DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYO ADAPTİF CEPHE ELEMANLARI

İlknur KÜKDAMAR

Temmuz, 2016
İZMİR

BİYO ADAPTİF CEPHE ELEMANLARI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilgisi Programı

İlknur KÜKDAMAR

Temmuz, 2016
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

İLKNUR KÜKDAMAR, tarafından **YRD. DOÇ. DR. AYÇA TOKUÇ** yönetiminde hazırlanan **"BİYO ADAPTİF CEPHE ELEMANLARI"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Yrd. Doç. Dr. Ayça TOKUÇ

Yönetici

.....

Doç.Dr. Özge ANDİÇ GAKIR

Jüri Üyesi

.....

YARD. DOÇ. DR. Kutluğ SAVAŞIR

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, beni yönlendiren ve her anlamda desteğini ve yardımlarını benden esirgemeyen, yeni bir ilgi ve çalışma alanı keşfedip, bu alanda ileri görüş ve çevre oluşturmamı sağlayan ve bunu geliştirmeme yardım eden, akademik anlamda öğrettikleriyle beni büyütüyor olan ve bilimsel açıdan gelişmeme katkıda bulunan tez danışmanım sevgili hocam Yrd. Doç. Dr. Ayça TOKUÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

Değerli yorumlarıyla ve görüşleriyle tez çalışmama destek olan jüri üyelerim Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi Anabilim Dalı öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Kutluğ SAVAŞIR'a ve Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı öğretim üyesi Doç. Dr. Özge ANDİÇ ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca aldığım bütün kararlarda bana her türlü özgürlük hakkını tanıyarak istediğim yolda ilerlememe izin veren, benden hem maddi hem manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve verdiği güvenle hep arkamda olduğunu hissettiğim sevgili annem Hacer KÜKDAMAR'a sonsuz teşekkür ederim.

İlknur KÜKDAMAR

BİYO ADAPTİF CEPHE ELEMANLARI

ÖZ

Fosil enerji kaynakları günden güne azalmakta ve bu durum insanları daha yeşil ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışına yöneltmektedir. Bu sebeple günümüzde sürdürülebilir enerjinin önemi artmaktadır. Biyoenerji de yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir ve biyokütlenin kimyasal dönüşümünden üretilmektedir. Biyokütle çeşitleri arasında algler de bulunmaktadır. Algler ya açık ya da kapalı kültür sistemlerinde yetiştirilmektedir. Alglerin üretimi için kullanılan kapalı sistemlere "fotobiyoreaktör" denmektedir. Fotobiyoreaktörler gün ışığını yakalamak, ulaştırmak, yöneltmek ve yetiştirme alanı içine bu ışığı dağıtmakta kullanılmaktadır. Bu reaktörler, sızdırmaz ve şeffaf konteynerler olup alg yetiştirilmesi için uygun ortamı sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütlenin verimli kullanılması; uygun reaktör seçimi ve kullanımı ile mümkündür. Fotobiyoreaktörlerin bina cephelerine uygulandığı örnekler incelendiğinde, cephelerin yeni bir işlev kazandığı ve enerji üretimi için kullanılacak alanlara dönüştüğü görülmektedir. Bu sayede yapıların çevreye olan karbon salımları da azalmaktadır. Bu tezde fotobiyoreaktörlerin cephelere uygulanabilmesi ve cephelerden biyokütle üretim şekilleri araştırılmaktadır. Sonuç olarak, biyo adaptif bir cephe önerilmekte ve fotobiyoreaktörlerin cephelerde kullanımı için geliştirilen fikirler sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Fotobiyoreaktör, alg, biyokütle, biyoenerji, bina cephesi, sürdürülebilir yapı

BIO ADAPTIVE FACADE ELEMENTS

ABSTRACT

Fossil energy sources are decreasing day by day therefore the community is searching for greener and renewable energy sources. Thus, the importance of sustainable energy is increasing nowadays. Bioenergy is one of the renewable energy sources and is produced from chemical transformation of biomass. Algae is a biomass source. Algae are grown in either open or closed culture systems. The closed systems which are used for the cultivation of algae are called “photobioreactor”. Photobioreactors catch, transport, channel and distribute sunlight into the cultivation area. These reactors are mainly sealed, transparent containers that are used for providing suitable environment to cultivate algae. Efficient use of biomass which is one of the renewable energy sources is possible with selection and use of a suitable reactor. When the examples of photobioreactors which are applied on building facades are examined, these facades gain a new function and are transformed into an energy production area. Thus, they reduce the carbon emission of buildings to the environment. In this thesis, application of photobioreactors to the facades is investigated, in addition the production of biomass on building facades is researched. Consequently, a bio adaptive facade is suggested and ideas for integration of photobioreactors into facades is presented.

Keywords: Photobioreactor, algae, biomass, bioenergy, building facade, sustainable building

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xiii

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Problemin Tanımı 1
1.2 Tezin amacı 3
1.3 Tezin Kapsamı ve Yöntemi 4

BÖLÜM İKİ –ALGLER VE YETİŞTİRME SİSTEMLERİ 6

2.1 Biyokütle 7
2.2 Biyoenerji 11
2.3 Fotosentez 13
2.4 Algler 15
2.4.1 Işık Yoğunluğu 17
2.4.2 Sıcaklık 18
2.4.3 Karıştırma 18
2.4.4 Besin 19
2.4.5 pH 20
2.4.6 CO_2 Tüketimi 20
2.4.7 Ortamdan O_2 Uzaklaştırması 21
2.4.8 Su Tüketimi 21

2.5 Alg Yetiştirme Sistemleri 21
2.5.1 Açık Sistemler 22
2.5.2 Kapalı Sistemler 24

BÖLÜM ÜÇ – FOTOBİYOREAKTÖRLERDE ALG ÜRETİMİNİ ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER VE FOTOBİYOREAKTÖR ÇEŞİTLERİ 25

3.1 Fotobiyoreaktörlerde Alg Üretimini Etkileyen Değişkenler 26
3.1.1 Işıklandırma 27
3.1.2 Kütle Aktarımı/Karıştırma 34
3.1.3 Ölçeklendirme 38
3.1.4 Süreç Yönetimi ve Temizlik 44
3.2 Fotobiyoreaktör Çeşitleri 50
3.2.1 Düz-Panel Fotobiyoreaktörler 50
3.2.2 Tübüler Fotobiyoreaktörler 54
3.2.3 Dikey-Kolon Fotobiyoreaktörler 57
3.3 Fotobiyoreaktörlerde Alg Üretimini Etkileyen Değişkenlerin Fotobiyoreaktör Çeşitlerine Göre Karşılaştırılması 60

BÖLÜM DÖRT – BİNA CEPHESİNDE FOTOBİYOREAKTÖR ÖRNEKLERİ 63

4.1 BIQ-Bio Intelligent Quotient, Splitterwerk ve Graz Mimarlık, Arup Mühendislik, Biyo Adaptif Cepheli Bina 64
4.2 VIDA-BIOCAS, Algleri Kullanarak Kendine Yeten Şehir 67
4.3 Alg Cephesi ve Tentesi, Cesare Griffa ve ecoLogicStudio 69
4.4 Algler ve Binalar Arasındaki Yenilikçi Ortak Yaşam, SymBIO_2, XTU Mimarlık 78
4.4.1 "In Vivo" Yeşil Projesi 79
4.4.2 AlgoNOMAD Pavyonu, Geleceğin Paris'i 82
4.5 "Sıfır Süreç: İyileştirme Çözümü" Binası Kavramsal Tasarımı, HOK ve Vanderweil Mühendislik ve Mimarlık 83

4.6 Ennesys ve OriginOil İşbirliği Binası 88
4.7 Alg Dokuması, Petra Bogias 91

BÖLÜM BEŞ – BİYO ADAPTİF CEPHE ÖNERİSİ 99

5.1 Bina Tipolojisi 99
5.2 Fotobiyoreaktör Çeşidinin Seçimi 100
5.3 Geometri 105
5.4 Taşıyıcı Sistem 106
5.5 Biyo Adaptif Cephe Önerisi 109

BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR 114

KAYNAKLAR 119

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Çevre kirliliğinin oluşumu, madde ve enerji kullanımı, çevre kirliliğinin önlenmesi 6
Şekil 2.2 Fotosentezin oluşumu 14
Şekil 2.3 Algler ve sucul ortamda büyümeleri 17
Şekil 2.4 Dairesel havuzlar, kanallı havuzlar ve büyük torbalar 24
Şekil 3.1 Plastik konteynerlerden fotobiyoreaktörler 25
Şekil 3.2 Güneş ışığı ve yapay ışık kullanan fotobiyoreaktörler 26
Şekil 3.3 Işık yoğunluğunun alglerin büyümesine etkisi 28
Şekil 3.4 Fotobiyoreaktörün yüzey eğimi, yani fotobiyoreaktör yüzeyiyle yataydaki açı ve yüzey azimut açısı, yani yerel boylamdan yüzeye normalin yatay düzlem üzerindeki izdüşüm sapması açısı 29
Şekil 3.5 Alglerin aydınlık karanlık döngüsüne göre büyüme eğrileri 31
Şekil 3.6 Dalga boylarına göre ışığın spektrumda aldığı renkler 32
Şekil 3.7 Işığın spektrumda aldığı renklere göre alglerin fotosentez verimliliği 33
Şekil 3.8 Işık yoğunluğu ve LED lambaların enerji tüketimine göre enerji verimliliği 34
Şekil 3.9 Dönüş hızının ve gaz akış oranının artmasının karıştırma zamanına etkisi 36
Şekil 3.10 Dönüş hızının ve gaz akış oranının artmasının CO_2'in hacimsel kütle aktarım katsayısına (k_La) etkisi 37
Şekil 3.11 Dönüş hızına, gaz akış oranına ve gaz birleşimine göre biyokütle büyüme eğrilerinin değişimi 38
Şekil 3.12 Gaz tutuş kesri ve hacimsel kütle aktarım katsayısının (k_La) değişen yüzeysel gaz hızlarında farklı kolon çaplarında değişimi 40
Şekil 3.13 Hacimsel kütle aktarım katsayısının (k_La) gaz tutuş kesrine oranının değişen yüzeysel gaz hızlarında farklı kolon çaplarında değişimi 40

Şekil 3.14 42 deneyin ortalama ışınım dizilerine göre, biyokütle üretimi ve aydınlık karanlık döngü sıklığı 41
Şekil 3.15 0,14 m derinliğinde, 7 lt kültür hacminde ve iki katı hacme sahip 0,28 m derinliğinde, 14 lt kültür hacminde fotobiyoreaktörler 43
Şekil 3.16 Reaktör derinliğine göre üretim verimliliğinin değişimi 43
Şekil 3.17 Kemostat, turbidostat, luminostatın şematik gösterimi 47
Şekil 3.18 Düz-panel, tübüler ve dikey-kolon fotobiyoreaktörler 50
Şekil 3.19 Düz-panel fotobiyoreaktörün yan ve ön kesiti 51
Şekil 3.20 Yapay ışıklı düz-panel fotobiyoreaktör 52
Şekil 3.21 Düz-panel fotobiyoreaktörler 53
Şekil 3.22 Yatık, konik ve yatay tübüler fotobiyoreaktörler 54
Şekil 3.23 Hava kaldırmalı tübüler fotobiyoreaktör 55
Şekil 3.24 Tübüler fotobiyoreaktörler 56
Şekil 3.25 Karıştırmalı tank ve hava kaldırmalı dikey-kolon fotobiyoreaktörler 57
Şekil 3.26 Kabarcık-kolon, çekiş tüplü hava kaldırmalı ve bölünmüş silindir hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler 59
Şekil 4.1 Cephelerde uygulanan düz-panel fotobiyoreaktörler 64
Şekil 4.2 Hamburg'ta inşa edilen biyo adaptif cepheli bina 65
Şekil 4.3 Binanın cephesindeki düz-panel fotobiyoreaktörün yapısı, kesiti ve görünüşü 65
Şekil 4.4 Bina cephesindeki ikincil fotobiyoreaktör yapısının yakından görünümü . 66
Şekil 4.5 Üretilen biyoenerjinin toplandığı biyogaz üretim makinesi 67
Şekil 4.6 Kelebek kanadından esinlenilerek tasarlanan fotobiyoreaktör birimleri 68
Şekil 4.7 Kelebek pullarının çatılarda ve cephelerde diğer kullanımları 69
Şekil 4.8 Milano'daki EXPO 2015 için yapılan alg cephesi ve tentesi prototipleri .. 69
Şekil 4.9 Milano'daki EXPO 2015 için yapılan alg cephesi ve tentesi prototipleri .. 70
Şekil 4.10 "WaterLilly 2.0" sistemiyle alg cephesi tasarımı 71
Şekil 4.11 Cesare Griffa'nın "WaterLilly 2.0" sisteminden yola çıkarak daha büyük ölçekte tasarladığı cephe sistemi 71
Şekil 4.12 Alglerin etken olduğu birimler, şeffaf plastik filmden büyüme odaları ... 72
Şekil 4.13 Cephe sisteminin işletim şeması 73

Şekil 4.14 Hareket algılayıcılarıyla donatılan cephe sisteminin insan hareketlerine göre verdiği etkiler 74
Şekil 4.15 Uygun sıcaklık dengesi ve günlük biyokütle üretim hacmi 75
Şekil 4.16 "Hortus" sistemiyle alg tentesi tasarımı 76
Şekil 4.17 Milano'daki EXPO 2015 için geliştirilen alg tentesinin uygulanan tasarımı 77
Şekil 4.18 SymBIO_2, algler ve binalar arasındaki yenilikçi ortak yaşam 78
Şekil 4.19 "In Vivo" yeşil projesi, Alg Evi tasarımı 79
Şekil 4.20 Ağaç Evi, Bitki Evi ve Alg Evi 80
Şekil 4.21 Alg Evi, fotobiyoreaktörlerle oluşturulan biyo adaptif cepheli bina 81
Şekil 4.22 Alg Evi'ndeki fotobiyoreaktörlerden biyokütle üretimi 81
Şekil 4.23 AlgoNOMAD ve kurulum aşaması 82
Şekil 4.24 AlgoNOMAD'ın içeriden ve dışarıdan görünüşleri 83
Şekil 4.25 Los Angeles'ta, 1960'larda inşa edilmiş, U.S. General Services Administration (GSA) ofis binası 84
Şekil 4.26 "Sıfır Süreç: İyileştirme Çözümü" Binası kavramsal tasarımı 85
Şekil 4.27 %25, %60 ve %80 oranında açıklık içeren, 2.322,5 m^2 alan kaplayan tübüler fotobiyoreaktörler 86
Şekil 4.28 Tübüler fotobiyoreaktörlerin bina cephesinde uygulanması 86
Şekil 4.29 3 büyük avlu ve 8 ışık kuyusuyla ofislerin aydınlatılması 87
Şekil 4.30 "Sıfır Süreç: İyileştirme Çözümü" Binası perspektif görünümü 88
Şekil 4.31 Ennesys ve OriginOil İşbirliği Binası kavramsal tasarımı 89
Şekil 4.32 OriginOil'in Alg Cihazı 90
Şekil 4.33 Ennesys ve OriginOil İşbirliği Binası perspektif görünümü 90
Şekil 4.34 Alg dokumasının sistem yapısı ve kesiti 92
Şekil 4.35 Fotobiyoreaktör ve alg dokumasının mekansal etki ve esneklik açısından karşılaştırılması 93
Şekil 4.36 Fotobiyoreaktör ve alg dokumasının geometrik düzen ve esneklik açısından karşılaştırılması 94
Şekil 4.37 Fotobiyoreaktör ve alg dokumasının uygulanabilirlik açısından karşılaştırılması 95

Şekil 4.38 Fotobiyoreaktör ve alg dokumasının çevresel etki açısından karşılaştırılması 97
Şekil 5.1 Hafif giydirme cephelerde çubuk, panel ve yarı panel sistemler..... 107
Şekil 5.2 Altıgen düz-panel fotobiyoreaktör ve fotobiyoreaktörün üçgensel parçası 110
Şekil 5.3 Altıgen düz-panel fotobiyoreaktörlerden oluşan giydirme cephenin görünümü 111
Şekil 5.4 Giydirme cephenin tümünden altıgen düz-panel fotobiyoreaktörlerin CO_2 besleme boruları, O_2 tahliye boruları ve besin, mineral borularının geçişinin görünümü 111
Şekil 5.5 Giydirme cephedeki panel sistemin çerçeveleri arasındaki derzlerden CO_2 besleme boruları, O_2 tahliye boruları ve besin, mineral borularının geçişini gösteren altıgen düz-panel fotobiyoreaktörün yan ve ön kesiti 113

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Biyokütle kaynakları ve örnekleri..... 10
Tablo 2.2 Biyoenerji dönüşüm grupları ve yöntemleri 12
Tablo 3.1 Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenlerin fotobiyoreaktör çeşitlerine göre karşılaştırılması..... 61
Tablo 5.1 Değerlendirme sisteminde verilen notların değeri ve anlamı 101
Tablo 5.2 Işıklandırma değişkeninin değerlendirilmesi..... 101
Tablo 5.3 Kütle aktarımı/karıştırma değişkeninin değerlendirilmesi 102
Tablo 5.4 Ölçeklendirme değişkeninin değerlendirilmesi 103
Tablo 5.5 Süreç yönetimi ve temizlik değişkeninin değerlendirilmesi..... 104
Tablo 5.6 Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenlere bağlı olarak fotobiyoreaktör çeşitlerinin fayda değer analizi sonuçları 105

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Güneş dünyanın ve insanoğlunun varoluşundan bu yana, yaşamın devamlılığını sağlayan en temel enerji kaynağıdır. Ancak teknolojinin gelişmesi ve fosil enerji kaynaklarının kullanılması ile güneş enerjisine verilen önem azalmıştır. Özellikle 19. ve 20. yüzyıllarda çoğunlukla fosil enerji kaynakları tercih edilmiş ve güneş ikinci plana itilmiştir. Fakat fosil enerji kaynaklarının aşırı kullanım nedeniyle günden güne azalmasına ve bu kaynakların dünya genelindeki olumsuz etkilerine karşı, insanların çevreyi, doğayı, havayı, kısaca dünyayı koruma amacıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeleri, güneş enerjisinin kullanımını ve önemini tekrar artırmıştır.

Mimaride, yenilenebilir enerji alanında bazı çalışmalar yapılmakla birlikte; bunların yapılı çevreye yansıması istenilen seviyede değildir. Oysa ki mimari, uygulama potansiyeli yüksek bir alan olduğu için, bu konu üzerine daha fazla çalışma ve araştırma yapılmalıdır. Mimarlık, çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi göstermekle birlikte, biyoenerjiye de ilgi duymaya başlamıştır. Yenilenebilir enerjinin ön plana çıkmaya başlamasıyla, güneş ışığını kullanarak enerji üretme fikri pek çok meslek alanının ve sektörün ilgisini çekmeye başlamıştır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de biyoenerjidir ve biyoenerji, güneş ışığı sayesinde üretilmektedir. Biyoenerjinin binalar yardımıyla üretilmesi, kullanılan binaların sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır.

1.1 Problemin Tanımı

Binalar gün boyunca güneş ışığı, sıcaklık, yağış, ve rüzgar gibi iklimsel hareketlerin etkisinde kalmaktadır. Bu nedenle bina cephelerinin baktığı yön, boyutu, biçimi ve malzemeleri iç mekanın rahatlığını ve enerji kullanımını belirlemektedir. Binaların enerji verimliliğini etkileyen en önemli yapı elemanlarından biri cephelerdir. Bina cepheleri sağır ve saydam cephelerden oluşmaktadır. Sağır cepheler dış duvarlar, saydam cepheler ise pencerelerdir. Binanın sağır ve saydam cepheleri aracılığıyla güneş ışığını kullanarak biyokütleden biyoenerji üretimi, son

yıllarda üzerinde çalışılan ve geliştirilmekte olan bir konudur. Bu konuda yapılan çalışmalar sonrasında biyokütleden biyoenerji üretimi sağlanması amacıyla fotobiyoreaktörlerin bina cephelerinde kullanım şekilleri araştırılmaktadır. Dünyada bina cephelerinde fotobiyoreaktör uygulamaları incelendiğinde, fotobiyoreaktörlerin giydirme cephe ya da çift kabuk cephe olarak bina cepheleriyle bütünleştiği örneklere rastlanmaktadır.

Giydirme cephe, bina cepheleri üzerine yatay ve düşey konumda uygulanan taşıyıcı sistem üzerine sabitlenmekte, bir anlamda giydirilmektedir. Kaplama malzemesi olarak cam ve kompozit panellerden oluşmaktadır. Giydirme cepheler binanın yükünü taşımayan, sadece kendi yükünü kirişlere aktaran, yapının dış kabuğunu oluşturan yapı elemanlarıdır (Kahraman, 2003). Bu dış kabuk genellikle saydam bir cephe olmaktadır. Çift kabuk cephede ise binanın asıl cephesi üzerine cam bir cephe daha kaplanmaktadır. Yani binanın sağır ve saydam cephelerinin, aralarında boşluk kalacak şekilde tasarlanmasıyla çift kabuk oluşturulmaktadır ya da her iki kabuk cam olabilmektedir (Yüceer, 2015).

Cepheler binaların enerji etkinliğini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Binaların güneş ışınımından yararlanması, iklim koşullarından korunması, havalandırılması, ses ve ısı yalıtımının sağlanması bunların başında gelmektedir. Ayrıca, cepheler kullanıcının ihtiyaçlarına etkili bir şekilde cevap vererek, birlikte çalışabilen sistemlere sahip yapıların tasarlanması ve uygulanmasında önemli rol oynamaktadır. Binanın daha sürdürülebilir olması için cephesi; yapı, şekil, yönlenme gibi edilgen sistemlerle beraber bu sistemleri desteklemek için, iklimlendirme, aydınlatma, yangın, güvenlik gibi etken sistemleriyle bütünlük oluşturacak şekilde tasarlanmalıdır.

Günümüzde çeşitli şekillerde çevreye karbon salımının gitgide arttığı düşünüldüğünde, özellikle kalkınmakta ve gelişmekte olan ülkelerin karbondioksit (CO_2) salımları daha da artmaktadır. Buna karşılık Kyoto Protokolü'nün önerdiği, yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması, sürdürülebilirliğin desteklenmesi gibi önlemler ülkeleri, CO_2 salımlarını daha da

azaltmaya ve düşük karbon çözümler geliştirmeye zorlamaktadır. Bunun için çeşitli yöntemler önerilmekte ve bu önerilerde kullanılan elemanlardan biri de binalar ve cepheler olmaktadır. Binalarda CO_2 salımını azaltmada kullanılabilecek en önemli yöntemlerden biri, içinde güneş enerjisinin de bulunduğu yenilenebilir enerji teknolojilerinden yararlanmaktır.

Cephelerde fotobiyoreaktörlerin uygulanması, onların enerji etkin olmakla kalmayıp, aynı zamanda daha sürdürülebilir olmasını sağlayacaktır. 1 ton algin büyüyebilmesi için 1,8 ton CO2'e ihtiyaç duyduğu bilinmektedir (Ulusoy, b.t). Ayrıca Türkiye güneşli gün sayısı bakımından oldukça zengin bir ülkedir. Bu nedenle fotobiyoreaktörler yardımıyla cephelerden enerji üretiminde yapılacak çalışmalar ve öneriler, cephelerden enerji sağlamaya geçişte, yapılan bu bilimsel çalışma sonrasında araştırmacılara ışık tutacaktır. Bu bağlamda fotobiyoreaktörler biyo adaptif cephe elemanları olarak yapılardaki CO_2 salımlarını azaltmada anahtar bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır.

Biyoenerjinin yapılarda üretilmesinde, yenilenebilir enerji teknolojilerinden olan fotobiyoreaktörlerin yapısal bir eleman olarak cephelerde kullanımı araştırılması gereken konular arasındadır. Fotobiyoreaktörler bina cephelerine uygulandığında, cepheler yeni bir işlev kazanmakta ve enerji üretimi için kullanılan alanlara dönüşmektedir. Cephelere fotobiyoreaktör eklenmesi ile hem cephe elemanlarının sürdürülebilirliği, hem de biyokütle enerjisinin etkinliği artırılabilmektedir. Ancak cephelerde fotobiyoreaktör kullanımının nasıl geliştirileceği sorusuna yanıt bulma gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Yenilenebilir enerjinin günden güne değerinin artmaya başlamasıyla birlikte biyoenerjinin ve insanların yaşadığı, çalıştığı alanlar olarak en çok enerji tüketiminin olduğu mimari yapıların bir araya getirilmesi, yapıların sürdürülebilirliğinin artırılması ve karbon ayak izinin azaltılması önemlidir. Bu tezde, binayla bütünleşen bir biyo adaptif cephe önerisinin yapılması tezin ana amacını oluşturmaktadır.

Bu bağlamda bina cephelerine fotobiyoreaktörlerin nasıl uygulanabileceğine dair farkındalık yaratmak için bu konuda dünyadan örneklerin ortaya konması ve fotobiyoreaktörlerin özelliklerinden yola çıkarak, bina cephelerinde hangi fotobiyoreaktör çeşitlerinin daha verimli olduğu, hangi tip binalarda fotobiyoreaktörlerin uygulanabileceği ve fotobiyoreaktörlerin nasıl binayla bütünleşmeye daha elverişli tasarlanabileceği konusunun tartışılması ve değerlendirilmesi ikincil olarak hedeflenmiştir. Bunlara ek olarak, biyoenerjinin temeli olan, biyokütle kaynaklarından alglerin, yetiştirme sistemlerinden fotobiyoreaktörlerin tanıtılması, çalışma koşullarının ve çeşitlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ise üçüncül olarak amaçlanmaktadır.

1.3 Tezin Kapsamı ve Yöntemi

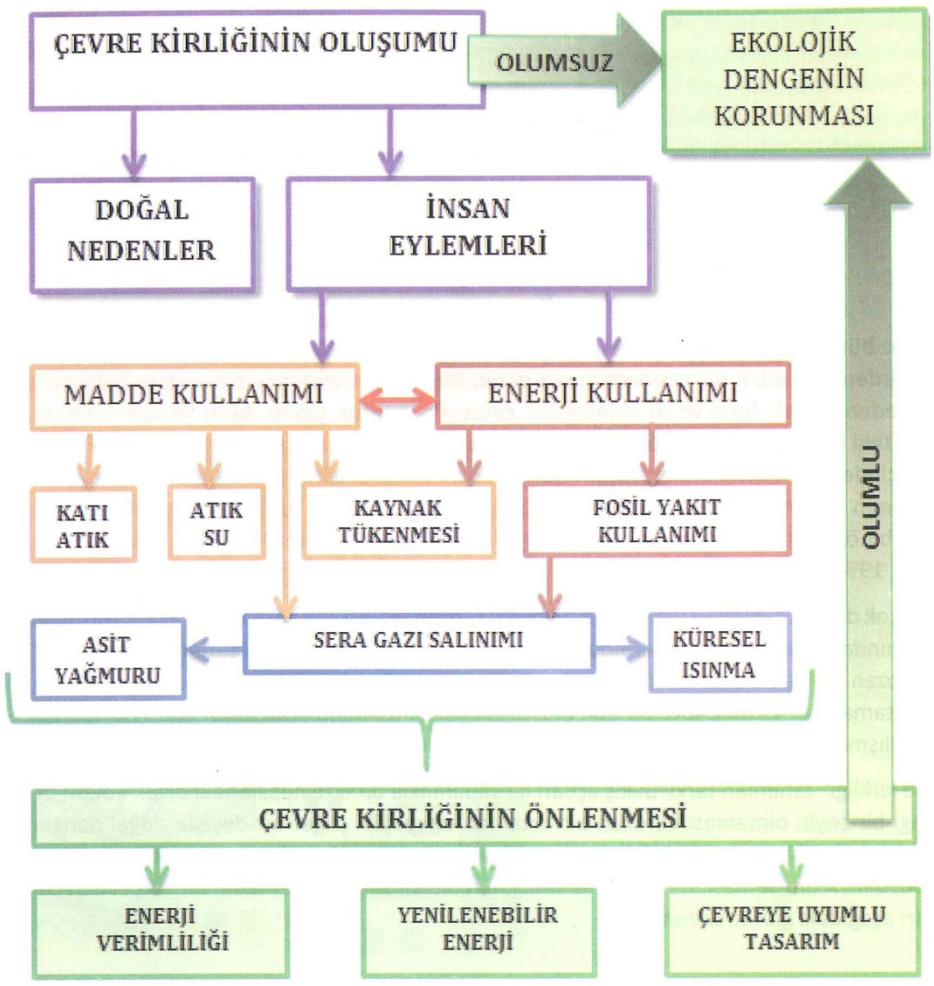
Tez kapsamında, öncelikle yenilenebilir enerji, biyokütle, biyoenerji, fotosentez ve alg kavramları incelenmektedir. Bu incelemede literatür taraması ile bilgiler toplanmakta, şekillerin ve tabloların desteği ile toplanan bilgiler sunulmaktadır. Ardından alg yetiştirme sistemleri araştırılarak, fotobiyoreaktörün tanımı yapılmakta, fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenler ve fotobiyoreaktör çeşitleri detaylı şekilde açıklanmakta ve sınıflandırılmaktadır. Belirlenen amaçlar doğrultusunda Türkçe ve yabancı kaynaklardan bu değişkenler ve çeşitler hakkında gereken bilgi elde edilmekte, şekillerle açıklama yapılmaktadır.

Güncel kaynaklardan sağlanan bilgilere göre, bina cephelerinde fotobiyoreaktörlerin uygulanmasına yönelik örnekler anlatılmaktadır. Bütün bu çalışmadan sonra, kazanılan ve öğrenilen bilgiler karşılaştırılıp birleştirilerek verimli bir fotobiyoreaktör cephe önerisi için geliştirilen fikirler sunulmakta ve biyo adaptif bir cephe sistemi önerilmektedir. Cephe önerisinin değerlendirilmesinde, kullanılacak olan algin çeşidi, sistemin maliyeti ve detaylandırılması, uygulama sorunları ve Türkiye iklim şartlarında sistemin çalışma koşulları kapsam dışında bırakılmaktadır.

Yapılan cephe önerisinde kullanılan fotobiyoreaktör çeşidinin seçimi için, fotobiyoreaktör çeşitlerinin alg üretimini etkileyen değişkenlere bağlı olarak fayda değer analizi yöntemiyle karşılaştırılmasından ve değerlendirmesinden, cephe önerisinin anlaşılmasına yardımcı olmak için ise şekillerden yararlanılmıştır. Son olarak elde edilen bütün bilgilere dayanarak, bilimsel görüş ve fikirler doğrultusunda bir değerlendirme yapılmakta, sonuçlar yorumlanmakta ve gelecek çalışmaların geliştirilmesiyle ilgili önerilerde bulunulmaktadır.

BÖLÜM İKİ
ALGLER VE YETİŞTİRME SİSTEMLERİ

Dünyadaki bütün canlılar enerjiye gereksinim duymaktadırlar. Bundan dolayı dünyada yaşanan çevre kirliliğinin başlıca nedenlerinden birisi enerji teminidir. Günümüzde dünyadaki enerji temininin %85'e yakını fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Çevre kirliliğinin oluşumu da madde ve enerji kullanımından kaynaklanmaktadır. Ama madde ve enerji kullanımı arasındaki ilişki doğru planlanırsa, çevre kirliliğinin önlenmesi mümkündür. Bunun da temeli enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve çevreye uyumlu tasarımdan geçmektedir (Şekil 2.1) (Yüceer, 2015).



Şekil 2.1 Çevre kirliliğinin oluşumu, madde ve enerji kullanımı, çevre kirliliğinin önlenmesi (Yüceer, 2015).

Yenilenebilir enerji yeryüzünde ve doğada çoğunlukla herhangi bir üretim sürecine gereksinim duymadan temin edilmektedir. Yüceer'e (2015) göre; kısaca yenilenebilir enerji sürekli yaratılan enerji kaynağı demektir (Yüceer, 2015). Yenilenebilir enerji çeşitlerini hidroelektrik enerjisi, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, biyoenerji (biyokütle enerjisi), dalga enerjisi, gel-git enerjisi ve hidrojen enerjisi oluşturmaktadır. Bu enerjilerin kaynakları yenilenebilir, yani kullanılmakla eksilmeyen enerji kaynaklarıdır (Yüceer, 2015).

Dünyanın çoğalan nüfusu ve sanayileşmesi ile giderek artan enerji gereksinimini çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek en önemli enerji çeşitlerinden birisi biyoenerjidir (Türe, 2001). Yenilenebilir enerji çeşitlerinden olan biyoenerji günümüzde, elektrik üretiminden, ısınmaya, sanayisel aktivitelerden, ulaşıma kadar birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle 20. yüzyılın sonlarına doğru teknolojinin de daha hızlı gelişmesine paralel olarak biyoenerji üretimi giderek artmaya devam etmektedir. Biyoenerjinin temel kaynağını oluşturan biyokütle ise bu araştırmada önemli bir yer tutmaktadır.

2.1 Biyokütle

Yüzyıllar önceden beri dünyanın en büyük ve önemli enerji kaynağı olan biyokütlenin yerini zamanla, ilk önce kömür daha sonra petrol ve doğal gaz almaya başlamıştır. Ama 21. yüzyılda biyokütlenin önemi ve gelişimi dünya genelinde tekrar artmaya başlamıştır. Bunda enerji piyasasında meydana gelen özgürleşme ve devletlerin çoğunun yenilenebilir enerji kaynaklarına destek vermesi ve yönelmesi etkili olmuştur (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011).

Biyokütle; biyolojik kökenli, fosil olmayan organik madde kütlesidir. Türk Dil Kurumu, Bilim ve Sanat Terimleri Sözlüğü'nün Biyoloji Terimleri Sözlüğü'ne göre ise biyokütle, canlı varlıklarda organizmanın suyu alındıktan sonra geriye kalan kuru kütlesidir. Biyokütle, bir türe veya çeşitli türlerden oluşan topluma ait yaşayan organizmaların belirli bir zamanda sahip olduğu toplam kütle olarak da

tanımlanabilmektedir (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011; Biyokütle, Türk Dil Kurumu [TDK], 1998; Türe, 2001).

Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar da yine canlı varlıkların milyonlarca yıl yer altında kalması ile oluşan fosil biyokütle olarak tanımlanabilmektedir. Fosil yakıtlar aslında tanımlanan biyokütle ile aynı özellikleri taşımasına rağmen, yer altındaki sıcaklıkla ve basınçla değişime uğradıkları için, yakıldıklarında havaya azot, kükürt, karbon gibi zararlı birçok madde salmaktadır. Ayrıca milyonlarca yılda oluşan bu birikimin kısa süre içinde yakılması, havadaki CO_2 ve karbonmonoksit (CO) dengesinin bozulmasına yol açmış, bunun sonuncunda küresel ısınma başlamıştır. Diğer zararları arasında asit yağmurları ile ormanları, canlı varlıkları, hatta binaların dış yüzeylerini bozması sayılmaktadır (Türe, 2001).

