağlanır.

Yetiştirme sistemi seçimine ve ölçeğine göre karıştırma işlemi farklı yöntemlerle yapılabilir. Mikroalg biyoreaktörlerinde en yaygın karıştırma yöntemleri pompalama, mekanik karıştırma (stirring) ve gaz püskürtmedir (injection) [41]. Mikroalg türlerinin tümünün kuvvetli karıştırmaya karşı toleranslı olmadığı bilinmektedir [25]. Fotobiyoreaktörlerde yüksek sıvı hızı ve yüksek türbülans kesme stresi yaratarak mikroalgelere zarar verebilir [45]. Farklı mikroalgelerin kesme stresine karşı farklı hassasiyette olmalarından dolayı, tüm mikroalg türleri için en uygun bir karıştırma sistemi yoktur. Gaz ile karıştırma sistemleri, mekanik pompalama sistemlerine nazaran, hassas mikroalg türleri üzerinde daha az hasar yaratmaktadır [46]. Hava kabarcıklarının oluşumu, gaz ile karıştırma yapılan fotobiyoreaktörlerde hücre ölümlerinin temel sebebidir ve bu reaktörlerde gaz giriş hızı hücre hasarlarının tahmininde bir ölçü olarak kullanılabilir [47]. Mikroalg yetiştirme sistemlerinden su kanallı havuz sistemlerinde karıştırma yöntemi olarak çarklar tercih edilmektedir [6, 48].

2.2.5 Besinler

Mikroalg kültürlerinin iki temel besini azot ve fosfordur. Kükürt, potasyum, magnezyum, demir, çinko, kalsiyum, molibden, kobalt, selenyum ve nikel az miktarda veya eser miktarda gereken besinlerdendir.

Mikroalg türleri farklı azot kaynaklarını kullanmakla beraber en çok nitrat, amonyak ve üreyi kullanmaktadırlar [21, 49]. Azotun ideal formu, göreceli maliyetlerine ve türlerin özel biyolojilerine bağlıdır [49]. Farklı formlarda azot kaynaklarını büyük miktarlarda içeren atık sular ucuz bir azot kaynağı olarak değerlendirilebilir [50]. Ortama eklenen fosfatların metal iyonlarıyla bileşik olması sebebiyle, her fosfor kaynağı biyolojik olarak kullanılabilir olmamakta ve bu durum fosforun aşırı miktarda sağlanmasını gerektirmektedir [2]. Kükürt, kükürt dioksit olarak kömürlü termik santrallerin baca gazından temin edilebilir [21].

Besin tedariki ve besin seviyelerinin kontrolü, yetiştirme ekonomisi, üretkenlik ve sürdürülebilirlik konuları için hayati öneme sahiptir. Besinlerin kontrolü ile mikroalglerin gelişimi istenilen yöne çekilebilmektedir. Mikroalglerin yağ içeriği

kültür ortamının besin bileşiminden etkilenmektedir [51, 52]. Fosfat eksikliği [50] ve azot eksikliği [53] yağ birikimi hususunda etkili olan unsurlardandır.

3. TERMİK SANTRAL KAYNAKLI KARBONDİOKSİT SALINIMLARININ AZALTILMASI

CO₂ ve diğer sera gazlarının atmosferdeki derişimlerinin artması iklim değişikliklerine yol açmaktadır. Bu değişikliklerin doğası, kapsamı ve zamanı belirsiz olmakla beraber esas değişiklik, ortalama küresel sıcaklıkta beklenmektedir [54]. Ortalama küresel hava ve okyanus sıcaklıklarındaki artışlar, kar ve buzların erimesi, deniz seviyesindeki yükseliş gibi gözlemler, iklim sistemlerinin değiştğini açıkça göstermektedir. 1995 ve 2006 yılları arasındaki 12 yılın 11'i, 1850 yılından beri ölçülüp kaydedilen küresel yüzey sıcaklıklarının en yüksek değerde olduğu ilk 12 yıl arasında yer almaktadır. Özellikle tropik ve subtropik bölgelerde, 1970'lerden itibaren daha geniş alanlarda daha yoğun ve uzun kuraklıklar gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarla ilişkilendirilen kurumadaki artış ve azalan yağışlar kuraklıktaki değişikliklerde pay sahibidir [55]. Bazı bölgelerde bulaşıcı hastalık vektörleri, kuzey yarım kürenin orta ve yüksek enlemlerindeki alerjenik polenler ve Avrupa'daki sıcaklıkla ilgili ölümler, sıcaklık artışının insan sağlığı üzerindeki etkileri olarak değerlendirilmektedir [56].

İnsan kaynaklı ana sera gazı bileşeni CO₂'dir [54]. İçinde bulunduğumuz bu yüzyılda, karasal ekosistemlerin net karbon tutumunun yüzyılın ortalarından önce en yüksek değerine ulaşması ve sonra hafiflemesi hatta tersine dönmesi muhtemel görünmektedir. 1,5-2,5°C değerini aşan ortalama küresel sıcaklıklar ve atmosferik CO₂ derişimindeki artışların, ekosistem yapısı ve işlevinde, türlerin ekolojik etkileşimlerinde ve türlerin coğrafi dağılımında biyolojik çeşitlilik ile su ve gıda tedariki gibi ekosistem gereksinimleri için genel olarak olumsuz sonuçlar doğuracak büyük değişikliklere sebep olacağı öngörülmektedir. Atmosferik CO₂ derişiminin artması sebebiyle artan asidifikasyonun, mercanlar gibi kabuk formundaki organizmalar ve bunlara bağlı türler üzerinde olumsuz etkiler yaratması beklenmektedir [56].

1990 ile 2000 yılları arasında yıllık ortalama küresel CO₂ salınımindaki artış %1,1 iken, iklim değişikliğine olan kaygının yükselmesine rağmen, 2000 ile 2007 yılları

arasında CO₂ salınımı yıllık ortalama %3 artış göstermiştir. Bu durum özellikle kömür tabanlı ekonomilerin büyümesinin yanı sıra, yüksek petrol ve gaz fiyatlarının kömür yakıtlı güç üretiminde artışa sebep olmasının sonucu olarak değerlendirilmektedir [57].

Küresel ısınmanın etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için çeşitli sera gazları salınımlarının kontrol altında tutulması gerekmektedir. Sera gazları içinde küresel ısınmaya en büyük oranda sebebiyet veren CO₂'nin kontrolü, yapılması gereken ilk eylemlerdendir. CO₂ salınımının kontrolü ile atmosferdeki CO₂ derişiminin artış hızı düşürülebilir hatta artış tamamen durdurulup derişimin daha düşük seviyelere inmesi sağlanabilir.

Atmosferdeki CO₂ seviyesinin düşürülmesi çeşitli yollarla gerçekleştirilebilir [54]:

- Enerji tüketimini azaltmak
- Enerji dönüşümlerindeki verimliliği artırmak
- Daha düşük karbon içerikli yakıtlara yönelmek (Kömürden doğal gaza geçmek gibi)
- Yenilenebilir ve nükleer enerji gibi CO₂ salınımı söz konusu olmayan enerji kaynaklarına yönelmek
- Fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan CO₂'nin yakalanması ve depolanması.

Toplam küresel fosil yakıt kullanımının %32'sinin gerçekleştiği elektrik üretim sektörü, enerji kaynaklı CO₂ salınımının %41'inden sorumludur [57]. Fosil kaynak kullanımında, dolayısıyla CO₂ salınımında, bu derece büyük paya sahip olan elektrik üretim sektörü, atmosferdeki CO₂ derişimini yönetebilmek için muhakkak tekrar ele alınmalıdır. Termik santrallerde genellikle kömür, doğal gaz ve petrol (motorin,fuel oil) kullanılarak elektrik elde edilmektedir. Petrol, elektrik üretiminde pek tercih edilmemekte daha çok ulaşım sektöründe değerlendirilmektedir. Termik santrallerden üretilen birim elektrik enerjisi başına salınan CO₂ miktarları yakıtın türüne ve içeriğine göre değişmekte olup bu değerler Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Yakıt türlerine göre birim elektrik üretimi başına CO₂ salınımı [58].

Yakıt	CO₂ salınımı (g/kWh)
Bitümlü kömürler	860
Düşük bitümlü kömür	920
Linyit	990
Doğal gaz	400
Fuel oil	670

Kömür yakıtlı santraller, 2005 yılı elektrik üretimi kaynaklı CO₂ salınımlarının %72'sinden sorumludur. Gaz yakıtlı santrallerin payı %20'ye tekabül etmekte, geri kalan salınım ise petrol yakıtlı santrallere aittir. Toplamda yaklaşık 1000 kömür yakıtlı termik santralden 2007 yılında 7,9 Gt CO₂ salınımı gerçekleşmiştir. Bu değer, toplam küresel CO₂ salınımının yaklaşık %27'sine denk gelmektedir [59].

Fosil yakıtlı güç santrallerinin neden olduğu CO₂ salınımlarını azaltmak için esas olarak üç yol vardır [57]:

- Santralleri iyileştirmek (en verimsiz santrallerin kapatılması veya modernizasyonu, yeni santraller için en iyi teknolojilerin seçilmesi),
- Düşük karbonlu yakıtlara yönelmek (kömürden doğal gaza geçiş, kömürün biyokütle ile beraber yakılması),
- Karbon yakalama ve depolama teknolojilerini devreye almak.

Fosil yakıtlı termik santrallerden salınan CO₂'nin tutulması ve yer altında depolanması CO₂ salınımını azaltmanın önemli bir yoludur. CO₂ yakalamanın en iyi şekilde gerçekleştirileceği yerler, küresel CO₂ salınımının üçte birinden sorumlu olan güç santralleri gibi büyük noktasal salınım kaynaklarıdır [54]. Diğer büyük noktasal kaynaklar demir-çelik endüstrisi ve çimento endüstrisidir.

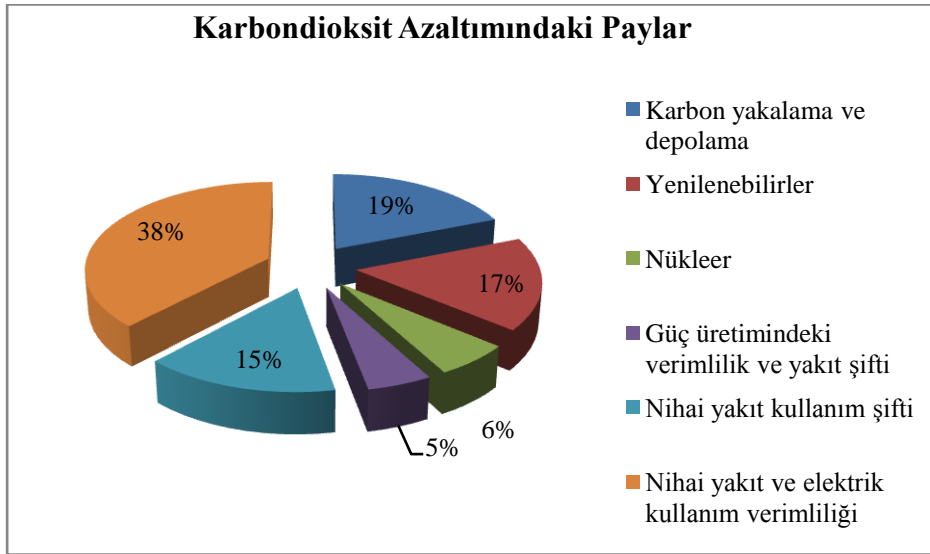
Karbon yakalama ve depolama teknolojisinin temel aşamaları CO₂'nin yakalanması, sıkıştırılması, nakliyesi ve yer altı rezervlerine enjeksiyonudur [60]. Rubin ve arkadaşları [61], karbon yakalama ve depolamaya olan dünya genelindeki ilgiyi;

(1) iklim değişikliği etkilerinden kaçınmak için küresel CO₂ salınımlarında büyük azaltımların gerektiği konusundaki farkındalığın artmasına,

(2) fosil yakıtlardan alternatif enerji kaynaklarına geçişin kolay ve hızlıca gerçekleştirilemeyeceğine ve

(3) karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin diğer sera gazı azaltımı önlemlerine eklenmesinin iklim değişikliğini hafifletmenin maliyetlerini azaltacağına olmak üzere üç faktöre bağlamaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2010 yılında yayınladığı Energy Technology Perspective 2010 çalışmasındaki [57] Mavi Harita (BLUE map) senaryosunda CO₂ salınımlarının azaltılmasındaki anahtar teknolojiler ele alınmıştır. Mavi Harita senaryosu, küresel enerji kaynaklı CO₂ salınımlarının 2050 yılında, 2005 yılındaki seviyesinin yarısına azaltıldığını varsaymaktadır. Mavi Harita senaryosunda 2050 yılında CO₂ salınımlarının 14 Gt'a kadar azaltılması söz konusudur. Bu azaltım senaryosunda 1 ton CO₂ için 175 \$'a kadar maliyet öngörülmüştür. Şekil 3.1'de verildiği gibi, Mavi Harita'da CO₂ azaltımı için anahtar teknolojilerinden olan karbon yakalama ve depolama, %19'luk paya sahiptir. Nihai yakıt ve elektrik kullanımındaki verimlilik, %38 ile CO₂ azaltımında en büyük rolü üstlenmiştir.



Şekil 3.1 : Mavi Harita senaryosundaki CO₂ azaltım teknolojilerinin payları [57].

Karbon yakalama ve depolama teknolojileriyle azaltılacak CO₂ salınımı 9,4 Gt olarak belirlenmiştir. Güç üretimi kaynaklı CO₂ salınımı azaltımı bu miktar içinde %55'lik paya sahiptir [57].

2010 yılı sonu itibarıyla, dünya genelinde çalışan 4 ticari CCS uygulaması mevcuttur: Kanada Weyburn-Midale'de yılda 2,5, Kuzey Buz Denizi Sleipner'da ve Cezayir In Salah'da yılda 1 milyon ton depolama yapılmakta ve ayrıca Barents

Denizi Snøhvit'de ise yılda 0.5 milyon ton depolama yapılması hedeflenmektedir. Daha birçok proje, farklı plan aşamalarında olup, diğer birçok proje ise pilot aşamasında çalıştırılmaktadır [60].

Karbon yakalama ve depolama teknolojileri temel olarak üç başlık altında incelenebilir: yakma öncesi yakalama, oksijenli yakma ile yakalama, yakma sonrası yakalama.

3.1 Yakma Öncesi Yakalama

Yakma öncesi yakalama, gaz türbin kombine çevrimleri için uygulanabilir. Bu teknolojiye yakıt, hava veya oksijen ile reaksiyona sokulur. Buradaki amaç CO ve hidrojen (H₂) içeren yakıt elde etmektir. Daha sonra buhar ile tepkimeye sokularak CO₂ ve H₂ karışımı elde edilir [62]. Yaygın şekilde kullanılan ticari bir ürün olan Selexol gibi bir kimyasal çözücü ile CO₂ ayrılarak CO₂ tutumu gerçekleştirilir [61]. H₂ ise şu an için güç üretiminde en verimli termik çevrim olan gaz türbin kombine çevriminde yakıt olarak kullanılır [62].

Yakma öncesi yakalama, doğal gaz veya kömür yakıtlı santrallerde gerçekleştirilebilir. Kullanılacak kaynak kömür ise, gazlaştırma üniteli kombine çevrim olarak bilinen kömürün gazlaştırılması anahtar süreç olmaktadır. Gazlaştırma, fosil yakıtların gaza dönüştüğü kısmi oksidasyondur. Ana bileşenleri H₂ ve CO olan bu gaz, sentez gazı olarak isimlendirilir [62].

Gazlaştırma ile yüksek verimlilik ve çevreye olan salınımların azaltımı hedeflenmektedir. Fakat mevcut kömür yakıtlı gazlaştırma üniteli kombine çevrim santrallerinin hiçbiri CO₂'in yakalanması için gerekli çift reaksiyon ünitesini içermemektedir [62].

Yakma öncesi yakalama teknolojisi, yakma sonrası yakalama teknolojisi gibi, büyük miktarda sermaye ve enerji gerektirmektedir [62]. Gazlaştırma üniteli kombine çevrim santraller, geleneksel kömür santrallerine göre daha karmaşık ve maliyetli olmalarına rağmen, bu santrallerde, yüksek çalışma basıncı ve yüksek CO₂ derişimi sebebiyle CO₂ ayırımı daha kolay ve ucuzdur. Yakma öncesi yakalama teknolojisi, doğal gazlı güç santrallerine de uygulanabilmektedir [61].

3.2 Oksijenli Yakma İle Yakalama

Havanın büyük çoğunluğunu oluşturan N_2 gazı, yakma sonrasında da baca gazının önemli kısmını oluşturmaktadır. Böyle durumlarda CO_2 tutumu için CO_2 'nin N_2 ile oluşturduğu karışımdan ayrılması gerekmektedir. Oksijenli yakma sistemlerinde yakma işlemi için hava yerine neredeyse tamamen saf oksijen kullanılmaktadır. Oksijenli yakma sistemlerinde hava kullanılmadığı için baca gazı büyük oranda su buharı ve CO_2 'den oluşmaktadır. Böylelikle CO_2 daha az işleme tabi tutularak yakalanabilmektedir [62].

Oksijenli yakma teknolojisi gelişim aşamasında olup güç santrallerinde henüz ticari olarak kullanılmamaktadır [61, 62].

Hemen hemen hiç sera gazı salınımı olmadan enerji üretimine imkan tanıdığından ötürü ilgi çeken oksijenli yakma sistemleri, yeterli miktarda oksijen üretiminin maliyeti sebebiyle önemli bir zayıflık sergilemektedir.

Oksijenli yakma sistemleri, hava yerine oksijen kullanılması haricinde, konvansiyonel yanma sistemleri ile benzerdir. Partikül maddeler uzaklaştırıldıktan sonra, baca gazı düşük derişimlerde SO_2 ve NO_x içermekle beraber esas olarak su buharı ve CO_2 'den oluşmaktadır. Su buharı soğutma ve sıkıştırmayla kolayca uzaklaştırılmaktadır. Böylece neredeyse saf CO_2 direkt olarak tutulmuş olur. Oksijenli yakmada, yakma sonrasında yakalama teknolojisinde ihtiyaç duyulan cihazlara gerek duyulmamakta, buna karşın hava ayırma ünitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Hava ayırma ünitesi ile yüksek saflıkta (%95-99) oksijen üretilir [63].

3.3 Yakma Sonrası Yakalama

Yakma sonrası yakalamada güç santrallerinin baca gazından CO_2 'yi yakalamak için genel olarak bir çözücü (solvent) kullanılır [62]. Çözücü daha sonra geri kazanılabilir tiptedir. Çözücüler fiziksel, kimyasal veya kimyasal ara ürün olabilmekle beraber, aminler olarak bilinen kimyasal çözücüler yakma sonrası yakalama teknolojilerinde en çok kullanılan çözücülerdir [62, 63]. Bunun sebebi, kimyasal çözücülerin fiziksel çözücülere nazaran, baca gazındaki CO_2 'nin düşük kısmi basıncından daha az etkilenmeleridir. Azot dioksit (NO_2) ve SO_x , amin ile reaksiyona girerek yeniden kazanılamayan tuzlar gibi sabit forma dönüşerek amin kaybına sebep olacağı için,

baca gazı, CO₂ tutumuna girmeden önce azot oksitleri ve kükürt oksitleri çok düşük düzeylerde içerir hale getirilmelidir. Tercih edilen SO_x düzeyi genellikle 1 ve 10 ppm(v) arasındadır [62].

Tozlaştırılmış kömürlü termik santrallerde kullanılan yakma sonrası yakalama teknolojileri doğal gaz yakıtlı kazanlarda veya kombine çevrimli santrallerde kullanılabilir [61]. Soğurucu olarak isimlendirilen bir kazanda baca gazındaki CO₂'nin %85-90'ı bir amin çözelti ile tutulur. CO₂ yüklü çözücü, rejeneratör denilen ikinci bir tanka gönderilir. Burada ısı yardımıyla, CO₂, gaz formunda serbest hale gelir. Elde edilen yüksek derişimdeki CO₂, süper kritik akışkan halinde sıkıştırılır. Böylece CO₂ seküstrasyon alanına nakliye için hazır hale getirilmiş olur [61, 63].

Yakma sonrası tutum süreçlerinin uygulanabilirliği, güç endüstrisinin ihtiyacı olan büyük ölçeklerde kanıtlanmamış durumdadır. Sermaye ve enerji talebinin yüksek olması ve çözücü bozunumu hala soru işaretleri oluşturmaktadır. CO₂ yakalama konusuna yönelik bilimsel ve toplumsal baskılar artarsa istenilen teknolojik gelişmeler gerçekleşebilir. Kömür yakıtlı büyük santrallerde birkaç demonstrasyon gerekse de, yakma sonrası CO₂ yakalama süreçleri şu anki teknoloji olarak değerlendirilebilir [62].

CO₂'nin yakma sonrası yakalama teknolojileri ile tutulması, var olan santrallerin iyileştirilmesi için en kolay yol olmakla beraber, yeni santral inşasına gerek duyulmayan durumlarda CO₂ tutumunun en verimli seçeneğidir [60].

3.4 CO₂'nin Nakliyesi Ve Depolanması

CO₂ yakalandıktan sonra depolama alanlarına taşınmalıdır. ABD'de yıllık yaklaşık 30 milyon ton CO₂, boru hattıyla taşınmaktadır. CO₂'nin boru ile taşınması genellikle elektrik iletiminden daha ucuza mal olduğundan ötürü güç santrallerini elektrik talebinin olduğu yerlere kurup CO₂'yi depolama alanlarına taşımak daha ucuz olmaktadır. Tükenmiş petrol ve gaz rezervuarları, derin tuz rezervuarları ve madencilğe elverişli olmayan kömür yatakları, CO₂ depolamak için temel alanlardır. CO₂'nin depolanması riskleri de beraberinde getirmektedir. Öldürücü ve havadan ağır bir gaz olduğu için yer altı depolamanın güvenliğiyle ilgili kaygılar olabilir. Olası büyük veya küçük ölçekli sızıntılar tehlike yaratabileceği gibi tutulan CO₂'nin tekrar atmosfere karışmasıyla CO₂ azaltımı çalışmalarını zorlaştıracaktır. Depolanan

CO₂ emisyon ticaretinde veya ulusal taahhütlerin karşılanmasında kullanılacaksa depolanan CO₂ miktarının doğrulanması gerekmektedir. Depolanan CO₂ miktarının kesin bir şekilde belirlenmesi ormancılık ve toprakta depolama gibi biyolojik seçeneklerde de önemli bir zorluktur [54]. Mikroalglerle CO₂ tutumunda bu durum kolaylıkla aşılmaktadır. Mikroalglerin yapısındaki karbon miktarı tespit edilerek ne kadar CO₂ tutumu gerçekleştirildiği hesaplanabilir.

Petrol üretim endüstrisi yıllardan beri petrol üretimine yardımcı olması için jeolojik formasyonlara akışkan enjeksiyonu yapmaktadır. CO₂ ile geliştirilmiş petrol üretimi (CO₂EOR) Kuzey Amerika ve Türkiye’de 1980’lerin ortalarından beri gerçekleştirilmektedir [60]. Bu uygulamalarda CO₂ ekonomik katma değer yaratmaktadır.

CO₂’nin nakliyesi ve depolanması lokal uygunluk ve depolama alanının karakteristiklerine çok bağlı olabilmekte, dolayısıyla projeye özel ilave ekonomik etkenler göz önünde bulundurulmalıdır [64].

CO₂’nin taşınması ve depolanması ortalama olarak 4-12 \$/t aralığında bir maliyet oluşturmaktadır [62].