Biyokütle çoğu kez bitkisel ve hayvansal kütle olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ölçü birimi ise belirli bir alana oranlanmış yaş ya da kuru kütledir. Biyokütleyi aynı zamanda organik karbon olarak da kabul etmek mümkündür. Biyokütlenin kimyasal içeriğinde ise, karbonun yanı sıra hidrojen, oksijen, azot atomları, daha küçük oranlarda alkali, alkali toprak ve ağır metaller içeren atomlar vardır (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011).

Biyokütle,

- dünyadaki ve Türkiye'deki potansiyelinin yüksek olması,
- çok çeşitli yerlerde yetiştirilebilmesi ve yetişmesi,
- kolayca depolanması,
- sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması,
- üretim ve dönüşüm teknolojilerinin iyi bilinmesi,
- her ölçekte enerji üretimi için uygun olması,
- düşük ışık şiddetlerinin yeterli olması,
- azot ve kükürt salımlarının çok düşük olması nedeniyle çevre kirliliği oluşturmaması,
- atmosferde CO_2 dengesini sağlayarak sera etkisi oluşturmaması,
- asit yağmurlarına yol açmaması,

- çevresel etkilerinin daha olumlu olması ve
- yenilenebilir bir kaynak olması nedeniyle önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Bunların yanında,

- tarım alanları için rekabet oluşturması,
- düşük çevrim verimine sahip olması,
- su içeriğinin fazla olması gibi olumsuz yönleri vardır (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011; Türe, 2001).

Biyokütle kaynaklarını yüzyıllık periyottan daha kısa sürede yenilenebilen, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvan artıkları, besin sanayisi, orman ürünleri ve kentsel artıkları içeren tüm organik maddeler oluşturmaktadır. Biyokütleye örnek olarak, ağaçlar, ölü ağaçlar, okaliptüs, söğüt, kavak gibi hızlı büyüyen ağaçlar, odun parçaları, keresteler, talaş, ekinler, buğday, mısır, kanola, soya, ayçiçeği, kenevir, şeker kamışı, bambu, palmiye gibi özel olarak yetiştirilen bitkiler, otlar, yosunlar, algler, evlerden atılan meyve ve sebze artığı gibi tüm organik çöpler, çiftlik hayvanlarının dışkıları, gübre ve sanayi atıklarını vermek mümkündür (Tablo 2.1) (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011; Yüceer, 2015).

Tablo 2.1 Biyokütle kaynakları ve örnekleri (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011).

Sektör	**Biyokütle Kaynakları**	**Örnekler**
Ormancılık	Ormanlar	Hızlı büyüyen ağaçlar (okaliptüs, söğüt, kavak vb.)
		Ağaçlar, ölü ağaçlar
	Orman yan ürünleri	Odun parçaları, keresteler, talaş vb.
Tarım	Kuru selülozik enerji bitkileri	Otsu bitkiler (kamışlar, bambu, kenevir vb.)
	Yağlı, şekerli ve nişastalı enerji bitkileri	Yağlı tohumlu bitkiler (kanola, soya, ayçiçeği, palmiye vb.)
		Şekerli bitkiler (şeker pancarı, şeker kamışı vb.)
		Nişastalı bitkiler (buğday, mısır, patates vb.)
	Bitkisel organizmalar	Otlar, yosunlar, algler vb.
	Tarımsal artıklar	Saman, sap, budama artıkları
	Hayvan atıkları	Yaş ve kuru dışkı, gübre
Sanayi	Sanayi atıkları	Sanayisel odun artıkları, talaş vb.
		Kağıt sanayi atıkları
Atık	Kuru selülozik maddeler	Park ve bahçe artıkları (yapraklar vb.)
	Organik atıklar	Odun parçacıkları
		Organik belediye atıkları
		Biyolojik olarak parçalanabilen organik çöpler ve çöp gazı
		Kanalizasyon çamuru

Biyokütle kaynakları klasik ve modern biyokütle kaynakları olarak ikiye ayrılmaktadır. Klasik biyokütle kaynakları, normal ormanlardan ağaç kesimiyle elde edilen yakacak odun, hayvan atıklarından oluşan tezek ve diğer bitki atıklarından oluşmaktadır. Modern biyokütle kaynakları ise, enerji ormancılığı ürünleri, orman ve

ağaç sanayi atıkları, enerji tarımı ürünleri, tarım kesiminin bitkisel ve hayvansal atıkları, bitkilerden biyodizel, biyoetanol, hayvan atıklarından biyogaz gibi çeşitli yakıtlar, kentsel atıklar, tarımsal sanayi atıkları olarak belirtilmektedir (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011; Türe, 2001).

Biyokütle kaynakları birincil biyokütle kaynakları ve ikincil biyokütle kaynakları olarak da bir ayrıma tabi tutulabilmektedir. Birincil biyokütle kaynakları, doğrudan ya da bir dönüştürme işlemi sonucunda, enerji üretimi amacıyla kullanılabilen ve oldukça hızlı büyüyen bitkilerdir. İkincil biyokütle kaynakları ise, insan ya da hayvanların beslenmesi veya özünü değiştirebilen birtakım tarımsal ve sanayisel faaliyetlerde ilk kullanımdan sonraki kalıntıların, artıkların tamamıdır. Bunlar özellikle gübreler, arıtma tesisleri çamurları, tarımsal atıklar ve orman atıklarıdır (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011).

2.2 Biyoenerji

Biyokütlenin enerji amaçlı kullanılması ile elektrik ve ısı üretilmekte, katı, sıvı ve gaz yakıtlar elde edilmektedir. Bitki ve hayvan atıklarından yani biyokütleden yararlanılarak elde edilen enerjiye biyoenerji denmektedir. Türk Dil Kurumu'nun Güncel Türkçe Sözlüğü'ne göre ise biyoenerji, biyokütlenin kimyasal dönüşümü ile elde edilen enerjidir (Yüceer, 2015; Biyoenerji, TDK, 2015).

Biyokütlenin biyoenerjiye dönüştürülmesi sırasında göz önüne alınması gereken üretim faktörleri,

- enerjinin az masrafla dönüştürülmesi,
- ekonomik olması,
- dönüştürme sırasında kullanılan teknolojinin basit ve çabuk uygulanabilir olması,
- eğitilmiş personele ihtiyaç duyulması,
- yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı olması,
- doğadaki dengeyi bozmaması,

- su, hava ve çevre kirliliğine yol açmamasıdır (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011).

Biyoenerji üretilirken, ön işlemden geçirilmiş biyokütleye uygulanan teknolojiler, termokimyasal ve biyokimyasal dönüşümler olmak üzere sınıflandırılabilmektedir. Bu dönüşüm grupları, istenilen amacı gerçekleştirebilmek için, doğrudan yakma, havasız çürütme, gazlaştırma, piroliz, mayalama (fermentasyon), hidroliz ve biyofotoliz gibi çeşitli dönüşüm yöntemlerini kullanmaktadır (Tablo 2.2) (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011; Türe, 2001).

Tablo 2.2 Biyoenerji dönüşüm grupları ve yöntemleri (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011).

Dönüşüm Grupları	**Dönüşüm Yöntemleri**	**Ürünler**
Termokimyasal dönüşümler	Doğrudan yakma	Elektrik enerjisi, buhar
	Piroliz	Odun kömürü, biyokömür Yakıt gazları (hidrojen ve metan gazı)
	Gazlaştırma	Elektrik enerjisi, buhar Yakıt gazları (hidrojen ve metan gazı)
Biyokimyasal dönüşümler	Havasız çürütme	Metan gazı (ısıtma amaçlı) Biyogaz, biyodizel
	Mayalama(Fermantasyon)	Kimyasal maddeler (etanol, bütanol, aseton vb.) Selülozdan yakıt Organik kimyasal madde
	Biyofotoliz	Hidrojen gazı Biyohidrojen

Canlı organizmalar CO_2 'i ve suyu kullanarak güneş ışığı aracılığıyla fotosentez yapmakta ve kendileri için gereken enerjiyi üretmektedir. Bu süreç, biyoenerji üretimindeki fotosentezin önemini açıkça göstermektedir. Bitkisel biyokütle fotosentez yoluyla gelişirken, tüm canlıların solunumu için gerekli olan oksijeni (O_2)

atmosfere vermektedir. Aynı zamanda yetişirken atmosferden aldığı CO_2 gazını, enerji üretimi için yakılma sırasında tekrar atmosfere salmaktadır. Ancak, bu biyokütle, oluşması sırasında atmosferden eş miktarda CO_2 almış olduğundan, biyokütleden biyoenerji elde edilmesinde, kapalı bir karbon çevrimi sağlanmaktadır. Böylece atmosferdeki CO_2 düzeyi ve sera etkisi artmamaktadır. Bu nedenle, odunsu ve otsu ürünlerden elde edilen katı, sıvı ve gaz biyoyakıtlar iklim değişikliğinin yavaşlatılmasına karbon nötr olmalarıyla katkıda bulunmaktadırlar (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011). Burada fotosentez en önemli anahtardır, çünkü enerjiye dönüşüm sırasında yanarak serbest kalan karbonun miktarı, alglerin büyümeleri sırasında yaptıkları fotosentez tarafından emilen karbon miktarına eşittir (Wurm, 2013).

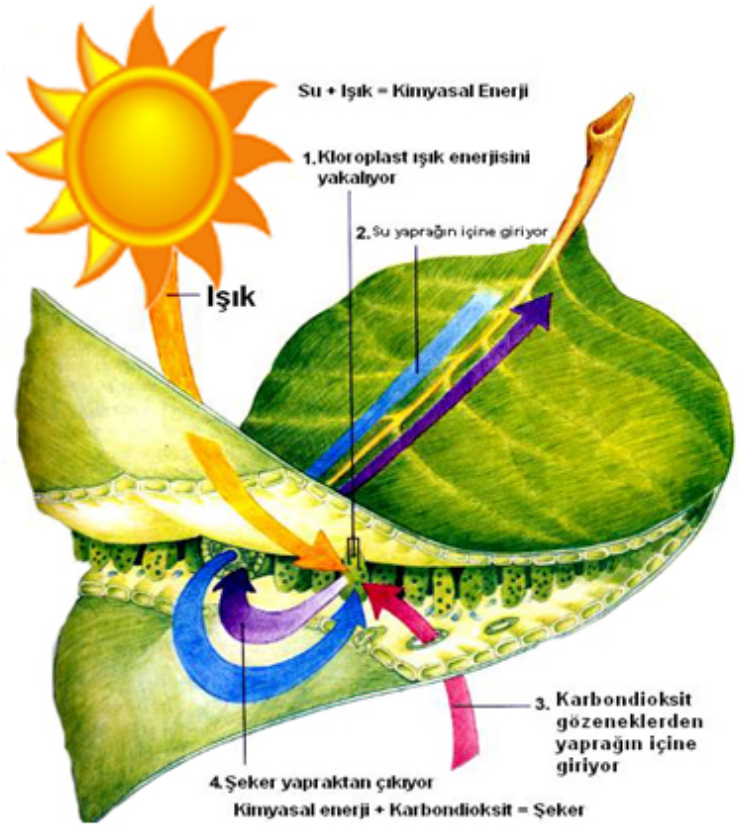
2.3 Fotosentez

Canlı organizma kökenli olarak ortaya çıkan biyokütle güneş enerjisini fotosentez yardımıyla depolayan bitkileri içermektedir. Bitkilerin gelişmek için kullandığı kaynaklar CO_2, su ve güneş ışığıdır. CO_2 ve suyun güneş ışığı aracılığıyla bitki tarafından birleştirilerek madde ve O_2'e dönüşmesi fotosentez olayı ile açıklanmaktadır (Şekil 2.2). Türk Dil Kurumu, Bilim ve Sanat Terimleri Sözlüğü'nün Kimya Terimleri Sözlüğü'ne göre ise fotosentez, yeşil bitkilerin kloroplastlarında karbon kaynağı olarak CO_2'in, hidrojen kaynağı olarak da suyun kullanılması ile yeşil pigment olan klorofilde tutulan güneş enerjisiyle hücre enerjisi yani adenosüntrifosfat (ATP) oluşması ve karbonhidratların sentezlenmesidir. Yani fotosentez ışığın neden olduğu sentezdir (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011; Fotosentez, TDK, 2007; Türe, 2001).

Temel olarak güneş enerjisinin kullanıldığı ve bu enerjinin havadaki CO_2 ve suyu, karbonhidrat, lignin, glikoz gibi çeşitli karbon bileşiklerine ve O_2'e dönüştürdüğü fotosentez işlemi birçok basamaktan oluşmaktadır. İlk basamakta oluşan glikoz için kimyasal tepkime Denklem 2.1 ile yazılabilmektedir:

$$6\,CO_2 + 5\,H_2O \xrightarrow{\text{Güneş enerjisi}} C_6H_{10}O_5 + 6\,O_2 \qquad (2.1)$$

Bu denklemde; CO_2: karbondioksit H_2O: su $C_6H_{10}O_5$: glikoz O_2: oksijen (Türe, 2001).



Şekil 2.2 Fotosentezin oluşumu (Fotosentez nedir? nasıl meydana gelir?, b.t).

CO_2 özümlenmesi olarak da bilinen fotosentez, genellikle bitkilerin yeşil yapraklarında, kloroplast adı verilen lamelli yapıda oluşmaktadır. Güneş ışığı yardımıyla, sağlıklı bir yeşil yaprağın her kilogramı saatte yaklaşık 3 litre (lt) O_2 üretmektedir. 1 metrekare (m^2) yaprak alanından ise yaklaşık 16 wattlık bir enerji akışı sağlanmaktadır. Bu durumda, bir insanın 24 saat boyunca gereksinimi olan O_2'in üretilebilmesi için 15-30 m^2 yaprak alanı gerekmektedir. Yapılan hesaplamalar ortalama bir iklim kuşağında, büyük bir ağacın, yetişkin bir insanın 1 yılda tükettiği O_2'i ancak sağlayabildiğini göstermektedir. Bundan dolayı doğada meydana gelen ve bitkilerin ışık ile etkileşim gösteren en temel olaylarından biri olan fotosenteze, besin

maddelerinin oluşumu ve atmosferik oksijenin üretimi açısından tüm canlılar yakından bağımlıdırlar (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011; Türe, 2001).

Güneşin dünyaya verdiği enerjinin yaklaşık 1,5 x 10^{18} kWh/yıl olduğu, bunun da dünyada tüketilen toplam enerjiden 10.000 kat büyük olduğu bilinmektedir. Dünya yüzeyine gelen bu enerjinin yaklaşık binde biri %0,1'i fotosentez yoluyla biyokütleye dönüştürülerek depolanmaktadır. Bu ise dünyada kullanılan toplam enerjiden 10 kat fazladır. Fotosentez sonucu oluşan biyokütlenin enerjisi hakkında fikir verebilmek için bunun 100.000 büyük nükleer santralin verdiği güce (9 x 10^{7} MW) eşit olduğunu söylemek yeterli olacaktır (Onurbaş Avcıoğlu ve diğer., 2011; Türe, 2001).

Son dönemlerdeki biyoenerji araştırmalarında ilgi çeken bir konu, biyolojik kaynaklardan elde edilen karbon nötr, uygun maliyetli, sürdürülebilir ve çevreye dost biyokütle kaynakları gibi algal biyokütleyi ve algleri ön plana çıkaran çalışmalardır. Hatta algal biyokütle, diğer biyoenerji kaynaklarının yerine geçmeye başlamıştır. Algler sahip oldukları potansiyelle, diğer bitki ürünleri ve besin desteği üstünde ters etkisi olmadan, biyoenerji kaynağı olarak iyi bir örnektir. Algler hücresel aktiviteleri aracılığıyla özel kimyasalları üretmek için suyu, CO_2'i ve güneş ışığını değiştirebilmektedir (Öncel, 2013).

2.4 Algler

Algler fotosentetik, serbestçe dolaşabilen mikroorganizmalar olup koloniler ve ipliksiler halinde şekil alabilmektedirler. Aşırı noktalardaki ekolojik yaşam alanlarına uyum sağlamada yüksek yeteneğe sahiptirler. Hücresel aktiviteleri aracılığıyla yüksek düzeyde karbonhidratlar, proteinler, yağ asitleri, vitaminler ve pigmentler gibi özel kimyasalları üretmektedirler. Günümüzde ticari alg üretimi bu kimyasallara bağlıdır. Çünkü bu kimyasallar kozmetik, sağlıklı gıda, yem desteği, kimyevi ve eczacılığa ait ilaç sanayisinde uygulamaya sahiptir (Öncel, 2013). Bununla beraber, algler yiyeceklerin üretiminde ve biyoaktif bileşimlerde kullanılmaktadırlar (Wurm, 2013).

Algler, çevrenin temiz tutulmasında faydalarıyla da ilgi çekmektedirler (Ugwu, Aoyagi ve Uchiyama, 2008). Algler gelişmekte olan ülkelerde atık arıtımı ve büyük ölçekli atık su arıtımında kullanılmaktadırlar (Conk Dalay, İmamoğlu ve Öncel, 2008). Ayrıca biyokütle çeşitleri arasında bulunmaktadırlar, hatta dünyanın bitki biyokütlesinin üçte birini algler oluşturmaktadırlar. Bu nedenle alglerin biyoenerjide kullanımı önemli unsurlardan biridir (Wurm, 2013). Alglerin biyokütle kaynağı olarak yetiştirilmesinin birçok yararı vardır. Bu yararlar şunlardır:

- Algler, fotosentetik işleme yoluyla organik bileşenlerin üretimi için güneş enerjisinin kullanıldığı verimli bir biyolojik sistem olarak düşünülmektedirler.
- Algler kompleks üreme organları olmayan damarsız canlılardır. Bu, bütün biyokütlenin hasatına ve kullanılmasına olanak sağlamaktadır.
- Alglerin birçok türü karbonhidratlar, proteinler, yağ asitleri, vitaminler ve pigmentler gibi ticari değeri olan ve istenen bileşenlerin özellikle yüksek konsantrasyonlarda üretilmesinde kullanılabilmektedirler.
- Tatlı su eksikliğinden veya fakir topraklardan dolayı verimin az olduğu birçok bölgede, verimliliği artırmanın ve basit protein üretimini güvence altına almanın bir yolu, değersiz topraklarda deniz suyu veya acı su kullanılarak yetiştirilen alglerin üretilmesidir.
- Algal biyokütle üretim sistemleri, yoğun emek harcanan üretim birimlerinden yüksek yatırımlar gerektiren tam otomatik sistemlere kadar çeşitli işlemsel veya teknolojik yetenek seviyelerine kolaylıkla uyum gösterebilmektedirler (Kendirli, 2010).

Algler, büyük çoğunluğu fotosentetik olmasına ve bitkilere benzemesine karşın, bitkiler alemiyle yakın akraba değillerdir (Su yosunları, b.t). Türk Dil Kurumu, Bilim ve Sanat Terimleri Sözlüğü'nün Su Ürünleri Terimleri Sözlüğü'ne göre ise, vücut yapıları gerçek kök, gövde ve yaprak olarak farklılaşmamış olan, iletim demetleri bulunmayan ve klorofil-a içeren sucul organizmalardır (Şekil 2.4) (Alg, TDK, 2015). Algler tüm fotosentetik prokaryotik ve fotosentetik ökaryotik organizmaları temsil etmektedirler (Conk Dalay ve diğer., 2008). Birçok alg sucul ortamda yaşamakta olup, biyolojik CO_2 / O_2 döngüsünde görev almaktadır (Conk Dalay ve diğer., 2008; Şahin ve Akyurt, 2010). Bitkiler gibi, algler de fotosentez yapabilmek için güneş

ışığını kullanmaktadırlar. Üstelik algler fotosentez konusunda gelişmiş bitki türlerinden daha verimlidirler, çünkü algler hücresel organizmalardır ve alg kolonisi içindeki her hücre fotosentez yapabilmektedir (Wurm, 2013).



Şekil 2.3 Algler ve sucul ortamda büyümeleri (Doğal yaşam ortamı deniz olan bir alg türünün diğer canlılarla olan ortak özellikleri nelerdir?, b.t; Algler nedir? görevleri nelerdir?, b.t).

Alglerin de dahil olduğu biyokütlenin enerjiye dönüşümü sırasında CO_2 sıfırlanmaktadır. Burada fotosentez en önemli anahtardır, çünkü enerjiye dönüşüm sırasında yanarak serbest kalan karbonun miktarı, alglerin büyümeleri sırasında yaptıkları fotosentez tarafından emilen karbon miktarına eşittir (Wurm, 2013). Alglerin hacimce büyümesinin temelinde fotosentez vardır. Bu sebeple fotosentezin içerdiği bütün öğeler ve değişkenleri alglerin yetiştirilmesinde önemlidir. Bu öğeler; ışık yoğunluğu, sıcaklık, karıştırma, besin, pH, CO_2 tüketimi, ortamdan O_2 uzaklaştırılması ve su tüketimidir (Kunjapur ve Eldridge, 2010; Conk Dalay ve diğer., 2008).

2.4.1 Işık Yoğunluğu

Alglerin canlılığını sürdürebilmeleri için ışık zorunlu bir değişkendir. Fotosentetik büyüme her bir algin kullandığı ışık enerjisi ile orantılı olduğu için, alglerin üretiminde ışığın en uygun seviyelerde sağlanması gerekmektedir. Işığın dalga boyu ve alglerin ışığa maruz kaldığı sıklık kadar, ışık yoğunluğu/alg kültürü içine girme önemli bir etkendir (Kunjapur ve Eldridge, 2010). Işık yoğunluğunun artması ile alglerin büyüme hızları artmaktadır. Ancak ışık yoğunluğunun artması, belli bir noktadan sonra, alglerin doygunluk seviyesine ulaşmasına neden olmaktadır. Bu

noktadan itibaren, algler ürettikleri enerjiyi ısı olarak açığa çıkartmaktadırlar. Aşırı ışık, etkisini birkaç dakika içinde göstermeye başlamakta, bazı alg kültürlerinde 15-20 dakika içinde kültüre %50'yi aşan hasar verebilmektedir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

2.4.2 Sıcaklık

Algler farklı sıcaklık aralıklarında yaşayabilmektedirler. Metabolizmalarına ve fizyolojik aktivitelerine doğrudan etkili olan sıcaklık değişimlerine hemen tepki göstermektedirler. Bu sebeple üretimi yapılacak alg türünün yetiştirilebileceği en elverişli sıcaklık dikkate alınarak uygun sistemde üretimi yapılmalıdır. Genel olarak alg türlerinin yaşadığı sıcaklık aralığı 16-27 °C arasında değişmektedir. En uygun aralık ise 18-24 °C arasında olup, özellikle ticari üretimi yapılan alglerin çoğu ılık sıcaklık aralığında yaşamaktadır. Sıcaklığın alglere olan etkisi hücre solunumu sırasında görülmektedir. Sıcaklık arttığında solunum hızı artmakta, artan solunum hızı biyokütle kayıplarını artırmaktadır. Sıcaklık alglerin verimliliği ve kimyasal kompozisyonları üzerinde de etkili olmaktadır (Conk Dalay ve diğer., 2008).

2.4.3 Karıştırma

Alg kültürlerinde, ışık ve sıcaklık gibi değişkenlerin ortamda en elverişli seviyelerde sağlanması için ortamın karıştırılması gerekmektedir. Karıştırma, alglerin çökelmesini önleyerek, kültürün içinde hücrelerin eşit olarak dağılım göstermesinde rol oynamaktadır. Böylece ortamdaki tüm alglerin ışık ve besin maddelerinden eşit oranda yararlanması sağlanmakta, özellikle açık hava kültürlerinde ısıl tabakalaşma önlenmekte, kültür ortamı ve hava arasındaki gaz aktarımı düzenlenebilmektedir. Karıştırma kültür sisteminin ölçeğine bağlı olarak, günlük olarak tüplerde ve erlenlerde elle, torbalarda ve tanklarda havalandırmayla, havuzlarda çarklı pedallar ve pompalarla gerçekleştirilmektedir. Ancak kültür sisteminin içine yüksek seviyede karıştırma uygulanırsa bu durum alglerin ölümü ile sonuçlanabilmektedir. Ayrıca bazı alg türlerinin karıştırmaya toleransı yoktur (Kunjapur ve Eldridge, 2010; Conk Dalay ve diğer., 2008).

2.4.4 Besin

Alglerin yetiştirilmesinde gerekli olan ana besinler, elementler ve vitaminlerdir (Conk Dalay ve diğer., 2008). Algler büyümek için fotosentez sırasında oluşan tepki gösteren elementlerden daha fazlasına gerek duymaktadır. Bu elementlerden iki ana besin desteği olan nitrojen ve fosfor, alglerin yağ üretimi ve büyüme oranlarının kontrolünde rol oynamaktadır. Diğer gerekli besinler karbon, hidrojen, oksijen, sülfür, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve klorürdür. Ayrıca besinler pek az miktarlarda ihtiyaç duyulan demir, bor, manganez, bakır, molibden, vanadyum, kobalt, nikel, silisyum ve selenyum içermektedirler. Alglerin besin dengelemesi algal biyokütlenin temel birleşimine dayanarak oluşturulmaktadır (Kunjapur ve Eldridge, 2010).

Her alg türünün üretiminde farklı yoğunluklarda çeşitli maddelere gereksinim duyulmaktadır. Alglerin gereksinimi çevresel ve fizyolojik değişkenlere bağlı olduğundan uygun kültür ortamının belirlenmesi yoğun bir çalışma gerektirmektedir. Algal üretim için kültür ortamındaki besin bileşenlerinin geliştirilmesinde bazı önemli etkenler vardır. Bunlar toplam tuz yoğunluğu, karbon kaynağı, azot kaynağı, diğer ana elementlerin yoğunluğu, ortamın pH değeri, ortamda bulunması zorunlu iz elementler, organik bileşenler ve büyümeyi destekleyici maddelerdir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Toplam tuz yoğunluğu algin orjinal biyolojik ortamına bağlıdır. Karbon kaynağı olarak inorganik ve organik kaynaklar kullanılmaktadır. Ortama karbon, inorganik madde olarak CO_2 gazından ya da bikarbonat formunda, organik olarak ise şekerler ya da asetat ile sağlanmaktadır. En çok kullanılan azot kaynakları nitrat, amonyak ve üre olup, uygun ve ekonomik azot kaynağı seçimi yapılmalıdır. Hangi azot kaynağının kullanılacağı alg türüne ve en uygun pH'a bağlıdır. Azot, algal biyokütlenin %10'undan daha fazlasını oluşturduğu için, en önemli elementlerdendir. Azot kaynağındaki değişim algin metabolik yolları üzerinde etki göstermekte, sonuç olarak algin yapısını değiştirmektedir. Diğer ana elementler potasyum, magnezyum, sodyum, sülfat ve fosfat gibi elementlerdir ve bunların yoğunluğu kültür ortamını

etkilemektedir. Ortamın pH değerinde bazı ana elementlerin çökelmesini önlemek için genellikle nötral değerler kullanılmaktadır. Ortamda bulunması zorunlu iz elementlerin genellikle az miktarlarda bulunması gerektiğinden stok çözeltileri hazırlanmaktadır. Organik bileşenler ve büyümeyi destekleyici maddeler olarak vitaminler ve hormonlar eklenmektedir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

2.4.5 pH

Alglerin üretimine etki eden bir diğer değişken ise pH'dır. Her alg türü özel olarak belirli bir pH aralığında üreyebilmektedir. Birçok alg türünün kültüründe pH, 7-9 aralığındadır. En uygun aralık ise 8,2-8,7 arasında değişmektedir. Alglerin yetiştiği kültür ortamı için uygun pH'ın sağlanamaması, hücrelerin parçalanarak içeriğinin ortama geçmesine ve kültürün ölümüne yol açabilmektedir. Bu sorun ancak kültürün havalandırılması ile aşılabilmektedir. Ortalama pH seviyesi alg kültüründeki CO_2 yoğunluğu ile bağlantılıdır. Çok yoğun kültür ortamlarında zamanla pH artışı meydana gelmektedir. pH dengesini istenen aralıklarda tutmak için uygun miktarlarda CO_2 eklenmektedir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

2.4.6 CO_2 Tüketimi

Alglerin CO_2 tüketimi, su tüketiminin yanında, fotosentezin oluşması için gerekli diğer bir değişkendir. Kültür ortamındaki CO_2 fazlalığı, fotosenteze ve alglerin büyümesine zararlı olabilmektedir. Algler yüksek CO_2 basıncına maruz kaldığında büyüme oranlarında düşüş gözlenmektedir. Yüksek CO_2 basıncında, CO_2 engellemesini önlerken, yeterli CO_2'i bütün kültür ortamına sağlamak için, CO_2'in kültür ortamı içine yayılması bir gaz geçirgen membran aracılığıyla desteklenebilmektedir. CO_2 basıncı hacimsel olarak %1-%5 aralığında olduğunda algler en iyi büyümeye ulaşmaktadırlar. Buna rağmen laboratuvarlar her zamanki şekilde, alg kültür ortamını %5-%15 aralığında CO_2 gazıyla işleme tabi tutmaktadırlar (Kunjapur ve Eldridge, 2010).

2.4.7 Ortamdan O_2 Uzaklaştırılması

Ortamdan O_2 uzaklaştırılması alglerin yetiştiği kültür ortamı içinde belli aralıklarla uygulanması gereken bir değişkendir. Ortamda yüksek O_2 varlığı algler için istenmeyen bir durumdur. Yoğun ışık ve yüksek O_2 yoğunluğunun birleşmesi algal biyokütleye zarar vermektedir. Genel kural olarak O_2 yoğunluğu, havadaki doygunluk değerinin %400 aşağısında tutulmalıdır (Kunjapur ve Eldridge, 2010).

2.4.8 Su Tüketimi

Su tüketimi açısından, alglerin üretilmesi için toprakta yetişen diğer ekinlerden çok daha fazla oranda su kaynağına ihtiyacı vardır. Algler tatlı sularda, tuzlu veya acı sularda ve atık sularda yetişebilmektedir. Alg türleri genellikle tatlı su ve tuzlu sularda büyüyebilenler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Suyun tuzluluk derecesi, her alg türünün bireysel karbonhidrat ve yağ üretim oranları kadar kendi içinde genel üretimini etkilemektedir. Algleri yetiştirmek için atık sular kullanılabilmektedir. Bu uygulama için kullanılan atık su iki önemli yarar sağlamaktadır. Hem algler gerekli besin maddelerince zengin ucuz ortamdan besinlerini almaktadır, hem de atık su bu süreç içinde daha ileri düzeyde iyileştirilmekte, temizlenmektedir. Buna karşın tuzlu sularda yetiştirilen algler eğer açık kültür ortamında ise suyun buharlaşmasından dolayı sudaki tuzluluk oranı kabul edilebilir değerlerin üstüne çıkabilmektedir (Kunjapur ve Eldridge, 2010).

2.5 Alg Yetiştirme Sistemleri

Alg yetiştiriciliğinin verimini artırmak için fizyolojik ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda çalışılmaktadır. Alglerin yetiştirilmesinde ticari başarının sağlanması ve etkili kültür ortamları için besinlerin en elverişli kullanımının, ışığın kullanımının, alglerin etkili üretiminin yanısıra ekonomik yetiştirme tekniklerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Alglerin daha yüksek verimle gelişmelerini sağlamak için gerekli büyüme ortamları oluşturulmasında belli sistemler kullanılmaktadır (Ugwu ve diğer., 2008). Alg yetiştirme sistemlerinin tasarımında kültür ortamının

seçilen algin ihtiyacına uygunluğu, sıcaklık, besin kaynağı, çevresel etkiler, yetiştirilen alg türünün özellikleri, kontrol mekanizmalarına olan gereksinim ve özellikle dış ortamda kurulu olan sistemler için güneş ışığından yararlanma gibi etkenler rol oynamaktadır. Bu sebeple sistemlerde,

- yeterli ve verimli ışık sağlanması ve ışıktan en yüksek seviyede yararlanılması,
- algal biyokütle ve gaz kayıplarının en düşük seviyelere indirilmesi,
- alg kültürünü yıpratan ve metabolizmasını yok eden fotosentetik O_2'nin sistemden uzaklaştırılması,
- ölçek büyütmeye uygunluk açısından kültür gereksiniminin sağlanması gerekmektedir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Alg yetiştirme sistemleri,

- karıştırma mekanizmasına,
- ışığın sağlanış biçimine,
- havalandırma sistemine,
- yapım malzemelerine,
- kültür ortamı ile olan ilişkisine göre farklı sınıflara ayrılabilmektedir.

Alg yetiştirme sistemleri genelde çevre ile olan ilişkilerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada, alglerin yetiştiği kültür ortamı dış etkilere açık ise "açık sistemler", kültür ortamının dış çevreyle ilişkisi tamamen kesilmiş ise "kapalı sistemler" olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu fiziksel ayrım istenen koşulların sağlanması için ortaya çıkan farklı tasarımlar sonucunda oluşmaktadır (Conk Dalay ve diğer., 2008).

2.5.1 Açık Sistemler

Açık sistemler, alg yetiştirme sistemleri içinde en basit ve temelde alglerin doğal yaşam ortamlarına benzer koşulların sağlandığı sistemlerdir. En büyük üstünlükleri çok basit işletime ve ucuz maliyete sahip olmalarıdır. Günümüzde büyük çaplı ticari alg üretimi yapan işletmelerin hemen hemen hepsi açık sistemleri kullanmaktadır.

Kapalı sistemlerin maliyetli olmaları, ölçek büyütmede hassas olmaları ve özellikle yapay ışıklandırmalı sistemlerde enerji maliyetinin fazla olması açık sistemlerin halen yaygın olarak kullanılmasının nedenlerindendir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Açık sistemlerin olumlu özelliklerinin yanısıra bazı olumsuz özellikleri de vardır. Bu sistemlerin önemli bir kısmı iklimsel olarak tüm yıl boyunca üretimin sağlanamayacağı bölgelerde kurulmuştur. Bu nedenle üretim verimi yıl içinde farklılıklar göstermekte ve üretimin yıl boyunca sürekli yapılamaması işletme giderlerinin karşılanmasında sorun çıkarmaktadır. Sistemlerin buharlaşma kayıpları, atmosfere CO_2 kayıpları, pislenme ve kirlilik olasılıkları diğer olumsuz özellikleridir. Ayrıca ışık kullanımının verimliliği için kültür ortamının derinliğinin çok fazla olmaması gerektiğinden açık sistemlerin kapladıkları alanlar büyüktür. Çok yüksek tuzlu, yüksek pH değerlerinde veya yüksek besin içerikli kültür ortamlarında yaşayan algler başarıyla açık sistemlerde yetiştirilmektedir. Ama her algin açık sistemlerde yetiştirilmesi ve verim alınması çok zordur. Günümüzde ilaç ve kozmetik sanayisindeki uygulamalarda önemi olan alg ürünlerinin belirli kalitede ve saflıkta olması gerekmekte olup, bu yüksek standartlar açık sistemlerdeki üretimlerde yakalanamamaktadır (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Ticari alg üretimi için kullanılan açık sistemler genellikle açık havuzlardan oluşmaktadır ve en yaygın kullanılan beş çeşidi bulunmaktadır. Bunlar; büyük açık havuzlar, karıştırma sistemli dairesel havuzlar, tanklar, kanallı havuzlar, kaskatlı havuzlar ve büyük torbalardır (Şekil 2.4) (Kunjapur ve Eldridge, 2010). Bu açık sistemlerden hangisinin yetiştirme için seçileceği algin özelliklerine, yerel iklime ve maliyete bağlıdır. Açık havuzların arazi maliyetleri ve hacimleri düşürülürken, alg üretimini artıracak şekilde sistem seçiminin yapılması, yetiştirmelerin ekonomik olması için şarttır. Açık sistemlerde alg kültürlerinden biyokütle veya biyolojik diğer maddelerin üretilmesi için yetiştirmenin açık havuzlarda yapılmaya başlanması, II. Dünya Savaşı sonrasında hız kazanmıştır (Conk Dalay ve diğer., 2008).



Şekil 2.4 Dairesel havuzlar, kanallı havuzlar ve büyük torbalar (Organic chlorella (green algae), 2007; Going green: biofuels from algae, 2009; Algae biotechnology, b.t).

2.5.2 Kapalı Sistemler

Kapalı sistemler, açık sistemler gibi yaygın olarak kullanılan diğer alg yetiştirme sistemidir. Bu sistemlerde, algin yetiştirildiği kültür ortamının dış ortamla ve atmosferle ilişkisi kesilmektedir. Bu sistemler özellikle gelişen sanayisel pazarların ihtiyaç duyduğu değerli algal ürünlerin yetiştirilmesinde kullanılmaktadır. Tam kontrollü bir kültür ortamı sağladıklarından, dış ortamdan gelebilecek pislenme ve kirliliğe, farklı organizmaların ortama karışma olasılığına karşı koruyucu bir kalkan sağlamaktadır. Ancak kapalı sistemler genelde çok özel üretimlerde kullanıldıkları için, ortam koşullarını en elverişli seviyede tutabilecek, tek çeşit alg kültürünün yetiştirilmesini sağlayacak esneklikte tasarlanmaktadırlar (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Alglerin yetiştirilmesi için kullanılan kapalı sistemler havanın durumuna veya yoğun tarım yöntemlerine bağlı değildir. Alglerin kapalı sistemlerde yetiştirilmelerinde, diğer enerji üretiminde kullanılan ürünler gibi ek tarımsal alanlara ihtiyaç duyulmaz. İçinde alg yetiştirilen kapalı sistemler “fotobiyoreaktör” olarak adlandırılmaktadırlar (Wurm, 2013). Fotobiyoreaktörler alg yetiştirilmesinin önemli yapı taşlarından biridir. Alglerin özelliklerine göre en iyi üretim ortamını sağlayarak, ekonomik kaliteyi ve verimi artırmaktadırlar. Günümüzde dünya çapında yapılan çalışmalarda farklı alg çeşitleri için farklı fotobiyoreaktör türleri kullanılmaktadır (Conk Dalay ve diğer., 2008). Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenler ve kullanılan fotobiyoreaktörler çeşitleri Bölüm Üç’de ayrıntılı olarak incelenmektedir.

BÖLÜM ÜÇ
FOTOBİYOREAKTÖRLERDE ALG ÜRETİMİNİ ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER VE FOTOBİYOREAKTÖR ÇEŞİTLERİ

Alglere büyüme ortamı oluşturulmasında kullanılan başlıca sistemler ya açık ya da kapalı kültür sistemleri olup, içinde alg yetiştirilen kapalı sistemler "fotobiyoreaktör" olarak adlandırılmaktadır (Ugwu ve diğer., 2008; Conk Dalay ve diğer., 2008). Alglerin gelişme durumları ve ortam koşulları fotobiyoreaktörlerde, açık sistemlere göre daha iyi kontrol edilebilmektedir. Ayrıca daha yüksek biyokütle üretimi elde edilmekte ve sistemdeki kirlilik daha kolay önlenebilmektedir (Ugwu ve diğer., 2008). Fotobiyoreaktörlerde şeffaf ve sızdırmaz çeşitli kaplar veya konteynerler kullanılmaktadır (Şekil 3.1) (Wurm, 2013).



Şekil 3.1 Plastik konteynerlerden fotobiyoreaktörler (Alg üretim sistemleri, 2013).

Fotobiyoreaktörler, alglerin biyoenerji üretimi için güneş enerjisinden verimli bir şekilde yararlanmalıdırlar. Bu sebeple fotobiyoreaktörlerin çoğu ışıklandırmaya, güneş ışığına maruz bırakılmış, geniş yüzeylere sahiptirler (Ugwu ve diğer., 2008). Fotobiyoreaktörler güneş ışığını yakalamak, ulaştırmak, yöneltmek ve alglerin yetiştirme alanı içine bu ışığı dağıtmakta kullanılmaktadırlar. Böylece her alge ulaşan ışık miktarını artırmaya çalışmaktadırlar. Fotobiyoreaktörün verimliliğine de ışığı yakalamasına, ulaştırmasına, dağıtmasına ve kullanmasına bakılarak karar verilmektedir (Zijffers, Janssen, Tramper ve Wijffels, 2008). Algleri barındıran bu kültür sistemleri güneş ışığı dışında, yapay ışıkla veya hem güneş hem yapay ışık birlikte kullanılarak aydınlatılabilmektedirler (Şekil 3.2) (Ugwu ve diğer., 2008).



Şekil 3.2 Güneş ışığı ve yapay ışık kullanan fotobiyoreaktörler (Greenhouse up and running, b.t; Spirulina yetiştiriciliği, 2013).

Fotobiyoreaktörler biyoenerji üretiminin verimli olarak gerçekleşmesini sağlayacak şekilde tasarlanmaktadırlar. Bunun için de etkili ışık kullanımı ve bunu sağlayacak yüzey-hacim oranı, yüksek yoğunluktaki alg kültürleriyle çalışma imkanı, yüksek alansal ve hacimsel üretim, dengeli, kaliteli ve sabit bir üretim sağlama, yüksek oranda CO_2 aktarımına izin verilmesi ve en az miktarda CO_2 kaybı, dış alanlarda kurulduğunda en üst seviyede güneş enerjisinden yararlanma ve biriken O_2'nin hızla uzaklaştırılmasını sağlama şartlarını gerçekleştirebilmelidirler (Conk Dalay ve diğer., 2008).

3.1 Fotobiyoreaktörlerde Alg Üretimini Etkileyen Değişkenler

Alg üretimi için uygun fotobiyoreaktör tasarımında öne çıkan değişkenler,

- ışıklandırma,
- kütle aktarımı/karıştırma,
- ölçeklendirme ve
- süreç yönetimi ve temizliktir.

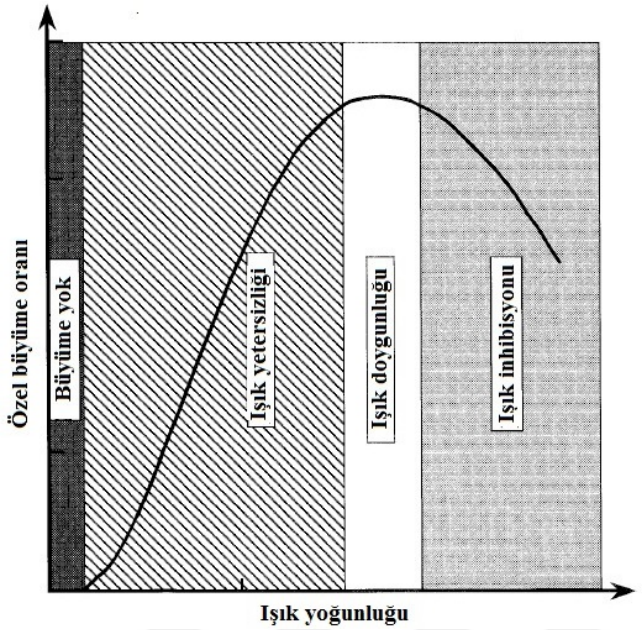
Fotobiyoreaktörlerin verimliliği çeşitli tasarım özellikleri bakımından sınırlandırılmaktadır. Reaktörler en önemli olarak iyi şekilde kullanılabilecek yüzey-hacim oranıyla ve eşit kütle aktarımıyla uygun ışıklandırma durumları altında

işletilmeye ihtiyaç duymaktadırlar (Tamburic, Zemichael, Crudge, Maitland ve Hellgardt, 2011).

3.1.1 Işıklandırma

Işık kültür ortamı içinde, alglerin büyümesi için gerekli ana enerji kaynaklarından biridir. Çünkü ışık algler tarafından besin gibi emilebilmektedir. Işık kaynağının yoğunluğu ve dalga boyu gibi özellikleri fotootrofik alglerin büyümesi için kesinlikle önemlidir. Bu durum, alglerin özel büyüme oranının ışık kaynağından büyük ölçüde etkilenebildiğini açıklamaktadır (Wang, Fu ve Liu, 2007). Işık yoğunluğu ve ışık dalga boyu düzeninin ikisi de ışığın seyreltilmesine, azaltılmasına, kültür ortamının her yerine karışmasına karar verilmesinde önemli etkenlerdir (Tamburic ve diğer., 2011).

Sabit durum koşullarında alglerin büyüme oranını etkileyen başlıca koşul ışık yoğunluğudur. Işık yoğunluğu güneşten gelen ışık, fotobiyoreaktörün yüzeyi ve reaktör geometrisine bağlıdır (Grima, Fernandez, Camacho ve Chisti, 1999). Işığın yokluğu kadar aşırı ışığın varlığının da alglerin büyümesini ters etkilediği belirlenmiştir. Aynı fotobiyoreaktör içinde eş zamanlı olarak tamamen karanlık bölge, ışığın yetersizliği, ışığın doygunluğu ve ışığın inhibisyonu (aşırı ışığın büyümeyi engellemesi) varolabilmektedir (Şekil 3.3). Işık yoğunluğu kritik seviyenin altına düştüğünde, kültür ortamındaki alglerin büyümesi son bulmakta ya da azalmaktadır. Fakat çok yüksek ışık yoğunluğu da, alglerin aşırı ışıktan dolayı büyümesini engellemektedir. Alglerin en uygun üretimi için, doygun ışık yoğunluğu eşit olarak bütün fotobiyoreaktör içine dağılmalıdır (Ogbonna ve Tanaka, 2000).



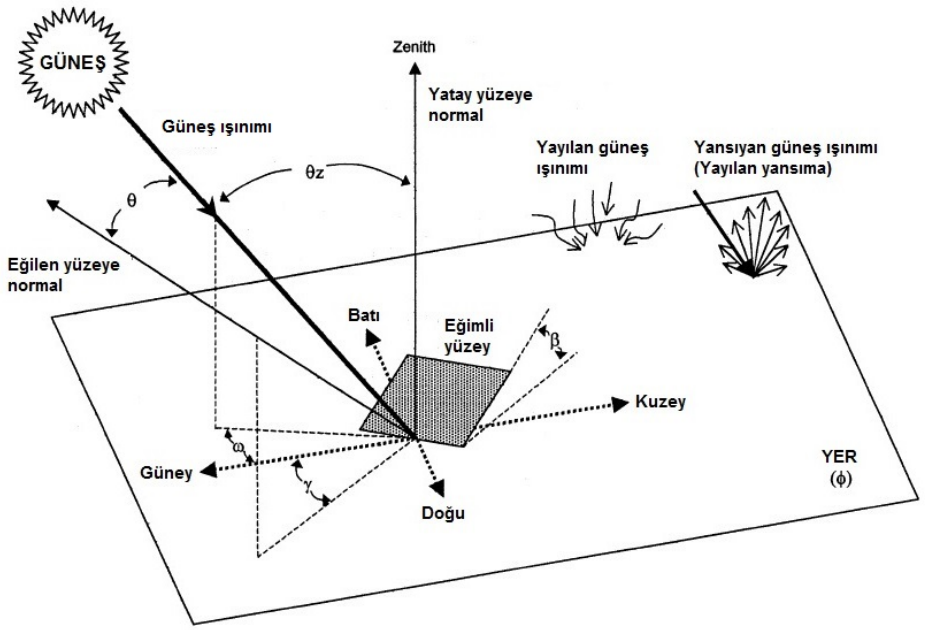
Şekil 3.3 Işık yoğunluğunun alglerin büyümesine etkisi (Ogbonna ve Tanaka, 2000).

Gelen ışınım seviyesi sabit olduğunda bile, algal kültür içindeki ışınım, konumun işlevine bağlı olarak değişmektedir. Fotobiyoreaktörün ışık alan yüzeyine daha yakın olan algler, reaktörün diğer bölgelerindeki alglerden daha yüksek ışınıma maruz kalmaktadırlar. Işık kaynağına daha yakın algler daha uzakta olanları gölgelemektedirler. Bundan dolayı, alglerin üretimi zamana ve konuma göre değişmektedir. Işınımın ortalama değeri kültür içindeki yerel ışınım değerlerinin hacim ortalaması olarak tanımlanabilmektedir. Ortalama ışınım kültür ortamı içinde bir tek algin rastgele hareketiyle maruz kaldığı ışık seviyesidir. Ortalama ışınım seviyesini tahmin etmek için kullanılan yöntemler fotobiyoreaktör içindeki akışkan hareketiyle ilişkili aydınlık karanlık etkilerini göz önüne almamaktadır. Aslında algler tarafından maruz kalınan ışık düzeni, yani toplam ışıklandırma ve algin hareketinden kaynaklanan aydınlık karanlık deneyimi, biyokütle üretimini etkilemektedir (Grima ve diğer., 1999).

Doğal ışık gün içinde değişim göstermektedir, hava, mevsim ve fotobiyoreaktörün bulunduğu coğrafya da bunu etkilemektedir. Reaktörler doğal ışığı kullandığında, gece güneş ışınımının olmaması önemli bir etkendir. Gece biyokütle kaybı, %25'e kadar ulaşabilmektedir. Bu durum gün içindeki ışık yoğunluğuna, sıcaklığına ve gece sıcaklığına bağlıdır (Kunjapur ve Eldridge, 2010). Genellikle aydınlık karanlık

döngüsü fotobiyoreaktörler için tasarlanırken genelde yayılım ve direkt ışınım verilerinin toplamını içeren küresel gerçek-gökyüzü ışınım verileri kullanılmaktadır (Cuaresma, Janssen, Vilchez ve Wijffels, 2011). Herhangi bir üç boyutlu fotobiyoreaktörde toplam gelen ışınım, doğrudan, yayılan ve yansıyan ışınımın toplamıdır (Grima ve diğer., 1999).

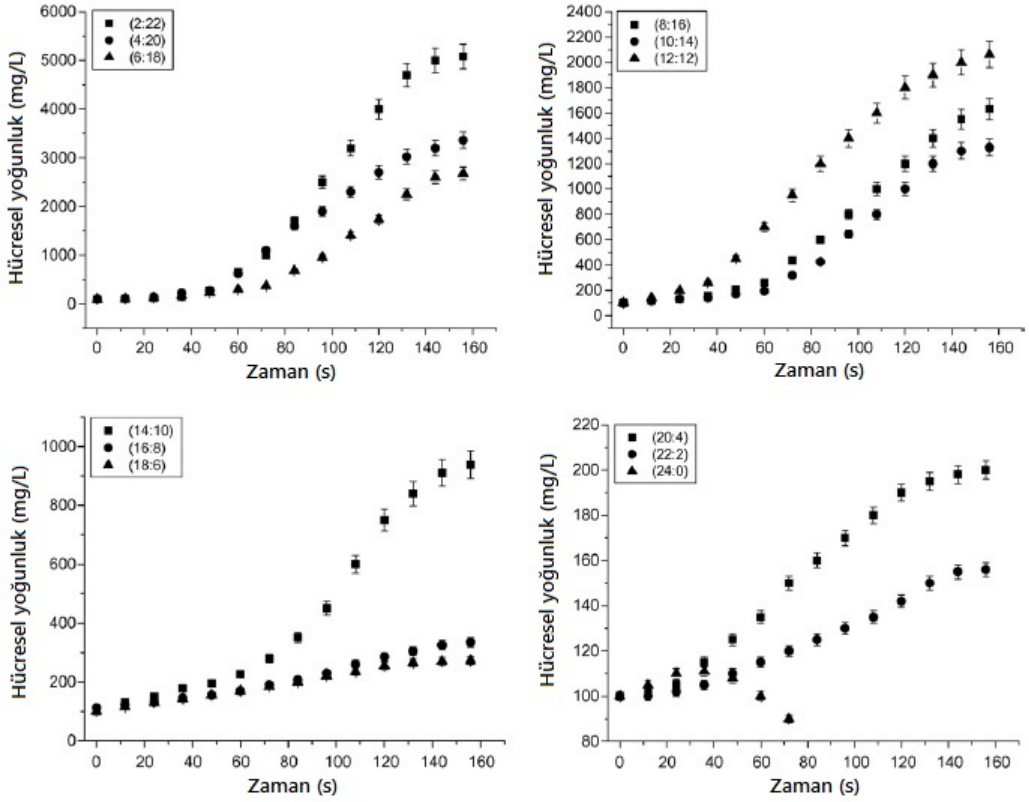
Bu verilerin hesabında fotobiyoreaktörlerin kurulacağı arazi, dünya üzerinde o arazinin güneş ışığını hangi açıyla aldığı, güneş ışınımının yoğun olduğu saat aralığı, hangi zamanlarda ve mevsimlerde gölgelenmeye maruz kaldığı, fotobiyoreaktörün yüzey eğimi; yani fotobiyoreaktör yüzeyiyle yataydaki açı ve yüzey azimut açısı; yani yerel boylamdan yüzeye normalin yatay düzlem üzerindeki izdüşüm sapma açısı gibi etkenler kullanılmaktadır (Şekil 3.4) (Akkerman, Janssen, Rocha ve Wijffels, 2002; Grima ve diğer., 1999). Ayrıca fotobiyoreaktör çeşidine bağlı olarak algler belli sabit zaman aralıklarında reaktörlerin aydınlanan yüzeylerinde ya da karanlık yüzeylerinde kalabilmektedirler. Düşük ışık yoğunluklarında, karıştırma etkisiyle oluşan mikrosaniyelik ya da milisaniyelik oranlardaki aydınlık karanlık döngüsü, fotosentez verimliliğini değiştirmektedir (Akkerman ve diğer., 2002).



Şekil 3.4 Fotobiyoreaktörün yüzey eğimi, yani fotobiyoreaktör yüzeyiyle yataydaki açı ve yüzey azimut açısı, yani yerel boylamdan yüzeye normalin yatay düzlem üzerindeki izdüşüm sapması açısı (Grima ve diğer., 1999).

Fotobiyoreaktör içindeki algal kültür aynı ışıksal özelliklerle iyi karıştırılmış olsa bile, kültürün derinliği sığ olsa bile her bir algin aldığı ışıklandırma asla aynı olmaz. Kültür içindeki herhangi bir noktadaki ışınım, kültürün yüzeyine gelen toplam ışınımın, kültürün ışıksal özelliklerinin ve yüzeyde bulunan noktanın uzaklığına bağlı matematiksel bir ifadedir. Güneşin konumunun değişmesiyle alınan yerel ışınım değişmektedir. Grima ve arkadaşlarının yatay ve dikey tübüler reaktörleri karşılaştırdığı bir örnekte, sabahları dikey reaktörlerin güneş gören tarafı diğer tarafından daha yüksek doğrusal yerel ışınım değerlerine sahiptir, ancak bu fark yatay reaktörlerde daha düşüktür. Öğlen ise yatay tüplerin aldığı ışınım kendi içinde daha farklı ancak dikey reaktörlerdeki ışınım dağılımı oldukça eşit olmaktadır başka bir deyişle, yerel ışınım değeri kutupsal koordinatlardaki açısal konuma bağlı değildir (Grima ve diğer., 1999).

Aydınlık karanlık döngüsü fotosentetik etkinlikte ve fotobiyoreaktörler içindeki alglerin büyüme oranlarında belirleyici bir etkendir. Doğada ışık kesintili biçimde bulunmaktadır, çünkü ışık gündüzden geceye değişmektedir. Jacob-Lopes ve arkadaşlarının farklı aydınlık karanlık döngülerinde alglerin fotobiyoreaktörlerde büyümesi üzerine yaptığı çalışmada, algler 24 saat içinde farklı zamanlarda ışık yoğunluklarına maruz bırakılmıştır. 2 saat karanlık, 22 saat aydınlık döngüsü (2:22) kurulduğunda devamlı ışık enerjisinin sağlandığı zamanla benzer büyüme eğrileri göstermişlerdir (Şekil 3.5). Döngünün aydınlık saatinin azaltılması, üretilen alg yoğunluğunda da paralel azalmaya neden olmaktadır. Bu bilgiye ters tek bulgu 12 saat karanlık, 12 saat aydınlık (12:12) ışık döngüsü için elde edilmiştir ve bu bulgu algal kültürün önceden uyum sağlamasının önemini göstermektedir (Jacob-Lopes, Scoparo, Lacerda ve Franco, 2009).

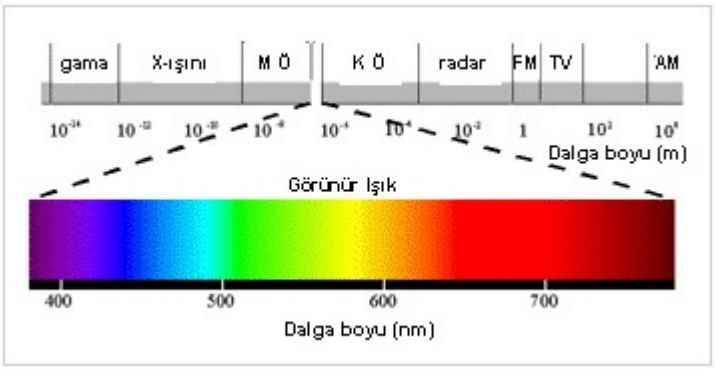


Şekil 3.5 Alglerin aydınlık karanlık döngüsüne göre büyüme eğrileri (Jacob-Lopes ve diğer., 2009).

Işığın dalga boyunun farklı renklerini göz önüne aldığımızda, doğal ışıkla aydınlatılan reaktör sistemleri, ışık parlaklığı dalga boyunun seçildiği yapay ışıkla aydınlatılan reaktör sistemlerinden daha fazla çaba gerektirmektedirler. Doğal ışıktan güneş ışınımının %50'den fazlası fotosentez için kullanılamamaktadır (Kunjapur ve Eldridge, 2010).

Yüksek ışık yoğunlukları, alg yetiştirirken daha fazla biyokütle üretimini sağlayabilmektedir. Kapalı ortamlarda çeşitli LED lambalar farklı dalga boylarında ve ışık yoğunluğunda alglerin yetiştirilmelerini etkilemektedir (Wang ve diğer., 2007). Dalga boylarına göre ışığın spektrumda aldığı renk değişmektedir (Şekil 3.6). Türk Dil Kurumu, Bilim ve Sanat Terimleri Sözlüğü'nün Kimya Terimleri Sözlüğü'ne göre, beyaz ışığın yaydığı ışınların bir prizmadan geçirilmesi ile elde edilen bütün renk ve dalga boylarını içeren çizgiler spektrum olarak tanımlanmaktadır (Spektrum, TDK, 2007). Floresan lambalarla ve ampüllerle karşılaştırıldığında, dar bantlı dalga boyu ve düşük enerji tüketimine sahip yeni

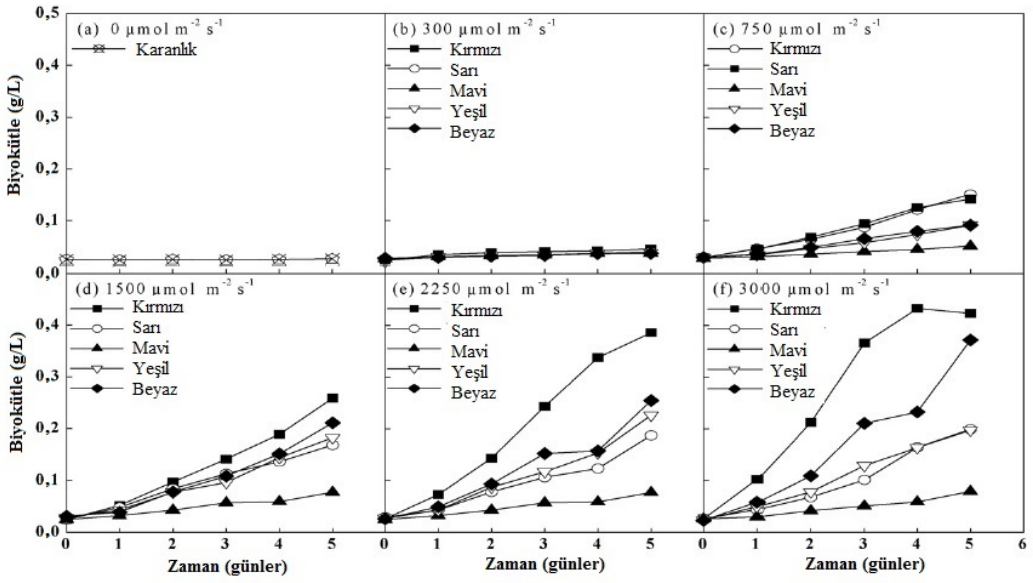
geliştirilen LED lambalar alglerin yetiştirilmesi ve ışığın dalga boyunun etkilerinin çalışılması için en uygun ışık kaynağı olarak düşünülmektedir (Wang ve diğer., 2007).



Şekil 3.6 Dalga boylarına göre ışığın spektrumda aldığı renkler (Uzaktan algılama, b.t).

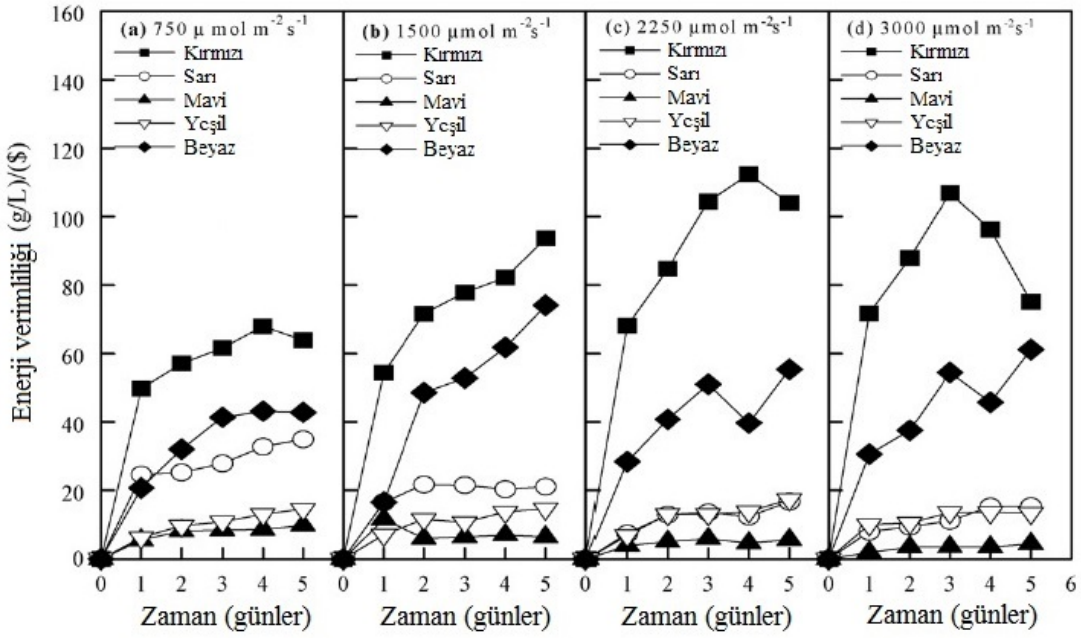
LED lambalar yaydıkları ışık spektrum rengine göre beş çeşide ayrılmaktadırlar. Bunlar beyaz, kırmızı, sarı, yeşil ve mavi ışık renkleridir ve yetiştirilecek alg türüne göre seçilmektedir. Wang ve arkadaşları alg türü olan *Spirulina Platensis*'in LED lambaların farklı ışık spektrumları ve ışık şiddetleri altında yetiştirilmesi üzerine çalışma yapmıştır. Kırmızı LED lambalarla, en yüksek biyokütle üretimiyle sonuçlanan, algal fotosentez için en verimli emilimi sağladığı düşünülmektedir. Yeşil pigment olan klorofilleri sayesinde kırmızı ışığı emen alg türleri için bu mantıklı görünmekle beraber, bu alglerde diğer spektrum renklerindeki LED lambaların ışığı sadece kısmen emilerek fotosentez için kullanılabilmektedir. Sarı LED lambaların emilim spektrum bandı kırmızı ışıklı LED lambalarla geniş bir örtüşmeye sahiptir. Bu arada yeşil ışık spektrum bantlı LED lambalar, kırmızı ışıklı LED lambalarla son derece düşük olarak örtüşmektedir. Bu nedenle, alglerin yetiştirilme oranı sarı LED lambalarda yeşil LED lambalardan daha fazladır. Bunun aksine, kırmızı LED lambaların emilim spektrum bandıyla hiç örtüşmeyen, mavi ışıklı LED lambalar, alglerin yetiştirilmesinde, düşük bir verimlilik göstermektedirler. Fotosentez sırasında, mavi ışıklı LED lambaların düşük başarıya sahip olmasının nedeni, alglerin klorofil emilim bandının bu ışık dalgaboyu içinde mevcut olmamasıdır. Bunun dışında, beyaz ışıklı LED lambalar ortalama bir biyokütle üretim miktarını göstermektedir. Bu durum, beyaz ışığın kırmızı ışık ve diğer yetiştirmede verimsiz

ışık spektrum renklerinin birleşiminden oluşmasıyla açıklanabilmektedir. Beyaz ışık muhtemelen biyokütle üretiminde bütün ışık spektrumlarının karıştırıldığı bir etki uygulamaktadır (Wang ve diğer., 2007). Bu sonuçlar Şekil 3.7'de açıkça algılanmaktadır. Işık şiddeti arttıkça, kırmızı ışık altında biyokütle üretimi artış göstermekte, beyaz ışık altında da ortalama verim olmakta, mavi ve yeşil ışıklar en az verimi göstermektedir.



Şekil 3.7 Işığın spektrumda aldığı renklere göre alglerin fotosentez verimliliği (Wang ve diğer., 2007).

Wang ve arkadaşları aynı çalışmada, biyokütleye etki eden farklı renkteki LED lambaların enerjisinin ekonomik verimliliğini de araştırmışlardır. Işık yoğunluğu ve LED çeşitlerinin tükettiği enerji arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Kırmızı ve beyaz LED lambalar aynı yoğunlukta ışık yayarken, en az enerjiyi tüketmektedirler. Yeşil LED lambalar diğer LED lambalarla karşılaştırıldığında aynı ışık yoğunluğunu yaymak için, en fazla enerjiyi harcamaktadırlar. Daha yüksek ışık yoğunluğunda, beyaz LED lambalar kırmızı LED lambalardan daha fazla enerji tüketmektedirler. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere, kırmızı LED lambalar, diğer LED lambalarla karşılaştırıldığında, bütün ışık yoğunluğu durumlarında, enerji tüketimindeki ekonomik verimlilik açısından en yüksek verimliliği vermektedir (Wang ve diğer., 2007). Kırmızı ışıklı LED lambalar enerji tüketiminde, fiyat performans verimliliği açısından en kullanışlı olmaktadır.



Şekil 3.8 Işık yoğunluğu ve LED lambaların enerji tüketimine göre enerji verimliliği (Wang ve diğer., 2007).

Kapalı ortamlarda fotosentezi verimli olarak yürütmek için, ışık sağlayıcı olarak dar bantlı kırmızı LED lambaların kullanımı, floresan lambalar veya ampüllerle karşılaştırıldığında, daha ekonomik olmaktadır. Bunun yanında daha uzun kullanım süreci ve daha az enerji tüketimi nedeniyle LED lambalar, algal kültürlerin yetiştirilmesinde diğer lambalara göre daha çok tercih edilmektedir (Wang ve diğer., 2007).

3.1.2 Kütle Aktarımı/Karıştırma

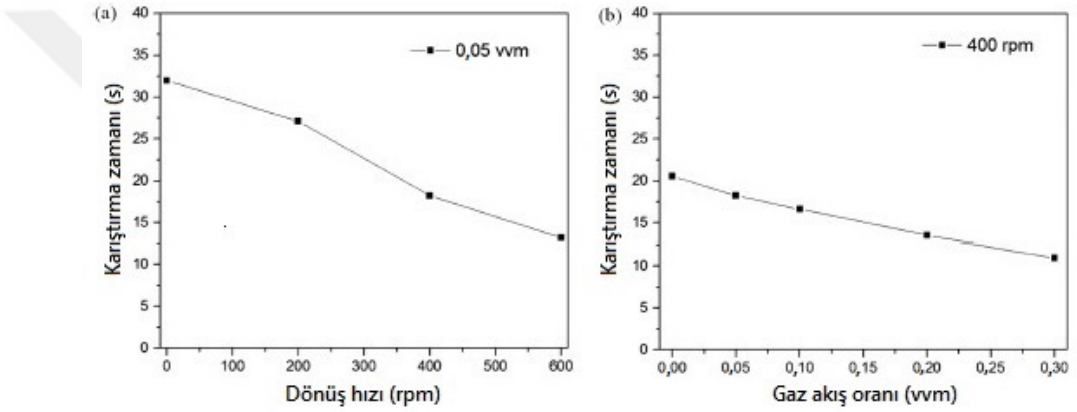
Alglerin fotobiyoreaktör içinde oluşan aydınlık ve karanlık bölgeler arasındaki hareketi karıştırma ile sağlamaktadır. Alglerin üzerine düşen ışık miktarını artırmakta ve geniş alan uygulamalarında üretimi çoğaltmaktadır (Guo, Yao ve Huang, 2015). Yüksek üretimi başarmak için, ışığın verimli kullanımında eşit ışık düzenini sağlamasının yanında, akışkan dinamiği ve kütle aktarımı, kültürün gerekliliklerini tatmin etmelidir. Fotobiyoreaktör içine ışık dağılımı ve yayılımı gibi diğer önemli etkenler, hidrodinamik ve kütle aktarımıdır. Bu ikisi tasarımda birbiriyle yakından ilgilidir, ayrıca tasarımı zorlaştırmaktadır (Guo ve diğer., 2015).

Havalandırma oranı alglerin büyümesini geliştirmek için anahtar bir değişkendir. Havalandırma sayesinde kütle aktarımını artırmak, CO_2 yetersizliğini önlemek, çözünmüş oksijenin zehirleyici seviyesini ve engelleyici CO_2 seviyesini kontrol etmek, kültür suyundaki besin dağılımını dengelemek, alg çökelmesini, ölü bölgelerin ortaya çıkmasını, alg kümelenmesini, reaktör içindeki alglerin bozulmasını engellemek ve fotosentezi artırabilen en uygun aydınlık karanlık döngüsünü yaratmak için kültüre gaz sağlanmaktadır. Ama aşırı havalandırma alglere zarar verebilmekte, mekanik kesme kuvvetine hassas alg türlerinde, kültürün performansını etkilemektedir. Dahası, yüksek havalandırma oranı, biyokütle yetiştirilmesi için tavsiye edilmeyen yüksek işletme maliyetine neden olmaktadır. O halde, düşük maliyetli uygulamalarda alglerin yetiştirilmesi için yukarıda belirtilen etkenlerin denetlenmesi gerekmektedir (Guo ve diğer., 2015).