3.5 Karbon Yakalama Teknolojilerinin Maliyetleri

Finkenrath’ın 2011 yılında yayınlanan “Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation” (Güç Üretiminden Karbondioksit Yakalamanın Maliyetleri ve Performansı) çalışması [64], çok sayıda ve yeni çalışmalardan derlenerek hazırladığı için Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) teknolojilerinin maliyetlerini ve performanslarını belirten önemli bir çalışmadır. Çalışmada OECD ülkelerindeki uygulamalara ek olarak Çin’den de uygulamalar yer almaktadır. Tez kapsamında ele alınan değerler OECD ortalamalarına aittir. Veriler CO₂ yakalama ve sıkıştırmayı kapsamaktadır, ancak CO₂ nakliyesi ve depolanması hesaba katılmamıştır.

3.5.1 Gazlaştırma ünitesi kombine çevrimli yakma öncesi CO₂ yakalama maliyeti

- Santrallerin net verimliliği CO₂ tutumu olmadan %41,4; CO₂ tutumu durumunda ise %33,1 olmaktadır. Net verimdeki göreceli düşüş %20 değerindedir.
- CO₂ tutumu olmadan 1 MWh elektrik üretimi 793 kg CO₂ salınımı oluştururken, CO₂ tutumu ile bu değer 115 kg'a düşmektedir.
- Tesislerin günlük maliyetleri CO₂ tutumu olmadan kW kapasite başına 2.586 \$; CO₂ tutumu durumunda ise %44 artış göstererek 3.714 \$ olarak gerçekleşmiştir.
- Seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyeti CO₂ tutumu olmadan 1 MWh için 75 \$ seviyesindeyken, CO₂ tutumu durumunda %39 artış göstererek 104 \$ seviyesine yükselmiştir.
- Engellenen 1 ton CO₂ salınımının maliyeti 43 \$ olarak gerçekleşmiştir. Tozlaştırılmış kömür baz alındığında bu değer 55 \$ olmaktadır.

3.5.2 Oksijenli yakma ile CO₂ yakalama maliyeti

- Santrallerin net verimliliği CO₂ tutumu olmadan %41,6; CO₂ tutumu durumunda ise %31,9 olmaktadır. Net verimdeki göreceli düşüş %23'tür.
- CO₂ tutumu olmadan 1 MWh elektrik üretimi 825 kg CO₂ salınımı oluştururken, CO₂ tutumu ile bu değer sadece 59 kg olarak gerçekleşmektedir.
- Tesislerin günlük maliyetleri CO₂ tutumu olmadan kW kapasite başına 2.263 \$; CO₂ tutumu durumunda ise %74 artış göstererek 3.959 \$ olarak gerçekleşmiştir.
- Seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyeti CO₂ tutumu olmadan 1 MWh için 62 \$ seviyesindeyken, CO₂ tutumu durumunda %64 artış göstererek 102 \$ seviyesine yükselmiştir.
- Engellenen 1 ton CO₂ salınımının maliyeti 52 \$ olarak gerçekleşmiştir.

3.5.3 Yakma sonrası yakalama ile CO₂ tutum maliyeti

Yakma sonrası teknolojisi için ele alınan uygulamalarda, karbon tutumu için MEA (monoethanolamine-amin tabanlı bir kimyasal çözücü) kullanılmıştır.

- Santrallerin net verimliliği CO₂ tutumu olmadan %41,4 iken, CO₂ tutumu durumunda %30,9 olmaktadır. Net verimdeki göreceli düşüş %25'tir.
- CO₂ tutumu olmadan 1 MWh elektrik üretimi 820 kg CO₂ salınımı oluştururken, CO₂ tutumu ile bu değer 111 kg'a düşmektedir.
- Tesislerin günlük maliyetleri CO₂ tutumu olmadan kW kapasite başına 2.162 \$; CO₂ tutumu durumunda %75 artış göstererek 3.808 \$ olarak gerçekleşmiştir.
- Seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyeti CO₂ tutumu olmadan 1 MWh için 66 \$ seviyesindeyken, CO₂ tutumu durumunda %63 artış göstererek 107 \$ seviyesine yükselmiştir.
- Engellenen 1 ton CO₂ salınımının maliyeti 58 \$ olarak gerçekleşmiştir.

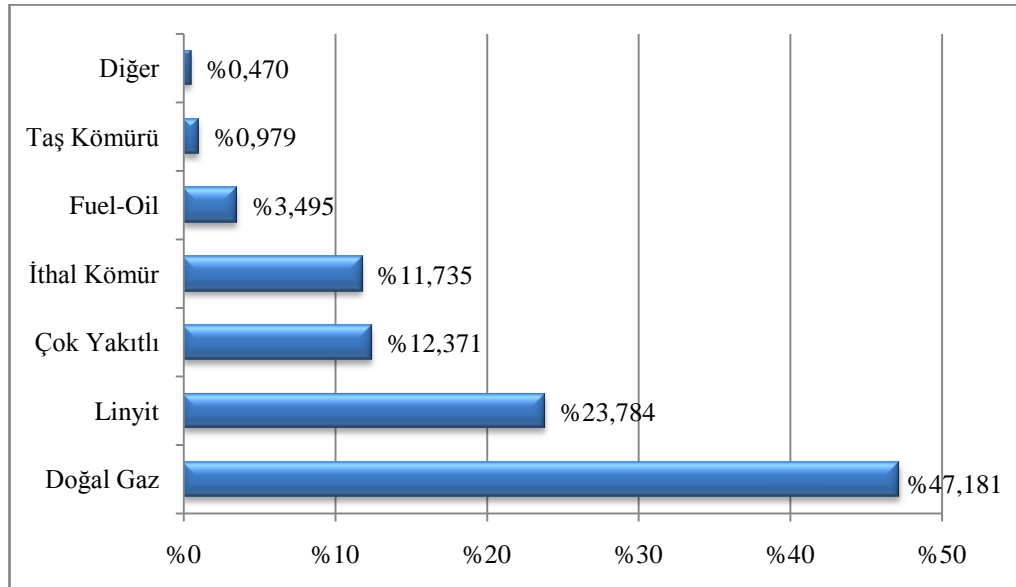
4. TERMİK SANTRALLER VE BACA GAZI ANALİZİ

4.1 Türkiye’de Termik Santraller

Türkiye’nin elektrik enerjisi kurulu gücü 2012 yılı Nisan ayı sonu itibarıyla 53.943 MW’tır. Bunun %63’ünü 34.223 MW ile termik santraller oluşturmaktadır. Türkiye, 2011 yılında termik santrallerinden 171.638 GWh elektrik elde etmiştir. Aynı yıl üretilen 229.395 GWh toplam elektrik enerjisinin %74,8’lik çok büyük kısmı termik santrallerden sağlanmıştır [65].

Elektrik üretimimizin önemli kısmını sağlayan termik santrallerin yakıt türleri önemli bir konudur. Yakıtın yerli veya ithal oluşu, yakıtın sürdürülebilirliği ile karbon salınımı miktarları, termik santral portföyü kapsamında dikkat edilmesi gereken konulardır.

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi doğal gaz yakıtlı termik santraller kurulu güç açısından %47,181 ile ilk sırada yer almaktadır. Doğal gazı %23,784’lük pay ile linyit izlemektedir. Termik santral kurulu gücümüzün %12,371’ini çok yakıtlı termik santraller oluşturmaktadır. İthal kömür ise %11,375’lik bir paya sahiptir [65].



Şekil 4.1 : 2012 yılı Nisan ayı itibarıyla termik santral kurulu gücünün yakıt türüne göre dağılımı [65].

2011 yılında üretilen 229.395 GWh elektriğin %45'i (104.048 GWh), doğal gazdan üretilmiştir. İkinci sırada %23'lük payla hidroelektrik kaynaklar yer almaktadır. Linyit, Türkiye'nin elektrik üretiminde 38.870 GWh ile %17'lik paya sahiptir. Dördüncü büyük elektrik üretim kaynağımız %12'lik payla ithal kömür, taş kömürü ve asfaltit karışımıdır [66].

4.2 Kömür Yakıtlı Termik Santraller

Türkiye'nin en güvenilir yerli enerji kaynağı kömürdür [67]. Türkiye'nin toplam kömür rezervi 12,9 milyar tondur. Bunun 11,6 milyar tonu linyit, 1,3 milyar tonu ise taşkömürüdür. 80 milyon tonu yerli, 24 milyon tonu ithal olmak üzere yıllık kömür tüketimi 104 milyon tondur. Türkiye kömür kaynaklarının sadece %37'lik kısmını değerlendirmektedir. 2023 yılı için hedef, tüm kömür kaynaklarının ekonomiye kazandırılmasıdır. 2023 yılı için elektrik üretiminin %30'unu kömürden karşılama hedefi de bulunmaktadır [65]. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere mevcut kömür yakıtlı termik santrallerimizin kurulu gücü 8.516 MW'tır.

Çizelge 4.1 : Türkiye'nin kömür yakıtlı santralleri [68].

Santralin adı	Santral mülkiyeti	Kömür ruhsatı	Yakıt	Kurulu güç (MW)
Seyitömer	EÜAŞ	TKİ	Linyit	600
Orhaneli	EÜAŞ	TKİ	Linyit	210
Tunçbilek A ve B	EÜAŞ	TKİ	Linyit	365
Soma A ve B	EÜAŞ	TKİ	Linyit	1.034
Çan	EÜAŞ	TKİ	Linyit	320
Yatağan	EÜAŞ	TKİ	Linyit	630
Yeniköy	EÜAŞ	TKİ	Linyit	420
Kemerköy	EÜAŞ	TKİ	Linyit	630
Afşin-Elbistan A	EÜAŞ	EÜAŞ	Linyit	1.355
Afşin-Elbistan B	EÜAŞ	EÜAŞ	Linyit	1.440
Kangal	EÜAŞ	EÜAŞ	Linyit	457
Çayırhan	EÜAŞ	EÜAŞ	Linyit	620
Silopi	Ciner Grubu	TKİ	Asfaltit	135
Çatalağzı	EÜAŞ	TTK	Taşkömürü	300
Toplam				8.516

Linyit, Türkiye'nin çeşitli yörelerine dağılmış durumdadır. Zengin linyit sahalarının başında Kangal, Orhaneli, Tufanbeyli, Soma, Tunçbilek, Seyitömer, Çan, Muğla, Çayırhan, Afşin-Elbistan, Karapınar ve Tekirdağ linyit havzaları yer almaktadır. Linyit kaynaklarının mevcudiyetinin yanı sıra kalorifik değerleri de önemlidir. Linyit kaynaklarımızın çoğu düşük kaliteli linyitlerdir [66].

4.3 Termik Santrallerin Baca Gazı İçerikleri

Yakıtın yakılması sonucu oluşan ve atmosfere salınan gazlar baca gazı olarak isimlendirilmektedir. Baca gazı bir gaz karışımdır. Kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların yakılmasıyla oluşan baca gazları başlıca azot (N_2), CO_2 , O_2 ve su buharı oluşturur. Ayrıca, baca gazları az miktarda CO , NO_x , SO_x , ve parçacık maddeler içerir [69].

Baca gazı bileşimi büyük oranda kullanılan yakıt türüne bağlıdır. Kömür yakıtlı santrallerin baca gazları, SO_x ve NO_x bileşiklerini genellikle en yüksek derişimlerde içeren baca gazlarıdır [70]. Kükürt oksitler, kükürt, hidrojen sülfürler veya organosülfür bileşiklerinin yanmasıyla açığa çıkar [71].

Baca gazındaki NO_x 'lerin %90'dan fazlası azot monoksittir (NO). Baca gazında SO_x 'lerin bertarafı kimyasal bir desülfirizasyon sistemi ile gerçekleştirilebilmekteyken NO 'nun uzaklaştırılması sıvı fazdaki düşük çözünürlüğü sebebiyle daha zordur [72].

Baca gazı salınımları çeşitli yasal düzenlemelerle kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Yanma süreçlerinin baca gazlarının içerdiği bileşiklerden N_2 , O_2 ve H_2O yasalarla sınırlandırılmayan; CO_2 , NO_x , SO_x , CO , C_xH_y , parçacıklı maddeler, ağır metaller, klor, flor ve bunların bileşikleri yasalarla sınırlandırılan kimyasallardır. Salınımı sınırlandırılmış bileşikler için çeşitli arıtma teknolojileri mevcuttur [71]. Elektrostatik filtreler ile termik santrallerden toz parçacıkların uzaklaştırılması mümkündür [69].

Baca gazının yapısında düşük seviyelerde de olsa metaller bulunmaktadır. Metallerin biyolojik birikimi, yüksek değerli beslenme yağlarının üretiminin hedeflendiği durumlarda önemli olabilir [73].

Termik santral baca gazlarındaki CO_2 derişimi, diğer baca gazı bileşenleri gibi, santralde kullanılan yakıt türüne bağlıdır. Kömür yakıtlı termik santrallerin baca

gazlarındaki CO₂ derişimi, doğal gaz ve petrol yakıtlı santrallere göre daha yüksektir. Çizelge 4.2’de verildiği gibi, tipik bir kömür yakıtlı santralin baca gazındaki CO₂ derişimi %10-15 iken, doğal gaz yakıtlı santraller için %3-6 civarındadır [49, 74, 75]. Doğal gaz yakıtlı santrallerde SO₂ salınımı söz konusu değildir.

Çizelge 4.2 : Tipik bir kömür yakıtlı güç santralının baca gazı bileşimi [74].

Bileşen	N ₂	CO ₂	O ₂	SO ₂	NO _x	Kurum
Derişim	%82	%12	%5,5	400 ppm	120 ppm	50 mg/m ³

Seambiotic firmasının mikroalg yetiştiriciliği için kullandığı Rutenberg Güç Santrali’nin baca gazı içeriği Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Rutenberg Güç Santrali’nin ortalama baca gazı bileşimi, Ashkelon, İsrail [76].

Bileşenler	Derişim değerleri
CO ₂	%13 (hacimsel, ıslak)
N ₂	%69 (hacimsel, ıslak)
O ₂	%5 (hacimsel, ıslak)
H ₂ O	%13 (hacimsel)
CO	40 mg/dNm ³
NO _x	450 mg/dNm ³
SO ₂	120 mg/dNm ³
Katı partiküller	20-40 mg/dNm ³

HTC Purenergy’nin CO₂ tutumu için çalışmalar yaptığı 420 MW kapasiteli kombine çevrimli doğal gaz santralının baca gazı bileşenleri Çizelge 4.4’te görülmektedir.

Çizelge 4.4 : Kombine çevrimli doğal gaz santralının baca gazı bileşimi, Regine, Kanada [77].

Bileşen	Derişim
Oksijen	%12 (mol)
Azot	%75 (mol)
CO ₂	%3,8 (mol)
NO _x	<5 ppm
NH ₃	<5 ppm
SO ₂	<1 ppm
Argon	%1 (mol)
Su	%8 (mol)

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da kömür yakıtlı iki farklı santralin baca gazı içerikleri verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Wyodak Tozlaştırılmış Kömür Yakıtlı Güç Santrali’nin baca gazı içeriği, Wyoming Eyaleti, ABD [78].

Baca gazı bileşeni	Derişim değerleri
N ₂	%67,0
CO ₂	%11,8
O ₂	%12
H ₂ O	%8
CO	300 ppm
SO ₂	180 ppm
NO _x	150 ppm

Çizelge 4.6 : Coronado Kömür Yakıtlı Güç Santrali’nin baca gazı içeriği (ortalama), Arizona Eyaleti, ABD [79].

Baca gazı bileşenleri	Derişim değerleri
CO ₂	%15,1
SO ₂	312 ppm (kuru)
NO _x	325 ppm (kuru)
O ₂	%3,7 – 3,9 (kuru)
Islaklık oranı	%10-11
N ₂	Geri kalan

5. MİKROALG ÜRETİMİ YOLUYLA TERMİK SANTRAL KAYNAKLI CO₂ AZALTIMI

Atmosferdeki CO₂ artışının yavaşlatılması hatta azaltılması amacıyla çeşitli biyolojik yöntemler uygulanabilmektedir. Hughes ve Benemann [80], biyolojik CO₂ azaltımını direkt ve dolaylı olarak iki gruba ayırmışlardır. Baca gazları veya yakalanan CO₂ ile mikroalg yetiştiriciliği ve fosil yakıtların odunlarla beraber yakılması direkt biyolojik CO₂ azaltım yöntemlerindedir. Karbon depolaması veya biyokütle yakıtlı güç santrallerine yakıt sağlamak için ağaç yetiştiriciliği gibi yöntemler dolaylı biyolojik CO₂ azaltım yöntemleri olarak değerlendirilmektedir. Dolaylı biyolojik CO₂ azaltım yöntemleri atmosfere salınmış CO₂'nin tutulmasını sağlar.

Ağaçlardan mikroskopik fitoplanktonlara kadar karasal ve sucul bitkilerin fotosentezi, küresel karbon çevriminde çok önemli bir etkiye sahiptir. Bu biyolojik sürecin daha iyi değerlendirilmesi, atmosferik CO₂ derişimdeki artışın ve küresel ısınmanın üstesinden gelmek için geliştirilecek çözümlerden birisidir [81]. Bitkilerin fotosentezin bir parçası olarak CO₂'yi yakalamaları ve kullanmaları, biyolojik CO₂ azaltımını cazip bir seçenek haline getirmektedir. Karasal bitkiler, atmosferden çok büyük miktarda CO₂'yi tutmaktadır. Karasal bitkilerin biyolojik CO₂ tutumunda kullanılması, atmosferdeki CO₂'nin nispeten düşük derişimde olması sebebiyle ekonomik açıdan uygulanabilir bir seçenek değildir [6]. Sucul mikroalgler, C₃ ve C₄ (fotosentez sürecindeki karbon çevrim türleri) bitkileriyle kıyaslandığında, daha etkin fotosentezleri ve çabuk çoğalmaları ile öne çıkmaktadırlar. Bu sebeple, mikroalgler, biyolojik CO₂ azaltım yöntemi için önemli bir aday olarak değerlendirilebilir [81]. Mikroalgleri, biyolojik CO₂ azaltım aracı olarak karasal bitkilerden üstün kılan bir diğer husus ise termik santraller gibi yüksek derişimli (%5-15) CO₂ salınımı yapan noktasal kaynaklarla bütünleştirilebilecek olmasıdır. Karasal bitkilerin CO₂'yi gaz formunda tutması sebebiyle, noktasal CO₂ salınımlarının karasal bitkilere beslenmesiyle CO₂ tutumunda önemli bir artış sağlanması beklenmemektedir. Mikroalgler, suda çözülmüş CO₂'yi kullanmaları sebebiyle, noktasal CO₂

salınımlarını değerlendirerek birim alan üzerinde daha fazla CO₂ azaltımı sağlayabilirler.

Mikroalgler ile CO₂ azaltımı, küresel ısınmayla mücadele etmede uygulanacak bir biyolojik yöntemdir. Mikroalgler, atmosferdeki CO₂'yi kullanarak yaşam döngülerini sürdürmektedirler. Mikroalgler fotosentez ile CO₂'yi bağlayarak CO₂ azaltımı sağlarlar. Fakat küresel ısınmayla mücadele etmek için çok büyük miktarlarda CO₂ azaltımının sağlanması gerekmektedir. Bu hedefe ulaşmak için mikroalglerin daha kısa süre içinde daha fazla CO₂ bağlama imkanları araştırılmaktadır. Yüksek derişimde CO₂ ile beslenen mikroalg kültür ortamlarında, birim alanda daha fazla CO₂ bağlandığı çok sayıda çalışma ile kanıtlanmıştır [73, 82]. Kültür ortamlarına beslenecek daha fazla CO₂'nin, mikroalglerin CO₂ tutumundaki etkinliğini artıracığı açıktır.

Fotosentetik canlılar CO₂'yi bağlayarak biyokütle oluştururlar. Elde edilen biyokütle farklı yöntemlerle farklı biyoyakıtlara dönüştürülebilir. Biyoyakıtlar yakılınca, biyokütle tarafından bağlanan CO₂ tekrar atmosfere salınır. Fakat bu bir kapalı CO₂ döngüsü olduğu için biyoyakıtlar CO₂ salınımlarının azaltılmasına hizmet etmektedir. Biyoyakıtlar, kullanıldığında her ne kadar CO₂ salınımı kaynağı olsa da, fosil kaynaklı yakıtların kullanımını azalttığı için, CO₂ salınımlarının azaltılmasında katkı sağlamaktadırlar.

CO₂ azaltımı için gerekli olan büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği, biyoyakıt üretimi amacı ile üzerinde çalışılan bir konudur. Ancak henüz mikroalg kaynaklı biyodizel, biyoetanol gibi biyoyakıtlar fosil kaynaklı alternatifleri ile ekonomik olarak yarışabilir seviyede değildir. Mikroalg kökenli biyoyakıt maliyetlerini düşürmek için yapılan çalışmalardan biri de mikroalg yetiştiriciliğini büyük ölçekli hale getirmektir. Bu sayede ölçek ekonomisinden faydalanılarak birim biyoyakıt maliyetleri bir miktar daha aşağıya çekilebilecektir. Fosil kaynaklı yakıtların, biyoyakıtlarla ikame edilebilmesi için önemli miktarda biyoyakıt üretilmesi gerekmektedir. Bu sebepten ötürü de biyoyakıt kaynağı amacıyla büyük ölçekte mikroalg yetiştiriciliği üzerine araştırmalar devam etmektedir. Biyoyakıt haricinde farklı ürünler elde etme imkanı olsa da, büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliğini gerektiren en önemli ürün biyoyakıtlardır. Dolayısıyla mikroalg ile termik santral kaynaklı CO₂ azaltımı amaçlanan projelerde, mikroalg kökenli biyoyakıt çalışmaları da çok büyük bir öneme sahiptir.

CO₂ tutumu amacıyla yapılan mikroalg yetiştiriciliğinde temel amaç, üretimi mümkün olan en düşük maliyetler ile gerçekleştirebilmektir. Bu tez çalışmasında da düşük maliyetli mikroalg üretimi hedeflenmiştir. Bu sebeple, mikroalg kültürüne sağlanacak CO₂'nin bir termik santral baca gazından elde edilmesi düşünülmüştür.

5.1 Baca Gazının Mikroalgler Üzerine Etkileri

Baca gazı için ön arıtma ihtiyaç duyulmaması ve tutulmuş CO₂'in sıkıştırma ve nakliye gibi ileriki işlemlerini ortadan kaldırması, biyolojik bir yöntem olan mikroalg fotosentezi CO₂ azaltımında avantajlı kılan konulardandır. Baca gazlarının direkt kullanımı ön arıtma maliyetlerini azaltmasına rağmen, bu durum yüksek CO₂ derişimi ile SO_x ve NO_x gibi mikroalgler için toksik kimyasalların varlığı sebebiyle mikroalgleri aşırı koşullara zorlamaktadır [70, 83].

Baca gazlarındaki CO₂'nin direkt biyolojik kullanımı için, istenilen mikroalg özellikleri Lee ve arkadaşları tarafından şöyle sıralanmıştır [70]:

- Yüksek CO₂ toleransı
- Düşük pH değerlerine tolerans
- Lineer fazda, kararlı ve yüksek büyüme hızı
- Yüksek hücre yoğunluklarında büyüme yeteneği
- SO_x ve NO_x toleransı
- Isıya tolerans

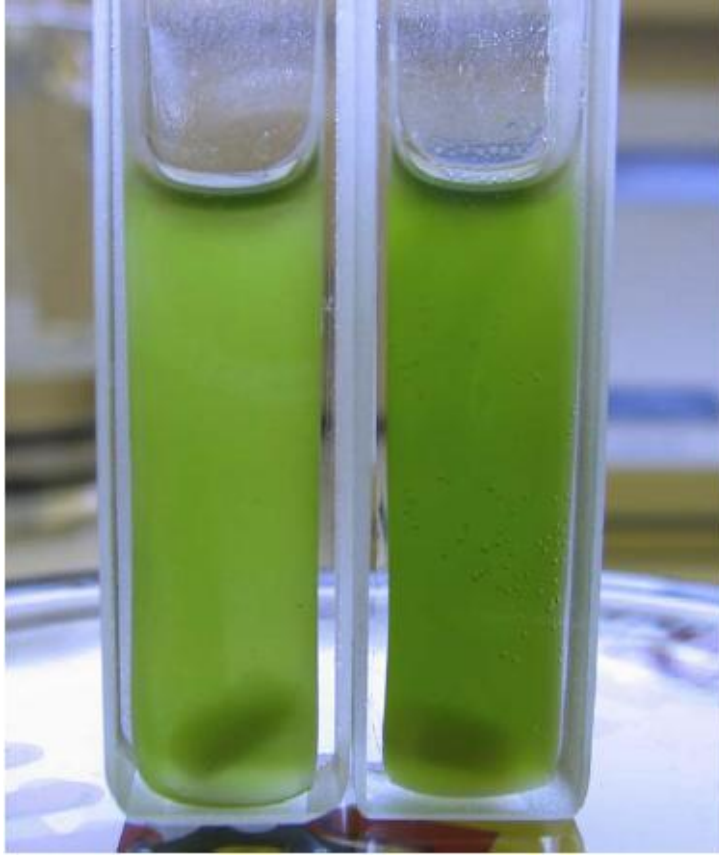
Düşük pH değerlerine uygun mikroalgler, pH kontrolünü ortadan kaldırarak işletme maliyetlerini azaltabilir. Mikroalgler yüksek kültür yoğunluklarında yetiştirilebilirse, yetiştirme tesislerinin büyüklüğü azalabilir [70]. Termik santralin bulunduğu çevredeki göllerden veya havuzlardan mikroalg izolasyonu, santralin yanma gazlarına toleranslı mikroalg elde etmek için yararlı bir stratejidir [84].

Özellikle santralin mikroalg yetiştirme tesislerine yakın olduğu durumda, CO₂ içeren baca gazlarının direkt kullanımı, sıkıştırılmış CO₂'den ekonomik ve çevresel bakımdan daha iyi bir seçenektir [71].

Termik santral baca gazlarının sıcaklığı yaklaşık 120 °C'tur. Baca gazlarından CO₂ ayırımının gerçekleştirilmesi, ısı değiştirici sistemlerin veya termofilik mikroalg türlerinin kullanımıyla mümkündür [69].

Yüksek derişimlerdeki CO₂'nin mikroalg gelişimini artırdığı, çok sayıda çalışma ile kanıtlanmış durumdadır [73, 82]. Bu sebepten, yüksek oranda CO₂ içeren baca gazlarının mikroalg yetiştiriciliğinde kullanımı, özellikle yüksek verim değerlerinin şart olduğu uygulamalar için büyük önem arz etmektedir.

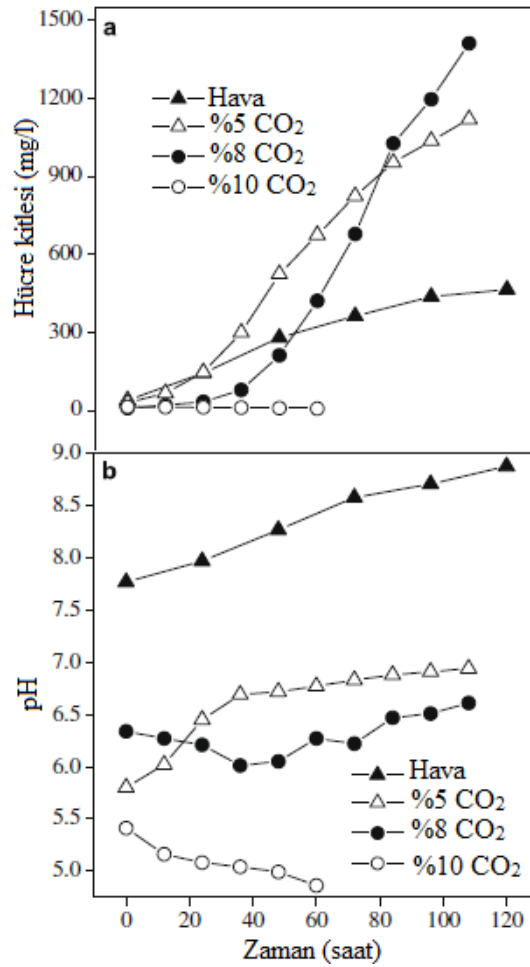
Az miktarda da olsa CO₂ ilavesi, atmosferdeki CO₂ derişimine kıyasla, mikroalg gelişimini hızlandırmaktadır. Şekil 5.1'de, %0,038 CO₂ içeren hava ile beslenen kültür ortamı (soldaki) ile %1 oranında CO₂ içeren aynı akış debisindeki hava ile beslenen kültür ortamının (sağdaki) 36 saatlik büyüme periyodu sonrası fotoğrafı verilmektedir. Bir tatlı su mikroalgi olan *Chlamydomonas reinhardtii* türünün yetiştirildiği tüplerde, biyokütle miktarları klorofil α ölçümü ile belirlenmiştir. %1 CO₂ içeren hava beslenen kültürdeki biyokütle miktarının, diğer kültürdeki biyokütle miktarının 2 katı olduğu tespit edilmiştir [73].



Şekil 5.1 : İki farklı CO₂ derişimine sahip hava ile beslenen mikroalg kültür ortamları [73].

Hsueh ve arkadaşları [82], 1 litre hacimli kabarcıklı sütun fotobiyoreaktörde, farklı CO₂ derişimlerine sahip gaz karışımları kullanarak *Nannochloropsis oculata* türünün büyüme değerlerini gözlemlenmişlerdir. Çalışmada incelenen gaz karışımlarının CO₂

derişimleri %0,036 (hava), %5, %8, %10, %20 ve %40 olarak ayarlanmıştır. Bu derişimlere göre kültür ortamının karbon yükü, sırasıyla $1,4 \times 10^{-2}$; 1,9; 3,0; 3,8; 7,6 ve 15,1 g/dakika-litre değerindedir. Gaz karışımları, CO₂'nin yanı sıra, %6 O₂ ve değişen oranlarda N₂ içermektedir. Şekil 5.2'de farklı CO₂ derişimlerine sahip gaz karışımları ile beslenen *Nannochloopsis oculata* türünün gelişimi ve kültür pH değerinin zamanla değişimi verilmektedir. Mikroalg büyüme oranının, havadakinden %8 CO₂ derişimine kadar gidildikçe arttığı gözlenmiştir. Fakat %10 CO₂ derişimde, mikroalgler gelişmemiştir. Hiçbir gelişme gözlenememesine, kültür ortamının düşük pH değerinin sebep olabileceği belirtilmiştir.



Şekil 5.2 : Farklı CO₂ derişimlerinde *Nannochloopsis oculata* türünün gelişimi ve kültür pH değerinin zamanla değişimi [82].

Termik santral baca gazlarının yüksek sıcaklığı ve kullanılan fosil yakıttaki diğer safsızlıklar ile SO_x ve NO_x'in varlığı CO₂'nin biyolojik tutumundaki temel problemlerdir [69]. Kükürt oksitler ve azot oksitler, çözeltilerin pH değerini düşürerek veya direkt engelleme ile mikroalg gelişimini olumsuz yönde

etkilemektedirler. Baca gazlarındaki yüksek seviyelerdeki (%10-15) CO₂, mikroalg gelişimi için engelleyici olabilmektedir [85]. CO₂ ortamın pH değeri üzerinde bir etki yaratabilmektedir. pH değerlerindeki değişiklikte, CO₂ çok zayıf bir etkiye sahipken SO_x kaynaklı büyük pH değişiklikleri tüm gelişimi engellemektedir [69].

Lee ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada *Chlorella* sp. KR-1 SO₂'ye karşı çok iyi tolerans göstermiştir [83]. Model baca gazındaki SO₂ derişimi arttıkça *Chlorella* KR-1'in doğrusal büyüme oranı ve maksimum hücre yoğunluğu önemli derecede düşmektedir. Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere, %15 CO₂ içeren hava karışımı kullanıldığında doğrusal büyüme hızı 1,66 g/l-gün iken 60 ppm SO₂ varlığında 1,24 g/l-gün, 100 ppm SO₂ varlığında 0,78 g/l-gün olmaktadır. 150 ppm SO₂ içeren gaz kullanıldığında ise *Chlorella* KR-1 türünün gelişimi tamamen son bulmuştur.

Lee ve arkadaşlarının *Chlorella* sp. KR-1 türü üzerinde yaptığı çalışmalarda %15 CO₂, %3 O₂, 100 ppm NO gaz karışımı kullanıldığında, KR-1'in gelişmesinin biraz yavaşladığı halde, %15 CO₂+hava karışımındakine çok yakın doğrusal büyüme hızı sergilediği görülmüştür [83]. NO seviyesi, 300 ppm değerine çıkarıldığında gelişme tamamen durmuştur.

Çizelge 5.1 : *Chlorella* KR-1 türünün SO₂'ye olan tepkisi [83].

Örnek baca gazı	Büyüme değeri (g/l-gün)
% 15 CO ₂	1,66
% 15 CO ₂ + 60 ppm SO ₂	1,24
% 15 CO ₂ +100 ppm SO ₂	0,78
% 15 CO ₂ +150 ppm SO ₂	-

Hauck ve arkadaşlarının çalışmalarına göre, *Chlorella vulgaris* ve *Cyanidium caldarium* türleri %15 CO₂, %3 O₂ ve N₂ içeren gaz ile (temsili baca gazı) beslendiğinde, havayla beslendiği duruma göre biyokütle miktarında önemli artış göstermişlerdir. *C. vulgaris* yüksek CO₂ derişimde yaklaşık 3 kat kadar yüksek biyokütle derişimine ulaşmıştır. *C. caldarium* ise yüksek CO₂ derişiminde 20 kat daha fazla biyokütle artışı sergilemiştir. Bu çalışmada 200 ppm SO₂ içeren temsili baca gazı kullanılarak *C. vulgaris* ve *C. caldarium* türleri üzerinde SO₂'nin etkisi araştırılmıştır. *C. vulgaris* türünün gelişimi tamamen engellenmiştir. *C. caldarium* ise SO₂ içermeyen baca gazına göre 130 kat daha az bir gelişme sergilemiştir. Bu çalışmada ayrıca NO_x'in etkisi test edilmiştir. Yaklaşık 50 ppm NO_x içeren temsili

baça gazının *C. caldarium* türünün gelişimde çok önemli bir engel oluşturmadığı belirtilmiştir. Azot oksitlere ve düşük pH ortamına tolerans göstermelerinden dolayı *C. caldarium* türü, baça gazlarıyla beslenen kültür ortamları için aday tür olarak gösterilmektedir [85].

Chlorococcum littorale türünün, %10 ve %20 oranında CO₂ içeren gaz ile beslendiğinde büyümesine bir engel oluşmadığı görülmüştür [70]. Bu CO₂ derişimlerinde yaklaşık 0,19 g/gün değerinde büyüme görülmüştür. %30 CO₂ kullanılan durumda büyüme değeri neredeyse yarı yarıya azalma göstermiştir. Aynı çalışmada *Chlorella* HA-1 türünün gelişiminde, %10 CO₂ derişiminin üstüne çıkıldığında yavaşlama görülmüştür.

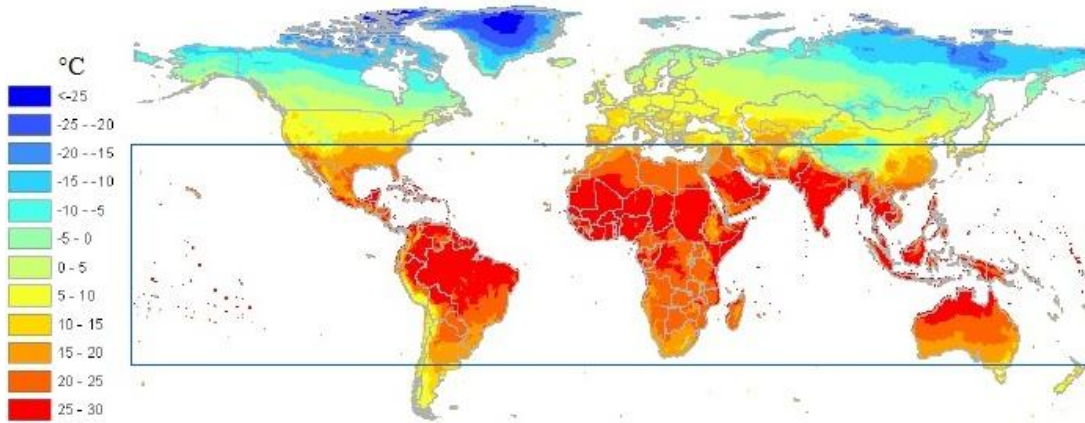
Jiang ve arkadaşlarının çalışmasında [86], *Scenedesmus dimorphus* türü, %2-20 CO₂ derişimlerine ve 150-500 ppm NO₂’ya mükemmel derecede tolerans göstermiştir. *S. dimorphus*’un tolerans gösterdiği en yüksek SO₂ derişimi ise 100 ppm olarak gerçekleşmiştir. SO₂’nin neden olduğu aşırı düşük pH ve bisulfit birikimi mikroalg gelişimini etkilemiştir. CaCO₃ ilavesi ve pH geri beslemesi ile yapılan aralıklı baça gazı dağıtımı ile baça gazının *S. dimorphus* türü üzerindeki engellemesi aşılarak litrede 3 gramın üzerinde mikroalg hücresi değerine ulaşılmıştır. Elde edilen bu sonuç, bu iki yöntemin mikroalg yetiştiriciliğinde baça gazı kullanımının büyük bir potansiyele sahip olduğunu belirttiği ifade edilmiştir.

5.2 Fizibilite Değerlendirmesi

Büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliğinin planlanmasında, tesisin bileşenleri ve çeşitli çevresel şartlar gibi nispeten kontrol edilemeyen koşulların değerlendirilmesi gerekir. Mikroalg yetiştirmeye etki edecek tüm etkenlerin, en uygun vaziyette olmasını sağlamak güçtür. Harmelen ve Oonk [18], sera gazı salınımı azaltımı için mikroalgal biyolojik bağlama (biofixation) sistemlerinin anahtar performans değişkenlerini şu şekilde belirlemişlerdir:

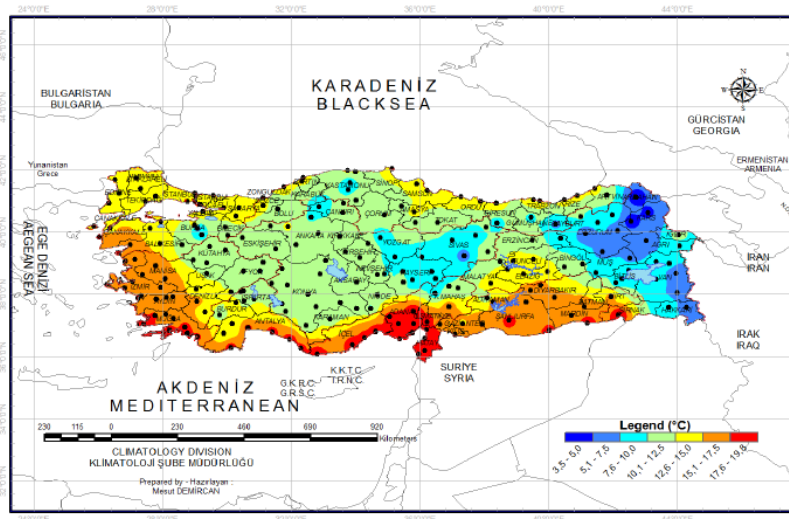
- Baca gazı ve/veya atık suların erişebilirliği veya havuzlara ulaştırılması
- Arazinin fiyatı, maliyeti, uygunluğu, erişebilirliği
- Algal verim, hasat edilebilirlik, işleme
- Ürün değerleri: biyoyakıtlar, sera gazı azaltımı, geri kazanılmış su, gübre ve diğer yan ürünler.

Alg üretimini sınırlayan temel değişken, sıcaklık, güneş ışığı ve ılıman mevsimsellik ile tanımlanan iklimdir. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi, yıllık ortalama sıcaklığın 15 °C ve üzeri olduğu yerler, uygun iklim koşullarının sağlandığı yerlerdir. Sıcaklık faktörü, yeryüzünün her enleminde mikroalg yetiştiriciliği yapılmasına engel oluşturmaktadır. Sıcaklık koşulunu sağlamadığı için uygun görülmeyen coğrafyalar bir hayli geniştir. Bu coğrafyaların genelinde nüfus yoğunluğunun düşük olmasından dolayı arazi temini kolay gözükse bile, iklim unsuru mikroalg yetiştiriciliğini uygulanamaz kılmaktadır.



Şekil 5.3 : 15 °C ve üstü yıllık ortalama sıcaklık değerleri ile mikroalg yetiştiriciliği için uygun iklime sahip yerler [18].

Türkiye coğrafi konumu itibarıyla sıcaklık açısından mikroalg yetiştiriciliği için uygun araziler sunmaktadır. Şekil 5.4'te görüleceği üzere, batı ve güney kıyılarımızın sıcaklık değerleri mikroalg yetiştiriciliğini desteklemektedir.

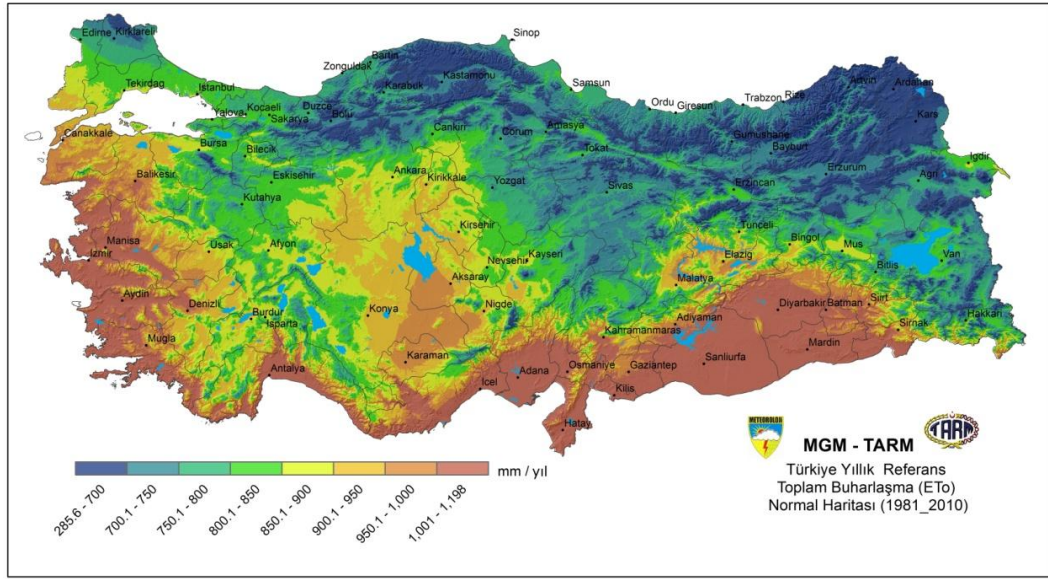


Şekil 5.4 : 1971-2000 yılları Türkiye ortalama sıcaklık normallerinin dağılımı [87].

Yıllık ortalama sıcaklık açısından uygun görülen bölgelerin kış aylarındaki sıcaklık değerleri incelenmelidir. Kışın önemli derecede soğuk geçmesi ve uzun sürmesi mikroalg yetiştiriciliğinin tüm yıl boyunca yapılmasına engel oluşturacaktır.

Buharlaşma, su kanallı havuz sistemiyle mikroalg yetiştiriciliğinde dikkate alınması gereken bir meteorolojik olaydır. Su kanallı havuzların, sığ olmalarından ve mekanik olarak karıştırılmalarından ötürü, su haznelerine göre daha yüksek buharlaşma oranlarına sahip olmaları beklenmektedir. Buharlaşma derecesi, havuzdan uzaklaşan su hacminin havuza beslenen su hacmine oranını ifade eden boşaltma (blow down) oranını etkilemektedir. Bu oran, suyun tuzluluğunun optimal alg üretkenliğini için olan değeri aşmaması amacıyla sabitlenmektedir [13].

Ülkemizin sıcaklık açısından en uygun arazilerinin, en yüksek buharlaşma değerlerine sahip olduğu Şekil 5.15'te görülmektedir [88].



Şekil 5.5 : 1981-2010 yılları Türkiye Yıllık Referans Toplam Buharlaşma (ETO) Normal Haritası [88].

5.2.1 Uygun arazi seçimi

Termik santrallerden salınan CO₂'nin mikroalgler ile azaltılması amacıyla geniş ve düz arazilere ihtiyaç duyulmaktadır. Arazilerin düz olmaması durumunda, araziye mikroalg yetiştiriciliğine uygun hale getirmek arazi maliyetlerini artıracaktır. Arazinin killi veya benzeri düşük su geçirgenliği olan topraktan oluşması istenilen

bir durumdur. Kumlu topraklar, yüksek miktarda sızdırmaya sebep olacağı için ince bir kil tabakası ile kaplanabilirler.

Lundquist ve arkadaşları [13], coğrafi bilgi sistemleri yöntemlerini kullanarak, algal biyoyakıt üretimi için, Kaliforniya'da özkaynak erişebilirliği analizi yapmışlardır. Coğrafi bilgi sistemleri yöntemleri yardımıyla, mikroalg yetiştiriciliği için gerekli unsurlar belirlendikten sonra, en iyi şartlara sahip yerleşimler tespit edilebilir. Bu yöntemlerle, büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği ile ilgili tüm unsurlar aynı anda değerlendirilmiş olur.

5.2.2 Su ihtiyacı

Büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği için gerekli su ihtiyacının karşılanması gerekmektedir. Klasik tarım bitkilerinin aksine, mikroalgler az veya çok tuzlu iç kesim suları gibi düşük kalitedeki sulara yaşayabilmektedirler [13]. Yeryüzü ve yeraltı sularının mevcudiyeti, mikroalg üretimi için ilgili araziye cazip hale getirmektedir. Deniz kıyısına yapılacak olan bir mikroalg yetiştirme tesisinde, su ihtiyacının deniz suyu ile karşılanması mümkündür.