Fotobiyoreaktörün akıllıca tasarlanması ve uygulanması için akışkan dinamiği ve kütle aktarımı konusunda derin bir bilgiye ihtiyaç duyulması, gaz tutuş kesri, sıvı dolaşım hızı, karıştırma ve gaz-sıvı kütle aktarımı boyunca etkileşimi anlamak için gerekmektedir. Yüksek sıvı dolaşım hızını ve ortamdaki CO_2'in tükenmesini önlemeyi yüzeysel gaz hızı belirlemektedir. Buna ek olarak, üst boşluk reaktördeki hidrodinamiği ve kesme kuvvetini kontrol etmek için, özellikle yüzeysel gaz hızı düşük olan reaktörler için, az araştırılmış bir konudur. Sıvı dolaşım hızı, karıştırma derecesini, reaktörün eşit dağılımını ve gaz tutuş kesrini etkilemektedir. (Guo ve diğer., 2015).

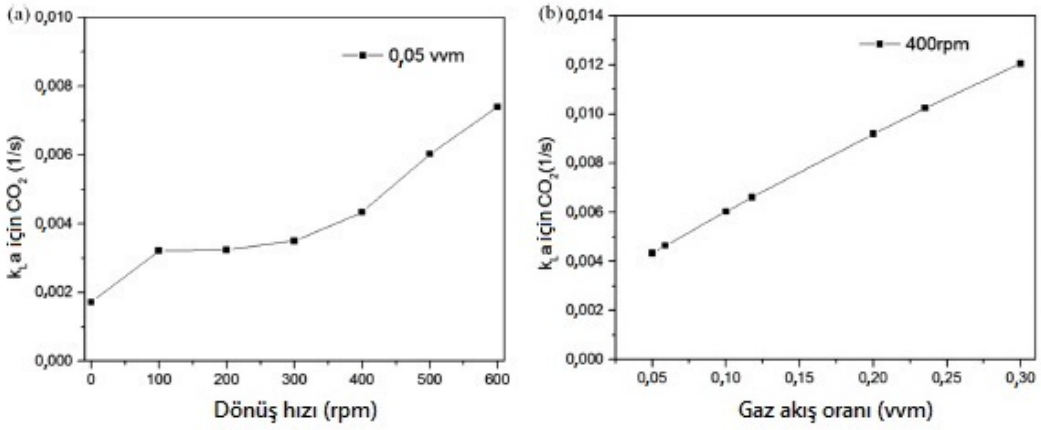
Sıvı haldeki CO_2 seviyesi, en uygun alg büyümesi için, algin beslenmesinde gerekli en az seviyeden fazla, ancak büyümeyi engelleyecek aşırı CO_2 seviyesinin de altında tutulmak zorundadır. CO_2'in pH üzerindeki etkisi güçlüdür, bu nedenle en uygun CO_2 düzeyi alg türüne bağlıdır. Bu arada, O_2 birikmesi de ciddi bir meseledir ve O_2 miktarı algleri zehirleyici seviyenin altında tutulmalıdır. Aşırı oksijenden kurtulmak için, kütle aktarımının kapasitesi O_2'i uzaklaştırmak için yeterince artırılmış olmalıdır. Çözünmüş CO_2 yoğunluğu, gaz akış oranı ve gaz içindeki CO_2'in parçalı basıncı ayarlanarak kontrol edilebilmektedir (Guo ve diğer., 2015).

Gao ve arkadaşları karıştırma, gaz-sıvı kütle aktarımı ve algal biyokütle büyümesi üzerine çalışarak, karıştırma ve kütle aktarımı için zaman ölçeğinin niteliğine karar vermek istemişlerdir (Gao, Kong ve Vigil, 2015). Karıştırma zamanı bir maddenin eklenmesinden sonra ortamda eşit dağılıma ulaşması için gereken zamandır (Guo ve diğer., 2015). Gao ve arkadaşlarının yaptığı deneylerde farklı dönüş hızları ve gaz akış oranları için karıştırma zamanı ölçülmüştür. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, sıvı karıştırma zamanının yaklaşık 10-30 saniye arasında olduğu durumlar için, dönüş hızının artması da gaz akış oranının artması da karıştırma zamanını azaltan etkenlerdir (Gao ve diğer., 2015).



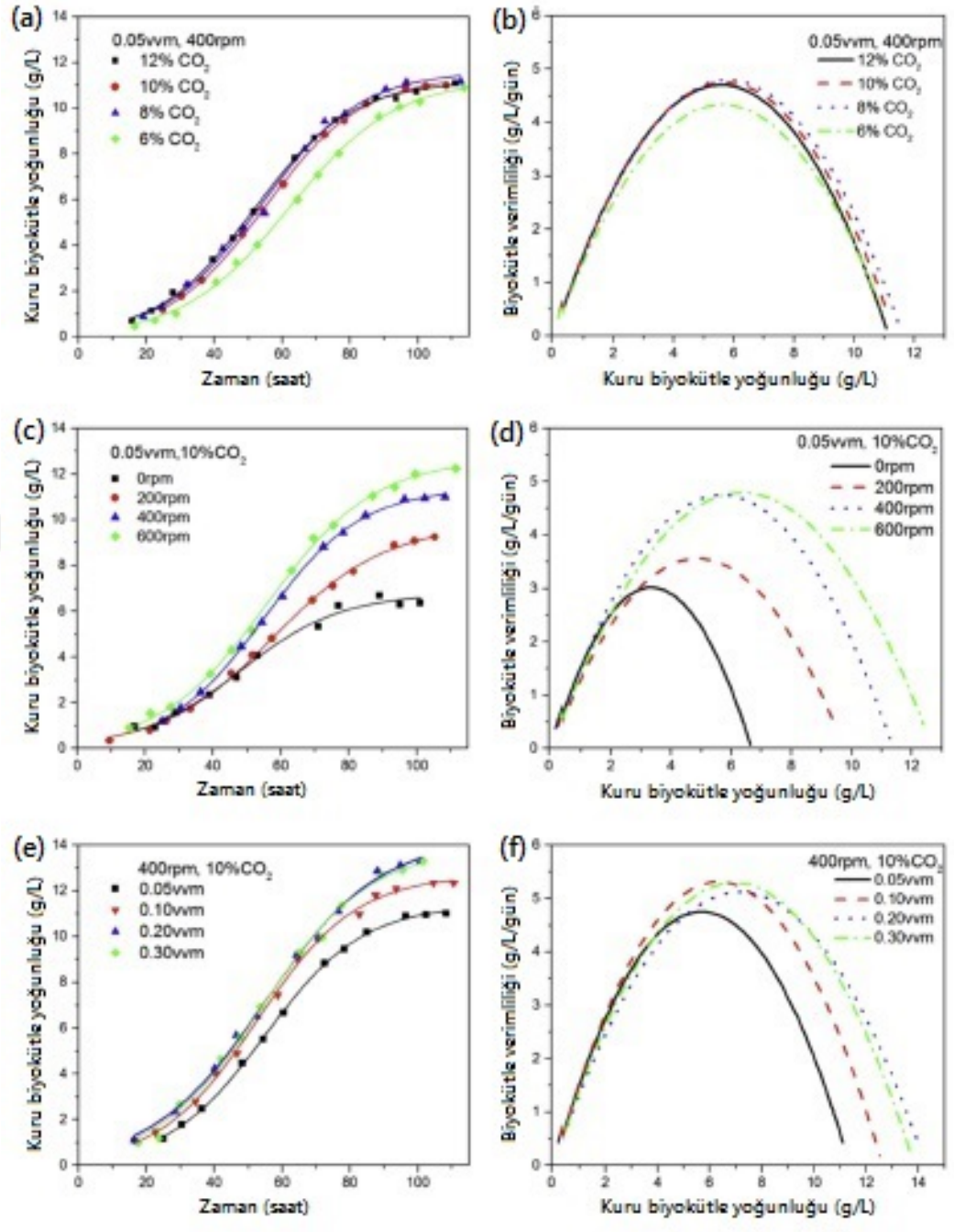
Şekil 3.9 Dönüş hızının ve gaz akış oranının artmasının karıştırma zamanına etkisi (Gao ve diğer., 2015).

En uygun alg büyümesini sağlamada önemli değişkenlerden biri hacimsel kütle aktarım katsayısıdır (k_La). Özellikle CO_2'in fotobiyoreaktör içinde tutulması için bu değişkenin yüksek olması gerekmektedir (Guo ve diğer., 2015). Gao ve arkadaşlarının çalışmasında, hacimsel kütle aktarım katsayısı, farklı dönüş hızları ve gaz akış oranlarında ölçülmüştür. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, CO_2'in hacimsel kütle aktarım katsayısı dönüş hızıyla beraber artmakla birlikte, aralarında daha karmaşık bir ilişki vardır. Ancak CO_2'in hacimsel kütle aktarım katsayısı gaz akış oranıyla doğru orantılıdır. (Gao ve diğer., 2015).



Şekil 3.10 Dönüş hızının ve gaz akış oranının artmasının CO_2'in hacimsel kütle aktarım katsayısına (k_La) etkisi (Gao ve diğer., 2015).

Bu çalışmada bir de dönüş hızına, gaz akış oranına ve gaz birleşimine göre biyokütle büyüme eğrilerinin değişimi ölçülmüştür. Şekil 3.11(a) ve (b)'de gaz birleşiminde CO_2 yoğunluğunun etkisi gözlemlenmiştir. Burada CO_2 yoğunluğu %6'dan fazla olduğunda, biyokütle büyüme oranına etki etmemiştir. Şekil 3.11(c) ve (d)'de dönüş hızının, sabit gaz akış oranı (0,05 vvm) ve CO_2 birleşimi (%10 CO_2) koşullarında biyokütle büyüme oranına etkilerine bakılmıştır. Dönüş hızının artması, gaz-sıvı kütle aktarımı katsayısında artışa neden olmakla beraber, çalışılan dönüş hızlarından hiçbiri, CO_2 tedariği veya kütle aktarımını olumsuz etkileyecek hızlar değildir. O halde, dönüş hızı büyüme oranı arasındaki bağıntı ancak diğer bazı etkenlere atfedilebilir, yani büyüme ortamı hidrodinamiğine duyarlıdır. Şekil 3.11(e) ve (f)'de sabit dönüş hızı (400 rpm) ve besin gaz birleşiminde (%10 CO_2), gaz hacimsel akış oranının biyokütle büyüme oranı üzerine etkileri incelenmiştir. Gaz akış oranı 0,05 vvm'den 0,2 vvm'ye arttığında, biyokütle büyüme oranı da iyileşmiştir. Ama, daha fazla akış oranlarında, biyokütle büyümesi etkilenmemiştir (Gao ve diğer., 2015).



Şekil 3.11 Dönüş hızına, gaz akış oranına ve gaz birleşimine göre biyokütle büyüme eğrilerinin değişimi (Gao ve diğer., 2015).

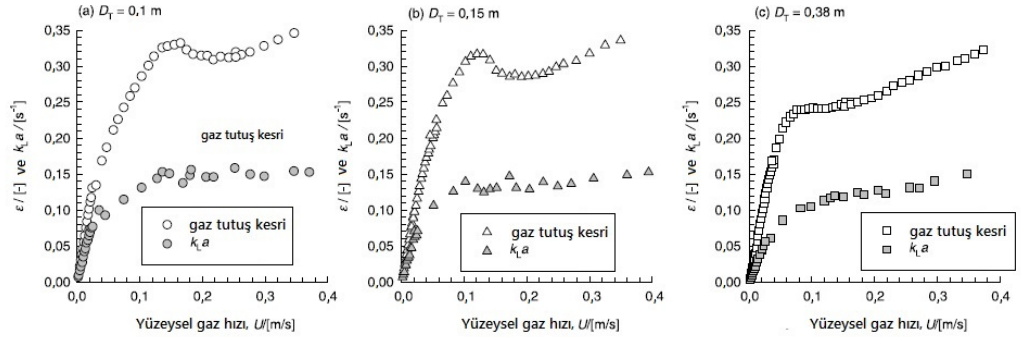
3.1.3 Ölçeklendirme

Fotobiyoreaktörün geometrisinin uygulanabilmesi ve ölçeklendirilmesi, laboratuvarda tasarlanan küçük ölçekli sistemlerin başarılı olup, büyümeye cevap vermesiyle, büyük ölçekli sistemler için bir çekirdek örnek sunmasıyla mümkün

olmaktadır (Quinn, Turner ve Bradley, 2012). Laboratuvarlarda küçük ölçekli tasarımlar gerçekleştirilmektedir. Bu tasarımlar yapılırken aslında daha büyük alanlarda benzer uygulamaların yapılabilmesi hedeflenmektedir. Bu farklı ölçekler arasında aynı verime ulaşabilme sorunu ölçeklendirme olarak adlandırılmaktadır. Farklı fotobiyoreaktör çeşitlerinde ölçeklendirme ile değiştirilebilecek değişkenler farklılık göstermektedir. Örneğin düz panel fotobiyoreaktörlerde ölçeklendirme iki boyutlu olarak yüzey alanına, yani genişliğe ve derinliğe göre değişirken; tübüler ve dikey kolon fotobiyoreaktörlerde çapa ve yüksekliğe ya da uzunluğa bağlı olarak değişmektedir. Genellikle boyut büyüdükçe ışıklandırma, kütle aktarımı, karıştırma, havalandırma gibi diğer değişkenlerin denetlenmesi fotobiyoreaktörlerde zorlaşmakta, bu da beraberinde mekanik sistem, bakım, temizleme, işletim maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Verimli bir fotobiyoreaktör tasarlamada ölçeklendirme sorununu çözümlemek için aydınlık karanlık döngüsü sıklığı, gaz tutuş kesri, hacimsel kütle aktarım katsayısı (k_La), yüzeysel gaz hızı gibi değerler ölçüt olarak kullanılmaktadır (Vandu ve Krishna, 2004).

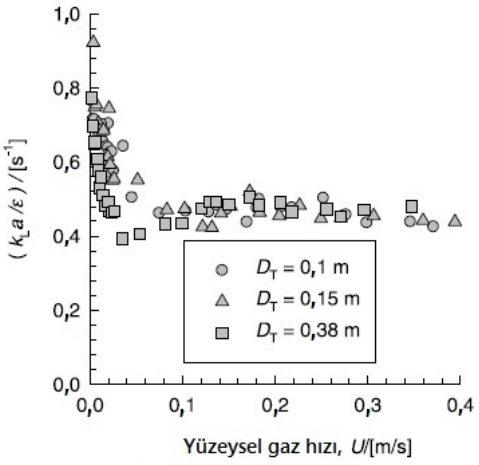
Dikey kolon fotobiyoreaktörlerde başarılı bir ölçeklendirme için kolon çapının işlevi kadar hidrodinamik ve kütle aktarım performansını hesaplayabilmek de gereklidir. Kolon çapının hacimsel kütle aktarım katsayısının değerine de etkisi vardır. Ticari ölçekli reaktörler için bu katsayı üzerinden ölçeklendirme yöntemleri önerilmektedir (Vandu ve Krishna, 2004).

Gaz tutuş kesri reaktörün hacminin gaz tarafından tutulan kısmı olarak tanımlanmaktadır (Ugwu ve diğer., 2008). Vandu ve Krishna'nın yaptığı araştırmada, gaz tutuş kesri, hacimsel kütle aktarım katsayısı, çapları 0,1 metre (m), 0,15 m ve 0,38 m olan üç farklı çaptaki kabarcık kolon fotobiyoreaktörler için değişen yüzeysel gaz hızlarında ölçülmüştür. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi, artan kolon çapıyla beraber gaz tutuş kesrinde az miktarda azalış gözlenmiştir. Bu etki artan ölçekle birlikte artan sıvı geri dönüşünden dolayı ortaya çıkmıştır. Hacimsel küle aktarım katsayısı da gaz tutuş kesriyle aynı eğilimi göstermiştir (Vandu ve Krishna, 2004).



Şekil 3.12 Gaz tutuş kesri ve hacimsel kütle aktarım katsayısının (k_La) değişen yüzeysel gaz hızlarında farklı kolon çaplarında değişimi (Vandu ve Krishna, 2004).

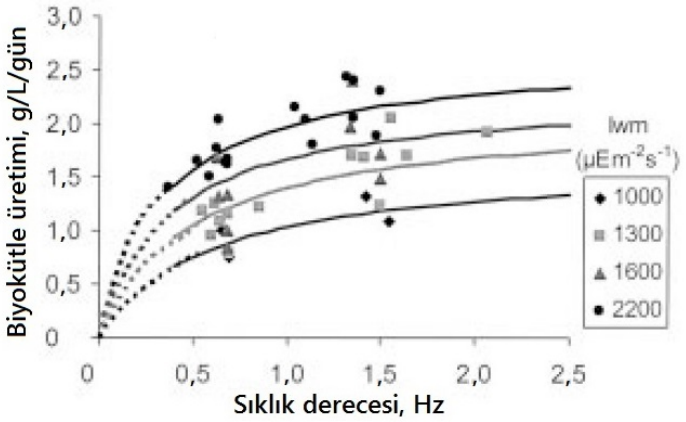
Aynı çalışmada hacimsel kütle aktarım katsayısının gaz tutuş kesrine oranına, üç farklı kolon çapı için yüzeysel gaz hızı işlev alınarak bakılmıştır. Farklı kolon çaplarında hacimsel kütle aktarım katsayısının gaz tutuş kesrine oranının, bütün yüzeysel gaz hızı değerleri için önemli bir bağlantısı yoktur. Şekil 3.13'e göre yüzeysel gaz hızı 0,08 m/s'nin altında olduğunda, hacimsel kütle aktarım katsayısının gaz tutuş kesrine oranının değeri, üç kolon çapı için de 0,8 s^{-1}'den 0,5 s^{-1}'e düşmüştür. Yüzeysel gaz hızı, 0,08 m/s'den büyük olduğunda ise, hacimsel kütle aktarım katsayısının gaz tutuş kesrine oranı, yüzeysel gaz hızından ve kolon çapından bağımsız olmuştur. Bu değişkenin değeri genelde 0,48 s^{-1} civarında oluşmuştur. Bu oranın sabitliği, verimli kabarcık kolon fotobiyoreaktörlerin çapının yüzeysel gaz hızından bağımsız olduğunu göstermiştir (Vandu ve Krishna, 2004).



Şekil 3.13 Hacimsel kütle aktarım katsayısının (k_La) gaz tutuş kesrine oranının değişen yüzeysel gaz hızlarında farklı kolon çaplarında değişimi (Vandu ve Krishna, 2004).

Tübüler fotobiyoreaktörlerde ölçek büyüdüğünde aydınlık karanlık döngüsünün sıklığı değişmeden kalmaktadır. Bu değişmeyen döngü sıklığı hidrodinamiğe ve reaktörün geometrisine ilişkin etkenlerden meydana gelmektedir. Grima ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada tübüler fotobiyoreaktörlerde, dört ana değişken tüp çapı, kültürün akış hızı, kültür tarafından alınan ışık yoğunluğu ve seyreltilme oranıdır, farklı çaplardaki reaktörlerde sabit tutulan aydınlık karanlık döngüsünün sıklığı ölçüt alınmıştır. Burada aydınlık karanlık döngü sıklığındaki günlük ortalama ışınımın etkisi önemli değildir (Grima, Fernandez, Camacho, Rubio ve Chisti, 2000).

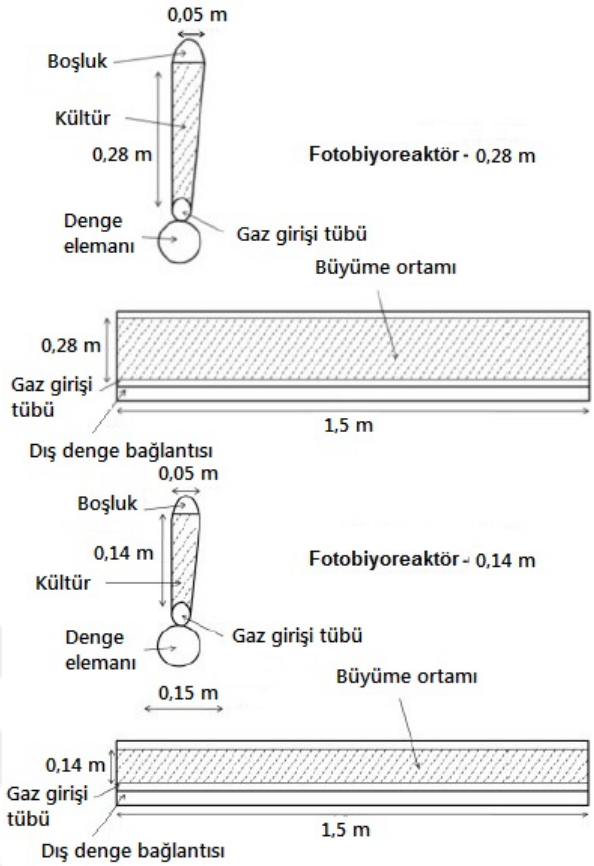
Yaptıkları çalışmada dış çapları 0,06 m ve 0,03 m olan tübüler reaktörler kullanılmıştır. Bu reaktörlerin hacimleri ise 0,22 metreküp (m^3) ve 0,05 m^3'tür. Kültür akış hızı 0,23 m/s'den 0,50 m/s değeri aralığındadır. Şekil 3.14'te biyokütle üretimi verilmekte ve aydınlık karanlık döngü sıklığını işlev olarak almaktadır. Her ne kadar veri biraz dağınıksa da esas biyokütle üretimi sadece aydınlık karanlık döngü sıklığı 1 Hz ve üzerindeyken olmuştur. Şekil 3.14'teki bu dağılım, döngü sıklığına ek olarak, günlük ortalama ışınımın bu davranışı etkilediğini göstermektedir. Üretim verilerindeki değişkenlerin çözümlenmesi, biyokütle üretiminin ana olarak aydınlık karanlık döngü sıklığına ve günlük ortalama ışınıma bağlı olduğunu göstermiştir. Diğer değişkenler üretimi doğrudan etkilememiş, aydınlık karanlık döngü sıklığı üzerinde etki yapmıştır. Bu nedenle, üretimde dolaylı bir etkiye sahiptir. Ama biyokütle üretimi artan günlük ortalama ışınım değeriyle doğrusal olarak artmıştır (Grima, Fernandez, Camacho, Rubio ve diğer., 2000).



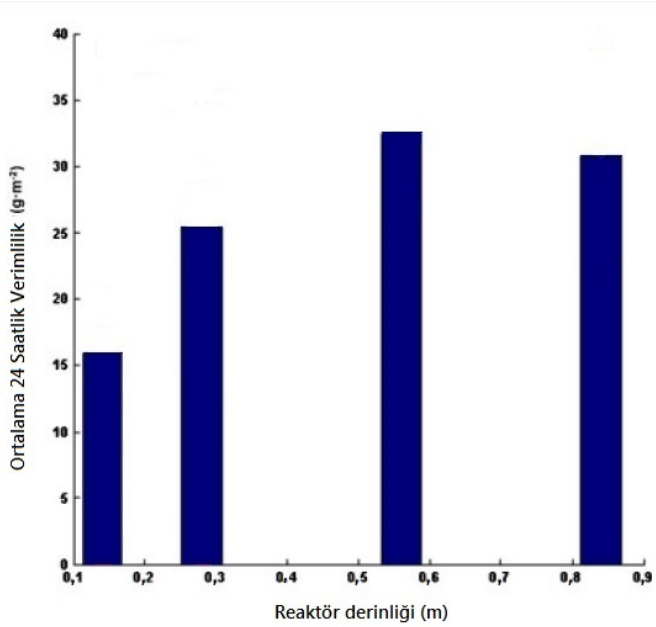
Şekil 3.14 42 deneyin ortalama ışınım dizilerine göre, biyokütle üretimi ve aydınlık karanlık döngü sıklığı (Grima, Fernandez, Camacho, Rubio ve diğer., 2000).

Aydınlık karanlık döngü sıklığı fotobiyoreaktörün ölçeklendirmesini etkileyen en önemli değişkendir. Eşik sınırının altındaki artışlar üretimi etkilememektedir. Eğer küçük ölçekli bir fotobiyoreaktörde döngü sıklığı 1-1,5 Hz aralığından daha büyük olursa, ölçeklendirmedeki kültür akış hızı, en fazla mümkün üretimi sağlayacak, tanımlanan eşik hızına ulaşmak için yeterli artışa ihtiyaç duyacaktır. Artan kültür akış hızı, daha büyük döngü sıklığı değerlerini elde etmek için faydalı değildir ve kesme kuvvetinin etkisinden dolayı zararlı olabilmektedir (Grima, Fernandez, Camacho, Rubio ve diğer., 2000).

Quinn ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, öncelikle küçük ölçekli bir fotobiyoreaktör sistemi tasarlanmış, buna çeşitli ışık yoğunlukları uygulanmış ve toplanan veriler, büyük ölçekli düz panel fotobiyoreaktör modelini inşa etmek için kullanılmıştır. Büyük ölçekli fotobiyoreaktör sistemi için 0,14 m derinliğinde, 7 lt kültür hacminde ve iki katı hacme sahip 0,28 m derinliğinde, 14 lt kültür hacminde reaktörler tasarlanmıştır (Şekil 3.15). Ayrıca ışığın nitelendirmesinden en uygun fotobiyoreaktör derinliğini hesaplamak için, reaktörün yüzeyindeki ışık yoğunluğunu ölçmek amacıyla 0,56 m ve 0,84 m derinliğinde iki reaktör daha inşa edilmiştir. 0,14 m'den 0,28 m'ye artan fotobiyoreaktör derinliği ve hacmi, alansal üretimde günde m^2 başına gram olarak %66'lık bir artış sağlamıştır. Derinlik 0,28 m'den 0,56 m'ye arttığında, üretimde %6'lık artış görülmüştür. Bu süreç değerlendirilirken, suyu kültürden uzaklaştırmak için gereken enerji, santifrüjleme temelli olup hacimle aynı oranda artmaktadır. Böylece fotobiyoreaktör geometrisinin kullanışlı hale getirilmesinde alansal üretimi ön planda tutmanın yanında bütünleşik bir sistem yaklaşımının gereksinimi görülmektedir. Çalışmanın sonucunda en uygun fotobiyoreaktör 0,56 m derinliğiyle günde m^2 başına 33,0 ± 9,80 gram üretime karşılık gelmiştir (Şekil 3.16). Bu tasarımda ışığın fotobiyoreaktör yüzeyi üzerinde tekrar dağılımı düşünülmemiştir (Quinn ve diğer., 2012).



Şekil 3.15 0,14 m derinliğinde, 7 lt kültür hacminde ve iki katı hacme sahip 0,28 m derinliğinde, 14 lt kültür hacminde fotobiyoreaktörler (Quinn ve diğer., 2012).



Şekil 3.16 Reaktör derinliğine göre üretim verimliliğinin değişimi (Quinn ve diğer., 2012).

3.1.4 Süreç Yönetimi ve Temizlik

Fotobiyoreaktörlerde alg yetiştirilmesi ışıklandırma, besin tedariği, hidrodinamik ve gaz-sıvı kütle aktarımı gibi çok yönlü değişkenleri içeren karmaşık bir süreçten oluşmaktadır. Ürün niteliğini belli bir ölçüde tutarak, üretimden en uygun şekilde yararlanmak için, ana yetiştirme değişkenlerinin devamlı denetlenmesi gerekmektedir. Bunu gerçekleştirebilmek için devamlı üretim en iyi tercih olarak gösterilmektedir. Son yenilikler ve olası gelecek eğilimleri, alglerin fotobiyoreaktörlerde üretimini teknolojik ve süreçsel gelişmeleri açısından incelemektedir. Bu incelemeler ise maliyet verimliliğini, ürün niteliğini, çalışma yöntemini ve üretilecek miktarı doğrudan etkilemektedir. Fotobiyoreaktörlerde çeşitli uygulamalar, teknikler, donanımlar, matematiksel modellemeler, uygulanabilme olanakları ve ekonomiklik araştırılmaktadır (Fernandes, Mota, Teixeira, Vicente, 2015).

Daha yüksek hacimsel üretimler, sabit üretim niteliği, mekan gerekliliğini azaltması, iş gücü maliyetini düşürmesi, daha az yatırım ve işletme maliyeti ve temizleme ve arındırma sırasında kullanılmayan sistemlerde oluşan kâr edilmeyen sürecin azalması, ticari ve laboratuvar ölçeğinde alglerin yetiştirilmesinde başvurulan yöntemler olması nedeniyle fotobiyoreaktörler, alglerin büyük ölçekte yetiştirilmesi için uygun bir yöntemdir. Bunu yanında üstünlükler, kısıtlamalar, donanım, bakım, gözlemleme, denetleme ve akıntı yönü süreçleri fotobiyoreaktörlerle bağlantılıdır. Ayrıca bu sistemlerin uygulanabilme olanakları, ekonomik yönleri, ana uygulamaları ve gelecek bakış açıları üzerinde düşünülmektedir (Fernandes ve diğer., 2015).

Diğer biyoteknolojik süreçler gibi algal ürün temelli üretim “akıntıya karşı” ve “akıntı yönü” süreci olarak ikiye ayrılmaktadır. Akıntıya karşı süreci aşı hazırlama, küçük ölçekli fotobiyoreaktörde alg yetiştirme ve büyük ölçekte alg yetiştirilmesi adımlarını, akıntı yönü süreci ise alglerin hasat edilmesinden son ürüne kadar geçen bütün süreç adımlarını içermektedir. Ürünün amacına bağlı olarak, biyokütlenin hasadından sonra, alg parçalanması, biyokütleden yapım-yıkım ürünü, öz ürünün saflaştırılması gibi ortaya çıkan çeşitli süreçlerden oluşmaktadır. Farklı dinamiklere

rağmen, hem fotobiyoreaktörlerde hem bölümlü üretim sistemleri için akış grafikleri, akıntı yönü sürecinde aynıdır. Akıntı yönü süreciyle ilişkili maliyet, kullanılan teknolojinin çeşidine ve alg kültürünün yoğunluğuna göre değişmektedir. Örneğin, toplam biyodizel üretim maliyetinin %60'ından tamamen akıntı yönü süreçleri sorumlu olabilmektedir (Fernandes ve diğer., 2015).

Fotobiyoreaktör kullanılıyorsa, akıntı yönü sürecinin kullanımı zorunlu değildir. Fotobiyoreaktör kullanılmasının olumsuz yanı, iş gücü maliyetini artırmasıdır. Ama fotobiyoreaktörde akıntı yönü süreci kullanıldığı halde de daha yüksek üretime ve gerçek zamanda akıntı yönü adımlarını gözlemlemenin ve denetlemenin mümkünlüğü nedeniyle esnekliğe izin vermektedir. Akıntı yönü süreçleri depolama adımı için ihtiyacı azaltmakta ya da durdurmaktadır. Maliyet ve depolama sırasında olan ürünün bozulma riskini veya değerli özelliklerinin kaybını azaltmaktadır. Ama depolama adımındaki durdurma akıntı yönü süreci seçimine bağlıdır. Çünkü akıntı yönü ünitelerinin akış oranı bu adımı yok etmek için, genellikle çok düşük olan akıntıya karşı yetiştirme adımının akış oranını sabit tutmalıdır. Ayrıca sermaye maliyeti akıntı yönü süreçlerini kullanarak azaltılabilmektedir (Fernandes ve diğer., 2015).

Algal hasat, biyokütle üretiminin ekonomisinde çok önemli bir etkiye sahiptir ki bu hasat, toplam biyokütle üretim maliyetinin yaklaşık %20-30'unu oluşturmaktadır. Özellikle fotosentetik algi; ayırmak, süzmek ve santrifüjlemek hasat etmede en çok kullanılan teknikler olarak göze çarpmaktadır. İki teknolojinin maliyetleri karşılaştırıldığında, süzme; küçük ölçekli sistemler için daha uygundur, devamlı santrifüjleme ise ekonomik açıdan büyük ölçekli sistemler için daha çekici bir teknolojidir. Önceki üstünlüklerine ek olarak, devamlı hasat tekniklerinin kullanımı, donanımların uzun süreli kullanımına izin vermektedir. Hasat etme tekniklerinden ana olarak kullanılan süzme, santrifüjleme ve çökeltme devamlı olarak algleri başka bir tanımlı yere uzaklaştırma olarak uygulanmaktadır. Devamlı hasat etme için diğer seçenekler de bulunmaktadır. Örneğin elektrolit yöntemi kullanımında algler kesme kuvvetine maruz kalmamaktadır (Fernandes ve diğer., 2015).

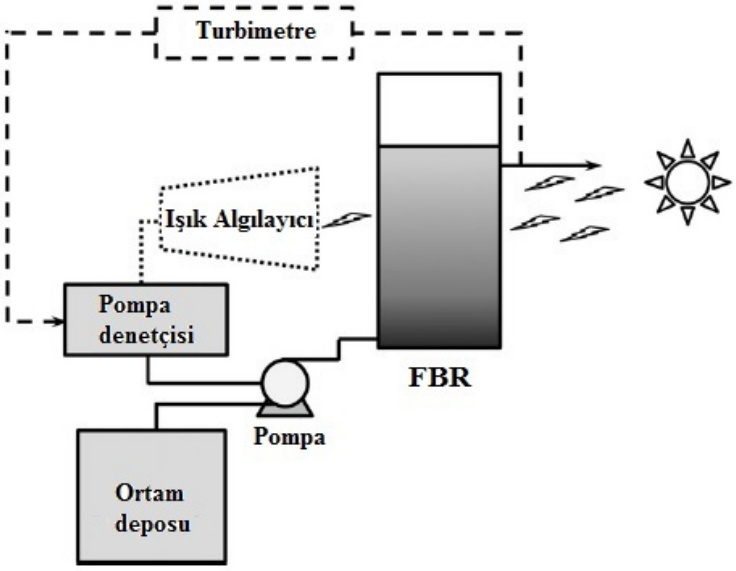
Fotobiyoreaktörlerin ekonomilerinin değerlendirilmesi çeşitli etkenlere bağlıdır. Bunlar, uygulama yerinin belirlenmesi, yatırım ve bakım maliyeti, kullanılan fotobiyoreaktörün çeşidi, akıntı yönü sürecinin teknikleri, sonuç ürünü ve onun ticari değeridir. Pek çok farklı ekonomik yaklaşıma rağmen, fotosentetik algleri devamlı olarak sanayisel bir süreçte üretmek için, bütün çalışmalar üretim maliyetinin düşürülmesine ihtiyaç olduğunu vurgulamaktadır (Fernandes ve diğer., 2015).