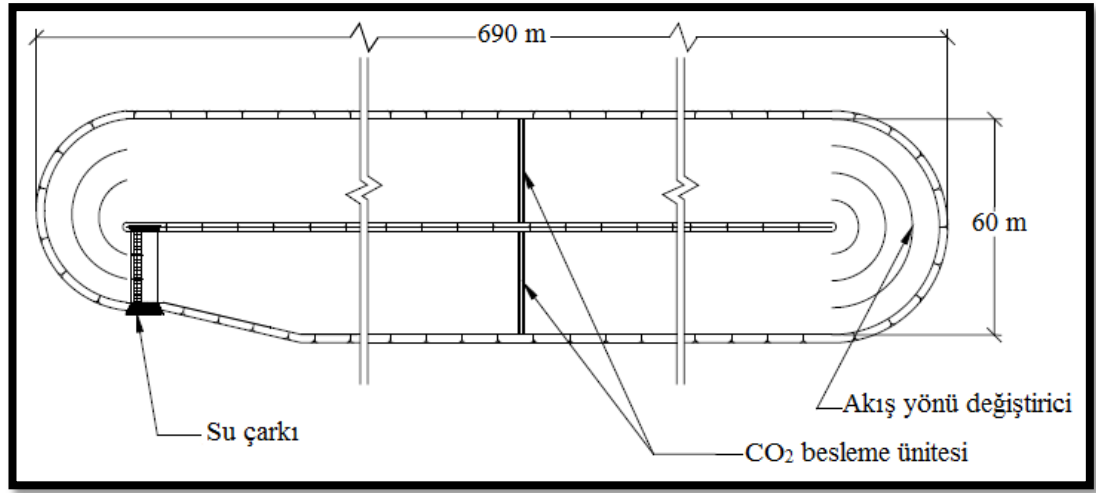
Atık sular, mikroalg yetiştiriciliğinde su kaynağı olarak değerlendirilebilir. Atık su arıtma tesisinin yakınına kurulacak bir mikroalg yetiştirme tesisi, aynı zamanda atık su arıtımında rol de alacaktır. Atık su arıtımında mikroalglerin temel işlevi, organik atıkları parçalayacak bakterilerin duyduğu çözülmüş oksijeni üretmektir [89]. Kentsel atık sular mikroalglerin temel besin ihtiyacı olan azot (~30-40 mg/L), fosfor (~5-10 mg/L) ve diğer temel mikro besinleri içermektedir [13]. Tatlı su kaynaklarında gerek iklim değişikliği gerekse de artan nüfustan ötürü yaşanabilecek bir kıtlığa karşı, atık suların mikroalg üretiminde değerlendirilmesi avantaj sağlamaktadır. Atık suların içeriği kaynaktan kaynağa değişmekte olup zaman içinde de dalgalanmaktadır. Atık sular ağır metal, aşırı iz metaller ve diğer kirleticileri içerebilmektedir [90]. Bundan dolayı, kullanılacak atık suyun kaynağı mikroalg yetiştiriciliği için önem arz etmektedir.

Atık suların arıtımı için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerin her birinde enerji tüketilmektedir. Dünya genelinde tüketilen enerjinin çoğu fosil kaynaklardan temin edildiği için enerji tüketiminin sera gazı salınımını artırdığı ifade edilebilir. Mikroalg yetiştiriciliğinde ihtiyaç duyulan su, atık sulardan karşılandığı zaman arıtılması gereken atık su miktarı azalacaktır. Elde edilecek olan mikroalg

biyokütlesinin biyoyakıt olarak kullanılacağı düşünüldüğünde, hem fosil yakıt kullanılmayacağı hem de yenilenebilir yakıt elde edileceği için, sera gazı salınımı iki kat azaltılmış olacaktır [13, 89]. Ayrıca, atık suların kullanımı mikroalglerin ihtiyaç duyduğu ticari gübrelerin maliyetlerini bertaraf edebilir ve atık su arıtma gelirleri mikroalg üretim tesislerine gelir yaratabilir [91].

5.3 Su Kanallı Havuz Yapısı

Su kanallı havuzlar, ihtiyaca göre farklı büyüklükte inşa edilmektedir. Lundquist ve arkadaşları [13], azami ölçek ekonomisine yaklaşmak için her bir havuzun Şekil 5.6'da gösterildiği gibi, yaklaşık 4 hektar olması gerektiğini belirtmişlerdir.



Şekil 5.6 : 4 hektar büyüklüğündeki bir su kanallı havuzun üstten görünüşü [13].

Mikroalg havuzlarının zemin kaplaması PVC gibi plastikler ile de yapılabilir. Fakat bu seçenek maliyetleri artıran bir unsurdur. Lundquist ve arkadaşları [13], 4 hektar büyüklüğündeki su kanallı havuzun, kaplama fikrine göre maliyetini hesaplamışlardır. Düşük maliyetli plastik ile kaplanan havuz 227 bin \$'a mal olurken, yerinde mevcut kil ile kaplanan havuz 136 bin \$'a mal olmuştur. Bununla birlikte, seçilen mikroalg türünün sürdürülebilmesi için, plastik kaplamalı olmayan havuzların temizlenmesinin mümkün olmadığı belirtilmiştir.

Şekil 5.7'de görülen Yeni Zelanda'daki Christchurch atık su arıtma tesisindeki su kanallı havuzlar, mevcut oksidasyon havuzlarının drenajından, kurutulmasından ve çamurun uzaklaştırılmasından sonra kalan çökeltiden yapılmıştır. Su kanallı havuzun toprak dolgusunun uygun maliyetli inşası, jeotekstil kaplı sıkıştırılmış toprak

banketleri kullanılarak kanıtlanmıştır. Havuzlar pahalı plastik kaplamalara gerek kalmadan işletilmiştir [92].



Şekil 5.7 : Christchurch atık su arıtma tesisinde bir su kanallı havuz, Yeni Zelanda [92].

Kültür ortamına aşılacak mikroalglerin yetiştirileceği küçük havuzların zemini plastikler ile kaplanabilir. Mikroalg tesisi içinde çok az yer kaplayan bu havuzların plastik ile kaplanması maliyetleri çok artırmayacak ve temizlenmeye müsait olduğu için kültür kirlenmesi azaltılmış olacaktır. Lundquist ve arkadaşları, aşılama için yetiştirme havuzlarının toplam alanını, üretim havuzlarının %1'i kadar tasarlamışlar ve bu havuzları, büyüme mevsimini uzatmak ve istenmeyen türler tarafından kirlenmeyi engellemek için sera içine almışlardır [13].

5.3.1 Su çarkları

Su çarkları kültür ortamının karıştırılmasını ve kültür ortamının hareket halinde olmasını sağlamaktadır. Karıştırma sayesinde çökelmenin önüne geçilmektedir. Şekil 5.8'de tipik bir su çarkı görülmektedir.



Şekil 5.8 : Tipik bir su arkı.

Yeni Zelanda'daki Christchurch atık su arıtma tesisinde, 4 adet 1,25 hektarlık su kanallı havuz bulunmaktadır [92]. 1,25 hektar büyüklüğündeki bir havuz için Şekil 5.9'da gösterilen tek bir su arkı kullanılmıştır. 0,20 m/sn değerindeki ortalama su hızı, süspansiyon içinde algal/bakteriyel topakların sürdürülmesi için yeterlidir ve ayrıca havuz dibindeki sedimentin süspansiyona karışmasını da minimize eder. Kullanılan su çarkları 6 metre uzunluğundadır. Su çarkları, 8 adet 0,80 metrelik, galvanize çelikten yapılmış ve boyanmış kanatlara sahiptir. Aks yatakları, pozitif deplasmanlı bir pompaya dönüşen kürek-çarkın altında bulunan, kıvrımlı-sığ bastırma (basınç düşürme) özellikli, beton-dolgulu kürek-çarkın her iki ucundaki beton kaideler ile desteklenmiştir. Su arkı, dişli kutusunun doğrudan tahriği ile çalışmaktadır. Dişli kutusunun 3 kW gücündeki 3 fazlı motoru, değişken hız sürücüsü ile kontrol edilmektedir.



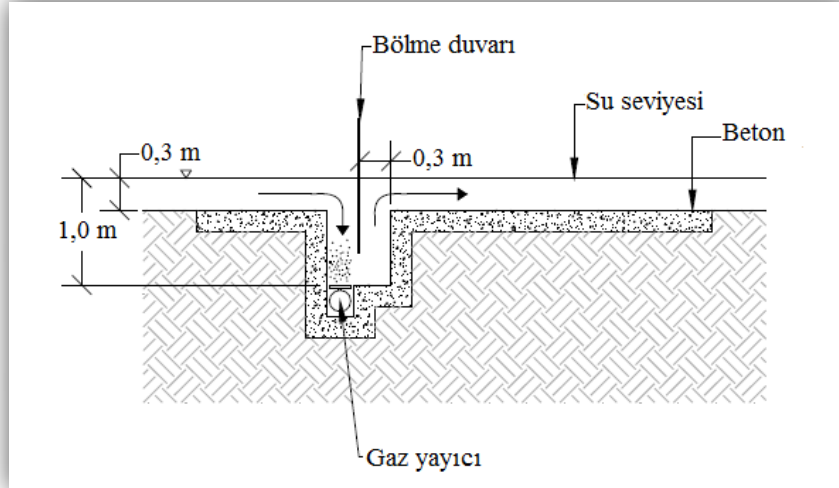
Şekil 5.9 : Christchurch atık su arıtımı havuzunda kullanılan su arkı [92].

Havuzlar 25 ile 35 cm arasındaki bir derinlikte olmalı. Daha düşük derinlikler, büyük sıcaklık değişikliklerine, hidrolik karıştırma problemlerine ve CO₂'nin havuzdan atmosfere geçme oranının aşırı yükselmesine neden olmaktadır. Optimal havuz karışımı, 20 ile 30 cm/sn değerindeki akış hızları arasında görülmektedir. Yüksek karıştırma hızları, çok fazla enerji tüketmekte ve zemini kaplanmamış (unlined) havuzların zeminini sürterek kazımaktadır. Daha düşük hızlar, alglerin çökmesine sebep olmakta ve çok fazla karbondioksit besleme ünitesini gerektirmektedir. Her havuzun su çarkına ve diğer aksamlara ihtiyaç duymasından ötürü, ölçek ekonomisine ulaşmak için her bir havuzun mümkün olduğu kadar geniş olması gerekmektedir. Yaz aylarında tavan yapan CO₂ besleme ihtiyacı, kanal uzunluğunu sınırlandırmaktadır. Kanal çevresindeki akışın hidrolik yük kaybının üstesinden gelmek için gereken kaldırma kuvveti, kanal uzunluğunu kısıtlayan diğer bir unsurdur. Su çarklarının havuz suyunu kaldırması açısından en yüksek kanal çevresi yaklaşık 1400 metredir. Havuzu karıştırmak için gerekli güç, alg kökenli yakıt üretimi sistemlerindeki büyük parazitik kayıplardan biridir. Karıştırma için gereken güç, akış hızının kübüyle artmaktadır [13].

5.3.2 Karbondioksitin havuzlara beslenmesi

Lundquist ve arkadaşları [13], mühendislik açısından, mikroalg üretim sistemlerinin tasarımındaki anahtar meselenin, CO₂ tedariği olduğunu ileri sürmüşlerdir. Mikroalgler için en önemli besin olan karbon, havuzlara genel olarak CO₂ şeklinde beslenmelidir. Ancak, kültür ortamında çözünmüş CO₂'nin depolanması, alkaliliğe bağlı olarak sınırlıdır. Aşırı miktarda CO₂ beslendiği takdirde, havuz yüzeyinden atmosfere salınacaktır. CO₂'nin havuzlara pompalanması parazitik enerji kayıpları yaratacağı için, CO₂'nin verimli kullanımı gereklidir. Bu sebeple, CO₂'nin kontrollü miktarlarda sık sık eklenmesi gerekir.

Şekil 5.10'da bir CO₂ besleme ünitesinin havuz içindeki yapısı gösterilmektedir. CO₂ su tabanının 1 m kadar aşağısından havuz suyuna beslenmektedir. Bu sayede yukarı doğru hareket eden CO₂ kabarcıklarının yolu uzatılmakta ve havuzdan atmosfere doğru olan CO₂ transferi büyük oranda engellenmektedir. Havuz içindeki CO₂ besleme ünitesinin çevresi, havuzun genelinin aksine betondan yapılmıştır. Buradaki amaç CO₂ besleme ünitesinin sağlamlığını artırmak ve CO₂ beslenmesinden dolayı havuz zemininde oluşacak hasarları engellemektir.



Şekil 5.10 : Baca gazı besleme amaçlı kültür sütunu [13].

Christchurch atık su arıtma tesisindeki her havuzda Şekil 5.11’de gösterildiği gibi CO₂ ekleme ünitesi (CO₂ addition sump) bulunmaktadır. Atık su arıtma tesisinin jeneratöründen alınıp boru hattıyla taşınan CO₂, üfleç (blower) ile havuza transfer edilmektedir. pH seviyesini 7,5-8,5 aralığında tutmak için, CO₂ transferi, havuz suyunun pH değeri ile harekete geçen solenoid valfi ile kontrol edilmektedir. CO₂ ekleme haznesi (1 m genişliğinde ve 1,5 m derinliğinde), su kanalı boyunca dağıtılmış ve betondan yapılmıştır. Hazne, dikine bir ayıraç ile alt ve üst akış kısımlarına ayrılmıştır. CO₂, 6 adet kabarcık dağıtıcı tüp boyunca haznenin alt-akış kısmına püskürtülür.



Şekil 5.11 : Christchurch atık su arıtma tesisindeki CO₂ besleme ünitesi [92].

5.4 CO₂ Miktarına Bağlı Mikroalgal Biyokütle Verimi Ve Maliyet Analizi

Büyük bitkiler CO₂ ihtiyacını havadan karşılarlarken, mikroalgler, yüksek büyüme değerleri için zengin CO₂ kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır. Havuz yüzeyindeki sınırlı gaz değişimi, atmosferik CO₂'nin yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Mikroalg verimini artırıp CO₂ tutum maliyetlerini aşağıya çekmek için, termik santral baca gazı gibi yüksek oranda CO₂ içeren gaz karışımlarının mikroalg kültür ortamına beslenmesi gerekmektedir.

5.4.1 Mikroalgal biyokütle verim değerleri

Mikroalglerin biyokütle verimi, yetiştirme sistemine, yetiştirme ve çevre koşullarına göre değişmektedir. Lundquist ve arkadaşları [13], teorik tahminler ve laboratuvar şartlarındaki verilerin, dış ortamdaki kültürler için farklı olduğunu vurgulamaktadırlar. Işık enerjisinin gerek gerçek gerekse de simule edilmiş tam ışık şiddeti yoğunluğunda biyokütleyle dönüşümünde gözlemlenmiş en iyi değerler %1-%3 iken en yüksek teorik değer yaklaşık %10'dur. Işığa doyma etkisinin bu derece düşük verimlere yol açması fotosentetik biyokütle üretimi için, özellikle de mikroalg üretimi için önemli bir problemdir. Gözlem değerlerinden ziyade bazı teorik kabuller üzerinden yapılan hesaplamalar bu sebepten ötürü yanıltıcı sonuçlar sunma tehlikesine sahiptir.

Alabi ve arkadaşların çalışmasında [34], Prince George ve Nanaimo yerleşimleri için biyokütle verim tahminleri Çizelge 5.2'te gösterilmektedir. Çizelge 5.2'de görüldüğü üzere, 12 ay boyunca su kanallı havuzdaki verim değeri, 53°53.4' kuzey enleminde bulunan Prince George yerleşimi için 9,38 g/m²-gün iken, 49°3.0' kuzey enlemindeki Nanaimo yerleşimi için 11,40 g/m²-gün olmuştur. 6 ay çalıştırılan sistem ile ısıtmalı sistem arasındaki ortalama günlük verim farkı, kış ayları boyunca düşük sıcaklığa ve güneş ışınmasına bağlanmıştır.

Çizelge 5.2 : Su kanallı havuzlar için mikroalg verim değerleri [34].

Üretim şekli	Üretim periyodu	Kuru ağırlık bazında verim değerleri (g/m ² -gün)	
		Prince George	Nanaimo
Su kanallı havuz	12 ay	9,38	11,40
Isıtılmı su kanallı havuz	12 ay	15,47	16,00
Su kanallı havuz	6 ay (Nisan-Eylül)	21,60	22,89

Ekvatora yaklaştıkça, birim alana düşen güneş enerjisi ve buna bağlı olarak da sıcaklık artmaktadır. Mikroalg verim değerleri için belirleyici olan bu koşullardan dolayı, diğer şartların eşit olduğu açık havuz sistemleri için, ekvatora yakın enlemlerde daha yüksek mikroalg verimlerine ulaşılabileceği tespiti yapılabilir.

Norsker ve arkadaşları [33], farklı yetiştirme sistemleri için mikroalg verimlerini araştırmışlardır. Su kanallı havuz, tüp şeklindeki fotobiyoreaktör ve düz panel fotobiyoreaktör için verim değerleri sırasıyla, 21, 41 ve 64 ton (kuru ağırlık)/hektar-yıl olarak gözlenmiştir.

5.4.2 CO₂ derişiminin etkisi

Cervantes ve arkadaşları [93], laboratuvar ortamında *Scenedesmus obtusiusculus* türü ile CO₂ bağlama ve yağ depolama araştırması yapmışlardır. Gaz giriş debisinin 0,4 vvm olarak ayarlandığı ortamda, %5 ve %10 CO₂ derişimlerinin ve farklı ışık şiddetlerinin (54,7 $\mu\text{mol/m}^2\text{-sn}$, 94,4 $\mu\text{mol/m}^2\text{-sn}$ ve 134 $\mu\text{mol/m}^2\text{-sn}$) mikroalg büyümesi üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Aynı ışık şiddetinde, %5 ve %10 derişimlerinde CO₂ beslendiğinde, biyokütle verimliliğinde istatistiksel açıdan fark bulunmamıştır. Bu çalışmada *S. obtusiusculus* türünün %10 CO₂ derişiminde gelişebildiği ve ışık enerjisinin mikroalg gelişiminde kısıtlayıcı faktör olabildiği gözlemiştir. 13 günlük yetiştirme sürecinde, en iyi verim değerlerine 134 $\mu\text{mol/m}^2\text{-sn}$ ışık şiddeti altında ulaşılmıştır. 0,4 vvm gaz giriş debisi ve 134 $\mu\text{mol/m}^2\text{-sn}$ ışık şiddeti için çeşitli biyokütle verileri Çizelge 5.3'te verilmektedir. X_{enb} değeri, kültür ortamında birim hacimden elde edilen en yüksek mikroalg biyokütlesi miktarını ifade etmektedir. P_{enb} , kültür ortamında görülen en yüksek günlük mikroalg verim değerini ifade etmektedir. μ , spesifik büyüme değerini ifade etmektedir. Çizelge 5.3'teki μ_{enb} (/gün) değeri, kültür ortamındaki biyokütle miktarının en yüksek günlük artış oranını belirtmektedir. P_{CO_2} , kültür ortamında tutulan CO₂ miktarını belirtmektedir.

Çizelge 5.3 : Scenedesmus obtusiusculus türünün farklı CO₂ derişimleri için büyüme değerleri [93].

Gelişim değişkenleri	CO ₂ derişimi (% v/v)	
	5	10
CO ₂ yükü (kg/m ³ -gün)	40	80
X _{enb} (g/m ³)	6000	5700
P _{enb} (g/m ³ -gün)	500	520
μ _{enb} (/gün)	0,37	0,38
P _{CO2} (g/m ³ -gün)	950	970

Aynı çalışmada 0,4 vvm ve 0,8 vvm olmak üzere iki farklı gaz giriş debisinin biyokütle verimi üzerindeki etkileri, 94,4 μmol/m²-sn ışık şiddetinde ve 80 kg/m³-gün sabit CO₂ yüklemesinde incelenmiştir. Giriş derişimleri 0,4 vvm debisi için %10, 0,8 vvm debisi için %5 olarak ayarlanarak CO₂ yükünün eşit olması sağlanmıştır. En yüksek biyokütle içeriği 0,4 vvm ve 0,8 vvm giriş debileri için sırasıyla 2700 g/m³ ve 3800 g/m³ olmuştur. Spesifik büyüme oranı, giriş debisi 2 katına çıkarılınca 0,34/gün değerinden 0,51/gün değerine yükselmiştir.

Cervantes ve arkadaşları [93], yeterli miktarda karbon beslenmesi durumunda, azotun yetersiz beslenmesiyle, mikroalglerin biyodizel üretimi için uygun bir profilde yağ biriktireceği sonucuna varmışlardır. %1 ile %50 aralığındaki yüksek bir CO₂ derişimi, uygun hasat zamanı ve yağ birikimini artıran azot içeriği yağ birikimi açısından önemli 3 etken olarak değerlendirilmiştir.

5.4.3 Maliyet

Chisti [2], yıllık 100 ton mikroalg üretimi üzerinden yaptığı hesaplamalarla, 1 kg mikroalg elde etmenin maliyetini fotobiyoreaktör sistemi ile 2,95 \$, su kanallı havuz sistemi ile 3,80 \$ olarak belirlemiştir. Yıllık kapasite 10.000 tona yükseltildiğinde, ölçek ekonomisi sebebiyle, 1 kg mikroalg elde etmenin maliyeti fotobiyoreaktörler için 0,47 \$, su kanallı havuzlar için 0,60 \$ değerine kadar düşmüştür. 100 ton üretim kapasitesi için 978 m²lik 8 adet su kanallı havuz gerekli görülmüştür. Derinliği 30 cm olan bu havuzlar için verim değeri 35g/m²-gün olarak alınmıştır.

Alabi ve arkadaşları [34], toplam 400 hektar, zemini kaplanmış su kanallı havuz tesisinde, 9,38 g/m²-gün verim değeri kabulüyle 1 kg kuru mikroalg biyokütlesinin maliyetini 2,66 \$ olarak bulmuştur. Alabi ve arkadaşlarının çalışmasında,

Kanada'nın Bristish Columbia eyaleti için yaptığı çalışmada mikroalgler ile CO₂ yakalama ve azaltımının maliyeti 1 ton CO₂ başına 793 \$ olarak tespit edilmiştir.

Alabi ve arkadaşlarının çalışmasında, mikroalglerden enerji elde etmenin ekonomik açıdan uygulanabilir olması için, yüksek değerli yan ürünlerin de üretildiği bir modelin bir seçenek olabileceği belirtilmiştir. Aynı çalışmada ilgili yan ürünlerin pazar ve fiyat yapısının, büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği için araştırılması gerektiği vurgulanmıştır. Alabi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, optimistik senaryoda dahi, fosil yakıt fiyatları ile yarışacak sonuçlar elde edilememiştir.

Lundquist ve arkadaşlarının [13], atık su arıtımı ve değerlendirilmesi, biyodizel ve biyogaz gibi biyoyakıtların üretilmesi gibi çeşitli senaryolardan oluşan kapsamlı çalışmasında, teknolojiye büyük ilerlemeler kaydedilmediği sürece, mikroalg kökenli biyoyakıtların fosil yakıtlarla hatta diğer biyoyakıtlarla maliyet açısından rekabetçi olamayacağı sonucuna varılmıştır. Lundquist ve arkadaşları yaptıkları çalışmadan temel sonuç olarak, mikroalglerden yağ üretmenin düşük maliyetli sistem tasarımı, yüksek mikroalg yetiştirme verimi, yüksek yağ içeriği, düşük maliyetli hasat ve işleme gibi lehte kabullerle bile mikroalglerle yağ üretiminin pahalı olacağını çıkartmışlardır.

Çizelge 5.4'te Christchurch atık su arıtma tesisinin havuzuna ait maliyetler görülmektedir. Havuzun kendi maliyeti 3,70 NZ \$/m², karıştırma maliyeti 2,20 NZ \$/m², CO₂ ekleme ünitesinin maliyeti 2,24 NZ \$/m² ve pH ünitesinin maliyeti 0,82 NZ \$/m²'dir. 4 adet 1,25 hektar büyüklüğündeki havuzların toplam maliyeti m²'si 8,96 NZ \$'dan 448.000 NZ \$ olmuştur [92].

Çizelge 5.4 : Christchurch atık su arıtma tesisinin su kanallı havuz maliyetleri [92].

		Maliyet (NZ \$)	Birikimli maliyet (NZ \$)	Birikimli maliyet (NZ \$/hektar)	Birikimli maliyet (NZ \$/m ²)
Havuz	Hafriyat	108.000	185.000	37.000	3,70
	Su bendi koruması	51.000			
	Akım saptırma bölmesi	26.000			
Karıştırma	Çark	87.000	110.000	22.000	2,20
	Çark istasyonu	23.000			
CO₂ ekleme	CO₂ pompası	90.000	112.000	22.400	2,24
	CO₂ püskürtme cihazı	22.000			
pH kontrolü ve valfler		41.000	41.000	8.200	0,82
Toplam			448.000	89.600	8,96

6. MİKROALGAL BİYOKÜTLE HASADI VE MİKROALG KÖKENLİ ÜRÜNLER

6.1 Mikroalg Hasadı Ve Biyokütle Eldesi

Hasat edilen mikroalg kültürlerinden suyun uzaklaştırılması önemli bir maliyet unsurudur. Kuru mikroalg biyokütlesi elde etmek için suyun tamamen uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu teknik olarak mümkün olmakla beraber ekonomik açıdan olumsuzluk yaratan bir işlemdir. Çünkü suyun uzaklaştırılması için önemli derecede enerji tüketimi gerçekleşecektir. CO₂ tutum projelerinde düşük maliyetli hasat işlemleri değerlendirilmelidir. Mümkün olan en düşük maliyetin hedeflendiği CO₂ tutum projelerinde güneş ile doğal kurutma seçeneği düşünülmesi gereken bir tekniktir.

Mikroalg hasadını, toptan hasat (kitle hasadı, bulk harvesting) ve yoğunlaştırma veya kıvamlştırma (thickening) olmak üzere iki temel aşamada ele almak mümkündür. Toptan hasatta biyokütleyi süspansiyondan ayırmak için bütün kitle üzerinde işlem yapılır. Toptan hasatta 100 ile 800 kat arası kadar derişim değışikliği sağlanmakta [50, 94], %2-7 gibi oranlarda katı maddeye erişilmektedir. Bu sayısal değerler biyokütlenin ilk derişimine ve kitle hasadında kullanılan yöntemle göre değışmektedir. Flokülasyon, yüzdürme ve yer çekimi ile çökeltme bu aşamada kullanılan yöntemlerdendir [94].

Yoğunlaştırma aşamasında mikroalg çamurunda (mikroalg pastası) 10 ile 30 kat arasında derişim artışı sağlanmaktadır [50, 94]. Santrifüjleme ve süzme bu aşamada kullanılan en yaygın teknolojilerdir [50].

Mikroalg hasadı ve su içeriğinin azaltılması için en iyi denecek tek bir metot yoktur [90]. Mikroalgin boyutu ve yoğunluğu gibi karakteristik özellikler, kullanılacak hasat tekniğinin seçiminde etkili olmaktadır [95]. Mikroalg hücrelerinin 3-30 µm kadar küçük çapa sahip olanları, biyokütlenin geri kazanımını büyük bir probleme dönüştürebilmektedir [96].

6.1.1 Flokülasyon (Topaklanma)

Flokülasyon, kitle hasadının ilk aşamasıdır. Mikroalg hücreleri bu yöntem ile bir araya toplanarak parça boyutlarını artırır.

Mikroalg hücreleri negatif yük taşımaktadırlar. Bu durum kültür ortamında hücrelerin doğal toplanmasına engel oluşturmaktadır. Negatif yükü nötrlemek veya azaltmak için çok değerlikli (multivalan) katyonlar ve katyonik polimerler gibi topaklaştırıcılar (floculants) eklenmektedir [94, 96].

Mikroalg hücrelerinin küçük gruplar şeklinde topaklanması (coagulation), çöktürmeye ve biyokütleyi kültür ortamından kolayca çıkartmaya olanak tanımaktadır [97].

Kullanılacak olan topaklaştırıcının seçimi dikkat edilmesi gereken bir husustur. İdeal bir topaklaştırıcı ucuz, zehirsiz ve düşük derişimlerde etkili olmalı, sonraki işlemler için ise ters etki oluşturmamalıdır [96].

Basitliği ve çeşitli teknikleri içermesi sebebiyle flokülasyon işlemi önceden beri geri kazanımda uygulanmaktadır [97]. Kimyasal flokülasyon, otoflokülasyon, biyoflokülasyon, elektroflokülasyon, köpük flokülasyonu (foam flocculation), ozon flokülasyonu, polielektrolit flokülasyon çeşitli flokülasyon yöntemlerindedir. Flokülasyon yöntemleri su ve atık su arıtımında kullanılmaktadır [24, 97].

Kalsiyum oksit (lime), alüminyum sülfat (alum), demir klorür (ferric chloride) gibi kimyasalların kullanıldığı kimyasal flokülasyon en genel ve yaygın mikroalg hasat yöntemidir ve çoğu mikroalg hücresi için uygulanabilmektedir. Topaklaştırıcılar ve uygulanan işlemler, kimyasal flokülasyonu pahalı kılmakta ve düşük maliyetli sera gazı azaltımı için uygulanamaz hale getirmektedir. Henüz tam olarak anlaşılmayan biyoflokülasyon, yer çekimli çöktürme ile birlikte uygulandığında mikroalgler ile sera gazı azaltımı için uygun olan en düşük maliyetli, birincil hasat yöntemidir [89].

6.1.2 Santrifüjleme

Santrifüjleme, çoğu mikroalg türünün hasadında kullanılabilecek bir tekniktir [96]. Dunaliella gibi çok hassas cinsler haricinde [89] kullanılması mikroalg hasadında santrifüjleme yöntemine bir üstünlük sağlamaktadır. Hassaslık hücre zarlarıyla ilgili bir durumdur. Hücre zarının istenmeyen şekilde parçalanması bazı ürünlerin kaybına yol açabilir.

Santrifüjleme, hızlı hasada imkan tanıyan fakat enerji tüketiminin yoğun olduğu bir hasat yöntemidir [96]. Genellikle bir motor tarafından çalıştırılan santrifüjde yoğunluk farklılığı ile biyokütle ve su ayrılmaktadır.

Santrifüjleme metodu büyük ölçekli mikroalg hasadı için yüksek enerji gereksinimi sebebiyle kullanışsız olarak değerlendirilmekle beraber, büyük endüstriyel santrifüjler su ve atık su arıtımında çamurun kurutulması maksadıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [97]. Santrifüjleme tekniğinin 1.000 \$/ton (kuru madde, dry mass basis) değerinin epeyce üzerinde olan yatırım ve işletim maliyetleri sera gazı azaltımı süreçleri ve atık su arıtımı için son derece pahalıdır [89].

Ticari mikroalg hasadında çoğunlukla santrifüjden faydalanılmaktadır. Maliyet ve enerji gereksinimi kalemleri santrifüj ile hasadın zayıf taraflarıdır. Mikroalglerden biyoyakıt üretimi üzerine yapılan analizlere göre toplam ekipman yatırımının %34'ü santrifüj düzeneği için kullanılmıştır. Santrifüj cihazının enerji tüketimi ise toplam tüketimin %48,8'ine denk gelmektedir. Mikroalg kültürlerinin derişimleri hasat sürecini etkilemektedir. Santrifüjleme tekniği için derişimi litrede 0,3 g değerinden 100 g/L değerine yükseltmenin maliyeti 2,72 €/kg iken, 50 g/L değerinden aynı hedefe ulaşmak sadece 0,7 €/kg olarak gerçekleşmektedir. İlk durumda enerji tüketimi 4,76 kWh/kg iken, ikincisinde 0,4-0,6 kWh/kg değerindedir. Başlangıç derişiminindeki bu değişiklik yüzdürme veya çökeltme ile birleştirilmiş flokülasyon ile başarılabilir [27].

6.1.3 Süzme (Filtration)

Süzme işleminin temelinde hasat edilmek istenen kütlenin belirli açıklığa sahip eleklerden geçirilmesi vardır. Parçacıklar boyutlarına göre ya geçerler ya da elek üzerinde kalırlar. Süzme, basınç veya vakum ile uygulanabilir [34]. Süzme işlemi kavramsal açıdan basittir ama çok pahalı olma potansiyeline sahiptir. Filtrenin gözenek boyutu, malzemesi ve tasarımı ile mikroalg biyokütlesinin filtreden kazanımı hususlarının daha iyi anlaşılması ile süzme işlemi optimize edilebilir [49].

Coelastrum ve Spirulina gibi nispeten büyük (>70 µm) mikroalglerin hasadı konvansiyonel filtrasyon için en uygun olandır [94]. Konvansiyonel filtrasyona alternatif olarak membran mikrofiltrasyonu ve ultrafiltrasyon vardır. Membran filtrasyonu genel itibarıyla büyük ölçekli mikroalg biyokütlesi üretiminde kullanılmamaktadır. Mikrofiltrasyon sadece günlük 2 m³ten küçük hacimlerin

filtrelenmesinde santrifüjden daha uygun maliyetli olabilmektedir [96]. Membran mikrofiltrasyonu ve ultrafiltrasyon hassas (fragile) hücreler ve küçük ölçekli üretimler için daha uygundur. Bu filtrasyon çeşitleri özellikle membranların yenileriyle değiştirilmesi ve pompalama gibi etkenlerden ötürü daha pahalıdır [14].

Teğetsel akış filtrasyonu (çapraz akış filtrasyonu) büyük miktarlardaki mikroalg kültürlerinin geri kazanımında umut verici bir tekniktir. Adından anlaşılacağı üzere, bu teknikte, kültür ortamı membran boyunca teğetsel olarak akmaktadır. Teğetsel akış filtrasyonunun diğer tekniklere göre üstünlüğü, birikinti (debris) ve mikroalg hücrelerinin tamamen uzaklaştırılmasının başarılabilir olmasıdır [98].

Teğetsel akış filtrasyonu gibi membran ile filtrasyon teknikleri bazı uygulamalarda avantaj sağlasa da sera gazı azaltımı için çok pahalı olacaktır [89].

6.1.4 Yüzdürme (Flotation)

Yüzdürme, bir yer çekimi ile ayırma yöntemidir. Bu yöntemde hava veya gaz kabarcıkları katı parçacıklara bağlanır. Bu parçacıklar sıvı yüzeyin üstüne çıkarlar ve burada birikirler. Parçacıkların birikmesinin ardından bu parçacıklar sıyrılarak ortamdan toplanabilir.

Yüzdürme tekniğinin başarısı askıda duran parçacıkların kararsızlığına (instability) bağlıdır. Kararsızlık (hareketlilik) ne kadar az olursa, hava parçacık (mikroalg) teması daha fazla olacaktır. Bu da hava ile temas halinde olan ve bu sebeple yüzen mikroalg miktarını artıracaktır [99].

Kabarcık üretimine göre 3 temel yüzdürme tekniği mevcuttur: çözülmüş hava yüzdürmesi, dağınkı (dispersed) hava yüzdürmesi ve elektrolitik yüzdürme [98].

Yüzdürme tekniği flokülasyonla beraber uygulanmaktadır. Flokülasyon yöntemi ile bir araya gelip çöken parçacıklar çeşitli yüzdürme teknikleriyle yüzeye çıkarılarak hücre zarını kırma, yağ veya diğer ürün ekstraksiyonu gibi daha sonraki işlemler için toplanmaktadır. Flokülasyon işlemleri ile kümelenen hücreler çökme ile de toplanabilir. Fakat yüzdürme tekniklerinden öne çıkan çözülmüş hava ile yüzdürme yöntemi, daha pahalı olmasına karşın daha derişik biyokütle kazanımı sağlamaktadır [89].

6.1.5 Yer çekimi ile çökeltme (Gravity sedimentation)

Bu yöntemde esas olan yer çekimi etkisidir. Mikroalg hücreleri doğal yer çekimi ile buldukları kültür ortamının zeminine doğru çökerler. Askıda duran hücrelerin çökmesinde hücrelerin çapları ve yoğunlukları etkili olan faktörlerdendir [94]. Mikroalg hücreleri flokülasyon yöntemi ile topaklaştırıldığında yer çekimi ile çökeltme işlemi daha etkili olmaktadır. Yer çekimli çökeltme ile mikroalg hasadı su ve atık su arıtma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [100].

Yer çekimi ile çökelmiş sulu çamurlar (sludge) santrifüj ile elde edilenlere göre daha seyreltik olmaktadır [96]. Elde edilen biyoküttele su oranının yüksek olması sonraki işlemlerin ekonomikliği açısından önemli derecede olumsuz etki yaratmaktadır [14].

Yer çekimi ile çökeltme hasat tekniği, lamel adı verilen ayırıcılar ve çökeltme tankları aracılığıyla uygulanabilir. Mikroalglerin çökeltme tankları ile ayrılması pahalı olmayan bir süreçtir [98]. Flokülasyon ile birleştirilmiş yer çekimli çökeltme son derece düşük değerli ürünler için kullanılabilir bir hasat yöntemi olabilir [14, 96].

6.2 Mikroalg Kökenli Ürünler

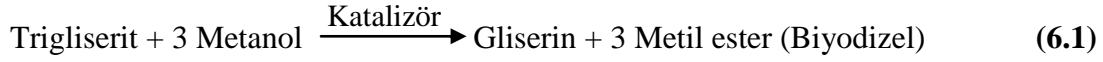
Mikroalg biyokütlesinden çok farklı ürünler elde edilebilir. Bazı ürünlerin eldesi için biyokütlenin tamamen kurutulması gerekmektedir. Suyun tamamen uzaklaştırılması mümkün olsa da, önemli bir maliyet yükü oluşturmaktadır. Kuru biyoküttele girdisi isteyen ürünlere, sulu biyoküttele süreçleri geliştirilebilirse ürünlerin maliyetinde düşüş gözlemlenebilir. Bu sayede ilgili mikroalg kökenli ürünler, farklı kaynaklardan üretilmiş benzer ürünlere karşı ekonomik açıdan rekabetçi olabilir. Mikroalg kökenli ürünleri genel olarak enerji ürünleri ve enerji dışı ürünler olarak sınıflandırmak mümkündür.

6.2.1 Enerji ürünleri

Mikroalg biyokütlesinden, fosil yakıtlara alternatif olabilecek çeşitli biyoyakıtlar elde etmek mümkündür.

6.2.1.1 Biyodizel

Biyodizel, genel itibarıyla, bitkisel veya hayvansal yağların transesterifikasyonu ile elde edilen metil esterlerden oluşur (Denk. 6.1). Aşırı metanol kullanımı, reaksiyonun eşitliğin sağ tarafına doğru gerçekleşmesini kolaylaştırır. Aşırı metanol geri kazanılarak tekrar kullanılır [101].



Biyodizel şu anda konvansiyonel yakıt bitkilerinden elde edilmektedir. Bazı ülkeler, taşıtlardaki kullanımı için, petrol kökenli dizel ile biyodizelin karıştırılarak satılmasını zorunlu kılmışlardır. Gerekli olan biyodizel konvansiyonel yakıt bitkilerinden elde edilmektedir.

Yağ kaynağı olarak mikroalglerin konvansiyonel yakıt bitkilerinden en önemli farkı, verim değerleridir. Pek çok mikroalg türünün yağ üretkenliği, en iyi yağ üreten bitkiden dahi daha yüksektir. Biyodizel üretiminde kullanılan mikroalgler genellikle sucul (aquatic) tek hücreli yeşil alglerdir. Bu tip mikroalgler, yüksek büyüme hızı ve yüksek popülasyon sıklığı ile karakterize edilen fotosentetik ökaryot hücreli mikroalglerdir. Yeşil mikroalgler şartların uygun olması durumunda, 24 saatten daha kısa bir sürede biyokütlelerini ikiye katlayabilirler. Mikroalg yağlarının biyodizele dönüşüm prosesleri, klasik tarım bitkilerinin yağlarında olduğu kadar kolaydır [102].

Çizelge 6.1’de, mikroalgler ve diğer biyodizel hammaddelerinin karşılaştırılması verilmektedir. Çizelge 6.2’de ise bazı mikroalg cinslerinin ve türlerinin yağ içerikleri verilmektedir.

Çizelge 6.1 : Mikroalgler ve diğer biyodizel hammaddeleri [14].

Kaynak	Tohum yağı içeriği (kütlece yağ yüzdesi)	Yağ verimi (litre yağ/ha-yıl)	Arazi kullanımı (m ² -yıl/kg biyodizel)	Biyodizel üretkenliği (kg biyodizel/ha-yıl)
Mısır	44	172	66	152
Kenevir (Hemp)	33	363	31	321
Soya	18	636	18	562
Jatrofa	28	741	15	656
Ketencik (Camelina)	42	915	12	809
Kanola/Kolza	41	974	12	862
Ay çiçeği	40	1.070	11	946
Hintyağı otu (Castor)	48	1.307	9	1.156
Palm yağı	36	5.366	2	4.747
Mikroalg (düşük seviyede yağ içeriği)	30	58.700	0,2	51.927
Mikroalg (orta seviyede yağ içeriği)	50	97.800	0,1	86.515
Mikroalg (yüksek seviyede yağ içeriği)	70	136.900	0,1	121.104

Çizelge 6.2 : Bazı mikroalg cinslerinin ve türlerinin yağ içerikleri [2].

Mikroalg	Yağ içeriği (kuru ağırlık yüzdesi)
Botryococcus braunii	25-75
Chlorella sp.	28-32
Cryptocodinium cohnii	20
Cylindrotheca sp.	16-37
Dunaliella primolecta	23
Isochrysis sp.	25-33
Monallanthus salina	>20
Nannochloris sp.	20-35
Nannochloropsis sp.	31-68
Neochloris oleoabundans	35-54
Nitzschia sp.	45-47
Phaeodactylum tricornutum	23-30
Schizochytrium sp.	50-77
Tetraselmis sueica	15-23

6.2.1.2 Biyoetanol

Biyoetanol üretimi için genel olarak iki yöntem uygulanmaktadır. Biri biyokimyasal bir proses olan fermantasyon, diğeri ise gazlaştırmadır. Mikroalgler fermantasyon için kullanılabilecek karbon kaynağı olarak karbonhidrat ve proteince zengindir [103]. Mikroalgler, glikoz ve sakaroz biriktirme yeteğine sahiptirler. Bu şekerlerden oksijensiz (anaerobik) fermantasyon ile etanol üretilebilir. Etanol, kültür ortamından direkt olarak çıkarılabildiğinde, etanol üretim prosesi, rekabetçi biyoyakıt proseslerinden büyük oranda daha az sermaye ve enerji yoğun olacaktır. Bu proses, biyokütlenin sudan ayrılmasını ve yağın çıkarılıp işlenmesini gereksiz hale getirmektedir [104].

Mikroalg fermantasyonuyla ilgili sınırlı miktarda rapor olmasına rağmen, mikroalglerden biyoetanol üretimi için birtakım avantajlar gözlenmiştir. Biyodizel üretim sistemi ile kıyaslandığında, fermantasyon prosesi daha az enerji tüketimi gerektirmekte ve daha sade bir prosestir. Fermantasyon sonucu oluşan CO₂, mikroalg yetiştirme sistemlerine beslenebilir. Mikroalglerden biyoetanol üretimi henüz ticarileşmemiştir [105].

6.2.1.3 Biyogaz (Biyometan)

Metan fermantasyon teknolojisini mikroalglerle uygulanması, biyogaz gibi değerli bir yan ürünün elde edilmesinden dolayı dikkat çekmektedir [105]. Biyogaz esas olarak, anaerobik çürüme sırasında oluşan CH₄ (%55-75) ve CO₂'nin (%25-45) karışımlarından oluşmakla beraber, az miktarda hidrojen sülfid (H₂S), nem ve siloksan da içerebilmektedir.

Biyometan çok sayıda biyokütle ürününden (biomass crops) ve ürün atıklarından elde edilebilir. Nispeten yüksek yağ, nişasta ve protein içeriğinin yanı sıra, fermente edilmesi zor olan ligninin (bitkilerin hücre duvarlarında bulunan kompleks bir kimyasal bileşik) bulunmaması, verimli biyometan üretimi için mikroalgleri ideal bir aday yapmaktadır. Çizelge 6.3'te çeşitli mikroalglerin metan verimleri verilmektedir. Mikroalg biyokütlesi elde etmenin yüksek maliyetli olması ve üretim kapasitesinin ticari biyogaz santrallerinin taleplerini karşılamada yetersiz kalması, mikroalglerin diğer biyometan kaynakları karşısında rekabet edememesine neden olmaktadır [90].

Çizelge 6.3 : Çeşitli mikroalglerin metan verimleri [105].

Biyokütle	Metan verimi (m³/kg)
Laminaria sp.	0,26-0,28
Gracilaria sp.	0,28-0,40
Macrocystis	0,39-0,41
L. Digitata	0,50
Ulva sp.	0,20

6.2.2 Enerji dışı ürünler

Mikroalgler, yüksek değerli çeşitli kimyasal bileşikler için, kullanılan mikroalg türüne bağlı olarak, önemli bir hammaddedir. Elde edilen bu değerli bileşikler, gerek doğrudan beşeri beslenmede gerekse ilaç gibi çeşitli alanlarda kullanılarak beşeri kullanıma hizmet etmektedir. Mikroalgler, gübre ve hayvansal yem olarak kullanıldığı gibi kozmetik sektöründe de kullanılan bir hammaddedir.

6.2.2.1 Beşeri tüketim

Mikroalgler gıda ürünü olarak tablet, kapsül ve sıvı gibi değişik formlarda pazarlanmaktadır [106, 107]. Mikroalgler sahip olunan protein kalitesi açısından bitkisel kaynaklara kıyasla zengin, hayvansal kaynaklara kıyasla fakirdir [14].

Mikroalgal pazarını domine eden mikroalgler Chlorella ve Spirulina'dır. Çizelge 6.4'te mikroalg üretim miktarları verilmektedir. Almanya'da gıda üretim ve dağıtım firmaları, mikroalgli fonksiyonel ürünleri pazarlamak için önemli çalışmalar başlatmışlardır. Mikroalg içeren pasta, ekmek, yoğurt ve meşrubatlar hazırlanan ürünlere örnek olarak gösterilebilir. Benzer gelişmeler, Fransa, Japonya, ABD, Çin ve Tayland'da da görülmektedir [108].

Çizelge 6.4 : Mikroalg üretim miktarları [94].

Mikroalg	Yıllık üretim	Uygulama ve Ürün	Fiyat (€)
Spirulina	3000 ton kuru ağırlık	Beşeri besin	36 kg ⁻¹ 11 mg ⁻¹
		Hayvansal besin	
		Kozmetik	
		Phycobiliproteins	
Chlorella	2000 ton kuru ağırlık	Beşeri besin	36 kg ⁻¹ 50 l ⁻¹
		Kozmetik	
		Su ürünleri yetiştiriciliği	
Dunaliella salina	1200 ton kuru ağırlık	Beşeri besin	215-2150 kg ⁻¹
		Kozmetik	
		β-karoten	
Aphanizomenon flos-aquae	500 ton kuru ağırlık	Beşeri tüketim	
Haematococcus pluvialis	300 ton kuru ağırlık	Su ürünleri yetiştiriciliği	50 l ⁻¹
		Astaksantin	7150 kg ⁻¹
Cryptocodinium cohnii	240 ton DHA yağı	DHA yağı	43 g ⁻¹
Shizochytrium	10 ton DHA yağı	DHA yağı	43 g ⁻¹

Mikroalgler gıda ürünlerine ek olarak, bitkisel veya hayvansal kaynakları kullanarak üretmenin uygun olmadığı veya aşırı pahalı olduğu ilaç, vitamin, aşı, nutrosotik (kapsül benzeri formdaki doğal ürünler) ve diğer besinlerin üretiminde de kullanılmaktadır [106].

Pigmentler (Renkveren, Renk maddeciği)

Mikroalgler aldığı ışık oranıyla (light incidence) ilişkili olarak çok sayıda pigment içermektedir. Mikroalglerde görülen üç temel fotosentetik pigment; klorofiller, karotenoidler ve fikobilinlerdir [108].