Alglerin fotobiyoreaktörlerde üretimlerinde araştırma aracı olarak en çok kullanılan yöntemler kemostatlar, turbidostatlar ve luminostatlardır. Kemostat yönteminde (Şekil 3.17'deki düz çizgiler), kültürün gelişmesi için gerekli besin, fotobiyoreaktöre önceden karar verilmiş sabit zaman ve miktarlarda beslenmektedir. Fotobiyoreaktörün kapasitesine göre, kimyasal ortamı dengede tutacak miktarlar belirlenmektedir. Kemostat yöntemi genellikle, besin yoğunluğu, pH veya özel, sabit büyüme oranlarında sıcaklığı çalışmak için bir araştırma aracı olarak kullanılmaktadır (Fernandes ve diğer., 2015).

Sabit bir alg yoğunluğu istendiğinde; aşırı ışığın büyümeyi engellemesi varsa, yavaş büyüyen algler veya karışık alg döngüleri bulunuyorsa, en fazla büyüme oranına yaklaşılmışsa, alg kültürü kemostat yönteminde dengesizse, en iyi ve en çok tercih edilen seçenek turbidostat yaklaşımını kullanmaktır (Şekil 3.17'deki kesikli çizgiler). Turbidostat içindeki sistem, yoğunluğu algılamak için optik bir algılayıcı ve gerekli yoğunluğu sağlamak için kullanılan bir pompadan oluşmaktadır. Yoğunluğa ek olarak alglerin büyümesiyle ilgili besin yoğunluğu, pH, CO_2 tüketimi, O_2 üretimi gibi diğer değişkenler, devamlı büyümeyi denetlemek için kullanılmaktadır. Turbidostat alglerin fotobiyoreaktörlerle üretiminde yaygın olmasına karşın, kemostatlardan daha karmaşık bir tekniktir (Fernandes ve diğer., 2015).

Güneşin konum değiştirmesinden ve havadaki değişimlerden kaynaklanan ışık durumlarındaki devamlı değişikliklerin üstesinden gelmek için luminostatlar kullanılmaktadır (Şekil 3.17'deki noktalı çizgiler). Bir fotobiyoreaktör içindeki karanlık bölgeleri azaltacak, ışık emilimini en yüksek seviyeye çıkartacak, alg

yoğunluğunu sabit tutacak ışık durumları luminostat yardımıyla ayarlanmaktadır, böylece üretim en yüksek seviyede sonuçlanmaktadır. Işığın iletilmesi fotobiyoreaktörün gerisindeki ışık yoğunluğu ölçülerek denetlenmektedir. Luminostat tekniğinin yararı, ışık doygunluğunun ve ışık kısıtlamasının etkisini azaltması, fotosentetik verimliliği ve üretimi artırması olmaktadır (Fernandes ve diğer., 2015).



Şekil 3.17 Kemostat, turbidostat, luminostatın şematik gösterimi (Fernandes ve diğer., 2015).

Fotobiyoreaktörlerin üstünlüklerinin yanında, bazı kısıtlamaları da bulunmaktadır. Bu kısıtlamaların kaynağı mali ve tekno-ekonomik temellerdir. Yöneticiler, değişime bir direnç göstermekte, düzenleme ve bilgi eksikliği güvensizliğe neden olmaktadır. Sistem karmaşıklığı ve bundan kaynaklanan teknik işler, özel donanım ihtiyacı ile daha yüksek kirlenme durumu gibi tekno-ekonomik nedenler de bu isteksizliği artırmaktadır. Fakat bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için bazı yöntemler geliştirilmektedir. Fotobiyoreaktörlerde sürecin maliyet verimliliğini artırmak için inşa ve işletme maliyetleri azaltılmaktadır. Ama bu maliyet azaltma, alg kültürünün verimliliği, saflığı ve niteliğinin giderlerinde yapılmamalıdır. Ürün niteliği ve maliyet arasındaki denge, fotobiyoreaktörlerin inşasında ucuz malzemenin kullanımıyla ve sürecin tüm otomasyonuyla başarılabilmektedir. Fotobiyoreaktörlerde süreç yönetimi, gerçek zamanlı gözlemleme sayesinde sürecin

denetimi yapılarak yatırımın azalmasını, verimliliğin ve kazancın artmasını mümkün kılmaktadır (Fernandes ve diğer., 2015).

Fotobiyoreaktörler açık sistemlere göre kirlenme olasılığını, su buharlaşmasını ve CO_2 kayıplarını azaltırken; biyoteknolojik değişkenleri denetlemeye ve düzenlemeye izin vermektedirler. Denetlenebilir hidrodinamik ve sabit işletim sıcaklığı, yetiştirme durumlarını tekrar üretebilir olması fotobiyoreaktörlerde daha kolaydır. Kültürün isteğine göre, dış ve iç ortamda yer alabilmesi bakımından da daha esnektir. Fotobiyoreaktörün inşa edildiği malzemeye (şeffaf malzemeler, cam, akrilik, polietilen, polivinil klorit gibi), ölçeğe (laboratuvar, pilot, sanayi gibi), alglerin büyüme ortamının kirlilik olasılığına (yüksek seçicilik, orta derecede seçicilik veya atık su gibi) bağlı olarak farklı temizleme yöntemleri uyarlanabilmektedir. Buharla temizleme ve basınçlı kap gibi teknikler fotobiyoreaktörlerin çoğunda kullanılan malzemelerden ya da ölçeklerden dolayı temizleme için uygun değildir. Basınçlı kap tekniği hacmi 10 lt'nin üzerinde olan, yerinde ısıyla temizleme tekniği hacmi 10 lt ile 100 lt arasında olan fotobiyoreaktörler için kullanılmaktadır. Temizleme için farklı bir seçenek ozonlamadır, ama bu teknik pahalı olabilmektedir. Sağlığı korumak için hipoklorit çözeltisi uygulanabilmektedir. Gerçekte bazen, alg yetiştirme ortamının çok tuzlu ve/veya çok yüksek pH'lı olduğu durumlarda temizleme gerekli olmamaktadır. Fotobiyoreaktörün temizlenmesinin yanında, içini besleyen hava ve CO_2 karışımı gazın temizlenmesi de önemlidir. Gaz genellikle filtrelemeyle, ortam ise basınçlı kap, filtreleme, UV veya ozonlama yöntemlerinden biriyle temizlenmektedir. Ortamı temizlemesi için iki veya üç yöntem birlikte kullanılabilmektedir. Pilot ya da sanayi ölçeklerinde UV ve ozonlama en genel kullanılan tekniklerdir (Fernandes ve diğer., 2015).

Gözlemleme ve denetleme teknikleri, bütün alg yetiştirme süreçlerinde önemlidir. Ekonomik açıdan otomatik gözlemleme ve denetleme sistemleri sadece iş gücü etkisini ve atık miktarını azaltarak işletme maliyetini azaltmamakta, ayrıca ürün niteliğini de geliştirmektedir, böylece en az maliyetle, uzun bir zaman için istikrarlı işletmeye izin vermektedir. Süreç değişkenlerini gözlemleme, genellikle veri elde etme sistemlerine bağlı algılayıcılarla yapılmaktadır. Alglerin yetiştirilmesinde

gözlemlenen, ana değişkenler üç sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar fiziksel (ışık, sıcaklık, karıştırma), kimyasal (çözünmemiş CO_2, O_2, pH, besin ve ürün yoğunluğu) ve biyolojik (biyokütle birleşimi, alg morfolojisi, fizyolojik durum ve fotosentetik verimlilik)tir. Bu değişkenleri gözlemleme sadece büyüme oranı, fotosentetik başarım gibi önemli yetiştirme değişkenlerine karar vermeye değil, ayrıca biyokütle büyümesini geliştirme için gerekli olan modelleri denetlemeye izin vermektedir. Biyolojik ya da fizikokimyasal gözlemleme yerinde ve çevrimiçi yapılmalıdır. Ama karmaşık ve zamana ihtiyaç duyan yaklaşım olmasına rağmen, bazı tekniklerle ilişkili özgünlükleri ve sınırlamaları nedeniyle çevrimdışı gözlemleme hala çok yaygındır. (Fernandes ve diğer., 2015).

Alg yetiştirme sistemlerinin denetlenmesi genellikle geri bildirim ya da ileri bildirim denetleme yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Geri bildirim denetlemeleri süreç çıktılarını ölçmekte ve kaynak değerlerle karşılaştırmaktadır. Değişken girdileri kaynaktaki çıktılara yaklaştırmak için değiştirmektedir. İleri bildirim denetleme yönteminde ise matematiksel örnekler gözlemci ya da tahmin edici olarak rol almaktadır, varolan durumu hesaplamakta, sonucu tahmin etmekte ve gerekliyse, kültürü önceden karar verilmiş ortam koşulları içinde tutmak için aletleri ve araçları harekete geçirmektedir. Geri bildirim denetlemelerine ayrıca ileri bildirim denetlemelerini ekleyerek uygulamak da yaygındır. Bu durumda, ileri bildirim kısmı ana sorunu denetlemekte, geri bildirim kısmı ise kurulum değerinden sapan tüm diğer süreç değişkenlerini denetlemektedir. Denetleme sistemlerinde değiştirilmeden gözlemlenen değişkenler (pH, biyokütle yoğunluğu özelikleri gibi) ve hem değiştirilebilen hem de bağımsız olan değişkenler (CO_2 eklenmesi, ışık yoğunluğu, seyreltme oranı gibi) bulunmaktadır. Genellikle pH'ın denetlenmesi bir geri bildirim denetlemesidir, pH kaynak değerin üstüne çıktığında, CO_2 veya asit pH değerini düşürmek için kültüre eklenmektedir. CO_2 eklenmesi pH'ın denetlenmesi için kullanılan en yaygın yöntemdir, çünkü aynı zamanda inorganik karbonun kaynağıdır (Fernandes ve diğer., 2015).

3.2 Fotobiyoreaktör Çeşitleri

Yıllar içindeki araştırmalar sonucunda, yüksek olumlu özelliklere sahip, yaygın üretimi yapılan üç fotobiyoreaktör tasarımı ortaya çıkmıştır. Bunlar "düz-panel", "tübüler" ve "dikey-kolon" sistemlerdir (Şekil 3.18). Bu tasarımların temel prensipleri ışık yolunu azaltmak ve böylece gerekli ışığın tüm alglere ulaşmasını sağlamak, iyi karıştırma sağlayarak ışığın dağılımını ve gaz aktarımını en uygun koşullarda sağlayabilmektir (Conk Dalay ve diğer., 2008). Adı geçen fotobiyoreaktör çeşitleri aşağıda detaylandırılmıştır.



Şekil 3.18 Düz-panel, tübüler ve dikey-kolon fotobiyoreaktörler (Şahin ve Akyurt, 2010).

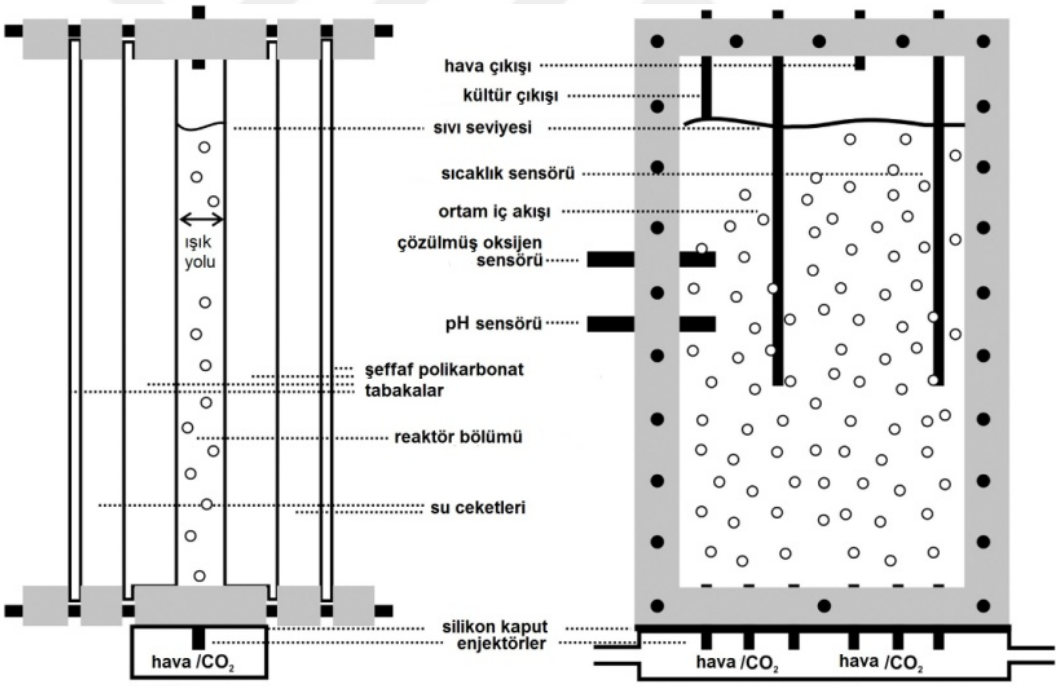
3.2.1 Düz-Panel Fotobiyoreaktörler

Düz-panel fotobiyoreaktörler, geniş ışıklandırma yüzey alanına sahip oldukları için fotosententik organizmaların yetiştirilmesinde ve alglerden biyoenerji üretiminde daha çok dikkati çekmektedirler. Diğer güneş panel sistemlerde olduğu gibi güneş enerjisinden en yüksek seviyede yararlanmak için PVC veya şeffaf malzemelerden yapılmaktadırlar (Ugwu ve diğer., 2008). Ayrıca düz-panel fotobiyoreaktörlerin, tabanlarından ortama hava verilmesini sağlayacak şekilde dağıtıcı ünitesi bulunmaktadır (Şekil 3.19) (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Düz-panel fotobiyoreaktörlerin tasarımları açısından avantaj sağlamaları için bazı üstünlüklerinin olması önem taşımaktadır. Bu üstünlükler,

- ışık yolunun kısaltılarak verimli ışık kullanımı sağlanması,
- gerektiğinde reaktörlere farklı açılarda eğim verilebilmesi,

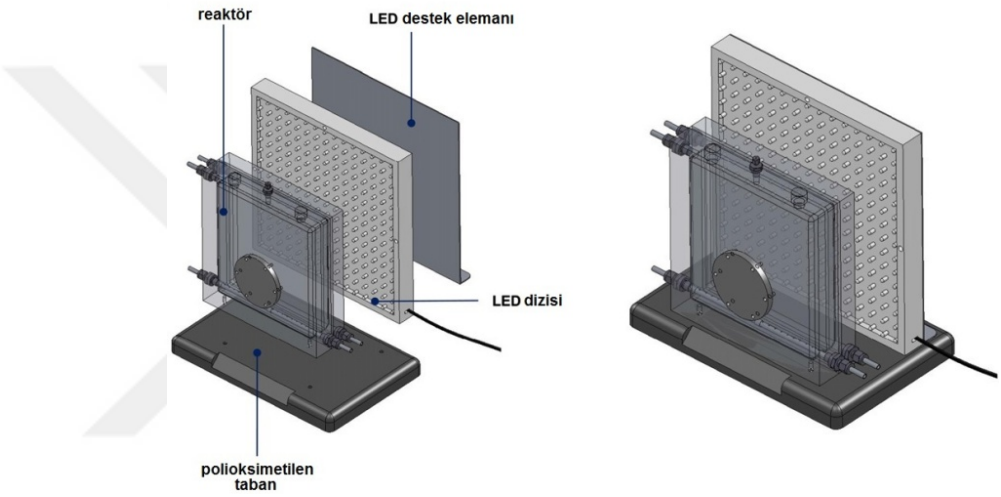
- pompa kullanımına ihtiyaç duymadan karıştırma işleminin hava beslemesiyle yapılması ve aynı anda hem karıştırmanın hem gaz aktarımının gerçekleştirilmesi,
- gerektiğinde yapay ışıklandırma ile çalışmaya da olanak vermesi,
- hacim yüzey oranı olarak en uygun ışıklandırmayı en az alan işgaliyle yapması,
- ölçek büyütmeye uygun olması,
- basit işletimi sayesinde küçük çaplı üreticiler tarafından da kullanılabilmesi,
- ortam koşullarının kontrolünün mümkün olması,
- kolay temizlenebilmesi,
- kurulan sistemin az sayıda parça ile oluşturulabilmesidir (Conk Dalay ve diğer., 2008).



Şekil 3.19 Düz-panel fotobiyoreaktörün yan ve ön kesiti (Bahadar ve Khan, 2013).

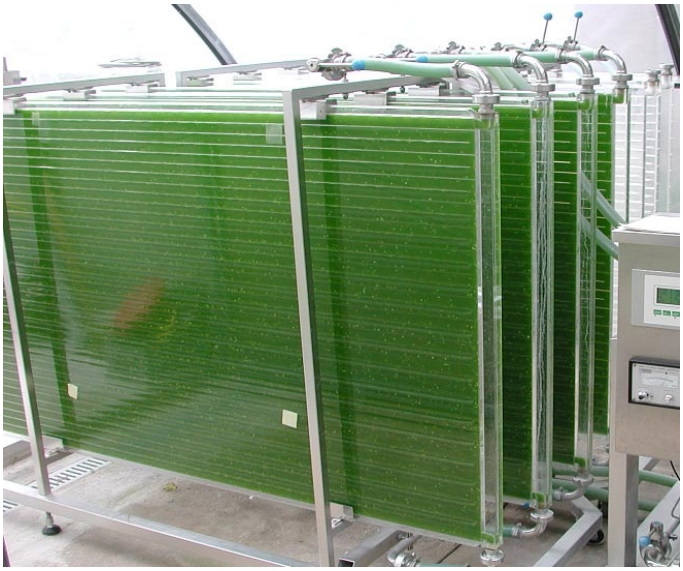
Yapay ışıklandırılmış düz-panel fotobiyoreaktörler çoğunlukla dikeydir ve ışık kaynağı reaktöre bir cepheden verilmektedir (Şekil 3.20). Dışarıda kullanılan düz-panel fotobiyoreaktörler ise tipik olarak belli açıda yana kaymış olmaktadırlar. Açılı olmaları güneş ışınımına uygun olmalarına izin vermektedir. (Tamburic ve diğer.,

2011). Gerektiğinde bu reaktörler güneşin konumuna göre farklı yönlerde hareket ettirilebilmektedirler. Farklı açılarda konumlandırılabilmeleri sayesinde bu reaktörlerden tüm mevsimlerde sabit olan reaktörlere göre %35 daha fazla verim alınabilmektedir (Conk Dalay ve diğer., 2008). Düz-panel fotobiyoreaktörler bağımlı olarak düşük kütle aktarım oranına sahiptirler, çünkü paneller arasındaki ışık yolu olarak bilinen boşluk kısıtlıdır, bu da fotosentez yoluyla üretilen dağılmış O_2'nin net verimliliğini azaltmaktadır. Reaktörde iyi bir şekilde O_2 yayılma oranı için uygun algal biyokütle büyümesini başarmak gerekmektedir (Tamburic ve diğer., 2011).



Şekil 3.20 Yapay ışıklı düz-panel fotobiyoreaktör (Tamburic ve diğer., 2011).

Bu paneller içindeki dağılmış O_2 toplanmasının birikmesi yatay tübüler fotobiyoreaktörlerle karşılaştırıldığında düşüktür. Yüksek yüzey-hacim oranı olduğu için, düz-panel fotobiyoreaktörler yüksek fotosentetik verimlilik sağlamaktadırlar. Ayrıca alg kültürleri ve dışarıda yetişen kültürler için çok uygundurlar (Şekil 3.21) İyi ışık yoluna sahiptirler, temizlenmeleri kolaydır, diğer fotobiyoreaktörlere kıyasla ucuzdur ve az O_2 ile daha fazla verim oluşturmaktadırlar (Ugwu ve diğer., 2008).



Şekil 3.21 Düz-panel fotobiyoreaktörler (Photobioreactor, b.t).

Fakat düz-panel fotobiyoreaktörler bazı kısıtlamalara da sahiptirler. Reaktörü boyut olarak büyütmek, daha fazla bölüm ve destek malzeme gerektirmektedir (Ugwu ve diğer., 2008). Reaktörlerin yüksekliği ve genişliği iki boyutlu olarak büyütmeye uygundur, ama pratik olarak sadece 2-3 m büyütme sınırındadır (Tamburic ve diğer., 2011). Fotobiyoreaktörlerin boyutça büyümesindeki kısıtlılıkların nedenleri arasında kültürün sıcaklık derecesini kontrol etmede zorluk yaşanması sayılabilmektedir. Ayrıca bazı reaktörlerin duvarlarında alg büyümesi gözlemlenebilmektedir. Hatta sistemde oluşan hidrodinamik basınç, bazı alg türlerinin büyümesini sınırlayabilmektedir (Ugwu ve diğer., 2008).

Düz-panel fotobiyoreaktörlerin önemli sorunlarından biri de panellerin üretildiği PVC veya cam gibi kırılgan malzemenin dış darbelere karşı korunmasının gerekliliğidir. Korumayı sağlamak amacıyla paneller gerektiğinde destek kalıplarıyla kuvvetlendirilmektedir. Bu durum panellerin ışık geçirgenliğini çok az etkilemektedir. Ama tübüler fotobiyoreaktörleri benzer şekilde korumak kolay değildir. Ayrıca düz-panel fotobiyoreaktörlerin içinin temizlenmesi, uzun tübüler fotobiyoreaktörlere göre daha rahat olmakta, böylece temizlik için kullanılan kimyasal maddelerin panel içinde birikimi engellenebilmektedir. Dış yüzeylerinin istendiğinde kolaylıkla temizlenebilmesi, ışık açısından önemli bir avantajdır (Conk Dalay ve diğer., 2008).

3.2.2 Tübüler Fotobiyoreaktörler

Tübüler fotobiyoreaktörler dışarıda yetişen algal biyokütle kültürleri için uygun reaktör türlerinden biridir. Dış ortamda kullanılan tübüler fotobiyoreaktörlerin çoğu genellikle ya camdan ya da plastik tüpten inşa edilmektedirler, yatık, yataya yakın, konik ve yatay şekillerde olabilmektedirler (Şekil 3.22) Tübüler fotobiyoreaktörler avantaj olarak geniş ışıklandırma yüzey alanına sahiptirler. Dışarıda kültür üretimi için uygun olup, biyokütle üretkenlikleri oldukça yüksektir ve diğer sistemlere oranla ucuzdurlar (Ugwu ve diğer., 2008).



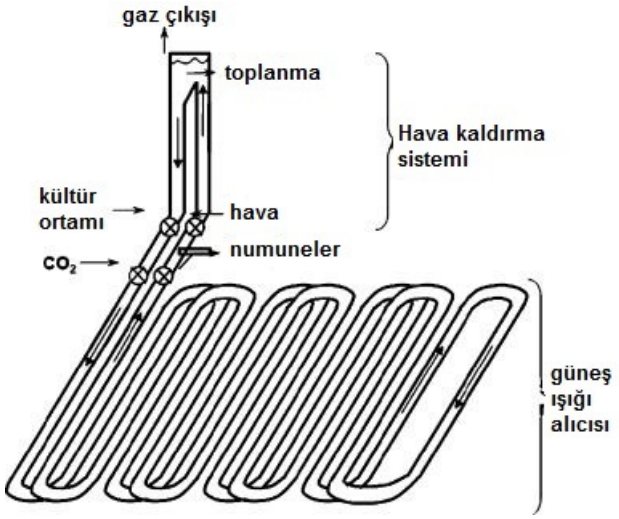
Şekil 3.22 Yatık, konik ve yatay tübüler fotobiyoreaktörler (Çukurova Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Su Ürünleri Temel Bilimleri Bölümü, b.t; GICON and Anhalt University of Applied Sciences receive Hugo Junkers Award for the "Christmas Tree Reactor" for cultivation of microalgae, 2013; Allinger ve Warthmann, 2011).

Tübüler fotobiyoreaktörler temel tasarımları itibariyle üç ana kısımdan oluşmaktadırlar. Bunlar, kültür ortamını içinde bulunduran tüplerden oluşan kısım, tüplerin içinde biriken gazın atılmasını sağlayan degazör kısmı ve karıştırmayı gerçekleştiren pompa kısmıdır. Ana tasarım amaçları, diğer fotobiyoreaktörlerde olduğu gibi en üst seviyede ışıktan faydalanma ve alglerin yetiştirilmesinde en uygun koşulların sağlanmasıdır. Bu reaktörler güneş ışığını en iyi şekilde kullanabilmek için yatay ya da dikey yerleştirilebilmektedirler ve tüpler düz, kıvrımlı ya da halkasal yapıda olabilmektedirler. En yaygın kullanılan çeşidi yatay tübüler fotobiyoreaktörlerdir. Tüpler yatay şekilde yerleştirilerek en yüksek ışıklandırmaya, en az yer kaplama esasına göre tasarlanmaktadır. Ancak bu tübüler fotobiyoreaktörler CO_2 kullanımında istenen verimi ve en uygun koşulları sağlamasının yanında, tüpler içindeki karanlık bölgeler nedeniyle, özellikle tabanlarındaki alglerin ışık almasında bazı sorunlarla karşılaşılmaktadır. Bu sorunu

giderebilmek için farklı kültür hızları, tüp şekilleri ve tüp dizilişleri kullanılmaktadır. Tüpler tek sıra, üst üste ya da dikey olarak yerleştirilebilmektedir. Tübüler fotobiyoreaktörlerde özellikle,

- yetiştirilecek algin özelliklerinin belirlenmesine,
- uygun özelliklerde tüp seçimine,
- reaktörün kurulacağı bölgenin iklim ve yer şekli özelliklerine,
- karıştırma sisteminin belirlenmesine dikkat edilmelidir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Tübüler fotobiyoreaktörlerde havalandırma ve kültürlerin karıştırılması genellikle hava pompalama veya hava kaldırma sistemleri ile yapılmaktadır (Şekil 3.23). Bu reaktörler alglerin dışarıda yetişen biyokütle kültürleri için çok uygundurlar. Çünkü geniş ışıklandırma yüzey alanına sahiptirler (Ugwu ve diğer., 2008). Tübüler fotobiyoreaktörlerde hava pompalama sistemi yerine hava kaldırmalı sistem kullanılarak pompalardaki mekanik parçaların hareketiyle, kültür ortamına vereceği zararlar ve gerilme kuvvetleri ortadan kaldırılabilmektedir (Conk Dalay ve diğer., 2008).



Şekil 3.23 Hava kaldırmalı tübüler fotobiyoreaktör (Kunjapur ve Eldridge, 2010).

Ama bu reaktörlerin ana kısıtlamalarından biri düşük kütle aktarımıdır. Tübüler fotobiyoreaktörlerin boyutları büyütüldüğünde, düşük kütle iletimi nedeniyle reaktörün içinde çok yüksek çözülmüş O_2 seviyelerine kısa zamanda

erişilebilmektedir. Bu da ortamda verimin azalmasına neden olmaktadır. Uzun tübüler fotobiyoreaktörlerde CO_2 ve O_2 aktarımı, tüpler boyunca yükseliş ve düşüş göstermektedir. Kültürlerin pH'ının artması, kültürlerin sık olarak karbonlaşmasına sebep olabilmektedir, bu da sonuç olarak alg üretiminin maliyetini artırmaktadır (Ugwu ve diğer., 2008).

Ayrıca her algin yeterince ışık alamaması sorunu, dış ortamdaki tübüler fotobiyoreaktörler için çok yaygındır, çünkü bir tübüler fotobiyoreaktörün tüp çapı artırıldığında ışıklandırılmış yüzeyin hacme oranı azalmaktadır. Fakat bu sayede tüplerin uzunluğu mümkün olduğu kadar kısa tutulabilmektedir. Bu durumda, eğer iyi bir karıştırma sistemi yoksa, gölgeleme sebebiyle, tüpün alt kısmındaki algler, büyümeleri için yeterli ışığı alamamaktadırlar. Her durumda, alglere verimli ışık dağılımı, ancak tüplerin içinde iyi bir karıştırma sistemi geliştirilmesi ile başarılabilmektedir (Şekil 3.24) (Ugwu ve diğer., 2008).



Şekil 3.24 Tübüler fotobiyoreaktörler (Spirulina yetiştiriciliği, b.t).

Tübüler fotobiyoreaktörlerin çoğunda kültürün sıcaklık derecesini kontrol etmek zor olmaktadır. Reaktörler istenen kültür derecesinin devamlılığını sağlamak için termostat ile donatılmış olsalar da bunu uygulamak çok güç ve pahalı olabilmektedir. Alglerin tüplerin duvarlarına yapışarak yığılması sorunu tübüler fotobiyoreaktörlerde yaygındır (Ugwu ve diğer., 2008).

3.2.3 Dikey-Kolon Fotobiyoreaktörler

Dikey-kolon fotobiyoreaktörler silindirik yapıda olup çeşitli çalışma ilkesine sahip tasarımlarda ve ölçeklerde test edilmektedirler. Bunlar yoğun, düşük fiyatlı ve işletmesi kolaydır. Bu reaktörler geniş ölçekte kullanıma uygundur (Ugwu ve diğer., 2008). Dikey kolon fotobiyoreaktörler havalandırma şekillerine göre karıştırmalı tank ve hava kaldırmalı olarak iki çeşide ayrılmaktadırlar (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Karıştırmalı tank ve hava kaldırmalı dikey-kolon fotobiyoreaktörler (Marine microalgal biotechnology, b.t; Fermentor bioreactor, b.t).

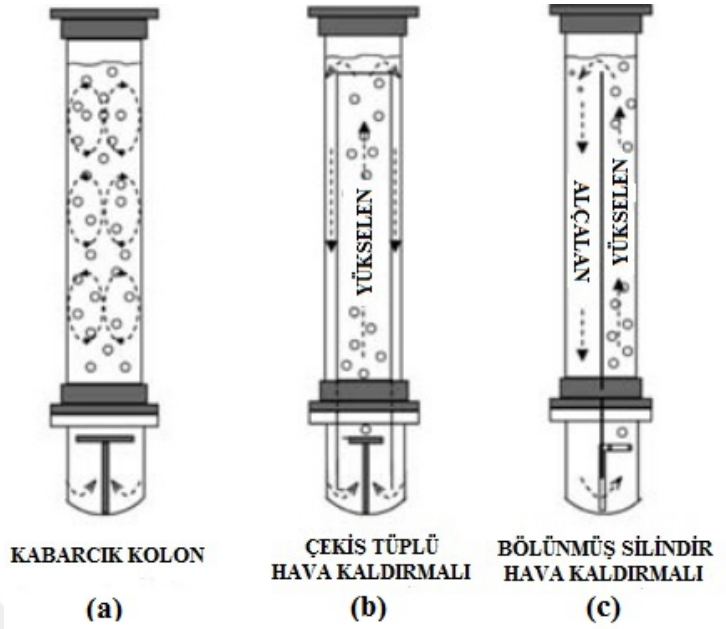
Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler karıştırma ve gaz aktarımı, hava beslemesi ile aynı anda yapıldığı sistemlerdir. Bu reaktörler tek alg türünün üretiminde kullanılabilmektedirler. Yeterli ve etkin karıştırma, kontrol edilen sıvı akışı ile uygulanmaktadır. Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerde CO_2 beslenmesi ve O_2 uzaklaştırması reaktör verimliliğini kısıtlamamaktadır. Ayrıca biyokütle yoğunluğuna göre reaktörlerin içinde karanlık bölgelerin oluşumu, yoğun ışığa karşı belirli bir engelleme kalkanı olarak görev yapmaktadır. Çekiş tüplü hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler yükselme bölümü karanlık bölgeyi kapsayacak şekilde tasarlanma avantajına sahiptirler. Böylece algin karanlık ve aydınlık bölgede geçirdiği zaman (10-100 sn) tamamen sıvı dolaşımıyla ve gaz akış hızıyla bağlantılı olmaktadır (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerde ölçek büyütmede bazı sorunlarla karşılaşılmaktadır. Bu sorunların en önemli nedeni kolon çapı artırıldığında yeterli ışığın alg kültürüne ulaşamamasıdır. Bu durumu aşmak için yüksekliği artırmak da

sorunu çözememekte, tasarım açısından daha büyük sorunlara neden olmaktadır. Çünkü artan yükseklikle gaz aktarımları farklılaşmakta, sistemin dengede tutulması için daha fazla hava beslemesi yapılması gerekmektedir. Bunun sonucunda özellikle kültür yoğunlaştıkça verim düşmektedir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler birçok alg türünün yetiştirilmesinde başarıyla kullanılmaktadırlar. Özellikle tam kontrole ihtiyaç duyulan ve yüksek gerilme kuvvetlerine karşı hassas olan alg türlerinde tercih edilmektedirler. Ölçek büyütme sırasında bazı sorunlarla karşılaşılsa da hava kaldırmalı reaktörlerin dış ortam üretimlerinde kullanılmasına ilgi artmaktadır. Kapladıkları alanın diğer reaktör çeşitlerine göre az olması, alglerin üzerine mekanik bir karıştırma gerektirmediklerinden dolayı basınca yol açmamaları önemli bir üstünlükleridir (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Kabarcık-kolon fotobiyoreaktörlerin çapı 0,19 m'ye kadarsa, son biyokütle yoğunlaşması ve büyüme oranı tübüler fotobiyoreaktördekilerle benzerlik göstermektedir. Kabarcık-kolon fotobiyoreaktörlerde hava aşağıdan verildiğinde kolonun içinde akış girdaplar halinde oluşmaktadır (Şekil 3.26(a)). Bunu önlemek için, kabarcık-kolonlar ya çekiş tüpleriyle donatılmakta ya da bölünmüş silindirler olarak yapılmaktadırlar. Çekiş tüplü hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerde, ortaya çekme amaçlı bir tüp yerleştirilmekte ve karışma çekiş tübünün duvarlarında yükselen ve alçalan bölgeler arasında oluşmaktadır (Şekil 3.26(b)) (Ugwu ve diğer., 2008). Bölünmüş hava kaldırmalı fotobiyoreaktör çeşitleri ise silindirin bir yarısında yükselen bölge, diğer yarısında ise alçalan bölge olacak şekilde konumlandırılmaktadır (Şekil 3.26(c)).



Şekil 3.26 Kabarcık-kolon, çekiş tüplü hava kaldırmalı ve bölünmüş silindir hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler (Sevilla, Garcia, Miron, Belarbi, Camacho ve Grima, 2004).

Karıştırmalı tank fotobiyoreaktörlerde eşit kültür dağılımı, tam denetleme imkanı, farklı ışıklandırma sistemlerinin içten veya dıştan uyarlanabilmesi, alg kültürlerinin farklı beslenme yöntemlerinde yetiştirilebilmesi gibi özellikler bulunmaktadır. Bu reaktörlerde ışık ve karıştırma önemli değişkenlerdir. Çünkü karıştırmalı tank fotobiyoreaktörlerde karşılaşılan en önemli sorunlar alg kültürünün eşit dağılımını korumak ve yeterli ışık almasını sağlamaktır. Tankların boyutları büyüdükçe ışık kullanımında sorunlar yaşanmaktadır. Uygun bir karıştırmalı tank fotobiyoreaktörde alglerin büyümesi için yeterli ışık, ayarlanabilir ışık şiddeti, geniş devir sıklığı aralığında, gerektiğinde farklı dalga boylarında ışık sağlanması, tüm reaktörler için ışık şiddeti farklılıklarının en düşük seviyede olması gerekmektedir. Bu koşulların gerçekleşmesiyle tankların boyutunu büyütmede önemli kolaylıklar sağlanacaktır (Conk Dalay ve diğer., 2008).