Klorofiller birincil fotosentetik pigmentlerdir. Klorofiller, mikroalglerden elde edilen farmakolojik olarak önemli bir üründür. Klorofillerin kısaçalışıcı etkisi, onları

özellikle karaciğer ve ülser tedavisinde ilaç olarak faydalanılabilir yapmaktadır [103].

Karotenoidler bitkileri güneş radyasyonundan ve onun ilgili etkilerine karşı korurlar. Karotenoidlerin antioksidan işlevselliği, beşeri tüketim için büyük öneme sahiptir. Bilinen 400'den fazla karotenoid arasında, β -karoten, astaksantin ve daha az önemli olarak lutein, zeaksantin, likopen ve biksin olmak üzere, çok azı ticari olarak kullanılmaktadır [107]. Antioksidanlar, anti-kanser özelliğine sahip, serbest radikal temizleyicisi işlevini görürler. Astaksantin, en etkili doğal antioksidan olarak bilinmektedir. Astaksantin genellikle sentetik olarak üretilmektedir. *Haematococcus pluvialis* türünden mikroalg kökenli astaksantin için büyüyen bir pazar vardır. β -karoten, antioksidan etkisine sahip olduğu için, doğal besinlerde (health foods) provitamin A olarak kullanılmaktadır [106].

Fikobilinler (Phycobilins, Phycobiliproteins) ışık enerjisinin daha verimli değerlendirilmesini sağlamaktadırlar. Fikobilinler çok güçlü ve floresan özelliklere bir hayli hassas olmaları sebebiyle, klinik veya araştırma bağışıklık biliminde geniş çapta kullanılmaktadır [107]. Fikobilinler koyu kırmızı veya koyu mavi, suda çözünen, kompleks, protein içeren bileşiklerdir. Fikobilinler gıda, kozmetikler ve tıbbi ilaçlar için doğal renklendirici olabilirler [109]. Fikobilinprotein renklendiricileri için 3-25 \$/mg arasında değişen fiyatlarla 50 milyon \$ değerinde pazar tahmin edilmektedir [107].

Çoklu doymamış yağ asitleri (PUFAs)

14-20 karbonlu yağ asitlerinin biyodizel üretiminde kullanılmasının yanında, 20'den fazla karbonlu çoklu doymamış yağ asitleri de doğal gıda (health food) pazarında yüksek değerli bileşiklerdir. Büyük yapılı bitkiler ve hayvanların çoğu 18 karbonludan fazla PUFA'nın sentezi için gerekli enzimlerden yoksundur. Bu yapılar iyi işleyiş ile birlikte, vücut zarlarına esneklik, akışkanlık ve seçici geçirgenlik özelliği vermede birinci derecede önemlidir. Çoklu doymamış yağ asitleri, 18 veya daha fazla karbon içeren bir yağ asidi iskelet zincirinde, üç veya daha fazla çift bağdan oluşur. Uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitlerinin yaygın olan kaynağı balık ve balık yağı asitleridir. Balıklarda bulunan çoklu doymamış yağ asitleri, okyanus ortamındaki parçalanmış (digested) mikroalglerden sağlanmaktadır. Bu sebepten, mikroalgler, çoklu doymamış yağ asitlerinin direkt potansiyel kaynağı

olarak değerlendirilebilir [110]. Çizelge 6.5'te mikroalg kökenli önemli çoklu doymamış yağ asitleri verilmektedir.

Çizelge 6.5 : Mikroalg kökenli önemli çoklu doymamış yağ asitleri [107].

PUFA	Yapı	Potansiyel Uygulama	Mikroalg
γ -Linolenik asit (GLA)	18:3 ω 6, 9, 12	Bebek maması Ek besinler	Arthrospira
Araşidonik asit (AA)	20:4 ω 6, 9, 12, 15	Bebek maması Ek besinler	Porphyridium
Eikosapentaenik asit (EPA)	20:5 ω 3, 6, 9, 12, 15	Ek besinler Su ürünleri yetiştiriciliği	Nannochloropsis, Phaeodactylum, Nitzchia
Dokosaheksaenik asit (DHA)	22:6 ω 3, 6, 9, 12, 15, 18	Bebek maması Ek besinler Su ürünleri yetiştiriciliği	Cryptocodinium, Schizochytrium

Mikroalgler çoklu doymamış yağ asitlerinin birincil kaynağı olmanın yanı sıra, hoş olmayan kokuda olmamaları, kimyasal kirlenme riskinin az olması ve daha iyi saflaştırma potansiyeli sebebiyle balık yağlarına karşı üstün konumdadırlar [108]. Ticari olarak üretilen tüm mikroalg çoklu doymamış yağ asitleri içinde, eikosapentaenik asit (EPA, 20:5, ω -3) ve dokosaheksaenik asit (DHA, 22:6, ω -3) ilgi çeken biyoaktiviteye sahiptirler. Mikroalgler büyük miktarlarda, yüksek kaliteli EPA ve DHA içermektedir [110]. DHA; kanser, AIDS ve kalp hastalıklarından korunmada ve bunların tedavisinde, kolesterolü düşürmede ve kontrol etmede, bağışıklık sistemini canlandırmada ve detoks malzemesi olarak, klinik kullanıma sahiptir [103]. Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7'de, sırasıyla, çeşitli mikroalglerin literatürdeki DHA ve EPA üretimleri verilmektedir.

Çizelge 6.6 : Çeşitli mikroalglerde DHA üretimi [110].

Mikroalg	DHA içeriği (mg DHA/g biyokütle)	DHA (% toplam yağ asidi)
Schizochytrium sp.	100-277	32,5-49
Cryptocodinium cohnii	174	31,1
Schizochytrium limacinum	170-173	33,6
Aurantiochytrium limacinum	153	23,9
Aurantiochytrium sp.	175	40
Aurantiochytrium	290	39,7

Çizelge 6.7 : Çeşitli mikroalglerde EPA üretimi [110].

Mikroalg	EPA içeriği (mg EPA/g biyokütle)	EPA (% toplam yağ asidi)
Phaeodactylum tricornutum	22	21,4-25,8
Navicula saprophila	13,6	20,1
Rhodomonas salina	-	15,4
Nitzschia sp.	-	24,7
Monodus subterraneus	23-43	25-34,2
Chlorella minutissima	37	31,3
Nitzschia laevis	26-30	11-22,4

6.2.2.2 Hayvansal tüketim

Spirulina, Chlorella ve Scenedesmus, hayvan yemi amacıyla yetiştirilen başlıca mikroalglerdir. Su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroalglerden önemli derece faydalanılmaktadır. Doymamış yağ asitlerinin seviyesi ve protein içeriği, mikroalg su ürünleri yemlerinin besinsel değerini belirlemektedir [104]. Mikroalgler, kedi, köpek, inek, at ve kümes hayvanları için de besin kaynağı olarak değerlendirilebilir [107].

6.2.2.3 Kozmetik

Arthrospira ve Chlorella başta olmak üzere, bazı mikroalgler cilt bakım ürünleri pazarında değerlendirilmektedir. Bazı kozmetik firmaları kendi mikroalg üretim sistemlerine sahiptirler. Cilt yaşlanmasını geciktirici krem, canlandırıcı bakım ürünleri, cilt yumuşatıcıları gibi yüz ve cilt bakım ürünleri, mikroalg özütlerinin ağırlıklı olarak yer aldığı ürünlerdir. Mikroalgler, ayrıca, güneşten korunma ve saç bakımı ürünlerinde de kullanılmaktadır [107].

6.2.2.4 Gübre

Mikroalglerden yağ ve karbonhidratlar çıkarıldıktan sonra dahi, geriye kalan biyokütle birçok besin ögesi içermektedir. Besin açısından zengin bu biyoküteller, biyogübre olarak değerlendirilebilmektedir. Pazar değeri düşük olsa bile, pazar hacmi geniştir. Bu besinlerin, mikroalg üretiminde tekrar kullanılmak üzere geri kazanılması ekonomik olabilir. Kimyasal gübre üretimi enerji yoğun bir süreç

olduğundan dolayı, nispeten daha yüksek sera gazı salınımı olacaktır. Gelecek yıllarda artacak gübre talebi için, mikroalg kökenli gübreler, kimyasal gübrelerin kullanımını azaltma potansiyeline sahiptirler. Bu sayede gübre üretiminin çevre üzerindeki olumsuz etkileri de hafiflemiş olacaktır [106].

7. KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRAL İLE BÜTÜNLEŞİK MİKROALG ÜRETİM TESİSİ

Bu bölümde, CO₂ ihtiyacı bir termik santralin baca gazı ile karşılanan büyük ölçekli bir mikroalg üretim tesisi teknik ve ekonomik açıdan ele alınmıştır. Çalışmada, Yatağan Termik Santrali baca gazı ile bütünleşik bir mikroalg üretim tesisi planlanmış olup CO₂ salınımını azaltma ve pek çok ürün elde etme amacıyla kullanılan mikroalg biyokütlesi üretme fikrinin gerçekleştirilebilirliği incelenmiştir.

7.1 Yatağan Termik Santrali

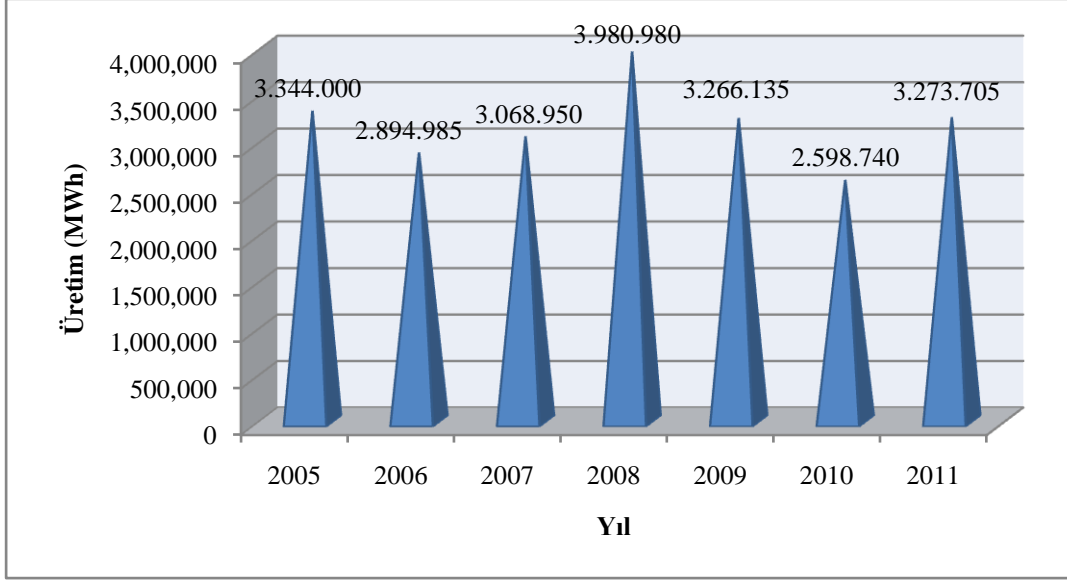
Yatağan Termik Santrali, Muğla-Yatağan linyit havzasındaki düşük kalorili kömürün değerlendirilmesi amacıyla 1975 yılında yatırım programına alınmıştır. Yatağan Termik Santrali, Yatağan-Milas karayolunun üzerinde Yatağan ilçesine 3 km mesafedeki 1 milyon 163 bin 600 m²lik bir alan üzerine kurulmuştur. Şekil 7.1’de santral ve çevresi görülmektedir.



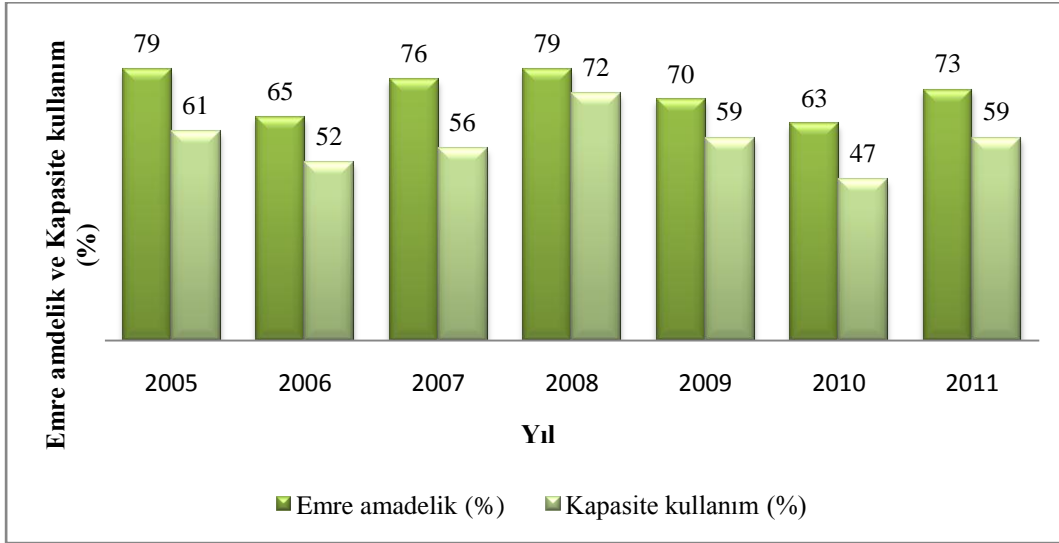
Şekil 7.1 : Yatağan Termik Santrali [111].

Santral her biri 210 MW gücünde olan 3 üniteden oluşmaktadır. 1982, 1983 ve 1984 yılında devreye alınan ünitelerin kesin kabulü, sırasıyla 1984, 1984 ve 1986

yıllarında gerçekleşmiştir. Şekil 7.2’de bu santralin yıllara göre brüt elektrik üretim değerleri, Şekil 7.3’de ise yıllara göre emre amadelik ve kapasite kullanım oranları verilmektedir.



Şekil 7.2 : Yıllara göre brüt elektrik üretim miktarları [112].



Şekil 7.3 : Yıllara göre emre amadelik ve kapasite kullanım oranları [112].

Ülkemizin en önemli kömür havzalarından biri olan Muğla yöresi için, TKİ ve MTA tarafından 800 milyon tonluk kullanılabilir kömür varlığı ifade edilmektedir.

Yatağan Termik Santrali'nin bir günlük kömür ihtiyacı ortalama 18.000 tondur. Santralde yakılan kömürün tipi, kalori değeri 1.890-2.310 kcal/kg arasında değişen linyittir. Parça iriliği 0-200 mm arasında değişen linyitler, kırıcıdan geçirilerek 0-40

mm iriliğine getirilmektedir. Kullanılan linyitin nem değeri %32-40 olmakla beraber, parça iriliği 40 mm değerinden küçük olan yakıtın nem oranı %23'tür.

Yatağan Termik Santrali'ne entegre edilen baca gazı desülfürizasyon tesisinde SO₂, SO₃, toz ve ağır metaller giderilmeye çalışılmaktadır. Çizelge 7.1'de temizleme verimleri gösterilmektedir. Baca içerisinde SO₂, O₂, NO, CO ve toz konsantrasyonları ile baca gazı sıcaklığı ölçümleri yapılmaktadır. Çizelge 7.2'de ham baca gazı verileri, Çizelge 7.3'te ise temiz baca gazı verileri gösterilmektedir.

Çizelge 7.1 : Baca gazı temizleme verimleri [111].

Bileşen	Verim
SO ₂	En az %95
Toz	En az %80
HCl	En az %95
HF	En az %90

Çizelge 7.2 : Her bir ünitenin ham baca gazı verileri (maksimum yükte) [111].

Değişkenler	Değerler
Kirli baca gazı debisi (ıslak bazda)	1.450.000 m ³ /sa
Kirli baca gazı debisi (kuru bazda)	1.189.000 m ³ /sa
H ₂ O (ıslak)	%18
O ₂ (ıslak)	%8
SO ₂ debisi	12.180 kg/sa
SO ₂ (ıslak)	8.400 mg/m ³
SO ₂ (kuru)	10.240 mg/m ³
HCl (ıslak)	2,5 mg/m ³
HF (ıslak)	24,3 mg/m ³
Toz (ıslak)	608 mg/m ³
Sıcaklık	160 °C

Çizelge 7.3 : Her bir baca gazı ünitesindeki temiz gaz verileri [111].

Değişkenler	Değerler
O ₂ (kuru)	%9,8
SO ₂	164,4 kg/sa
SO ₂ (kuru)	136,4 mg/m ³
HCl (kuru)	0,2 mg/m ³
HF (kuru)	3 mg/m ³
Toz (kuru)	58,3 mg/m ³
Sıcaklık	91 °C

Termik santral baca gazı gibi yüksek derişimli CO₂ kaynaklarının mikroalg kültürüne beslenmesi üzerine yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, Yatağan Termik Santrali'nin baca gazı, mikroalg üretim tesisleri için uygun bir yüksek derişimli CO₂ kaynağı olarak değerlendirilebilir. İhtiyaç duyulan CO₂'nin Yatağan Termik Santrali'nden karşılanması, tesisin CO₂ maliyetini ortadan kaldırmıştır. Norsker ve arkadaşları [33], su kanallı havuzlar ile mikroalg üretiminde 1 ton mikroalgal biyokütle eldesi için gerekli olan CO₂'nin 336,7 € ile tüm maliyetin %6,8'i olduğunu belirtmişlerdir. Büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği için gerekli olan CO₂'nin, termik santral baca gazlarından karşılanmasının maliyetleri azaltacağı görülmektedir.

Yatağan Termik Santrali baca gazının desülfirizasyon ünitesinden geçtikten sonra (temiz baca gazı) SO₂ derişimi 136,4 mg/m³ olarak ölçülmüştür [111]. Diğer bir ifadeyle mikroalg yetiştirme havuzlarına beslenecek baca gazının SO₂ derişimi yaklaşık 59 ppm seviyesindedir. Kültür ortamına beslenen gazlardaki SO₂ derişiminin mikroalgler üzerindeki etkileri (Bölüm 5.1'de incelenmiştir) dikkate alındığında, Yatağan Termik Santrali baca gazlarının, SO₂ derişimi açısından mikroalg yetiştiriciliğine uygun olduğu görülmektedir.

Mikroalg gelişimi üzerinde etkili olan baca gazı bileşenlerinden biri de NO'dur. Yatağan Termik Santrali'nin baca gazındaki NO derişimi bilgisine ulaşılamamıştır.

7.2 Maliyet İncelemesi

Durum çalışmasının temel maliyet bileşenlerinin tespitinde, Bilanovic ve arkadaşlarının, su kanallı havuzların maliyet yapılarını ele aldığı çalışmadan faydalanılmıştır [113]. İlgili çalışmada mikroalg yetiştiriciliği için 25 bin m²lik birim alanın 22 bin 333 m²si net yetiştirme alanı olarak belirlenmiştir. Bahsedilen çalışmada sistem bileşenlerinin maliyetleri farklı çalışmalardan ve görüşmelerden derlenmiş ve bazı istatistiki yöntemler kullanılarak mikroalg üretim maliyetlerinin modellenmesi yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamındaki durum çalışmasının maliyet bileşenleri, adı geçen bu çalışmaya dayandırılarak incelenmiştir. 25 bin m²lik mikroalg üretim üniteleri üzerinden, 1 hektar alandan 1 yıl boyunca 1 ton mikroalg biyokütlesi (kuru bazda) eldesinin maliyeti hesaplanmıştır.

Maliyet çalışmaları için mikroalg biyokütlesi üretimindeki verim değeri önem arz etmektedir. Aynı alandan elde edilebilecek mikroalg biyokütlesi arttıkça, birim mikroalg maliyeti düşecektir. Literatürdeki çalışmalardan, fotosentetik verimliliğin, mikroalg verimini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Yatağan yerleşkesinin coğrafi konumu ve yapısı dikkate alınarak, yıl boyunca ortalama 20 g/m²-gün mikroalg biyokütle verimi kabul edilmiştir. Bu değer 73 ton/ha-yıl değerine denk gelmektedir. Benemann [20], şu an için 50 ton/ha-yıl değerindeki mikroalg veriminin başarılabildiğini bildirmiştir. Harmelen ve Oonk [18], yakın ve orta vadede 100 ton/ha-yıl mikroalg verim değerlerine ulaşılacağını belirtmişlerdir. Bu çalışmadaki hesaplamalarda esas alınan 73 ton/ha-yıl (20 g/m²-gün) değeri, literatür göz önüne alındığında gerçekçi bir değerdir.

Maliyet hesaplamalarında belirlenmesi gereken bir konu da tesisin ömrüdür. Uzun ömürlü bir tesis, ilk yatırım maliyetlerinin daha fazla yıla bölünmesini sağlayacağı için, birim mikroalg maliyetlerini daha düşük seviyelere çekecektir. Bu çalışmada tesis ömrü 30 yıl alınmıştır.

Net yetiştirme alanı, mikroalg verim değeri ve tesis ömrü dikkate alınarak bir hektar alandan bir yıl boyunca bir ton mikroalg biyokütlesi eldesinin maliyeti hesaplanabilmektedir. 2,2333 hektar, 73 ton/ha-yıl ve 30 yıl değerleri ile bölme sayısı olarak 4891 ton değeri elde edilir. Sabit maliyetlerin bu değere bölünmesiyle, maliyet kalemlerinin 1 hektar alandan 1 yıl boyunca 1 ton mikroalg biyokütlesi

eldesine etkileri ve böylece üretilecek mikroalg biyokütlesinin TL/ton-ha-yıl cinsinden değeri hesaplanabilmektedir.

Termik santral baca gazı ile bütünleşik 25 bin m²lik mikroalg üretim tesisinde 22 bin 333 m² net yetiştirme alanı ve 73 ton/ha-yıl mikroalg verim değeri ile mikroalg yetiştiriciliğinin maliyetleri 7 ana başlıkta incelenmiştir. Çizelge 7.4'de tesisin 7 temel maliyet kalemi ve maliyet değerleri verilmektedir. Yatağan Termik Santrali ile bütünleşik mikroalg üretim sistemi ile 1 yılda 1 hektar alandan 1 ton mikroalg biyokütlesi elde etmenin maliyeti 644,79 TL olarak hesaplanmıştır (644,79 TL/ton-ha-yıl). Çalışmada 1 ABD doları 1,8108 TL ve 1 € 2,3191 TL olarak alınmıştır (04.04.2013, TCMB).

Çizelge 7.4 : Mikroalg üretim tesisinin maliyet bileşenleri ve değerleri.

Maliyet kalemleri	Maliyet değerleri (TL/ton-ha-yıl)
İnşaat	160,83
CO ₂ tüketimi	-
Gübre tüketimi	256,87
Hasat	96,50
İşçilik	55,00
Teçhizat	64,33
İşletme ve bakım	11,26
Toplam	644,79

Norsker ve arkadaşları [33], su kanallı havuzların yer aldığı, iki farklı yerleşkede, 100 hektar büyüklüğündeki mikroalg üretim tesisi için maliyet çalışması yürütmüşlerdir. Kuru bazda 1 ton mikroalgal biyokütle eldesinin maliyetinin Eindhoven yerleşkesi için 11 bin 480 TL, Bonaire yerleşkesi için ise 6 bin 563 TL olacağını hesaplamışlardır. Aynı çalışmada bazı maliyetlerin azaltılması ve fotosentetik verimin daha yüksek kabul edilmesiyle 1 ton mikroalgal biyokütle eldesinin Eindhoven yerleşkesi için 6 bin 52 TL, Bonaire yerleşkesi için 2 bin 968 TL olacağı belirtilmiştir.