Dikey-kolon fotobiyoreaktörler iyi karıştırma koşullarında yüksek kütle aktarımı ve düşük kesme kuvveti, düşük enerji tüketimi gibi avantajlara sahiptirler. Ölçeklendirme konusunda yüksek potansiyelleri vardır, kolay temizlenebilirdirler. Alglerin ışık alımının engellenmesini ve ışıktan dolayı oksitleşmeyi azaltmaktadırlar. Bu reaktörlerin kısıtlamaları ise, dar ışıklandırma yüzey alanına sahip olmaları, inşa

edilmeleri için nitelikli malzeme gereksinimi ve yeterli karıştırma olmadığında alg kültürlerinin üstüne yüksek kesme kuvveti binmesidir. Reaktörlerin boyutları büyütüldüğünde, ışıklandırma yüzey alanı azalmaktadır (Ugwu ve diğer., 2008).

3.3 Fotobiyoreaktörlerde Alg Üretimini Etkileyen Değişkenlerin Fotobiyoreaktör Çeşitlerine Göre Karşılaştırılması

Başlık 3.1'de incelendiği üzere fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenler ışıklandırma, kütle aktarımı/karıştırma, ölçeklendirme, süreç yönetimi ve temizliktir. Fotobiyoreaktörlerin özelliklerini daha iyi gözler önüne sermek için bu değişkenler Başlık 3.2'de detaylandırılan fotobiyoreaktör çeşitlerine göre ana hatlarıyla Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Bu tablodan yararlanarak hangi fotobiyoreaktör çeşidinin daha verimli olacağı hakkında yararlı bir tahmin yapılabileceği öngörülmektedir.

Tablo 3.1 Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenlerin fotobiyoreaktör çeşitlerine göre karşılaştırılması

Değişkenler **Fotobiyoreaktör Çeşitleri**	**Işıklandırma**	**Kütle Aktarımı/** **Karıştırma**	**Ölçeklendirme**	**Süreç Yönetimi** **ve Temizlik**
Düz-Panel **Fotobiyoreaktörler**	Işık yolunun azaltılması Geniş yüzey-hacim oranı Dış ortamdaki uygulamalarda eğik ve açılı tasarım Yapay ışıklandırma yapılabilmesi	Hava beslemesiyle aktarımın/karıştırmanın gerçekleşmesi Işığın içe doğru seyrelmesini denetimde zorlanma Algal bozulma olasılığı	Kullanım aşamasında esneklik İki boyutlu ölçek büyütmeye uygunluk Alg büyümesini ve sıcaklığı denetimde boyut büyütüldüğünde zorluk	Basit işletimiyle küçük üreticiler tarafından kullanılabilmesi Kolay temizlenebilmesi Sistemin az sayıda parçayla çok yönlü kurulabilmesi
Tübüler **Fotobiyoreaktörler**	Geniş ışıklandırma yüzey alanı Dış ortamdaki uygulamalarda konik veya yatay tasarım	Tüpler boyunca yüksek gaz iniş çıkışları Hava pompalamayla kaldırmayla aktarımın/ karıştırmanın yapılması	İlave borular, bölümler ve kollarla büyütme Boyut ve çap büyütüldüğünde verimin azalması	Kültürün sıcaklık derecesini korumak için güç yöntemlerin gerekliliği Zor temizlenmesi
Dikey-Kolon **Fotobiyoreaktörler**	Düşük yüzey-hacim oranı Yapay ışıklandırma yapılabilmesi Dış ortamda uygulama	Hava kaldırmayla iyi karıştırma/kütle aktarımı Alg kültürü üstünde düşük kesme kuvveti	Boyut ve çap büyütüldüğünde ışıklandırma yüzey alanı ve verimin azalması	Geniş alanda kullanıma uygunluk Kolay işletilmesi ve temizlenmesi

Işıklandırma açısından fotobiyoreaktör çeşitlerini karşılaştırdığımızda, düz-panel fotobiyoreaktör en uygun ışıklandırmayı, en az alan işgaliyle yaparak ve ışık yolunu kısaltarak verimli ışık kullanımını sağlamaktadır. Bu nedenle diğer iki fotobiyoreaktör çeşidine göre, daha çok üstünlüğe sahiptir. Tübüler fotobiyoreaktör de geniş ışıklandırma yüzey alanına sahip olabilirken, dikey-kolon fotobiyoreaktörün, dar ışıklandırma yüzey alanına sahip olması, düşük yüzey-hacim oranı yaratmaktadır.

Kütle aktarımı/karıştırma yönünden fotobiyoreaktörleri birbiriyle kıyasladığımızda, dikey-kolon fotobiyoreaktörde hava beslemesiyle kütle aktarımı ve karıştırmanın aynı anda yapılmasıyla mekanik bir karıştırma gerektirmemektedir. Bu sayede algler üzerine etki eden düşük kesme kuvveti, dikey-kolonu düz-panel fotobiyoreaktörlerden daha üstün kılmaktadır, tübüler fotobiyoreaktör ise bu konuda diğer ikisinden daha yetersiz kalmaktadır.

Ölçeklendirme konusunda fotobiyoreaktör çeşitlerini incelediğimizde, düz-panel fotobiyoreaktör uygulamada diğerlerine göre daha çok esneklik sağladığı, daha farklı amaçlarla kullanılabilir olmaya yatkın olduğu, iki boyutlu büyütüldüğünde, diğer iki çeşide göre verimi daha az düştüğü, ışığın dağılmasının diğer fotobiyoreaktör türlerine göre çok sorun çıkarmadığı ve ışık alglere daha eşit oranda ulaşabildiği için daha uygundur. Dikey-kolon fotobiyoreaktörün inşa edilmesi için nitelikli malzeme gereksinimi diğer ikisine göre olumsuz bir özelliğidir.

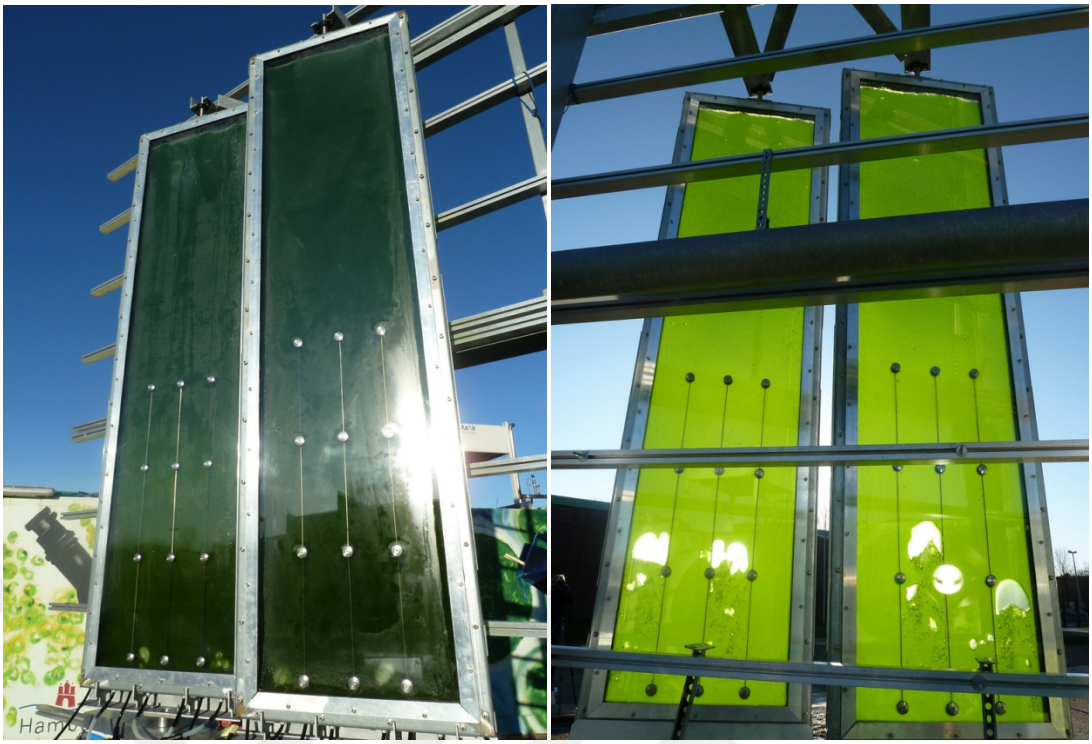
Süreç yönetimi ve temizlik açısından baktığımızda, işletimi ve temizlenmesi kolay olan, geniş alanda kullanılabilen dikey-kolon fotobiyoreaktör büyük bir üstünlüğe sahiptir. Ama düz-panel fotobiyoreaktör sistemi çok yönlü kurulabilmeye uygun olduğu için tercih edilebilmektedir. Tübüler fotobiyoreaktörde ise çoğunlukla kültürün sıcaklık derecesini denetlemek zor olduğu için, istenen sıcaklığın devamlılığını sağlamaya yönelik ek sistemlerin kurulumu gerekmektedir ve temizlikleri diğer iki sisteme göre daha zordur.

BÖLÜM DÖRT
BİNA CEPHESİNDE FOTOBİYOREAKTÖR ÖRNEKLERİ

Fotobiyoreaktörler bina cephelerine uygulandığında, cepheler yeni bir işlev kazanmakta ve enerji üretimi için kullanılacak alanlara dönüşmektedir. Cephelere fotobiyoreaktör eklenmesi ile hem cephe elemanlarının yapılarda sürdürülebilirliğe katkısı artmakta hem de cephelerde biyokütle enerjisi üretilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyoenerjinin üretilmesi ise cephelerde uygun fotobiyoreaktör seçimi ve kullanımı ile mümkün olmaktadır.

Fotobiyoreaktör cepheler, dinamik sistemlerdir. Algal biyokütle güneş ışığını kullanarak fotosentez yapıp, cephelerden yenilenebilir enerjinin üretimini sağlamaktadır (Şekil 4.1). Bu sistemlerin binalarla bütünleşmesi, hem yeni hem varolan yapılar ve sanayisel, ticari, konut ve kamusal yapılar için uygundur (Arup, 2013). Fotobiyoreaktör cephelerin özellikleri,

- güneş ışığını biyoenerjiye ve ısıya dönüştürme,
- güneş ısı enerjisi kullanımı ve yerel depolama,
- yenilenebilir enerji üretimi,
- sıfır CO_2'e yaklaşma,
- güneş ışınımı yoğunluğunun artmasıyla şeffaflık ve camdaki toplam enerji iletiminin azalması nedeniyle dinamik ve adaptif gölgeleme etkisi,
- oluşan hava kabarcıkları ve alglerin renklerinin çeşitlenmesiyle yaratılan, yaşayan ve dinamik kullanıcı deneyimi,
- yüksek ısıl ve akustik yalıtım sağlama,
- giydirme cephe sistemleri gibi uygulanabilirliği olmaktadır (Arup, 2013).



Şekil 4.1 Cephelerde uygulanan düz-panel fotobiyoreaktörler (Research and practice: the bio-responsive façade, 2013).

4.1 BIQ-Bio Intelligent Quotient, Splitterwerk ve Graz Mimarlık, Arup Mühendislik, Biyo Adaptif Cepheli Bina

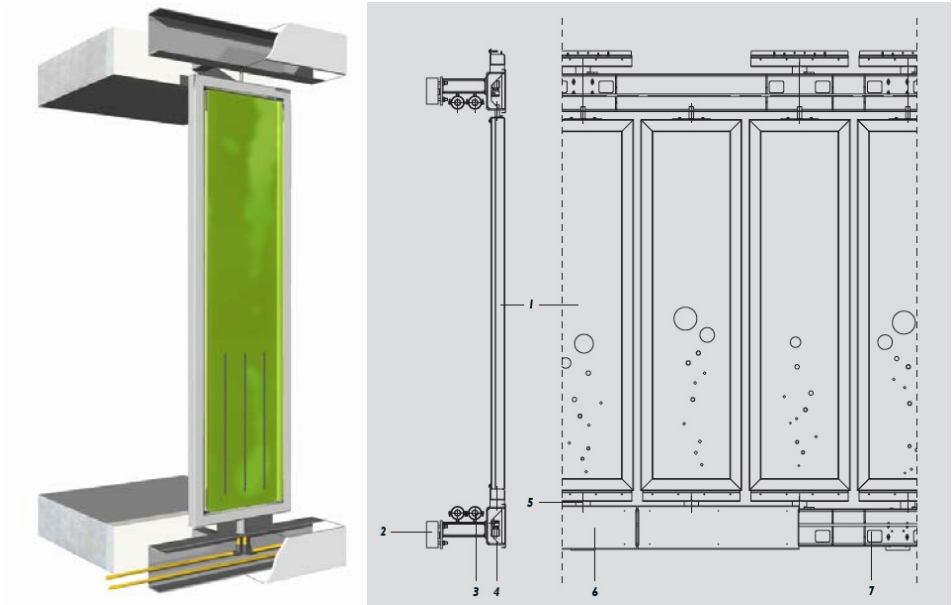
Bina cephelerinde fotobiyoreaktörlerin uygulanmasıyla ilgili ilk örnek Almanya, Hamburg'ta uygulanmıştır. Dünyanın ilk biyo adaptif cephe örneğine sahip olan bina, Avusturyalı mimarlar Splitterwerk ve Graz tarafından tasarlanmıştır. Arup mühendislik firması ile beraber, Smart Material House yarışması için bu binayı tasarlayıp, birincilik ödülünü kazanmışlardır. Yapı 2013 yılında Uluslararası Bina Sergisi kapsamında, Hamburg'da inşa edilmiştir (Şekil 4.2) (Wurm, 2013).

Konut yapısı, ikinci bir deri özelliğindeki fotobiyoreaktör cephe tasarımıyla kaplanmıştır. Bu şekilde iç ve dış ortam arasında bir tampon bölge oluşmuştur. Sistem binaya hem güneş ısı enerjisi hem de biyoenerji sağlamaktadır ve binanın enerji ihtiyacına katkı sağlamıştır (Wurm, 2013).



Şekil 4.2 Hamburg'da inşa edilen biyo adaptif cepheli bina (Research and practice: the bio-responsive façade, 2013).

Yarışma tasarım sürecinde çeşitli denemelerde farklı fotobiyoreaktör uygulamaları araştırılmıştır. Bu noktada, düz-panel fotobiyoreaktördeki biyokütle güneş ışığını %10 verimlilik ile dönüştürmüştür. Düz-panel fotobiyoreaktörler sadece tübüler fotobiyoreaktörlerden daha verimli olmakla kalmamış, ayrıca daha az bakım ve onarım gerektirmişlerdir (Şekil 4.3) (Wurm, 2013).



Şekil 4.3 Binanın cephesindeki düz-panel fotobiyoreaktörün yapısı, kesiti ve görünüşü (Research and practice: the bio-responsive façade, 2013).

Net yüzey alanı 200 m^2 olan cephe sisteminin 129 fotobiyoreaktör elemanından oluşan pilot proje, 2013 ilkbaharında, 4 katlı bir konutta hayata geçirilmiştir. Sistem için güneybatı ve güneydoğu cephelerine ikincil bir yapı inşa edilmiştir. Her bir düz-panel 2,5 m yüksekliğinde, 0,7 m genişliğindedir (Şekil 4.4). Bina enerji yönetim sistemi, besin desteğini kontrol etmekte, algleri toplamakta, iç ve dış çevrim sistemini düzenlemekte ve bir ara yüz yardımıyla bina servis sistemini denetlemektedir. Bu ara yüz yardımıyla alglerin içeriği ve ortamın sıcaklık derecesi izlenmektedir. Güneş etkisiyle ortaya çıkan ısı dağıtılmazsa sistem aşırı ısınabilmektedir. Sabit üretim oranında sıcaklık 40°C'nin altında olmalıdır. Aşırı ısı, ısı değiştiriciler ile sistemden dışarı atılmaktadır. Atık ısı ya doğrudan sıcak su tedariği için kullanılmaktadır ya da jeotermal kuyularla zeminde depolanmaktadır (Wurm, 2013).



Şekil 4.4 Bina cephesindeki ikincil fotobiyoreaktör yapısının yakından görünümü (Research and practice: the bio-responsive façade, 2013).

Alg biyokütlesi cephedeki her metrekare için, 15 gr olarak tahmin edilmektedir. Sistemde üretilen biyoenerji, düzenli aralıklarla biyogaz üretim makinesinin yakınında toplanmakta ve depolanmaktadır (Şekil 4.5) (Wurm, 2013). Bu binanın fotobiyoreaktör cephelerinin her yıl 30 kWh/m² biyoenerji ve 150 kWh/m² ısı enerjisi üreteceği tahmin edilmektedir. Bütün cepheler her yıl binanın CO_2 salımını 6 ton azaltmaktadır ve 2,5 ton CO_2 biyokütle tarafından emilmektedir (Arup, 2013). Bu

fotobiyoreaktör sisteminde, ışığın biyoenerjiye dönüşüm verimliliği %10, ısıya dönüşüm verimliliği ise %38'dir (Arup, 2013).

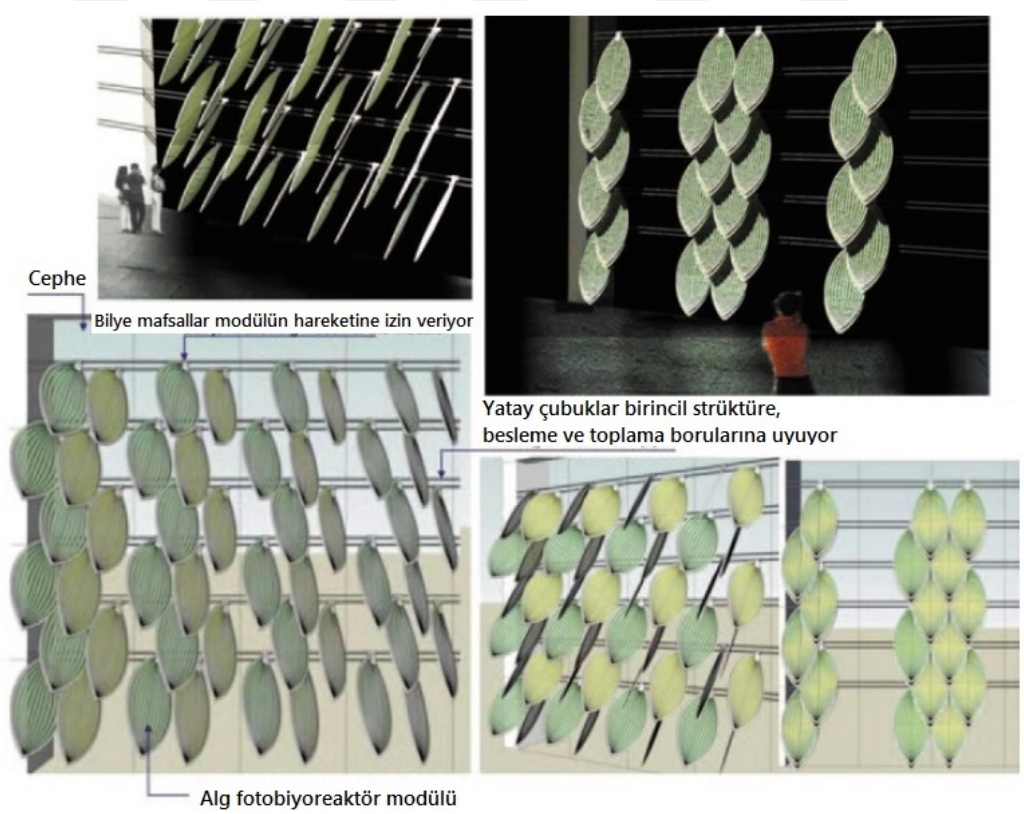


Şekil 4.5 Üretilen biyoenerjinin toplandığı biyogaz üretim makinesi (Research and practice: the bio-responsive façade, 2013).

4.2 VIDA-BIOCAS, Algleri Kullanarak Kendine Yeten Şehir

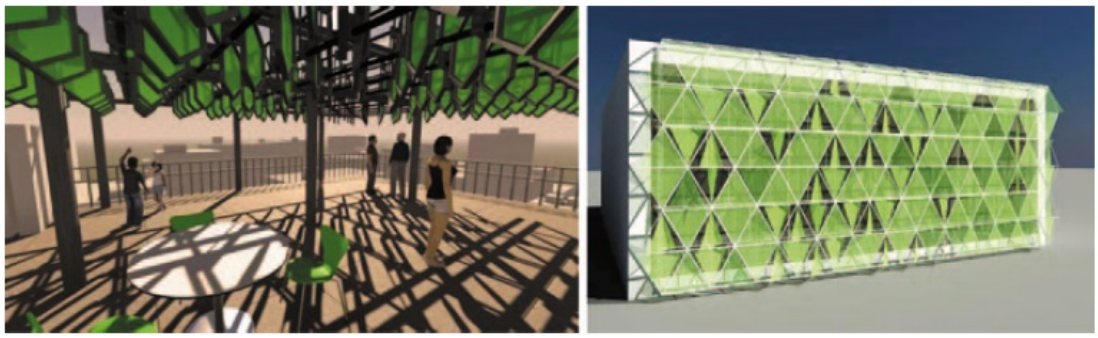
İnşa tiplerinin (yerleşim, sanayi vb.) çeşitliliği, her tür için özel planlama hedefleri gerektirmektedir. Ama fotobiyoreaktörler günden güne kullanıma müdahale etmeden, konut ya da sanayi binalarının pencere yüzeyleriyle bütünleşmeye uygundurlar. Sanayi kesimindeki binaların tipik özelliği, zarf yapının kullanımına daha yoğun izin veren büyük hangarlar ve depolar içermeleridir. Varsayıma dayalı bir çalışmada, 400 hektarlık bir alanda, yerleşim ve sanayi kesiminin her biri alanın %33'ünde, diğer %33'lük kısmının %20'sinde halk alanları ve yeşil alanlar, %13'ünde cadde, sokak ve yol ağları kentsel dağılım göstermektedir. Eğer varolan fotobiyoreaktör ürün teknolojisi kullanılarak en uygun verim olan 0,02 kW/m^2 elde edilebilseydi, her gün 100 m^2 cepheden, toplamda 12 kW/s enerji elde edilebilirdi. Bu verim cephenin ve çatı yüzeyinin kullanımına bağlı olarak değişebilirdi (Cervera-Sarda, Gomez-Pioz, Ruiz-de-Elvira, 2014).

İspanyol Sanayi Bakanlığı'nın, CENIT 2010 VIDA-BIOCAS "Algleri Kullanarak Kendine Yeten Şehirler" projesinde 13 firma ve 25 araştırma kurumu bir arada çalışmıştır. Bunlardan biri olan Cerveza&Pioz mimarlık firması, mimariyle ve şehirle fotobiyoreaktörlerin bütünleşmesi ile ilgili çığır açan fikirler geliştirmiştir. Bu proje çerçevesinde yapılan çalışmalarda, biyo-inşaya bağlı biyonik araştırmalar, bir kelebeğin kanadındaki ipeksi pullardan esinlenilen bir fotobiyoreaktör tasarlanmasıyla sonuçlanmıştır. Kelebeklerin kanat yüzeyleri kiremitler gibi dizilmiş, çok ince ipeksi pullar ile şekillenmektedir. Bu pullar sarkık ya da çıkık olarak kelebeğin kanat yapısının sonuna kenetlenmektedirler. Fotobiyoreaktörün tasarım benzetmesindeki bu düzenleme sayesinde her yüzeyi veya cepheyi kaplayabilen bir yapı geliştirilmiştir. Bir seri yatay çubuk, alg birimlerini birlikte tutan birincil yapıyı oluşturmaktadır. Bu birimlerin asma parçaları eklemlidir. Böylece bu birimler kullanıcı isteğine ya da tasarıma uygun, bakım ve tamir için istenen şekilde konumlandırılabilmektedirler. Birimlerdeki alg kültürü tübüler ya da çift cam arasında yer alabilmektedir (Şekil 4.6) (Cervera-Sarda ve diğer., 2014).



Şekil 4.6 Kelebek kanadından esinlenilerek tasarlanan fotobiyoreaktör birimleri (Cervera-Sarda ve diğer., 2014).

Cepheler ve çatılar için farklı tasarımlarla, hem algal kültür için bir mekan yaratılmakta hem de pullar panjur gibi gölgeleme yaratmakta ve güneş ışınım etkisini azaltmakta kullanılabilmektedirler (Şekil 4.7) (Cervera-Sarda ve diğer., 2014).



Şekil 4.7 Kelebek pullarının çatılarda ve cephelerde diğer kullanımları (Cervera-Sarda ve diğer., 2014).

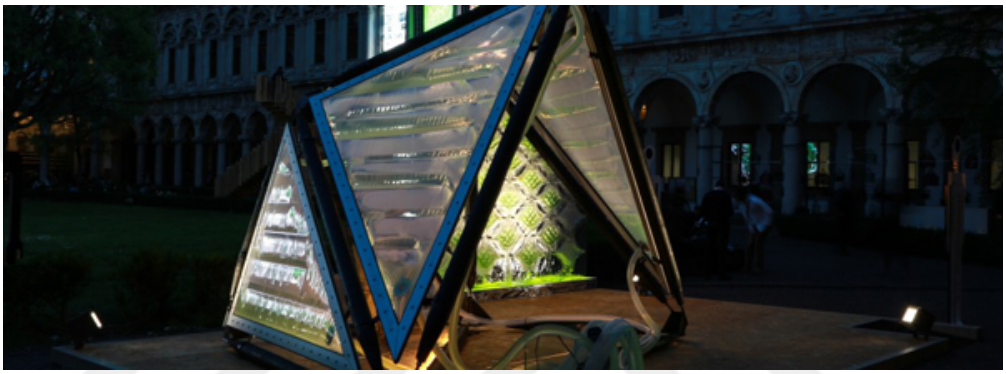
4.3 Alg Cephesi ve Tentesi, Cesare Griffa ve ecoLogicStudio

Fotobiyoreaktörlerin ve alglerin kentsel ve mimari anlamda kullanımına uygun olarak geniş bir alanda tasarım çalışmaları devam etmektedir. Bunlardan biri de Carlo Ratti Associati tarafından geliştirilen Future Food District projesi kapsamındaki alg tentesi ve cephesi üretimidir. İtalya'nın Milano şehrindeki EXPO 2015'te, Expo alanının merkez geçiş yolunda sergilenmek için geliştirilmiştir. Bu pavyonun cepheleri ve tentesi, yeni bir alg duvar sisteminden yararlanmaktadır. Bu sistem mimar Cesare Griffa ve ecoLogicStudio tarafından tasarlanmıştır. İki çeşit prototip, cephenin ve tentenin gerçek ölçeğinde modellenmiştir (Şekil 4.8) (Bojovic, 2014).



Şekil 4.8 Milano'daki EXPO 2015 için yapılan alg cephesi ve tentesi prototipleri (Griffa, 2014).

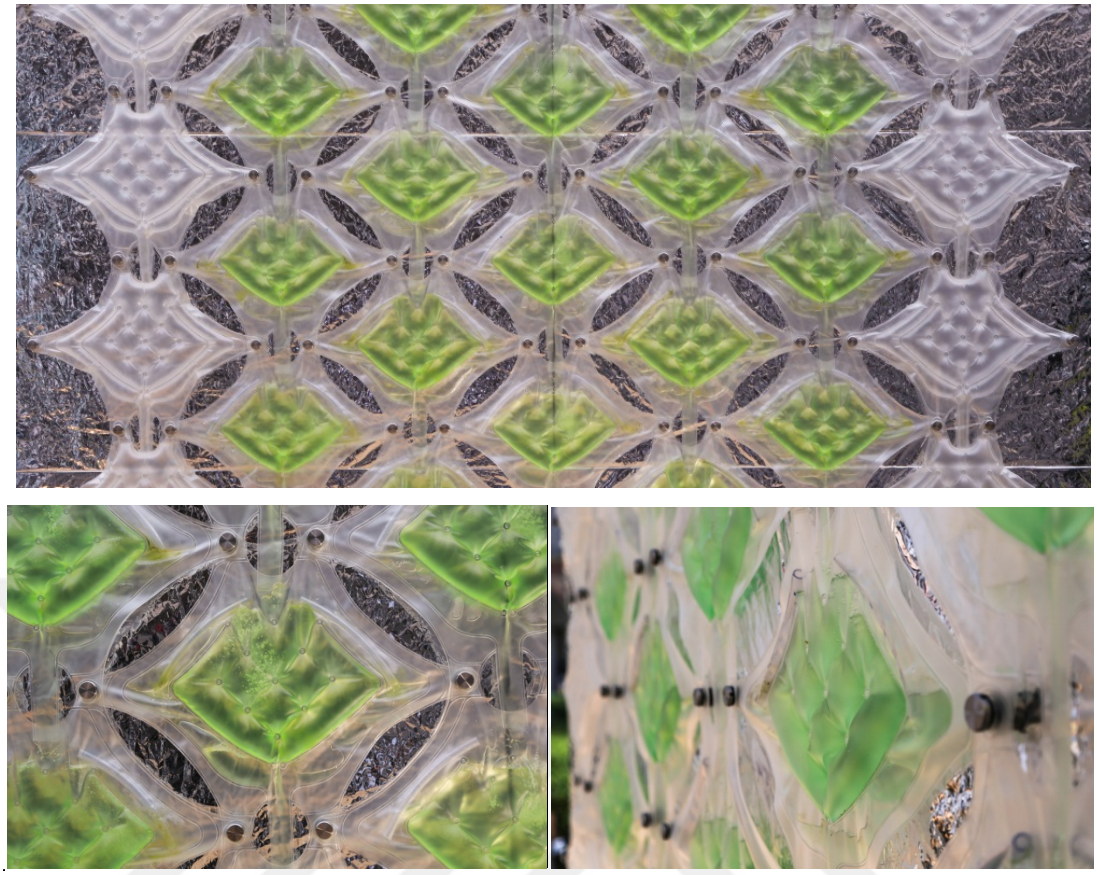
Bu prototiplerin çalışma ilkeleri, alglerin sıradışı özelliklerini temel almaktadır. Algler büyük ağaçlarla ve çayırlarla karşılaştırıldığında, fotosentez açısından 10 kat daha verimlidirler. EXPO Milano 2015 için geliştirilen alg cephesi ve tentesi, insan yapımı bir ekoloji geliştirmekte, kentsel tarım ve mimari ile bütünleşen kaplama elemanı olarak alglerin kullanımını keşfetmektedir. Algler sağlıklı ve yaşanabilir bir dünya yaratmak için önemli ipuçları sunmaktadırlar. Algler, şehirlerde geleceğe yönelik enerji ve besin üretim sistemleri olarak kullanılabilmektedirler (Şekil 4.9) (Bojovic, 2014).



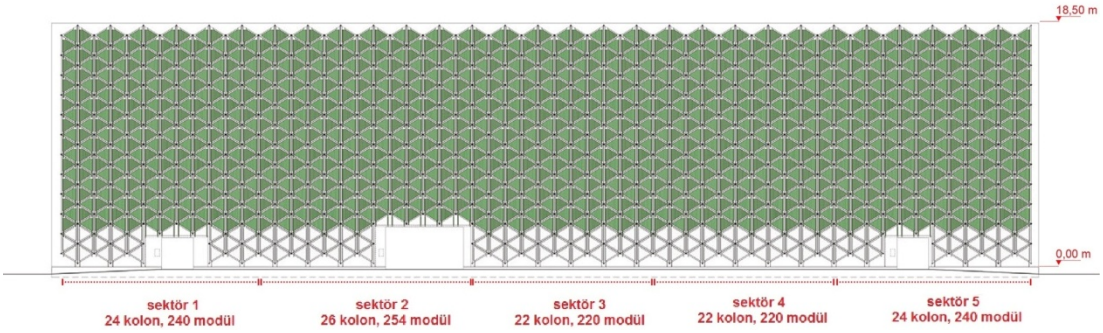
Şekil 4.9 Milano'daki EXPO 2015 için yapılan alg cephesi ve tentesi prototipleri (Bojovic, 2014).

Alg cephesi, mimar Cesare Griffa'nın "WaterLilly 2.0" sistemini temel almaktadır. Bu prototip, Milano'daki EXPO 2015 için özel olarak geliştirilmiştir. "WaterLilly 2.0" alglere dikey üretim sahası sağlamak için bir yapı kabuğu gibi uygulanmaktadır. Buradaki amaç, şehirlerin yeşil sistemiyle bütünleşen, alglerin CO_2 emmesine ve O_2 üretmesine yardım eden, binaların ikinci bir kabuğu olarak hareket edebilen, pasif soğutmayı destekleyen ve cephenin gölgelenmesini artıran bir sistem kurmaktır (Şekil 4.10) (Bojovic, 2014).

Cesare Griffa, geliştirdiği "WaterLilly 2.0" sistemini daha büyük ölçekte denemeye karar vermiştir. İnşa edilmemiş bu tasarım, belki de şimdiye kadar tasarlanmış en büyük fotobiyoreaktör olacaktı. Bu cephe 75 m eninde, 18 m uzunluğunda, yaklaşık 1350 m^2 alana sahiptir (Şekil 4.11) (Griffa, 2015).



Şekil 4.10 “WaterLilly 2.0” sistemiyle alg cephesi tasarımı (Griffa, 2014).