7.2.1 İnşaat maliyeti

İnşaat giderleri, 25 bin m²lik mikroalg yetiştirme ünitesinin inşasını, yol ve ofis inşasını, arazi edinimini ve ekipman harcamalarını içermektedir. İnşaat giderleri için hesaplanan en yüksek maliyet 2 milyon 527 bin 172 TL'dir. Bu değer bir adet 25 bin m²lik mikroalg yetiştirme ünitesinin inşaat maliyetini ifade etmektedir. En yüksek maliyet seçeneği için 50 ton/ha-yıl verim değeri, 30 yıllık sistem ömrü ve 2,23 hektarlık yetiştirme alanı hesaba katılarak $50 \times 30 \times 2,23$ ifadesi ile 3345 değeri elde edilmiştir. 2 milyon 527 bin 172 TL, bu değere bölünerek 1 hektardan yıllık 1 ton mikroalg biyokütlesi elde etmenin en yüksek inşaat maliyeti için 755,51 TL değeri elde edilmiştir [113].

İnşaat giderleri için hesaplanan en düşük maliyet 543 bin 104 TL dir. En düşük maliyet seçeneği için 100 ton/ha-yıl verim değeri, 30 yıllık sistem ömrü ve 2,23 hektarlık yetiştirme alanı hesaba katılarak, $100 \times 30 \times 2,23$ ifadesi ile 6690 değeri elde edilmiştir. 534 bin 104 TL, bu değere bölünerek 1 hektardan yıllık 1 ton mikroalg biyokütlesi elde etmenin en düşük inşaat maliyeti için 81,18 TL değeri elde edilmiştir [113].

Yatağan Termik Santrali ile bütünleşik olarak planlanan mikroalg üretim tesisinin inşaat giderleri 786 bin 622 TL olarak hesaplanmıştır. Çizelge 7.5'de inşaat giderlerini oluşturan alt giderler ve bunların değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 7.5 : Tesisin inşaat giderlerini oluşturan kalemler.

Maliyet kalemleri	Maliyet değerleri (TL)
Mikroalg yetiştirme ünitesi	137.498
Arazi edinimi	300.000
Yol ve ofis	105.000
Ekipman harcamaları	244.124
Toplam	786.622

786 bin 622 TL değerindeki toplam inşaat maliyeti, 4.891 bölme sayısına bölünerek 160,83 TL/ton-ha-yıl değeri elde edilir. Bu değer, 1 hektar alandan 1 yılda 1 ton mikroalg biyokütlesi elde etme maliyetinin, inşaat maliyetinden gelen kısmını göstermektedir.

7.2.1.1 Mikroalg yetiştirme ünitesinin kurulma maliyeti

Bilanovic ve arkadaşlarının çalışmasında mikroalg yetiştirme ünitesinin inşası için en yüksek maliyet 926 bin 202 TL, en düşük maliyet 324 bin 812 TL olarak belirlenmiştir. En yüksek maliyet, ünitelerin betonarme şekilde inşası için geçerlidir. En düşük maliyet seçeneğinde, içinde kilin de bulunduğu alternatif inşaat malzemeleri belirtilmiştir [113]. Lundquist ve arkadaşları [13], 4 hektar büyüklüğündeki su kanallı havuzun düşük maliyetli plastik ile kaplandığında 411 bin 52 TL'ye, tesis bölgesinde bulunan kil ile kaplandığında ise 246 bin 269 TL mal olduğunu bildirmişlerdir.

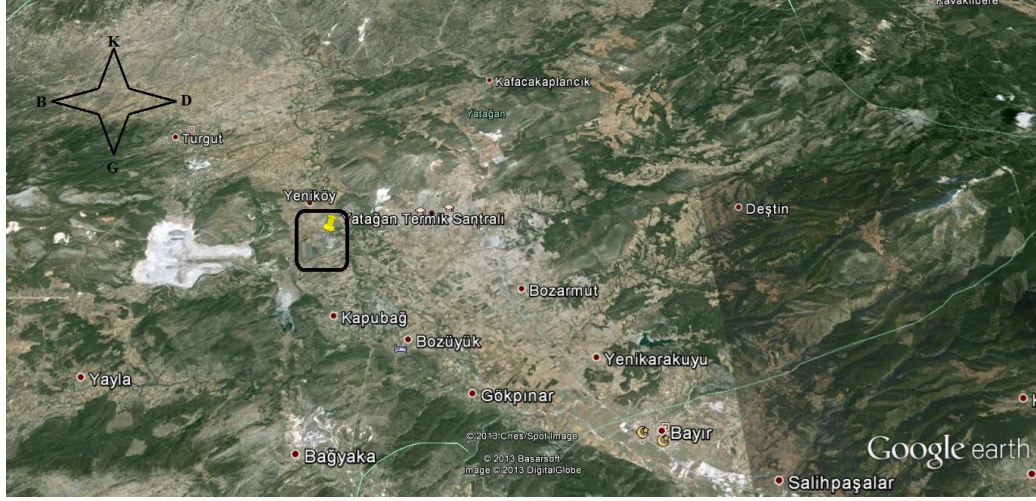
Saç ve arkadaşları [114], Yatağan havzasında 19 örnekleme noktası ile toprak yapısını incelemişlerdir. Örnekleme noktalarının sınırları içerisinde Yatağan Termik Santrali de yer almaktadır. Örnekleme noktalarındaki toprakta kil oranları büyük farklılık gösterse de %52,56 ve %34,24 gibi önemli oranlarda kil tespit edilen örnekleme de mevcuttur. Bu çalışmadaki verilere dayanarak, Yatağan Termik Santrali'nin yakınında mikroalg yetiştiriciliği için yapılacak olan su kanallı havuzların zemininin kil ile kaplanmasının, yerel imkanlarla kolayca gerçekleştirilebileceği söylenebilir.

Yatağan tesisi için mikroalg yetiştirme ünitesi inşasının maliyeti, Lundquist ve arkadaşlarının çalışması [13] dikkate alınarak hesaplanmıştır. Yatağan mikroalg üretim tesisinde her bir su kanallı havuzun 2,2333 hektar büyüklüğünde yetiştirme alanına sahip olduğu göz önüne alınarak, mikroalg yetiştirme ünitesinin inşa maliyeti 137 bin 498 TL olarak hesaplanmıştır.

7.2.1.2 Arazi edinimi

Bilanovic ve arkadaşlarının çalışmasında arazi maliyetleri için tavan değer 18,11 TL/m² üzerinden hesaplanarak 452 bin 750 TL olarak belirlenmiştir. Yerel yönetimlerin veya karbon vergisi giderlerini düşürmek isteyen termik santrallerin arazi bağışında bulunabileceği göz önüne alınarak, Bilanovic ve arkadaşlarının çalışmasında arazi maliyetinin olmadığı bir seçenek de mevcuttur [113].

Önerilen Yatağan mikroalg yetiştiriciliği tesisi, Yatağan Termik Santrali ile bütünleşik olacağı için, termik santral civarındaki araziler incelenmiştir. Şekil 7.4'te termik santralin çevresinin Google Earth'den alınan uydu görüntüsü verilmektedir.



Şekil 7.4 : Yatağan Termik Santrali'nin çevresinin Google Earth görüntüsü.

Şekil 7.4'te görüldüğü üzere termik santralin güneyi, güneydoğusu ve doğusu tarım arazilerinden oluşmaktadır. Su kanallı havuz için gerekli olan geniş ve düz arazi için yeteri kadar alanın kolaylıkla sağlanabileceği görülmektedir.

Santralin güney doğusunda tek parça geniş tarım alanı bulunmaktadır. Şekil 7.5'te gösterildiği gibi mavi çerçeve içine alınan bu alan, yaklaşık 2.000 hektar büyüklüğündedir. Arazinin yükseltisi ve eğimi, mikroalg tesisine uygunluk için önemli değişkenlerdir. Çerçeve içindeki arazinin kuzeybatı ile güneydoğu köşelerini birleştiren kırmızı çizgi ile yükselti ve eğim değerleri hakkında yaklaşık bir fikir elde etmek mümkündür. Kırmızı çizginin olduğu doğrultu için en düşük, ortalama ve en yüksek yükselti değerleri sırasıyla 334 m, 360 m ve 392 m olarak tespit edilmiştir. En yüksek eğim değerleri %9,3 ve %-7,8'dir. Ortalama eğim değerleri ise %1,5 ve %-1,5'tir.



Şekil 7.5 : Santralin güney doğusundaki tek parça büyük arazi.

Yukarıdaki bilgiler ışığında, Yatağan Termik Santrali'nin yanında, büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği için müsait çok büyük bir arazi bulunmaktadır. Bu arazi tarım amaçlı kullanılmaktadır. Arazi fiyatları için yapılan görüşmeler sonucunda ortalama 12 TL/m² değeri tespit edilmiştir [115]. 25 bin m²lik ünite için arazi maliyeti 300 bin TL'dir.

7.2.1.3 Yol ve ofis inşası maliyeti

Bilanovic ve arkadaşları [113], yol ve ofis inşası maliyetlerinin hesabında arazi edinme maliyetini baz almışlardır. Yol ve ofis inşasının en yüksek maliyeti, en yüksek arazi edinme maliyetinin %40'ı olacak şekilde 181 bin 80 TL alınmıştır. En düşük maliyet için, en yüksek arazi edinme maliyetinin %25'i, 113 bin 175 TL, alınmıştır.

Yatağan Termik Santrali'yle bütünleşik olarak planlanan mikroalg üretim tesisinin yol ve ofis inşası maliyetleri, 300 bin TL olan arazi maliyetinin %35'i değerinde olacağı kabul edilerek, 105 bin TL olarak hesaplanmıştır.

7.2.1.4 Ekipman maliyeti

Bilanovic ve arkadaşları [113], en yüksek sermaye harcamaları için, mikroalg yetiştirme ünitesi, arazi edinme, yol ve ofis inşası maliyetlerinin en yüksek değerlerinin toplamını (1.559.982 TL) dikkate almışlardır. En yüksek ekipman harcaması 967 bin 188 TL olarak belirlenmiştir.

En düşük sermaye harcamaları için, mikroalg yetiştirme ünitesi, arazi edinme, yol ve ofis inşası maliyetlerinin en düşük değerlerinin toplamı dikkate alınmıştır. En düşük ekipman harcaması 105 bin 117 TL olarak belirlenmiştir.

Yatağan Termik Santrali ile bütünleşik mikroalg üretim tesisi için mikroalg yetiştirme ünitesinin inşası, arazi edinme ile yol ve ofis inşası toplam 542 bin 498 TL'ye mal olmuştur. Ekipman maliyeti, bu toplamın %45'i olarak kabul edilerek, 244 bin 124 TL değerinde olmuştur.

7.2.2 CO₂ maliyeti

Mikroalg tesislerinin CO₂ ihtiyacı farklı kaynaklardan karşılanabilir. Dolayısıyla CO₂ maliyeti de kaynaklara göre farklılık gösterecektir. Öte yandan, CO₂ girdisinin sisteme bir maliyet oluşturmaması hatta bir gelir sağlaması da mümkündür. Termik

santrallerden salınan CO₂, atmosferdeki CO₂ derişimini önemli derecede etkilemektedir. Baca gazı ile atmosfere salınan CO₂'nin, termik santraller için ekonomik değeri yoktur. Hatta karbon vergisi gibi uygulamaların söz konusu olması durumunda, CO₂, termik santraller için ek bir maliyet unsuru olacaktır. Termik santral baca gazı ile mikroalg tesisinin CO₂ ihtiyacının karşılanması dolayısıyla, bu çalışmada, CO₂ maliyet unsuru olarak değerlendirilmeyecektir. Tutulan CO₂, karbon ticaretinde değerlendirildiği takdirde gelir dahi sağlayacaktır.

Bu çalışmada ele alınan Yatağan mikroalg üretim tesisinin CO₂ ihtiyacı, Yatağan Termik Santrali'nin baca gazından karşılanmaktadır. Bu sebepten dolayı tesiste CO₂ maliyeti söz konusu değildir. Karbon ticareti ile elde edilebilecek olası gelirler maliyet hesabında dikkate alınmamıştır.

7.2.3 Gübre (azot ve fosfor) maliyeti

Gübre gereksinim miktarları, tesiste yetiştirilecek mikroalg türüne göre değişim göstermektedir. Bu sebepten dolayı kesin bir gübre ihtiyacı tespit etmek güçtür. Ancak, 1 birim mikroalg biyokütlesinin içinde kaç birim azot ve fosfor bulunduğu tespitine yönelik çalışmalardan hareketle yaklaşık gübre ihtiyacını tespit etmek mümkündür.

Chisti [2], mikroalg biyokütlesinin besin ihtiyaçlarını belirlemek amacıyla şöyle bir moleküler formül önermiştir: CO_{0,48}H_{1,83}N_{0,11}P_{0,01}. Çizelge 7.6'da verilen mikroalglerin genel besin ihtiyaçlarına göre, 1 ton mikroalg biyokütlesi için 65,9 kg N ve 13,3 kg P gerekmektedir.

Çizelge 7.6 : Mikroalglerin kaba kimyasal formüle göre besin ihtiyaçları.

Element	Atom ağırlıkları	Mol oranları	1 kg mikroalg biyokütlesi için gerekli olan miktarlar (kg)	1 ton mikroalg biyokütlesi için gerekli olan miktarlar (kg)
C	12	1	0,5137	513,7
O	16	0,48	0,3288	328,8
H	1	1,83	0,0783	78,3
N	14	0,11	0,0659	65,9
P	31	0,01	0,0133	13,3

Gerekli gübre ihtiyacı için, Toros Tarım firmasından fiyat alınmıştır. En ucuz azot kaynağı üre gübresidir. Üre gübresi ile 1 kg azotun maliyeti 2,58 TL olarak

hesaplanmıştır. 1 ton mikroalg biyokütlesi elde etmek için gerekli olan azotun maliyeti 170,02 TL'dir. En ucuz fosfor kaynağı ise Triple Süperfosfat (TSP) gübresidir. TSP gübresi ile 1 kg fosforun maliyeti 6,53 TL olmaktadır. 1 ton mikroalg biyokütlesi elde etmek için gerekli olan fosforun maliyeti 86,85 TL'dir. Böylece, 1 ton mikroalg biyokütlesi elde etmek için gerekli azot ve fosfor gübrelerinin toplam maliyeti 256,87 TL olmaktadır.

CO₂ maliyetlerine benzer bir durum, azot ve fosfor maliyetleri için de geçerlidir. Gübre olarak satın alınıp havuza beslenen N ve P, doğal olarak bir maliyet doğururken, atık suların havuza beslenmesiyle giderilen N ve P ihtiyacı, atık su arıtımında üstlendiği rolden ötürü gelir sağlamaktadır. Yatağan mikroalg üretimi tesisinin gübre ihtiyaçları için, atık su alternatifi değerlendirilmeye alınmamıştır.

7.2.4 Hasat maliyeti

Elde edilmek istenen biyokütle kalitesine ve biyokütlenin kullanım amacına göre hasat tekniği ve dolayısıyla da hasat maliyetleri değişmektedir. Bu çalışmada, hasat ünitesinin seçiminde, hasat edilen biyokütlenin farklı ürünlerin eldesinde kullanılacağı fikri esas alınmıştır. Hasat ünitesinde çökeltme tankları, flokülasyon, çözülmüş hava yüzdürmesi ve santrifüjleme ekipmanları yer almaktadır. Hasat ünitesini daha basit tekniklerden oluşturarak, hasat maliyetleri düşürmek mümkündür. Fakat bu çalışmada planlanan tesisteki hasat edilen biyokütlenin, farklı ürünlerin eldesine hammadde olabilmesi amacına uygun olan ve daha maliyetli olan bir hasat ünitesi seçilmiştir. Hasat ünitesinin maliyetleri, inşaat giderlerinin %60'ı olarak kabul edilmiş [113] ve bir adet mikroalg yetiştirme ünitesinin hasat giderleri 471 bin 973 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değer 4891 bölme sayısı ile bölünerek, hasat maliyetlerinin mikroalg üretimindeki payının 96,50 TL olduğu hesaplanmıştır.

7.2.5 İşçilik maliyeti

Bilanovic ve arkadaşları [113], 1 yılda 1 hektar alandan 1 ton mikroalg elde etmek için gerekli iş gücünün tavan maliyeti için 128,87 TL, taban maliyeti için 11,86 TL değerlerini hesaplamışlardır.

Amerika Birleşik Devletleri Merkezi İstihbarat Teşkilatı'nın (CIA) dünya geneli için hazırladığı kişi başı gayri safi yurtiçi hasıla (KBGSYİH) verileri [116] kullanılarak Türkiye için tahmini bir işçilik maliyeti belirlenmeye çalışılmıştır. KBGSYİH

değerleri ile iş gücü arasında yüksek pozitif korelasyon olduğu kabul edilmiştir. 228 ülkenin yer aldığı listede Türkiye 15.000 \$ ile 87. sırada yer almaktadır. Bu veriler ışığında, Türkiye’de 1 yılda 1 hektar alandan 1 ton mikroalg elde etmek için gerekli iş gücü maliyeti 55 TL olarak öngörülmüştür.

7.2.6 Teçhizat giderleri

Su çarkları; CO₂ sıkıştırıcı, dağıtıcıları, boru ve valfleri; kablolar; pompalar; ölçme ve kontrol cihazları ve diğer ilgili ekipmanlar, teçhizat giderleri altında değerlendirilmektedir [113]. Teçhizat giderleri, birim mikroalg üretim ünitesinin inşaat giderlerinin %40’ı olarak kabul edilerek [113], 314 bin 649 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değer 4891 bölme sayısına bölünerek teçhizat harcamalarının mikroalg üretimindeki payı 64,33 TL/ton-ha-yıl olarak hesaplanmıştır.

7.2.7 İşletme ve bakım maliyeti

İşletme ve bakım maliyeti; işletme maliyeti, enerji maliyeti (karıştırma, hasat, su ve CO₂ pompalama amaçlı elektrik ve gaz), çökeltme maliyeti ve diğer maliyetleri kapsamaktadır [113].

İşletme ve bakım maliyetleri, inşaat giderlerinin %5 ile %10’u olarak kabul edilmektedir [113]. Bu çalışmada işletme ve bakım gideri oranı %7 kabul edilerek işletme ve bakım maliyetleri 55 bin 64 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değer 4891 bölme sayısı ile bölünerek, işletme ve bakım maliyetlerinin 1 ton mikroalg üretimindeki payının 11,26 TL olduğu hesaplanmıştır.

7.3 Tesis Yapısı Ve Mikroalgal Biyokütle Değeri

Tesis, Şekil 7.5’te gösterilen, santralin güney doğusunda yer alan 2.000 hektar büyüklüğündeki araziye kurulacak şekilde planlanmıştır. Mikroalg yetiştiriciliğinin, 2,2333 hektar net yetiştirme alanına sahip, 2,5 hektar büyüklüğündeki ünitelerde yapılması planlanmıştır. Böylece, tesiste 800 adet yetiştirme ünitesi yer alacaktır.

Tesiste mikroalg yetiştirme sistemi olarak tercih edilen su kanallı havuzlar için mikroalg biyokütle verimi 73 ton/ha-yıl olarak kabul edilmiştir. Tesisin net yetiştirme alanı 1.787 hektardır. Dolayısıyla 2.000 hektar büyüklüğündeki mikroalg üretim tesisinden yılda 130 bin 451 ton mikroalg biyokütlesi elde edileceği öngörülmektedir.

7.4 CO₂ Tutumu

Tesiste üretilen 1 kg mikroalg biyokütlesinin 1,83 kg CO₂ bağlayacağı kabul edilmiştir [2]. Tesiste yılda 130 bin 451 ton mikroalg biyokütlesi elde edileceği dikkate alındığında, yılda 238 bin 725 ton CO₂ tutulabileceği öngörülmektedir.

CO₂ gereksinimi termik santral baca gazından karşılanan su kanallı havuz sistemlerinde, CO₂ tüketim oranı dikkate alınması gereken bir değişkendir. Tutulan CO₂ miktarı, üretilen mikroalg biyokütlesi miktarından hesaplanabilse de; kültür ortamına beslenmesi gereken CO₂ miktarının belirlenmesi için kültür ortamına beslenen CO₂'nin tüketilme oranının bilinmesi gerekmektedir. Gerçek CO₂ tüketim oranı, kültür ortamının kimyasına ve CO₂ dağıtım teknolojisine göre değişebilmektedir [9]. Literatürde %75-90 gibi yüksek CO₂ tüketim oranları kabul görmektedir [13, 89]. Bu çalışmada CO₂ tüketim oranı %80 olarak alınmıştır.

Yatağan Termik Santrali'nin 2.894.985 MWh elektrik ürettiği 2006 yılında, santralin CO₂ salınımı 2.276.881 ton olarak bildirilmiştir [117]. Dolayısıyla 1 MWh elektrik üretimine karşılık 786 kg CO₂ salınımı gerçekleşmiştir. Yatağan Termik Santrali'nin, 2005-2011 yılları arasındaki elektrik üretim miktarları dikkate alındığında, santralin yılda ortalama 3.203.927 MWh elektrik ürettiği kabul edilebilir. Bu durumda Yatağan Termik Santrali'nin yıllık ortalama CO₂ salınımı 2 milyon 518 bin 286 ton değerindedir.

Mikroalgler fotosentez yaparak CO₂ tutumu gerçekleştirmektedir. Gündüz vakti gün ışığı ile fotosentez mümkünken, gün ışığının olmadığı zamanlarda fotosentez için yapay ışık kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada planlanan mikroalg üretim tesisi için yapay ışıklandırma kullanılmayacaktır. Dolayısıyla CO₂ tutumu sadece gündüz vakitleri gerçekleşecektir. Yatağan Termik Santrali'nin CO₂ salınımının her saat dilimine eşit olarak dağıldığı kabul edilerek, salınımı engellenebilecek en yüksek CO₂ miktarı 1 milyon 259 bin 143 ton olarak belirlenmiştir.

Planlanan tesiste, yılda 238 bin 725 ton CO₂ salınımının azaltılması mümkündür. Kültür ortamına beslenen CO₂'nin değerlendirme oranının %80 olarak kabul edildiği göz önüne alındığında, kültür ortamına yılda 298 bin 406 ton CO₂'nin beslenmesi gerekmektedir. Mikroalg biyokütlesi elde etmenin maliyeti (644,79 TL/ton-ha-yıl) ve 1 ton mikroalg biyokütlesinin 1,83 ton CO₂ bağladığı dikkate alındığında, planlanan

tesiste 1 ton CO₂ salınımı azaltmanın maliyetinin 352,34 TL olacağı öngörülmektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Durum çalışmasında ele alınan, Yatağan Termik Santrali ile bütünleşik, 2.000 hektar üzerine kurulu mikroalg üretim tesisinde, bir yılda 130 bin 451 ton mikroalg biyokütlesi (kuru bazda) elde edilebileceği görülmüştür. Üretilen bu mikroalg biyokütlesi ile yılda 238 bin 725 ton CO₂ salınımı engellenmiş olacaktır.

Planlanan tesiste, bir yılda bir hektar alandan bir ton mikroalg biyokütlesi elde etmenin maliyeti 644,79 TL olarak hesaplanmıştır (644,79 TL/ton-ha-yıl). Yedi ana maliyet kalemi ve değerleri şu şekildedir: inşaat, 160,83 TL; CO₂ tüketimi, 0 TL; gübre tüketimi, 256,87 TL; hasat 96,50 TL; işçilik, 55,00 TL; teçhizat, 64,33 TL ve işletme ve bakım 11,26 TL.

Maliyet hesaplamaları öz kaynaklara dayanılarak yapıldığından ötürü banka kredisi maliyeti hesaplamalara katılmamıştır. Ancak yenilenebilir enerji yatırımları için verilen banka kredileri hem teşvikli hem de düşük faiz ve uzun vade seçeneklerine sahip olduğundan uzun vadede banka kredisi maliyeti külfetli olmayacaktır.

CO₂ ihtiyacı santralin baca gazından karşılanacağı için, CO₂ tüketimi mikroalg üretiminde bir maliyet unsuru olmayacaktır.

Gübre tüketimi mikroalg üretim maliyetinin %39,8'ini oluşturmaktadır. Tesisin gübre ihtiyacı ticari gübrelerden karşılanmıştır. Mikroalg üretim maliyetlerinde bu derece yer tutan gübre tüketim maliyetini azaltmak mümkündür. Atık sular, mikroalglerin temel besin ihtiyaçları olan azot ve fosforca zengin sulardır. Mikroalg üretim tesislerini, atık su arıtım tesisleriyle bütünleşik hale getirmek ticari gübre tüketiminin azalmasını sağlayacaktır.

Hasat, mikroalg üretim maliyetinde %15 ile önemli bir pay sahibidir. Planlanan tesiste uygulanan hasat süreci ile tamamen kuru mikroalg biyokütlesi elde etmek amaçlanmıştır. CO₂ tutumu için üretilen mikroalg biyokütlesinin tamamen kuru hale getirilmesi gerekmemekle beraber, elde edilen biyokütlenin farklı ürünlerin eldesinde kullanılmasına imkan tanımak için hasat ünitesi kuru mikroalg biyokütlesi sunacak şekilde belirlenmiştir.

Türkiye, karbon ticaretini Gönüllü Karbon Piyasası'nda (GKP) yapabilmektedir. Türkiye'de toplam 109 karbon projesi gerçekleştirilmiştir. Bu projelerin 50'si hidroelektrik, 49'u rüzgar, 3'ü jeotermal, 6'sı atıktan enerji üretimi ve 1 tanesi de biyokütle enerjisi projeleridir. Türkiye'nin gönüllü piyasa kredileri, 2008 yılı için 9,5\$/tCO₂e ve 2009 yılı için 10,4\$/tCO₂e ortalama değerlerine sahiptir [118]. Yatağan Termik Santrali'yle bütünleşik mikroalg üretim tesisinde bir ton CO₂ tutum maliyeti 352,34 TL olarak hesaplanmıştır. 2008 ve 2009 yılı değerleri göz önüne alındığında bir ton CO₂ tutumu ile elde edilebilecek karbon kredisi 18 TL olarak kabul edilebilir. Mikroalglerle CO₂ tutum maliyeti ile karbon kredisi değeri karşılaştırıldığı zaman, mikroalglerin sadece CO₂ salınımının azaltılması amacıyla değerlendirilmesinin uygulanabilirlikten çok uzak olduğu görülmektedir.

Mikroalg yetiştiriciliği ile CO₂ azaltımının uygulanabilir olması için 6. bölümde ele alınan mikroalg kökenli ürünlerin üretilmesi gerekmektedir. Büyük ölçekli bir mikroalg yetiştirme tesisinden elde edilecek mikroalg biyokütlesi, aynı anda, biyoyakıt üretiminden ilaç yapımına, kozmetik ürünlerden hayvan yemine kadar farklı alanlarda değerlendirilmelidir. Pazar hacmi biyoyakıtlara göre oldukça düşük olan mikroalg kökenli beslenme ve ilaç ürünleri, birim miktar başına yüksek ekonomik getirileri ile CO₂ azaltımı amaçlı büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliğini uygulanabilir duruma getirebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/history.html>>, alındığı tarih: 03.04.2013.
- [2] **Chisti, Y.** (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, 294–306.
- [3] **Crocker, M. ve Morton, S.** (2010). Development of an algae-based system for CO₂ mitigation from coal-fired power plants. *Energia*, 21, (6).
- [4] **Url-2** <<http://www.caer.uky.edu/greenhouse/home.shtml>>, alındığı tarih: 02.04.2013.
- [5] **Sudhakar K., Suresh S. ve Premalatha M.** (2011) An overview of CO₂ mitigation using algae cultivation technology. *International Journal of Chemical Research* Vol. 3, Issue 3, (Sf. 110-117).
- [6] **Stepan, D. J., Shockey, R. E., Moe, T. A. ve Dorn, R.** (2002). Subtask 2.3 – Carbon Dioxide Sequestering Using Microalgal Systems. **DE-FC26-98FT40320** Energy & Environmental Research Center University of North Dakota, Grand Forks, ND.
- [7] **Larsson, M. ve Lindblom, J.** (2011). *Algal Flue Gas Sequestration And Wastewater Treatment: An Industrial Experiment* (yüksek lisans tezi). Industrial Ecology, Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç.
- [8] **Kadam, K. L.** (2001). Microalgae Production from Power Plant Flue Gas: Environmental Implications on a Life Cycle Basis. *National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-510-29417*, Golden, Colorado.
- [9] **Seambiotic Ltd.** Seambiotic Ltd. - Algae Pilot Plant. Ashkelon, İsrail. <http://www.seambiotic.com/uploads/Seambiotic%20Ltd.%20-%20Algae%20Pilot%20Plant%20white%20paper.pdf>
- [10] **Url-3** <<http://www.seambiotic.com/>>, alındığı tarih: 29.03.2013.
- [11] **RWE.** (2009). Production of micro-algae using power plant flue gases to bind CO₂. Rwe's Algae Project In Bergheim-Niederaussem. Köln, Almanya. <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/en/352278/data/0/3/dl-RWEs-Algae-Project.pdf>
- [12] **Url-4** <<http://www.rwe.com/web/cms/en/213188/rwe-power-ag/innovations/coal-innovation-centre/rwes-algae-project/>>, alındığı tarih: 02.04.2013.
- [13] **Lundquist, T. J., Woert, I. C., Quinn, N.W.T. ve Benemann, J. R.** (2010). A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production. Energy Biosciences Institute University of California, Berkeley, California.

- [14] **Mata, T. M., Martins, A. A. ve Caetano, N. S.** (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 217–232.
- [15] **Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J. ve Roessler, P.** (1998). A Look Back at the U.S. Department of Energy’s Aquatic Species Program—Biodiesel from Algae. *National Renewable Energy Laboratory Close-Out Report*, **NREL/TP-580-24190**, Golden, CO.
- [16] **Kunjapur, A. M. ve Eldridge, R. B.** (2010). Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**, 3516–3526.
- [17] **Ugwu, C. U., Aoyagi, H. ve Uchiyama, H.** (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, **99**, 4021–4028.
- [18] **Harmelen, T. V. ve Oonk, H.** (2006). Microalgae Biofixation Processes: Applications and Potential Contributions to Greenhouse Gas Mitigation Options. *TNO Built Environment and Geosciences raporu*, **36562**, AH Apeldoorn, Hollanda.
- [19] **Khan, S. A., Rashmi, Hussain, M. Z., Prasad, S. ve Banerjee, U. C.** (2009). Prospects of biodiesel production from microalgae in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 2361–2372.
- [20] **Benemann, J.** (2009). Microalgae Biofuels: A Brief Introduction. Benemann Associates and MicroBio Engineering, Inc., CA, USA.
- [21] **Darzins, A., Pienkos, P. ve Edye, L.** (2010). Current Status and Potential for Algal Biofuels Production. *IEA Bioenergy report*, **T39-T2**.
- [22] **Url-5** <<http://www.cyanotech.com/company/facility.html>>, alındığı tarih: 08.04.2013.
- [23] **Molina, E., Fernandez, J., Acien, F. G. ve Chisti, Y.** (2001). Tubular photobioreactor design for algal cultures. *Journal of Biotechnology*, **92**, 113–131.
- [24] **Tredici, M. R.** (2004). Mass Production of Microalgae: Photobioreactors, in *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, Ed. Richmond A. Blackwell Publishing.
- [25] **Wang, B., Lan, C. Q. ve Horsman, M.** (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances*, **30**, 904–912.
- [26] **Wen, Z. ve Johnson, M. B.** (2009). Microalgae as a Feedstock for Biofuel Production. *Virginia Cooperative Extension raporu*, **PUBLICATION 442-886**, Petersburg, Virginia.
- [27] **Url-6** <<http://www.algae.wur.nl/UK/>>, alındığı tarih: 27.12.2012.
- [28] **Url-7** <<http://www.algae.wur.nl/UK/projects/AlgaePARC/Research+facility/>>, alındığı tarih: 04.02.2013.
- [29] **Url-8** <<http://biofuels.asu.edu/biomaterials.shtml>>, alındığı tarih: 08.04.2013.
- [30] **Sierra, E., Acien, F. G., Fernandez, J. M., Garcia, J. L., Gonzalez, C. ve Molina, E.** (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for

the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, **138**, 136–147.

- [31] **Kantarci, N., Borak, F., ve Ülgen, K. O.** (2005). *Bubble column reactors. Process Biochemistry*, **40**, 2263–2283.
- [32] **Url-9** <http://www.algae.wur.nl/UK/technologies/production/pilotscale_photobioreactors/>, alındığı tarih: 05.02.2013.
- [33] **Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermue, M. H. ve Wijffles, R. H.** (2011). Microalgal production — A close look at the economics. *Biotechnology Advances*, **29**, 24–27.
- [34] **Alabi, A. O., Tampier, M. ve Bibeau E.** (2009). Microalgae Technologies & Processes For Biofuels-Bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability & Barriers to Implementation. *British Columbia Innovation Council raporu*.
- [35] **Marsh, A. A.** (2008). *A Study into the Cultivation of Algae for Carbon Dioxide Sequestration from a Power Plant and It's Use as a Bio Fuel* (yüksek lisans tezi). Cardiff School of Engineering Cardiff University.
- [36] **Carvalho, A. P., Silva, S. O., Baptista, J. M. ve Malcata, F. X.** (2011). Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Appl Microbiol Biotechnol*, **89**, 1275–1288.
- [37] **Park, K. H. ve Lee, C. G.** (2001). Effectiveness of Flashing Light for Increasing Photosynthetic Efficiency of Microalgal Cultures over a Critical Cell Density. *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, **6**, 189-193.
- [38] **Sorokin C. ve Krauss R. W.** (1958). The Effects of Light Intensity on the Growth Rates of Green Algae. *Plant Physiol.*, **33(2)**, 109–113.
- [39] **Lopes, E. J., Scoparo, C. H. G., Lacerda, L. M. C. F. ve 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**, 306–310.
- [40] **Suh, I. S. ve Lee, C. G.** (2003). Photobioreactor Engineering: Design and Performance. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **8**, 313-321.
- [41] **Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J. ve diğ.** (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions *Trends in Biotechnology*, **28**, 371–380.
- [42] **Larsdotter, K.** (2006). Wastewater treatment with microalgae – a literature review. *VATTEN*, **62**, 31–38.
- [43] **Tsai, D. D. W., Ramaraj, R. ve Chen P. H.** (2012). Growth condition study of algae function in ecosystem for CO₂ bio-fixation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **107**, 27–34.
- [44] **Pulz, O.** (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol*, **57**, 287–293.
- [45] **Eriksen, N. T.** (2008). The technology of microalgal culturing. *Biotechnol Lett*, **30**, 1525–1536.

- [46] **Carvalho, A. P., Meireles, L. A. ve Malcata F. X.** (2006). Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances. *Biotechnol Prog.*, **22(6)**, 1490-506.
- [47] **Barbosa, M. J., Hadiyanto, ve Wijffels, R. H** (2004). Overcoming shear stress of microalgae cultures in sparged photobioreactors. *Biotechnol Bioeng*, **85(1)**, 78-85.
- [48] **Wellsman, J. C. ve Goebel, R. P.** (1987). Design and Analysis of Microalgal Open Pond Systems for the Purpose of Producing Fuels. *Solar Energy Research Institute A Subcontract Report, SERI/STR-231-2840, DE87001164*, Golden, Colorado.
- [49] **U.S. DOE** (2010). National Algal Biofuels Technology Roadmap. *U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Biomass Program raporu.*
- [50] **Wang, B., Li, Y., Wu, N. ve Lan, C. Q.** (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol*, **79**, 707-718.
- [51] **Griffiths, M. J., Dicks, R. G., Richardson, C. ve Harrison S. T. L.** (2011). Advantages and Challenges of Microalgae as a Source of Oil for Biodiesel. In Dr. Margarita Stoytcheva (Ed.), *Biodiesel - Feedstocks and Processing Technologies*, ISBN: 978-953-307-713-0, InTech Press. Available from: <http://www.intechopen.com/books/biodiesel-feedstocks-and-processing-technologies/advantages-andchallenges-of-microalgae-as-a-source-of-oil-for-biodiesel>.
- [52] **Chen, M., Tang H., Maa, H., Holland, T. C., Simon Ng, K. Y. ve Salley, S. O.** (2011). Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliella tertiolecta*. *Bioresource Technology*, **102**, 1649–1655.
- [53] **Sforza, E., Bertucco, A., Morosinotto, T. ve Giacometti, G. M.** (2012). Photobioreactors for microalgal growth and oil production with *Nannochloropsis salina*: From lab-scale experiments to large-scale design. *Chemical Engineering Research And Design*, **90**, 1151–1158.
- [54] **Davison, J., Freund, P. ve Smith, A.** (2001). Putting Carbon Back Into The Ground. *IEA Greenhouse Gas R&D Programme raporu*, ISBN 1 898373 28 0.
- [55] **Working Group I** (2007). Climate Change 2007 The Physical Science Basis. *Intergovernmental Panel on Climate Change Report*, Cambridge University Press.
- [56] **Working Group II** (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Intergovernmental Panel on Climate Change Report*, Cambridge University Press.
- [57] **International Energy Agency** (2010). Energy Technology Perspectives 2010 Scenarios & Strategies to 2050.
- [58] **International Energy Agency** (2012). CO₂ Emissions From Fuel Combustion Highlights (2012 Edition), Paris, Fransa.

- [59] **International Energy Agency** (2008). CO₂ Capture And Storage A Key Carbon Abatement Option. *Energy Technology Analysis*, ISBN 978-92-64-04140-0.
- [60] **Aiken, T.** (2012). Capture, transport and storage of CO₂. *IEA Greenhouse Gas R&D Programme raporu*.
- [61] **Rubin, E. S., Mantripragada, H., Marks, A., Versteeg, P. ve Kitchin, J.** (2012). The outlook for improved carbon capture technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, **38**, 630-671.
- [62] **Adams, D. ve Davison J.** (2007). Capturing CO₂. *IEA Greenhouse Gas R&D Programme report*, ISBN : 978-1-898373-41-4.
- [63] **Rubin, E. S.** (2008). CO₂ Capture and Transport. *Elements*, **4**, 311–317.
- [64] **Finkenrath, M.** (2011). Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation. *International Energy Agency working paper*.
- [65] **Url-10** < http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Dunyada_ve_Turkiyede_Enerji_Gorunumu.pdf>, alındığı tarih: 22.02.2013.
- [66] **Elektrik Üretim A.Ş (EÜAŞ)** (2011). Yıllık Rapor.
- [67] **İTÜ** (2007). Türkiye'de Enerji ve Geleceği. Ed. Satman, A. İTÜ Görüşü, İstanbul.
- [68] **Tamzok, N., Özcan, M., Özel, G., Demirkol, Ö., Demir, E. ve Babayiğit, S. S.** (2012). Kömür Sektör Raporu (Linyit) 2011. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu.
- [69] **Kumar, K., Dasgupta, C. N., Nayak, B., Lindblad, P. ve Das, D.** (2011). Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource Technology*, **102**, 4945–4953.
- [70] **Lee, J. S., Sung, K. D., Kim, M. S., Park, S.C ve Lee, K. W.** Current Aspects of Carbon Dioxide Fixation by Microalgae in Korea. Taejeon, Korea. http://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/41_4_ORL_ANDO_08-96_1397.pdf
- [71] **Hende, S. V. D., Vervaeren, H. ve Boon, N.** (2012). Flue gas compounds and microalgae: (Bio-)chemical interactions leading to biotechnological opportunities. *Biotechnology Advances*, **30**, 1405–1424.
- [72] **Pires, J. C. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G. ve Simoes, M.** (2012). Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 3043– 3053.
- [73] **Packer, M.** (2009). Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. *Energy Policy*, **37**, 3428–3437.
- [74] **Oilgae** Capture of CO₂ Emissions Using Algae, A Research Document by Oilgae. Alındığı tarih: 29.12.2012. http://www.oilgae.com/ref/downloads/Analysis_of_CO2_Capture_Using_Algae.pdf

- [75] **IEA** (2006). CO₂ Capture & Storage. *The IEA Energy Technology Essentials, ETE01*.
- [76] **Ben-Amoht, A.** (2011). Algae Applications for Power Generation and CO₂ Recycling. *ISES Annual Meeting*, Tel-Aviv, 5 Ekim.
- [77] **Aboudheir, A., Asghari, K., Idem, R., Gelowitz, D. ve Tontiwachwuthikul, G.** (2007). Design and Engineering Factors Affecting CO₂ Capture and EOR Applications. *CCU/06*.
- [78] **Robertson, E. P.** (2007). Analysis of CO₂ Separation from Flue Gas, Pipeline Transportation, and Sequestration in Coal. *Idaho National Laboratory raporu, INL/EXT-08-13816*.
- [79] **Reddy, M. H.** (2002). *Application of Algal Culture Technology for Carbon Dioxide and Flue Gas Emission Control* (yüksek lisans tezi). Arizona State University.
- [80] **Hughes, E. ve Benemann J. R.** (1997). Biological Fossil CO₂ Mitigation. *Energy Convers. Mgmt*, **38**, 467-473.
- [81] **Kurano, N., Sasaki, T. ve Miyachi, S.** (1998). Carbon dioxide and microalgae. *Studies in Surface Science and Catalysis*, **114**, 55–63.
- [82] **Hsueh, H. T., Li, W. J., Chen, H. H. ve Chu, H.** (2009). Carbon bio-fixation by photosynthesis of *Thermosynechococcus* sp. CL-1 and *Nannochloropsis oculata*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **95**, 33–39.
- [83] **Lee, J. S., Kim, D. K., Lee, J. P., Park, S. C., Koh, J. H., Cho, H. S. ve diğ.** (2002). Effects of SO₂ and NO on growth of *Chlorella* sp. KR-1. *Bioresource Technology*, **82**, 1-4 PII: S0960-8524(01)00158-4.
- [84] **de Morais, M. G. ve 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**, 2169–2173.
- [85] **Hauck, J. T., Olson, G. J., Scierka, S. J., Perry, M. B. Atai, M. M.** (1996). Effects of Simulated Flue Gas On Growth Of Microalgae. *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry*, **41**.
- [86] **Jiang, Y., Zhang, W., Wang, J., Chen, Y., Shen, S. ve Liu, T.** (2013). Utilization of simulated flue gas for cultivation of *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource Technology*, **128**, 359–364.
- [87] **Demircan, M.** (2012). 2011 Yılı Sıcaklıklarının Analizi. Klimatoloji Şube Müdürlüğü
- [88] **Url-11** <<http://www.mgm.gov.tr/tarim/referans-toplam-buharlasma.aspx?s=h#sfB>>, alındığı tarih: 12.03.2013.
- [89] **Benemann, J. R. ve Pedroni, P.** (2007). Biofixation of fossil CO₂ by microalgae for greenhouse gas abatement. *Encyclopaedia Of Hydrocarbons. Volume III / New Developments: Energy, Transport, Sustainability*.

- [90] **Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnug, J. H., Posten, C.** ve diğ. (2008). Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenerg. Res.*, **1**, 20–43.
- [91] **Christenson, L. ve Sims, R.** (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances*, **29**, 686–702.
- [92] **Craggs, R., Sutherland, D. ve Campbell, H.** (2012). Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *J Appl Phycol*, **24**, 329–337.
- [93] **Cervantes, A. T., Morales, M., Novelo, E. ve Revah, S.** (2013). Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*. *Bioresource Technology*, **130**, 652–658.
- [94] **Brennan, L. ve Owende, P.** (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 557–577.
- [95] **Olaizola, M.** (2003). Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. *Biomolecular Engineering*, **20**, 459-466.
- [96] **Grima, E. M., Belarbi, E. H., Acien Fernandez, F. G., Medina, A. R., Chisti, Y.** (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, **20**, 491–515.
- [97] **Ryan, C.** (2009). Cultivating Clean Energy: The Promise of Algae Biofuels. *The Natural Resources Defense Council raporu.*
- [98] **Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M. K., Forde, G. M., Hoadley, A.** (2010). Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*, **2**, 012701.
- [99] **Shelef, G., Sukenik, A. ve Green, M.** (1984). Microalgae Harvesting and Processing: A Literature Review. *Solar Energy Research Institute a Subcontract Report*, Golden, Colorado.
- [100] **Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., Chang, J. S.** (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, **102**, 71–81.
- [101] **Demirbaş, A. ve Demirbaş, M. F.** (2010). Biodiesel from Algae. *Algae Energy Algae as a New Source of Biodiesel*. Springer-Verlag London Limited.
- [102] **Demirbaş, A.** (2011). Biodiesel from oilgae, biofixation of carbon dioxide by microalgae: A solution to pollution problems. *Applied Energy*, **88**, 3541–3547.
- [103] **Singh, J. ve Gu, S.** (2010). Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 2596–2610.

- [104] **Parmar, A., Singh, N. K., Pandey, A., Gnansounou, E. ve Madamwar, D.** (2011). Cyanobacteria and microalgae: A positive prospect for biofuels. *Bioresource Technology*, **102**, 10163–10172.
- [105] **Harun, R., Singh, M., Forde, G. M. ve Danquah, M. K.** (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 1037–1047 doi:10.1016/j.rser.2009.11.004.
- [106] **Iersel, S. V., Flammini, A.** (2010). Algae-based biofuels: applications and co-products. *Food and Agriculture Organization of the United Nations review paper*, ISBN 978-92-5-106623-2.
- [107] **Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. ve Isambert, A.** (2006). Commercial Applications of Microalgae. *Journal Of Bioscience And Bioengineering*, **101**, (2), 87–96.
- [108] **Pulz, O. ve Gross W.** (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol*, **65**, 635–648.
- [109] **Milledge, J. J.** (2011). Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Rev Environ Sci Biotechnol*, **10**, 31–41.
- [110] **Yen, H. W., Hu, I. C., Chen, C. Y., Ho, S. H., Lee, D. J. ve Chang, J. S.** (baskıda). Microalgae-based biorefinery – From biofuels to natural products. *Bioresource Technology*.
- [111] **Yatağan Termik Santrali envanteri**, alındığı tarih: 02.04.2013.
- [112] **Url-12** <<http://yatagants.gov.tr/>>, alındığı tarih: 30.03.2013.
- [113] **Bilanovic, D., Holland, M. ve Armon, R.** (2012). Microalgal CO₂ sequestering – Modeling microalgae production costs. *Energy Conversion and Management*, **58**, 104–109.
- [114] **Saç, M. M., Uğur, A., Yener, G., Bolca, M., Altınbaş, Ü., Kurucu, Y. ve diğ.** (2005). Muğla İli Yatağan Havzasında Eğimli Alanların Büyük Toprak Gruplarında ¹³⁷Cs'nin Dağılımı. *Ege Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, **42 (1)**, 143-154 ISSN 1018-8851.
- [115] **Akkuş, M.** (2013). Kişisel görüşme.
- [116] **Url-13** <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>>, alındığı tarih: 05.03.2013.
- [117] **Alış, H.** Ulusal İklim Değişikliği Strateji Belgesi Bağlamında Elektrik Üretim Sektörü. <http://www.uevf.com.tr/uevf2/2011sunumlar/HalilAlis.pdf>
- [118] **T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı** (2011). Karbon Piyasalarında Ulusal Deneyim ve Geleceğe Bakış. Ankara.