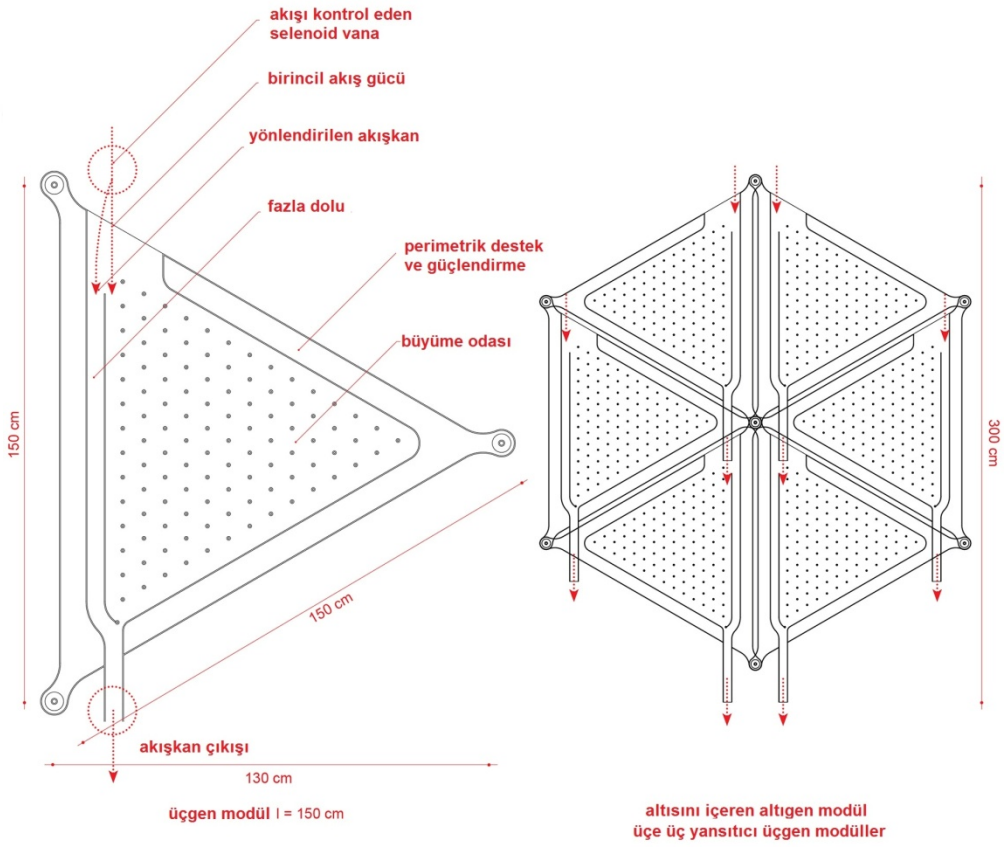


Şekil 4.11 Cesare Griffa’nın “WaterLilly 2.0” sisteminden yola çıkarak daha büyük ölçekte tasarladığı cephe sistemi (Griffa, 2015).

Cephe sistemi iki kısımdan oluşmaktadır. Açıklıklar hariç, 1348 m^2 olan etken yüzeyde, alg yetiştirilmekte, alglerin büyümesi ve etkileşimli ışıklandırma sistemi için donanıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu etken cephe, yan yana 118 sırada düzenlenen toplam 1174 etken alg birimini içermektedir. Bu bölümler zeminden çatıya, +18,50 m’ye kadar bütün pavyon yüzeyini örtebilecektir. Pompaları ve diğer alg donanımı bodrumdaki teknik bir mekanda çözülecektir (Griffa, 2015).

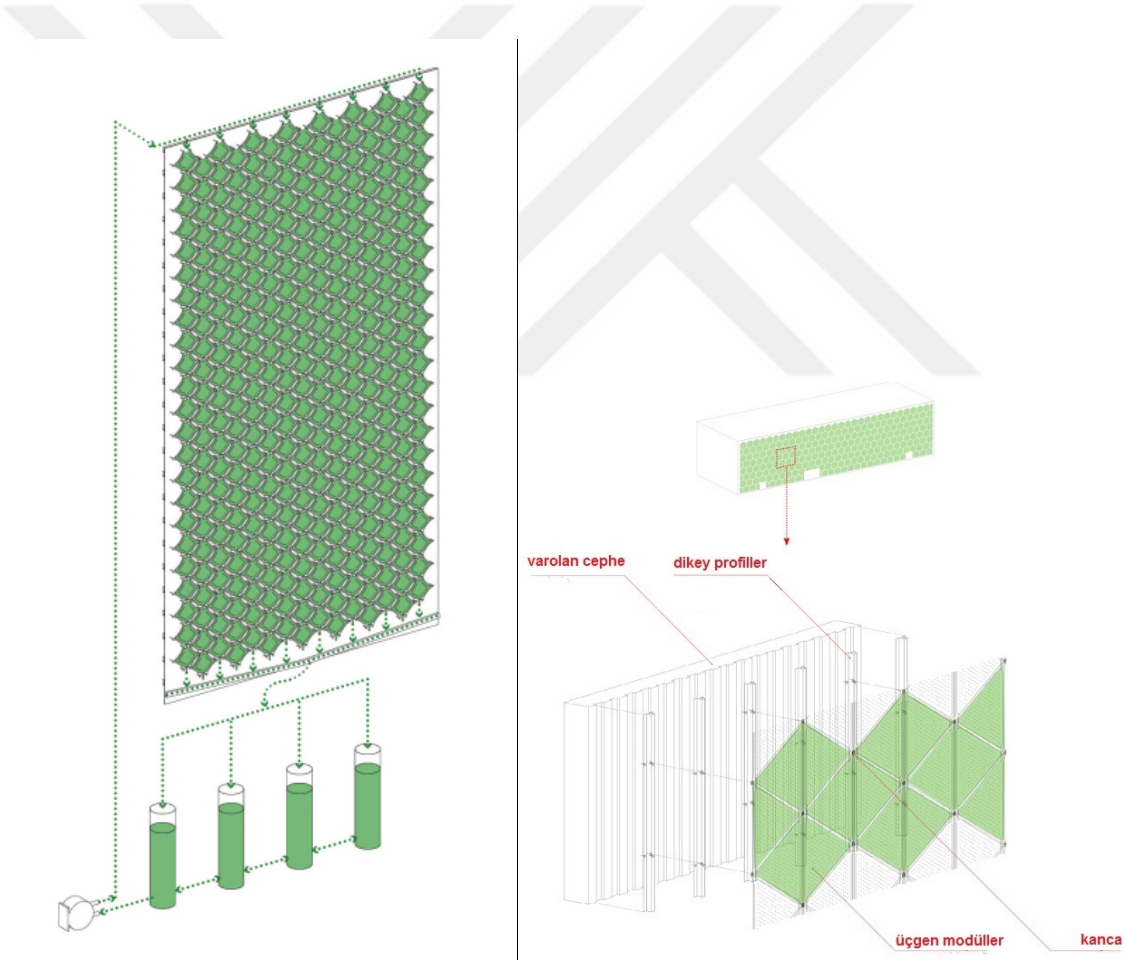
Açıklıklar hariç, 2554 m^2 alandan oluşan edilgen yüzey ise, kaplama sistemidir. Bu sistem alg büyümesi için gereken donanımın dışında, mimari tasarımın devamlılığını sağlamak için, gerekli elemanlardan oluşmakta ve etken yüzeyin parçalarını temel almaktadır (Griffa, 2015).

Alglerin etken olduğu birimler sistemin temel birimleridir. Bu birimler, şeffaf plastik filmden "büyüme odaları"dır. Alg kültürünün akışkan dinamiğine uygun olması için özel şekilli tasarlanmıştır. Birimler güçlendirilmiş çevre elemanı ve büyüme odasından gerçekleşebilecek taşmaları engelleyecek bir yan kanaldan oluşmaktadır. Alg kültürü odanın üstündeki açıklıktan sağlanmaktadır. Alg akışı, odanın altındaki kuyruk kısmından aşağıdaki odaya devam etmekte ve aşağıdaki birimin dolmasını sağlamaktadır. Her birim hacimsel olarak 10-15 lt alg kültürü içermektedir. Edilgen kısım ise strüktüre kaynaklanmakta ve şişme sistem, kenarındaki vana yardımıyla hava ile doldurulmaktadır (Şekil 4.12) (Griffa, 2015).



Şekil 4.12 Alglerin etken olduğu birimler, şeffaf plastik filmden büyüme odaları (Griffa, 2015).

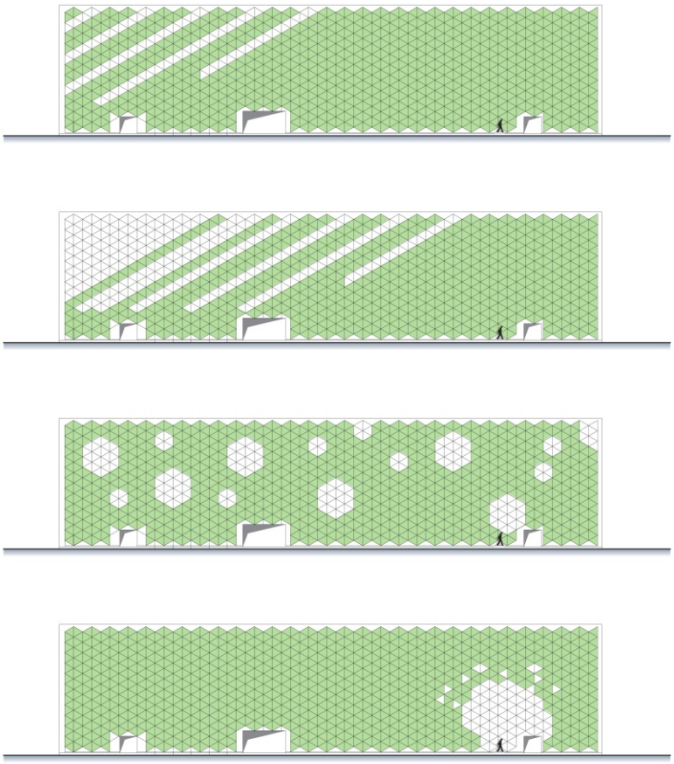
Cephe sistemi, işletme sırasında hidrolik ve mekanik sistemin birbirinden bağımsız çalıştığı beş bölgeye ayrılmaktadır. Bu cephe, akıllı yönetim sistemi ile yönetilmekte ve sistemde oluşabilecek teknik arızalara ya da olağandışı iklimsel değişimlerde ortaya çıkabilecek her durumla başedebilmektedir. Sistemde, döngü halindeki alg kültürü bodrumdaki beş tankta toplanmaktadır. Bu tanklar bakım işlemleri için denetlenebilmektedirler. Her tankın boyutu yaklaşık olarak 1x0,3x15 m, hacmi 4.000 lt olup, toplamda bütün cephe için 20.000 lt'dir. Alg kültürü, tanklardan yukarıya, zeminin +18,5 m üstüne pompalanmaktadır. Sistemdeki alg döngüsü yarı kapalıdır ve buharlaşmayı dengelemek için su tedariği gerekmektedir (Şekil 4.13) (Griffa, 2015).



Şekil 4.13 Cephe sisteminin işletim şeması (Griffa, 2015).

Sistemdeki alg akışı programlanabilmektedir. Sistem, hareket algılayıcılarıyla donatılıp, insan hareketlerine göre cepheyle insanlar arasında bir etkileşim yaratacak şekilde, cephede dalga hareketi veya dolu-boş gibi çeşitli etkiler oluşturmak amacıyla

programlanabilmektedir. Ancak, insan hareketine ani tepki verememektedir çünkü büyüme odalarının bu tepkiyi verebilmesi için zaman gerekmektedir (Şekil 4.14) (Griffa, 2015).

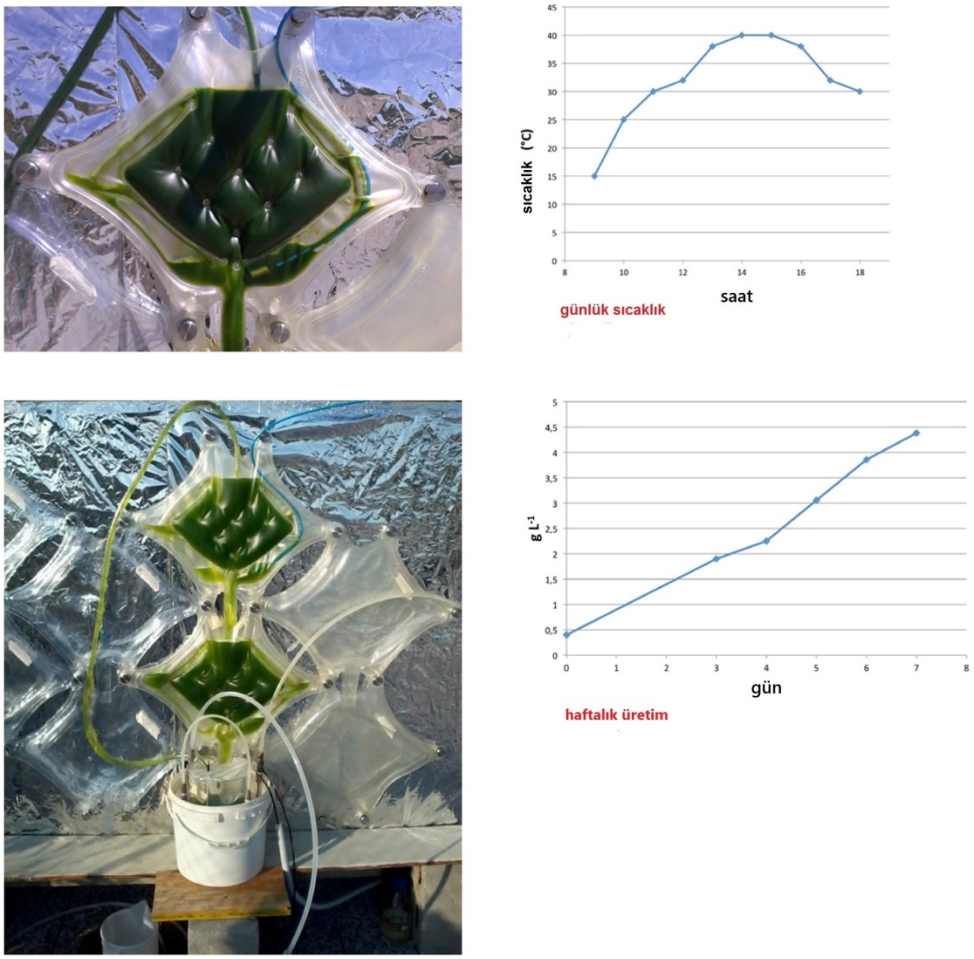


Şekil 4.14 Hareket algılayıcılarıyla donatılan cephe sisteminin insan hareketlerine göre verdiği etkiler (Griffa, 2015).

Etken cephe programlanabilir LED ışık sistemiyle donatılmaktadır. Bu ışık sistemi, cepheyi büyük bir biyo-ekran yapmaktadır. Ekranda farklı canlandırma, görüntü ve yazıların "basılması" mümkün olabilmektedir. Sistem, insan ile etkileşimi kolaylaştırmak için hareket algılayıcılarıyla donatılabilmektedir (Griffa, 2015).

Bütün sistemin işlemesi, alglerin akışı temellidir. Yaz sıcaklığına dirençli yerel algler, bu akış tabanlı sistem ile uygun sıcaklıkta tutulmaktadır. Uygun sıcaklık dengesinin sağlanmasında sistemdeki akış hızı önemlidir. Tasarım aşamasında, sistemin günde litre başına 0,8 gr gibi yüksek bir üretim hacmine sahip olacağı öngürülmektedir. Büyüme odalarında kullanılan plastik malzeme, pH'da önemli

değişiklikler yaratmamaktadır. Buharlaşma günlük 100 ml olmaktadır. Biyokütlenin duvarlara yapışması göreceli olarak sınırlıdır (Şekil 4.15) (Griffa, 2015).



Şekil 4.15 Uygun sıcaklık dengesi ve günlük biyokütle üretim hacmi (Griffa, 2015).

Alg tentesi ise, ecoLogicStudio'nun "Hortus" sistemini temel almaktadır. Birebir ölçekli bu prototip, dünyanın ilk biyo-dijital tentesi, alg kültürünü ve gerçek zamanlı dijital yetiştirmeyi mimari sistem üzerinde bütünleştirmektedir. Alglerin barındırdıkları gücü ortaya çıkarmak için, 4 katmanlı bir ETFE kaplama sistemi tasarlanmıştır (Şekil 4.16). Bu sistemde enerji, su ve CO_2 akışı gerçek zamanlı olarak denetlenip düzenlenmekte, havanın durumuna ve ziyaretçilerin hareketine göre cevap vermektedir. Tamamlandığında bu alg tentesi ile, 4 hektar ormanlık alanın ürettiğine eş O_2 ve her gün, %60'ı doğal proteinden oluşan 150 kg'ın üstünde biyokütle üretileceği düşünülmektedir (Bojovic, 2014).



Şekil 4.16 “Hortus” sistemiyle alg tentesi tasarımı (Bojovic, 2014).

Şekil 4.17’de Milano’daki EXPO 2015’te inşa edilen alg tentesi verilmiştir. ecoLogicStudio’nun “Hortus” sistemiyle geliştirdiği bu tente sayesinde, algler her gün 4 kg CO_2’i atmosferden uzaklaştırmaktadırlar ve 2 kg O_2’i fotosentetik çatısından serbest bırakmaktadır. Üretilen O_2, her gün 3 yetişkinin nefes almasına yetmektedir. Tentedeki 27 fotobiyoreaktörler, güneş ışığını yakalamakta ve alglerin büyümesini sağlamaktadır, bir yandan da gölgeleme yaratmaktadır. Sistemde her gün 100 gr alg üretilmektedir. Aynı zamanda alglerden 12 insanın günlük ihtiyacına eş olan protein üretilmektedir, üretilen protein günlük 2 kg etten alınan protein miktarına eşittir. İnsanları ve algleri serinletmek için 29 °C’de, buharlaşarak soğutma sistemi devreye girmektedir. Sistemde yetiştirilen algler ayda iki kere hasat edilmektedir. Alglerin akışını gözlemleyebilmek için, ziyaretçiler tarafından bir düğmeye basılarak sistem harekete geçirilmektedir.







Şekil 4.17 Milano'daki EXPO 2015 için geliştirilen alg tentesinin uygulanan tasarımı (kişisel iletişim, A.Tokuç, 1 Nisan 2016).

4.4 Algler ve Binalar Arasındaki Yenilikçi Ortak Yaşam, $SymBIO_2$, XTU Mimarlık

XTU Mimarlık, $SymBIO_2$ projesinde algler ve binalar arasındaki bir yenilikçi ortak yaşamı hedefleyen, içinde alg yetiştirilen biyo adaptif cepheler geliştirmiştir (Şekil 4.18). Bu cepheler, alg kültürü ile buna ev sahipliği yapan bina arasındaki ısıl ve kimyasal etkileşimlerden yararlanmaktadır. Projenin hedefi, binanın çevresel niteliğini geliştirmek ve ekonomik alg kültürlerinin üretimi için yeni bir çözüm sunmaktır. Üretken, canlı ve etkin bu yeni üretim cephe, alglere ev sahipliği yapan fotobiyoreaktörler ile donatılmış üretken bir kabuktur. Bu "dikey tarlalar", alg kültürü için hasadın ısıl düzenlemesinde %80 ve su tüketiminde %90 tasarrufla, güneş enerjisini, sağlık, kozmetik ve yiyecek piyasası için yüksek değerli biyokütleye dönüştürmektedir ($SymBIO_2$ biofaçades, b.t).

Bu biyo adaptif cephe, alglerin yaptığı fotosentezle, CO_2'i O_2'e, büyüyen bir ormandan beş kat daha verimli dönüştürmektedir. Yağmur suyunu veya gri suları da temizlemekte kullanılmaktadır. Böylece iklim değişimini azaltmaya yardımcı olmakta ve şehrin önemli, hayati kaynaklarını korumaktadır. Bu cephede, kentsel alg kültürü ortalama 22 °C'de tutulmaktadır. Bu cephe ısıl etkin bir cephedir ve bir yandan binanın ısıl ihtiyacından %50 tasarruf ederken, diğer yandan da kentsel ısı adası etkisini azaltmaktadır ($SymBIO_2$ biofaçades, b.t).



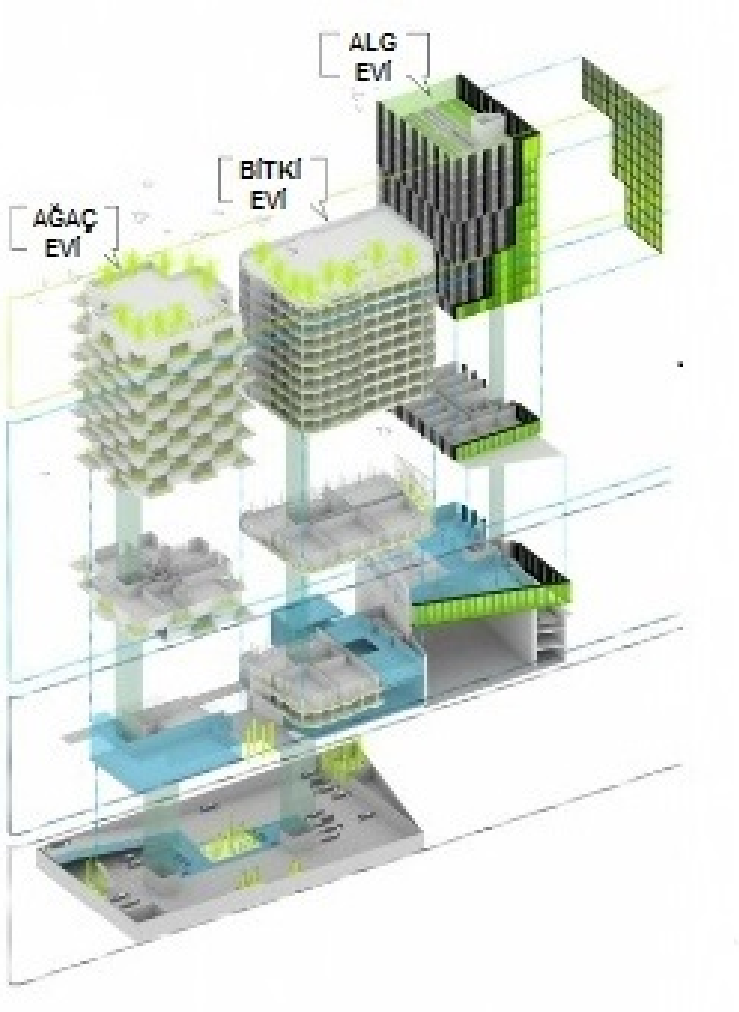
Şekil 4.18 $SymBIO_2$, algler ve binalar arasındaki yenilikçi ortak yaşam ($SymBIO_2$ biofaçades, b.t).

4.4.1 "In Vivo" Yeşil Projesi

BPD Marignan ve XTU Mimarlık, SNI Grubu ve MU Mimarlık'la birlikte hazırladıkları projeyle, Paris Rive Gauche M5A2 kentsel gelişim bölgesi için, Reinventer.Paris kentsel proje yarışmasını kazanmışlardır. "In Vivo" adındaki kazanan proje, şehirler içinde insanlarla doğa arasındaki bütünleşmeyi, sosyal etkileşimi ve açıklığı desteklemek ve bunu başarmak için, daha uygun, daha sürdürülebilir ve esnek bir şehir ortaya çıkarmaya çalışmaktadır (Şekil 4.19). Tasarlanan üç bina, Ağaç Evi, Bitki Evi ve Alg Evi olarak adlandırılmaktadır ve 13.000 m^2 konut alanı, 1.200 m^2 halka açık mekan, 255 m^2 'lik bir kafe ve 2.000 m^2 'den daha fazla yeşillik ve bahçe alanında, öğrencilere ve genç araştırmacılara ev sahipliği yapacaktır (Şekil 4.20) (Santos, 2016).



Şekil 4.19 "In Vivo" yeşil projesi, Alg Evi tasarımı (Santos, 2016).

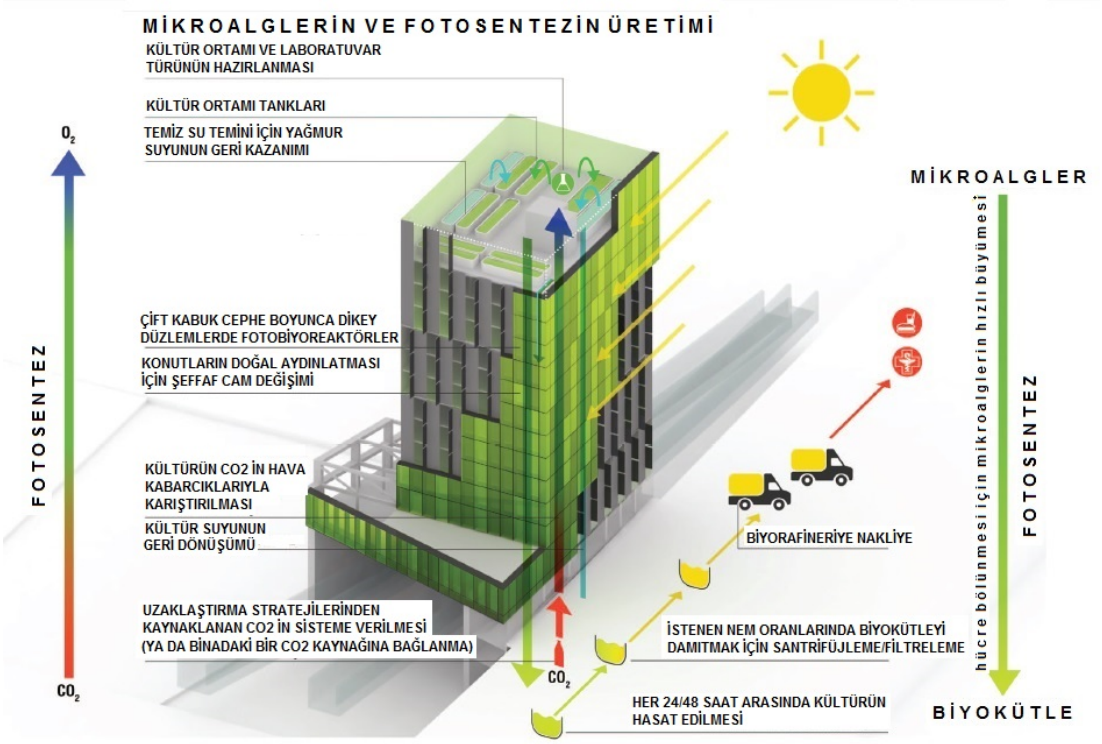


Şekil 4.20 Ağaç Evi, Bitki Evi ve Alg Evi (In Vivo, b.t).

Alg Evi, fotobiyoreaktörlerle oluşturulan biyo adaptif cepheli bir bina olarak nitelendirilmektedir (Şekil 4.21). 900 m^2'lik biyo adaptif cepheye sahip olan binada, bu fotobiyoreaktörlerde tıbbi araştırmalarda kullanılmak üzere alg kültürü üretilecektir. Bu biyo adaptif cepheler, eve ait sıcak suyu ve ısınmayı sağlamak için, fotobiyoalgılayıcılar tarafından toplanan ısının kullanılmasına izin verecektir. Binada sıcak su eldesi ve ısınmanın neden olduğu yıllık enerji tüketimi fotobiyoreaktör sistemi sayesinde Paris İklim Değişikliği Planı çerçevesinde önerilen, metrekare başına 48 kW/s'in altına düşürecektir (Şekil 4.22) (Santos, 2016).



Şekil 4.21 Alg Evi, fotobiyoreaktörlerle oluşturulan biyo adaptif cepheli bina (Santos, 2016).



Şekil 4.22 Alg Evi'ndeki fotobiyoreaktörlerden biyokütle üretimi (In Vivo, b.t).

Ayrıca bu tasarım, Michel Serres Merkezi, Yaşayan Çatılar, Kent Bahçeleri, Babil Kollektifi gibi merkezlerin rehberliğinde, binalarda yaşayan her sanatçı, girişimci, araştırmacının çalışmalara katkı koyabileceği 1.000 m^2 'lik bir laboratuvar içerecektir (Santos, 2016).

4.4.2 AlgoNOMAD Pavyonu, Geleceğin Paris'i

XTU Mimarlık tarafından yaratılan özgün mimari nesne AlgoNOMAD, Aralık 2015'te Paris'te yapılacak iklim değişikliği görüşmelerinden önce Paris Belediyesi'nin karşısındaki meydanda sergilenmiştir. Bu pavyonun sergilenmesinin amacı, kentsel gelecek için halkın dikkatini biyolojik fotosenteze çekmektir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 AlgoNOMAD ve kurulum aşaması (SymBIO_2 biofaçades, b.t).

Algler AlgoNOMAD'ın cephelerinde yetişmektedir. Bu cepheler petrokimya sanayinde kullanılan moleküller yerine kullanılabilecek ürün üretmekle beraber, kirli suları temizlemektedir. İleride uçaklar alglerden üretilen biyoyakıtla uçacaktır. Şehirde yaşayan insanlar, doğal alanları işgal etmeden kentlerde yetişen algler ile beslenecektir. Akıllı bina cepheleriyle alg kültürlerinin bütünleşmesi, şaşırtıcı,

kullanılmamış, ancak gelecekte gerçekleşmesi mümkün bir durumdur, bu sayede şehirleri de daha sürdürülebilir yapacaktır. AlgoNOMAD dört fotobiyoreaktörden oluşmaktadır. İnsanlar bu pavyonun içine girebilmekte, fotobiyoreaktörleri içeriden ve dışarıdan deneyimleyebilmektedir (Şekil 4.24). Sanayisel yenilik anlamında ve laboratuvar aşamasındaki çalışmalar devam etmektedir ($SymBIO_2$ biofaçades, b.t).



Şekil 4.24 AlgoNOMAD'ın içeriden ve dışarıdan görünüşleri ($SymBIO_2$ biofaçades, b.t).

4.5 "Sıfır Süreç: İyileştirme Çözümü" Binası Kavramsal Tasarımı, HOK ve Vanderweil Mühendislik ve Mimarlık

Yeşil bir bina söz konusu olduğunda, en kolayı tasarıma sıfırdan başlamaktır ama aslında varolan binalarda enerji verimliliğinin iyileştirilmesi gerektirmektedir. Metropol Magazin'in her yıl düzenlediği Gelecek Nesil Tasarım Yarışması, 2011 yılında, 10 yıl veya daha az tecrübeye sahip olup, gelişmekte olan tasarımcılardan bu konuyu çözmeye çalışmalarını istemiştir. Yarışmaya katılan ekipler, Amerika'nın Los Angeles şehrinde bulunan, 1960'lar döneminde inşa edilmiş, U.S. General Services Administration (GSA) ofis binasının, net sıfır bina olarak güçlendirilip tasarlanmasıyla görevlendirilmiştir. Bu sınıflandırma ekiplere, zamanında federal hükümetlere, 2020'den önce sera gazlarının salınımını daha düşük, %30 civarında azaltmakla görevlendirildiği için verilmiştir. 300 kuzey Los Angeles Caddesi'nde bulunan bu özel bina, Welton Becket, Albert C. Martin ve Paul R. Williams tarafından tasarlanmıştır. 8 katlı çelik çerçeve yapı, tek cam ve beton panellerle

örtülmüştür (Şekil 4.25). İç koridorlar doğal ışıktan yoksundur, çalışmak için çevre dostu ve hoş bir yer değildir. GSA'nın 33.630.900 m^2'lik ofis alanına sahip, 1960'lardan kalma bu binayı, 2020'den önce iyileştirmesi gerekmektedir (Bernard, 2011).



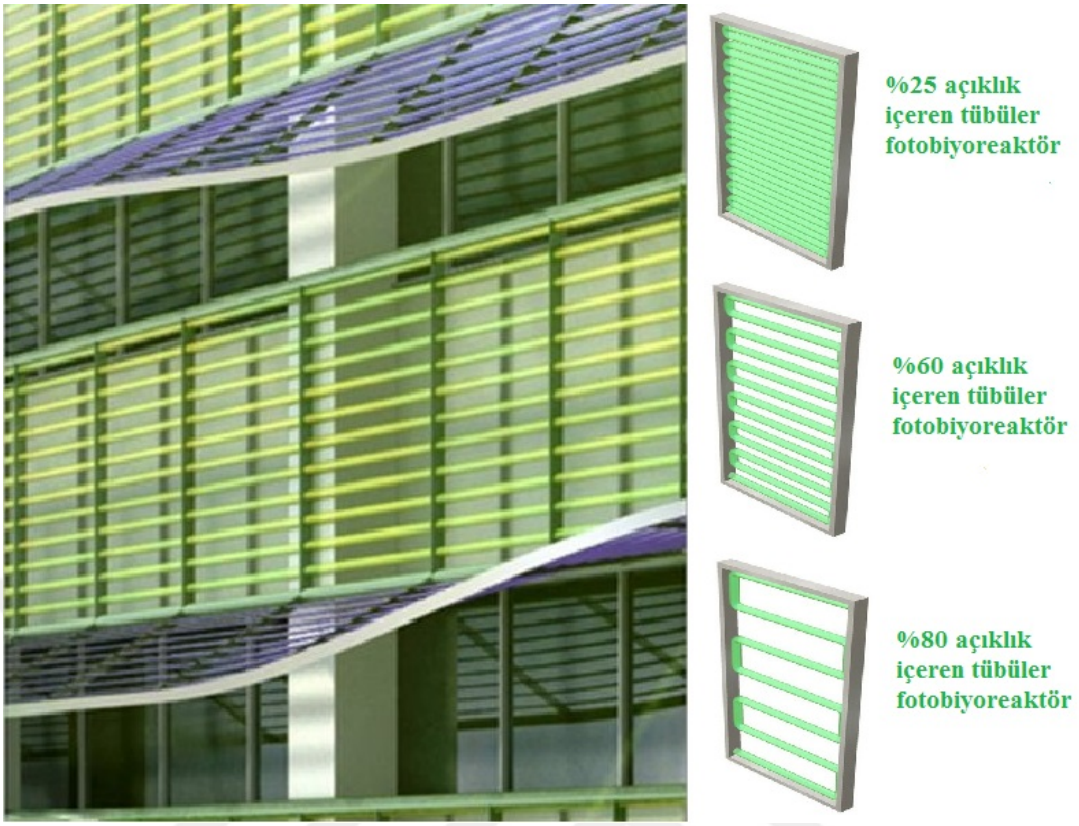
Şekil 4.25 Los Angeles'ta, 1960'larda inşa edilmiş, U.S. General Services Administration (GSA) ofis binası (Hales, 2011).

Gelecek Nesil Tasarım Yarışması 2011'i kazanan yarışmacı, "Sıfır Süreç: İyileştirme Çözümü" bir iyileştirilmiş tasarım süreci olarak adlandırılan proje olmuştur (Şekil 4.26). Bu proje HOK ve Vanderweil'in mühendislerinden ve mimarlarından oluşan 15 kişilik bir ekip tarafından, 70.600 m^2'lik bir alanda tasarlanmıştır. HOK ve Vanderweil, binanın bütün enerjisini %84 oranında azaltmayı başarmaktadır, geriye kalan %16'sı da arazide üretilmektedir. Bu tasarım böylece sıfır karbon bir bina olabilmektedir, ayrıca Living Building Challenge 2.0.'ın toplumsal bilinç ölçütlerini karşılamaktadır (Bernard, 2011).



Şekil 4.26 “Sıfır Süreç: İyileştirme Çözümü” binası kavramsal tasarımı (Bernard, 2011).

Binanın iyileştirilmesi, dışarıdan yeşil olarak yapılmıştır. Yarışmayı kazanan ekibe göre böyle bir tasarım mimaride ilktir. HOK firması daha önce de pek çok kere yenilikçi, biyolojiden ilham alan The Biomimicry Group ile iş birliği yapmıştır. Bu nedenle HOK’un ilham için doğaya bakması yeni bir yaklaşım değildir. Doğayı taklit eden tasarım, binaya gereken gücü sağlamak için alglerden üretilen enerjiyi kullanmaktadır. Binanın cephesinde, güneş alma ve gölgeleme için yapılan incelemelere dayanarak, %25, %60 ve %80 oranında açıklık içeren, 2.322,5 m^2 alan kaplayan tübüler fotobiyoreaktörler algler için büyüme alanı olmaktadır (Şekil 4.27). Algler besinlerini binanın atık suyundan almaktadır ve binanın dışını örten cam tüplerde yaşayan algler kirli suyu süzmektedir. Bu tasarlanan sistem, güneş ışığını emmektedir ve algler lipitleri üretmektedir, böylece üretilen lipitler alanda biyoyakıta dönüştürülebilmektedir. Ayrıca algler ofis binasının yakınında bulunan Santa Ana Çevre yolundan salınan CO_2’i fotosentez süreciyle emmektedir ve O_2 üretmektedir. Aynı zamanda bu tübüler sistem, iç mekandaki ofisler için gölgeleme sağlamaktadır ve fotobiyoreaktörler binayı yaşayan, canlı bir varlığa dönüştürmektedir. Bu fotobiyoreaktör sistemi, yenilenen ofis binasının enerji ihtiyacının %9’unu sağlamaktadır (Şekil 4.28) (Bernard, 2011; Algae powers design of net zero energy building retrofit, b.t).

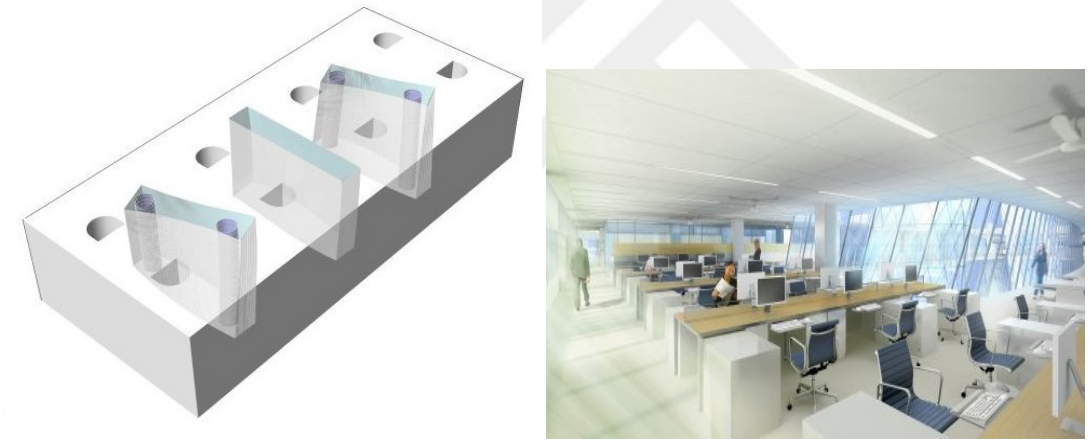


Şekil 4.27 %25, %60 ve %80 oranında açıklık içeren, 2.322,5 m^2 alan kaplayan tübüler fotobiyoreaktörler (Algae powers design of net zero energy building retrofit, b.t).



Şekil 4.28 Tübüler fotobiyoreaktörlerin bina cephesinde uygulanması (Bernard, 2011).

Ayrıca tasarım ekibi kanıtlanmış enerji korunumu ve yenilenebilir stratejileri geliştirmek için çeşitli çözümler bulmuştur. Yeni avlular ve ışık kuyuları çalışma alanlarındaki doğal ışık eksikliğini azaltmaktadır. 3 büyük avlu ve 8 ışık kuyusuyla penceresiz iç mekan parçalara ayrılmaktadır, böylece ofislerin %100'üne gün ışığı getirilmektedir (Şekil 4.29). Yapay ışıklandırma, binanın enerji yükünün dörtte birini tüketmektedir. Bu açıklıklar aynı zamanda doğal havalandırmayı da sağlamaktadır. Binanın yeni cephesi 3.441,5 m^2'lik fotovoltaik filmle kaplanmaktadır. Çatıda 2.949,9 m^2'lik alanı kaplayan güneş toplayıcıları sıralanmaktadır, bu toplayıcılar ile ısıtılan su binanın döşemesinden geçirilerek binayı ısıtmada kullanılmaktadır. "Faz değişim malzemeleri" tavanda yalıtımı amaçlı kullanılmaktadır. Bulut bilişim sistemi de ısı üreten bilgisayar donanımının yerini almaktadır (Bernard, 2011; Algae powers design of net zero energy building retrofit, b.t).



Şekil 4.29 3 büyük avlu ve 8 ışık kuyusuyla ofislerin aydınlatılması (Hales, 2011).

HOK ve Vanderweil ekibi kazandıkları 10.000 dolarlık ödülü daha çok araştırma için hedeflenen yenilenebilir enerji teknolojilerini geliştirmeye tekrar yatıracaktır ve bir gün bu sistem kamu binaları ve diğer bina çeşitlerini iyileştirmek için uygulanabilecektir (Şekil 4.30) (Bernard, 2011; Algae powers design of net zero energy building retrofit, b.t).



Şekil 4.30 “Sıfır Süreç: İyileştirme Çözümü” binası perspektif görünümü (Bernard, 2011).

4.6 Ennesys ve OriginOil İşbirliği Binası

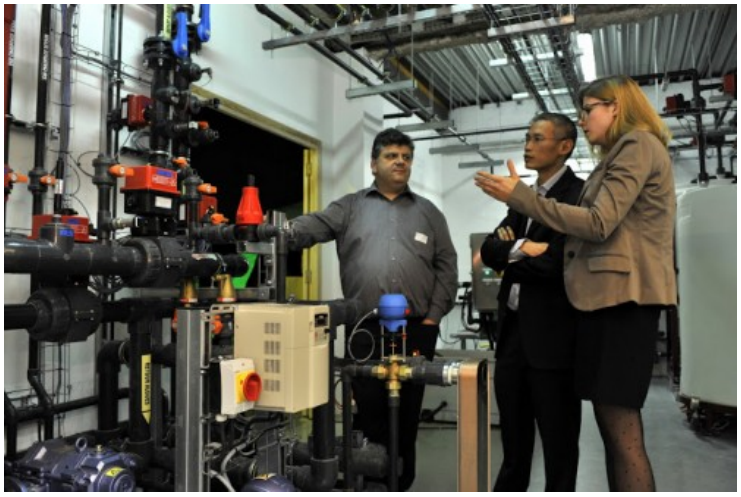
Fransa RT2020 olarak adlandırılan çok sıkı bir çevre politikasını benimsemiştir. Bu politikaya göre 2020’ye kadar ülkeyi enerji tüketiminde %20 azalmaya ve yenilenebilir enerji kullanımını %20 artırmaya çağırmaktadır. 2020 hedeflerini gerçekleştirmek için Fransa, kullandıklarından daha fazla enerjiyi üretmek ve atık suyu şehrin belediye kanalizasyon sistemine birdenbire boşaltmak yerine ona özel işlem uygulamak ve dönüştürmek için yeni ticari binalara ihtiyacı olmaktadır. Fransız temelli biyoteknoloji ve enerji sistemleri şirketi Ennesys ve bir Amerikan alg hasat şirketi olan OriginOil, “gerçekten yeşil” binalar için, Paris yakınlarındaki 3.502.444,6 m^2’lik ofis alanına sahip olan Nanterre La Defense bölgesinde, bu konudaki ilk sistemlerini 2012 yılının Kasım ayında tanıtmışlardır. Essenys’in yönetim kurulu başkanı Pierre Tauzinat, projenin konseptinin herhangi bir ekin tarlası kullanmadan, geleceğin temiz ve ucuz yakıtı olan algleri yetiştirerek enerji üretmek ve aynı zamanda binanın atık suyunu temizlemek olduğunu söylemiştir. Tauzinat bu teknolojiyi, geliştiriciler ve Amerikan mimarlara o yılki Uluslararası Greenbuild Konferansları’nda ve Expo’da sunmuştur. OriginOil’in yönetim kurulu başkanı Riggs Eckleberry Ennesys ile işbirliğiyle oluşturdukları bu yeni sistemin düzenlemelere cevap vereceğine inanmakta ve alglerin hem enerji üretmek hem de

atık suyu temizlemek için mükemmel bir çözüm olduğunu bildirmektedir. Bu düzenlemeler algler için piyasada büyük bir fırsat olarak görünmektedir. Dahası, temiz enerji ve su yönetiminin kaynağı olarak algler büyük miktarda CO_2'i emmekte, fosil yakıtlardan salınan miktara eş değer CO_2'i ortadan kaldırarak karbon-nötr bir yakıt yaratmaktadır (Algae can make truly green buildings, 2012; Loomans, 2012; OriginOil ships first production system to Paris-based Ennesys, its European urban algae venture, b.t).

Ennesys bir enerji dengesini kurmaya yardımcı olmak ve bu süreçte suyu temizlemek için binaların çatılarında ve duvarlarında alg yetiştirilmesini sağlayan yeni "kentsel alg" sektörü içinde bir öncüdür. Polikarbonat veya camdan yapılabilen düz panel fotobiyoreaktörler bina cephesine yerleştirilmiştir (Şekil 4.31). Bu fotobiyoreaktörlerin içinde dolaşan, ışık, kirli su ve CO_2'i kullanan algler, her 24 ila 48 saatte bir hasat edilebilmektedir. Büyüme döngüsünün sonunda algler, Los Angeles'ta bulunan OriginOil'in Alg Cihazı kullanılarak hasat edilmektedir ve sonra biyo-hammadde olarak işlenmektedir (Şekil 4.32). Bu ham madde hemen hemen kömür ile aynı enerji değerine sahiptir ve binanın sistemlerini çalıştırmak için kullanılmaktadır (Algae can make truly green buildings, 2012; Loomans, 2012).



Şekil 4.31 Ennesys ve OriginOil işbirliği binası (Loomans, 2012).



Şekil 4.32 OriginOil'in Alg Cihazı (Meyers, 2013).

Hasat sürecinde hiçbir kimyasal madde kullanılmadığı için, alglerin büyümesi için kullanılan su, büyüme sistemi içinde tekrar dönüştürülebilmektedir. Buna ek olarak, algler atık suyun içinde bulunan nitratı emmektedirler ve bu su daha sonra binanın sıhhi tesisat sistemi içinde, sifonlarda "gri su" olarak kullanılabilmektedir. Dahası dış duvarlardaki fotobiyoreaktörler, binanın sıcaklığını ortalama değerlerde tutan bir ısı kalkanı olmaktadır ve düşük maliyetli bir yalıtım sistemi oluşturmaktadır (Şekil 4.33). En uygun koşullar altında, 1 hektar (yaklaşık 2,5 dönüm) fotobiyoreaktör yılda 150 tona kadar alg üretebilmektedir. Büyük ofis kuleleri için, su tüketimini ve birincil enerji ihtiyacını %80'e kadar azaltacağı düşünülmektedir, bu sayede sağlanan tasarruf yılda yüz binlerce Euro'ya ulaşabilecektir (Algae can make truly green buildings, 2012; Loomans, 2012).



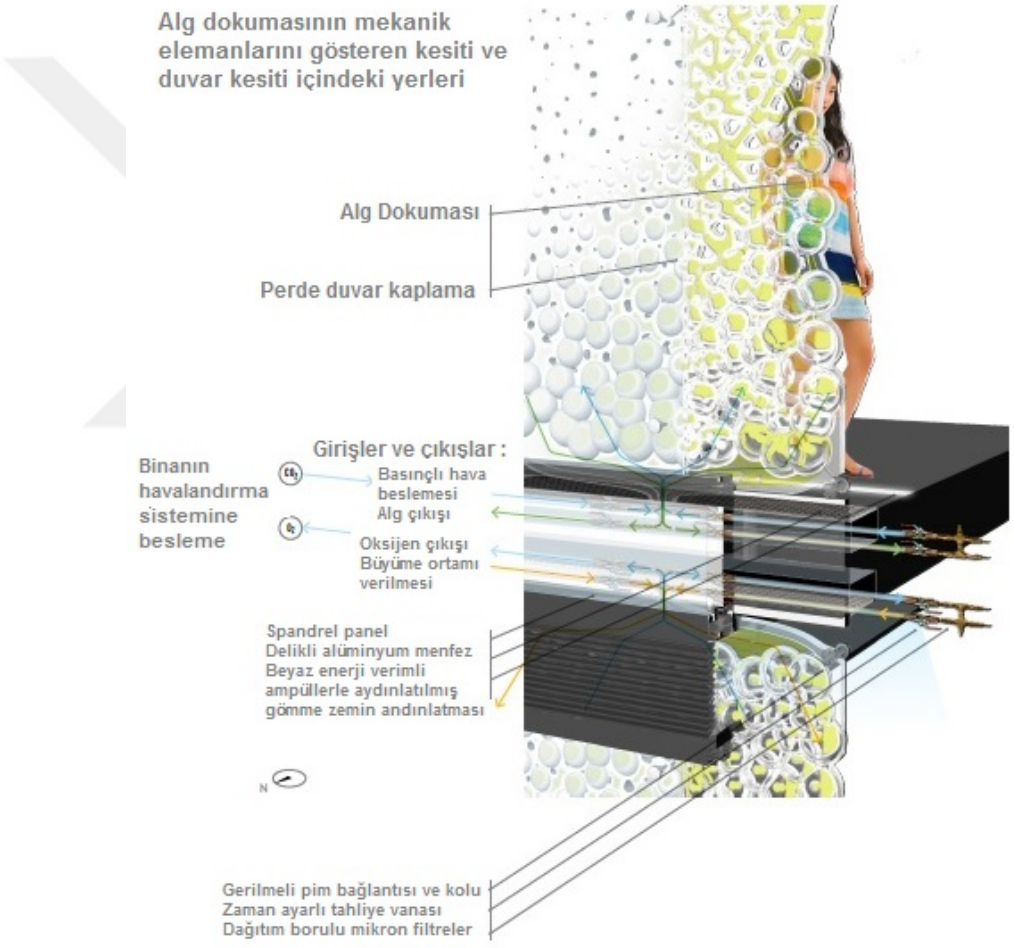
Şekil 4.33 Ennesys ve OriginOil işbirliği binası perspektif görünümü (Loomans, 2012).

4.7 Alg Dokuması, Petra Bogias

Alglerin fotobiyoreaktörlerde büyümesi, eylemsel ve ekolojik bir tabakanın oluşturulduğu yenilikçi bir çağdaş bina sistemi ile geliştirilebilmektedir. Önerilen alg dokuma sisteminin amacı, binayla bütünleşen bir fotobiyoreaktörün verilen bir programa ve çevre koşullarına göre şeklinin ayarlanabildiği, esnek bir membran gibi düzenlenmesidir. Bu yapı sayesinde sanayi amaçlı üretilen fotobiyoreaktörlerden farklı olarak işlevsel şekiller oluşturulmaktadır. Oluşturulan şekiller, binanın katmanlarında alglerin nasıl alternatif bir ekoloji gibi bütünleşebildiğini gösteren, bir kabuk ya da bölme duvarı gibi olmaktadır. Tipik bir giydirme cephede, kullanılan membranın malzemesinin ve geometrisinin yeni ölçütlerini denemek olasıdır. Membranda parametrik olarak denetlenebilen yarı periyodik ve konformal geometriler çalışılabilmektedir. Dokumanın değişen gözenekli yapısı ışığı yumuşatmak için uygulanabilmekte ve verilen mekana göre dikilip fotobiyoreaktörün yapısını meydana getirdiği zaman, geometrik bir esneklik sunmaktadır. Küçük boyutlu, şeffaf, ince film polimerler eşleştirilerek, şekil oluşturulmakta ve kapalı alan sağlanmaktadır. Bu sayede, algler gibi yenilenebilir kaynaklar, duvarlarda ek bir kalınlık yaratmadan konumlandırılabilmekte ve eylemsel, gelecek nesil bir bina kabuğu kolaylıkla varolan bir binayı donatabilmektedir (Bogias, 2014).

Alg dokuması, geleneksel fotobiyoreaktör elemanlarını, tipik kentsel bina kurulumlarına ve duvarlarına kolaylıkla bütünleşen hafif bir sistemle binalarla birleştirmektedir. Dokuma esnek polimer membrandan şekil almaktadır ve içindeki boşlukları bir ağla doldurulmaktadır. Bu ağ, büyüyen alg kültürünün dokuma içinde dolaşmasına izin vermektedir ve hafifliğinden dolayı basit bir donanım kullanarak, sistem varolan yapıya bağlanabilmektedir. Bu iç boşluk geometrileri sayesinde, verilen bina tasarımının mekansal taleplerine bağlı olarak, program, ışık veya yapı gibi bağlamsal bina durumları arasındaki ilişkileri düzenlemektedir. Bu gereksinimler, fotobiyoreaktörlerin mimari bağlamda kullanılmasında yüksek oranda özelleştirilebilir olması ihtiyacını getirmektedir. Eğer bir fotobiyoreaktör amaçlanan tasarım estetiğini ve kullanıcı rahatlığını, binanın kat planı taleplerini düzenli olarak karşılayabilirse, yapılı çevreyle alglerin bütünleşmesi tipik uygulamalarda daha çok

karşılaşılabilir olmaktadır. Eğer eylemsel bina kabuğunu meydana getirmek için bu yöntem ele alınırsa, dokuma, üretici yüzeylerdeki bölümleri dönüştürmek için verilen binanın herhangi bir durumuna uygulanabilmektedir. Her bina kendi şartlarına, düzenine, boyutuna, görünümüne, koridorlarına, yönlendirmesine sahiptir ve bunlar dokunun tasarım değişkenlerini farklı olarak etkilemektedir. Verilen duruma uygun bir doku türetmek için duruma özel bir dikim yaklaşımı olmaktadır. Esnekliğin seviyesini bulabilmek için dokumanın geometrisinin neden istendiği parametrik tasarımda yardımcı olmaktadır (Şekil 4.34) (Bogias, 2014).

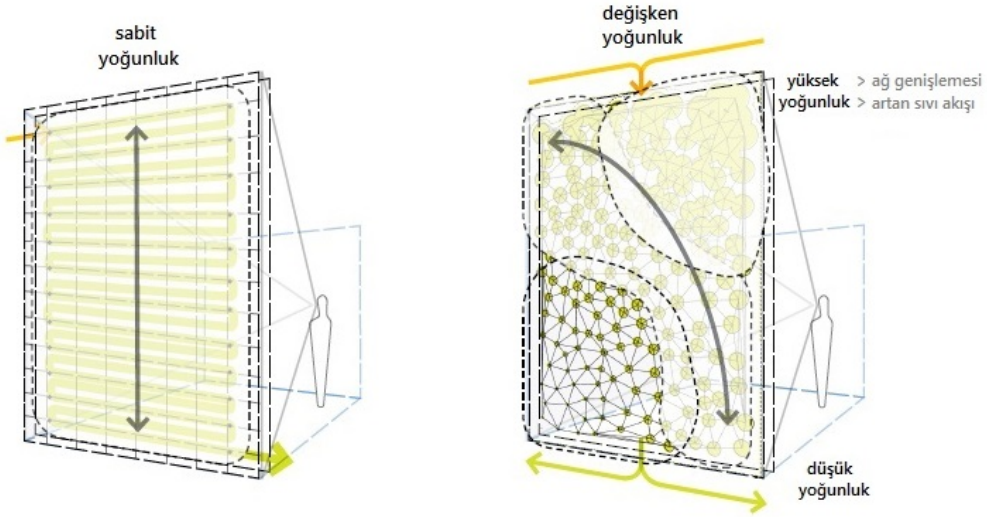


Şekil 4.34 Alg dokumasının sistem yapısı ve kesiti (Bogias, 2014).

Gerçekte, binada bir fotobiyoreaktör için ihtiyaçların, sanayi amaçlı kullanım için yapılan fotobiyoreaktörlere kıyasla, çok farklı olduğu ortaya çıkmaktadır. Mimarlar için şekil, ışık, kullanıcı rahatlığı gibi ayarlayıcı niteliksel değişkenler, teknik ve mekanik çıktılar gibi nicel değişkenlerin üstünde öncelik almaktadır. Sonuç olarak

bir fotobiyoreaktörün niteliksel ve nicel gerekliliklerinin birleşimine odaklanan bir dizi fotobiyoreaktör tasarım ilkelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Alg dokumasını tasarlamak için üç ilke belirlenmiştir. Bunlar mekansal etki, uygulanabilirlik ve çevresel etkidir. Bu tasarım ilkeleri, binaya özel bağlamında, bir fotobiyoreaktör için gerekli olanın ne olduğunu tanımlamaya yardımcı olmak için kullanılmaktadır ve sırayla alg dokumasının tasarımının nasıl değerlendirileceğine yardım edecek ve alg dokuması bu ilkeleri birleştirecektir (Bogias, 2014).

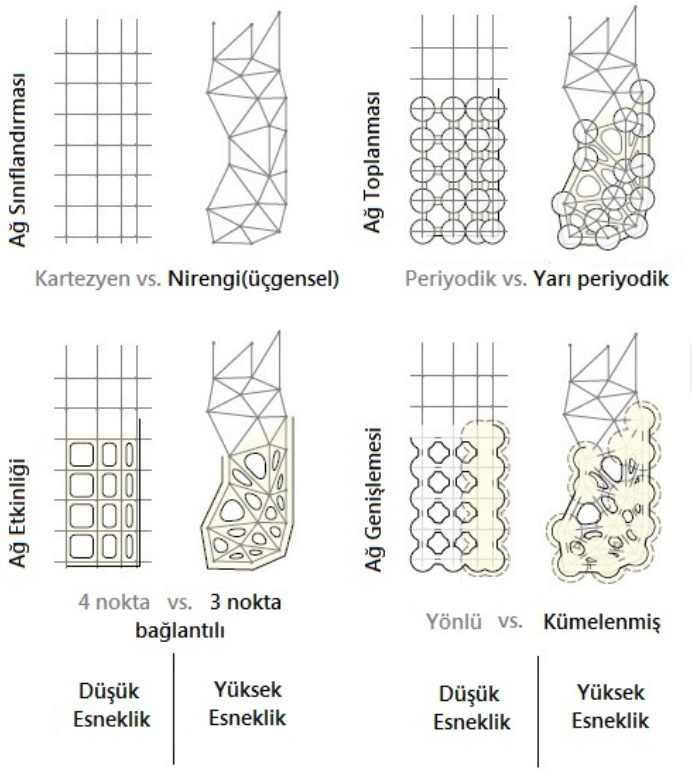
Mekansal etki açısından fotobiyoreaktör ve alg dokumasının bölge yoğunluğu özellikleri karşılaştırıldığında, fotobiyoreaktör sabit bir yoğunluğa sahip iken, alg dokumasında yoğunluk çeşitlenmektedir. Dokumanın üst kısmında, yüksek yoğunlukta sıvı akışı olduğunda, ağ genişlemektedir, alt kısmındaysa az yoğunluk bulunmaktadır. Normal bir fotobiyoreaktör yarı şeffaftır, ama sabit geometrisinden dolayı düşük esnekliğe sahiptir, ağırdır, az gözenekli yapıdadır ve sağlamdır. Alg dokuması da yarı şeffaftır, ama fotobiyoreaktöre göre daha değişken geometrisinden dolayı yüksek esnekliğe sahiptir, hafiftir, çok gözenekli yapıdadır ve incedir (Şekil 4.35) (Bogias, 2014).



Şekil 4.35 Fotobiyoreaktör ve alg dokumasının mekansal etki ve esneklik açısından karşılaştırılması (Bogias, 2014).

İkisinin de geometrik düzenine bakıldığında, ağ sınıflandırması yönünden, fotobiyoreaktörde ağ, Kartezyen, alg dokumasında ise nirengi (üçgensel) şeklinde

sınıflandırılmaktadır. Ağ etkinliğinde fotobiyoreaktör dört noktadan bağlanmakta, alg dokumasında ise üç noktadan bağlanmakta ve daha etkin çalışmaktadır. Fotobiyoreaktördeki dört bağlantı noktasıyla, uzayda düzenli noktalar tanımlanabilmektedir. Alg dokumasındaki üç bağlantı noktasıyla ise uzayda, düzensiz noktalar tanımlanabilmektedir. Esneklik açısından ağın bir araya gelmesi karşılaştırıldığında, fotobiyoreaktörde ağ periyodik, alg dokumasında ise yarı periyodiktir. Ağ genişlemesi, fotobiyoreaktörde yönlü, alg dokumasında ise kümelenmiş haldedir. Bütün bu ağ özellikleri fotobiyoreaktöre düşük esneklik, alg dokumasına ise yüksek esneklik vermektedir (Şekil 4.36) (Bogias, 2014).

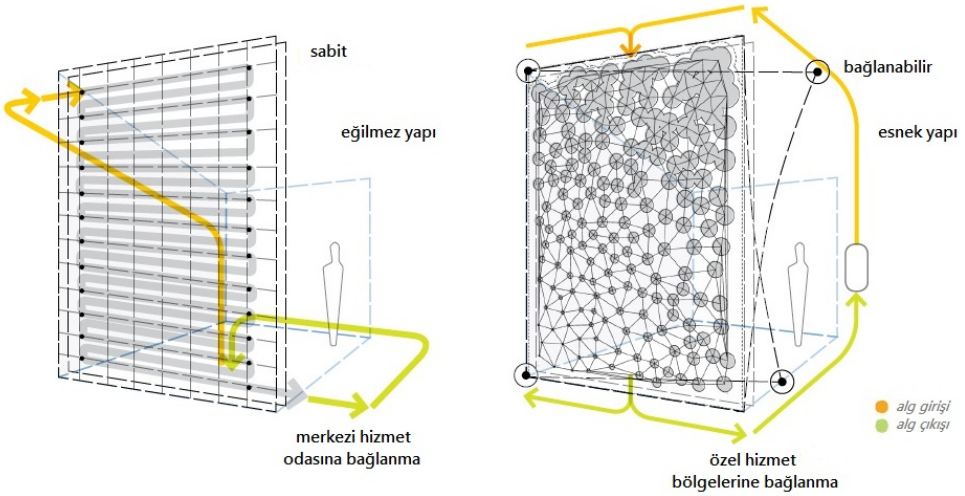


Şekil 4.36 Fotobiyoreaktör ve alg dokumasının geometrik düzen ve esneklik açısından karşılaştırılması (Bogias, 2014).

Alg dokumasında mekansal etkinin belirlenmesi için gereken etkenler, malzeme, yapı ve estetiktir. Sistemin ana malzeme niteliği açısından, uygulamadan en iyi şekilde yararlanmak için, fotobiyoreaktör hem malzeme hem de şekil olarak esnek tercih edilmektedir, böylece yarı şeffaflık ve incelik sağlamaktadır ve iç mekanlarda bir engel oluşturmamaktadır. Sistemin binalarda uygulanmasını daha kullanışlı hale

getirmek için, sistemin bağlanma ve destek alt yapısının, dikkat çekmeyen, sade bir şekilde olması tercih edilmektedir. Ayrıca bu durum reaktörü hem iyileştirme hem de yeni inşa projeleri için kullanıma uygun yapmaktadır. Mekanda yarattığı estetik açısından, fotobiyoreaktörün tasarımı, onun çevrelediği mekanın özelliğine yarar sağlamalıdır. Örneğin, fotobiyoreaktörün ışık ve gölgeyi duruma göre değiştirebilmesi veya büyüme dönemleri arasındaki hareket ve dönüşümü tarafından sağlanan görsel çekicilik gibi. Bu nedenle, esnekliğin sunduğu geometriler daha beğenilir olmaktadır (Bogias, 2014).

Uygulanabilirlik açısından fotobiyoreaktör ve alg dokumasının destek sistemleri karşılaştırıldığında, fotobiyoreaktör sabit, eğilmez, esnemez bir yapıya sahip iken, alg dokuması bağlanabilir ve esnek bir yapıya sahiptir. Fotobiyoreaktör merkezi hizmet odasına bağlanırken, alg dokuması özel hizmet bölgelerine bağlanmaktadır. Fotobiyoreaktör arazide inşa edilebilmektedir, kalıcı gömme bir sisteme, çoklu elemanlara, büyük ölçekli destek sistemlerine, inşaatta çok elemanın eşgüdümlü çalışma gereksinimine sahiptir ve uyarlanabilir değildir. Alg dokuması ise arazi dışında, parçaları önceden hazırlanıp, sonra birleştirilerek kurulabilmektedir, bağlanabilir ve sökülebilir bir sisteme, küçük elemanlara, küçük ölçekli destek sistemlerine sahiptir ve inşaatta az iş birliği ile üretilebilmekte, verilen mimari duruma uyarlanabilmektedir (Şekil 4.37) (Bogias, 2014).

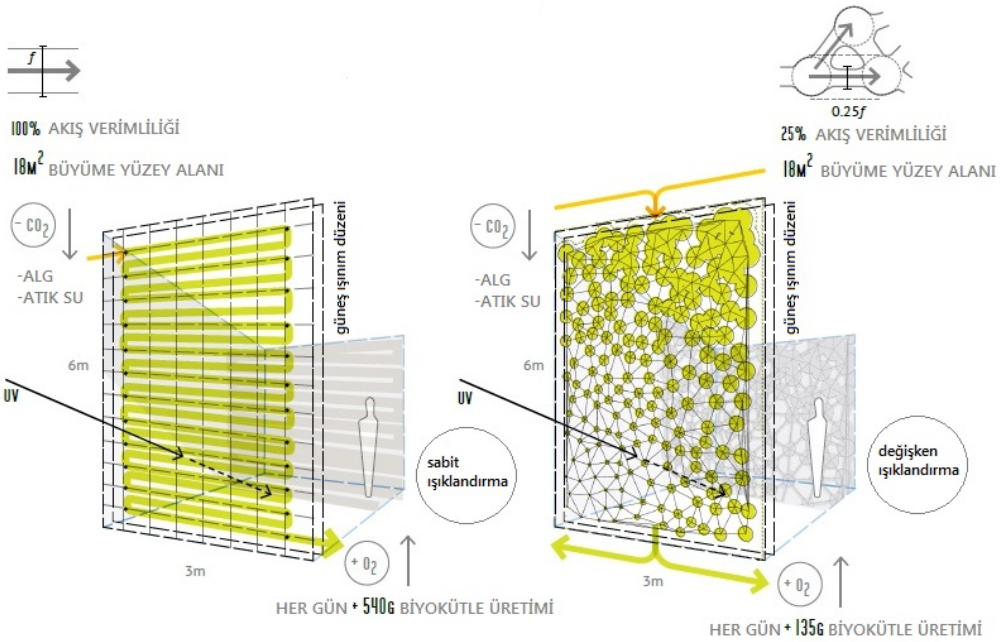


Şekil 4.37 Fotobiyoreaktör ve alg dokumasının uygulanabilirlik açısından karşılaştırılması (Bogias, 2014).

Alg dokumasında uygulanabilirliğin belirlenmesi için gereken etkenler üretme, kurulum ve binayla bütünleşmedir. Sistemin nasıl üretileceği açısından bakılırsa, arazide inşa gerektiren sistemler, fiziksel iş gücü gerektirmekte, atık malzeme üretmekte ve hassasiyet sorunlarının etkisi giderilebilmektedir. Bir fabrika ortamında kalite denetlemesinden geçen parçaları önceden hazırlanıp, sonra birleştirilerek kurulabilen sistemler ve sistemin üretim parçaları ise niteliği, verimliliği ve maliyeti geliştiren makineleştirme sürecine doğru en uygun hale getirilmektedirler. Sistemin kurulum süreci açısından bakılırsa, binalarda fotobiyoreaktör kullanımını artırmak için kurulum sürecinin baside indirgenmesi istenmektedir. Eğer bir reaktör, binanın mekanik altyapısında çoklu sayıda büyük ölçekli sistemlere ihtiyaç duymadan, verilen binanın kat planına her durumda bağlanabilirse, bu durum yapılı çevrede alglerin kullanımını daha etkin kılabilmektedir. Sistemin binadaki tesisatlar ve mekanik sistemlerle nasıl bütünleşeceği açısından bakılırsa, fotobiyoreaktörlerin binada kurulması için destek sistemleri gerekmektedir. Binada, bölme duvarlarının veya döşemelerin içinde, su tesisatı ağından ve hizmet odasındaki elektrik paneline veya havalandırma, ısıtma, soğutma gibi diğer mekanik sistemlere bağlanabilen bir merkezi denetleme panelinden daha fazla bir şey içermemelidirler (Bogias, 2014).

Çevresel etki açısından fotobiyoreaktörde ve alg dokumasında ürünler karşılaştırıldığında, 3 m eninde, 6 m boyunda 18 m^2 büyüme yüzey alanına sahip, CO_2 ve atık suyu, algler yardımıyla kullanıp O_2 üreten fotobiyoreaktör, sabit ışıklandırmayla, %100 akış verimliliğine sahip olmaktadır ve her gün 540 gr biyokütle üretmektedir. 3 m eninde, 6 m boyunda 18 m^2 büyüme yüzey alanına sahip, CO_2 ve atık suyu, algler yardımıyla kullanıp O_2 üreten alg dokuması ise, değişken ışıklandırmayla, %25 akış verimliliğine sahip olmaktadır ve her gün 135 gr biyokütle üretmektedir. Fotobiyoreaktörde karbon döngüsü ve su döngüsü vardır, yüksek verimlilikte biyokütle üretmektedir, sabit ışık ve gölgeleme durumlarına maruz kalmaktadır. Alg dokumasında da, karbon döngüsü ve su döngüsü vardır, ancak düşük verimlilikte biyokütle üretmektedir, yalnız değişken ışıklandırma ve gölgeleme durumlarına sahiptir. Hasat edilen alglerin net ölçüsü, alg büyüme oranı değişkenidir ve her gün her metrekare başına düşen gram miktarıyla ölçülmektedir. Bilimsel çalışmalarda bir fotobiyoreaktör için her günde bir metrekareye ortalama 30

gr biyokütle üretimi öngörülmektedir, ama kanallı açık havuzlarda üretim 10-60 gr arasındadır, çünkü tarım doğasında değişkendir (Şekil 4.38) (Bogias, 2014).



Şekil 4.38 Fotobiyoreaktör ve alg dokumasının çevresel etki açısından karşılaştırılması (Bogias, 2014).

Alg dokumasında çevresel etkinin belirlenmesi için gereken etkenler, karbon döngüsü, su döngüsü, biyokütle, gün ışığı ve gölgelemedir. Alg dokumasının kirli havanın içindeki CO_2'i emmek için katkıda bulunduğu düşünülürse, bu miktar yüksek, düşük veya ortalama olarak ayrılamaz. Fotobiyoreaktörün emdiği CO_2 miktarı, özel uygulamanın ölçeğine bağlı olacaktır. Ayrıca sisteme alınan havanın nereden çekildiği de düşünülmelidir. Örneğin, bu çeşit sistemler, ya dış çevreden ya da iç odalardan, hangisinde CO_2 yüksekse, süzülen havayı içine çeken bir sistem ile donatılabilmektedir. Alg dokumasının atık suyu yeniden sisteme soktuğu düşünülürse, bu miktar gene yüksek, düşük veya ortalama olarak yönlendirilemez, bu da özel uygulamanın ölçeğine bağlı olacaktır. Bu sistemin algal biyokütleyi kullanarak arazide enerji yaratmaya katkıda bulunduğu düşünülürse, bu miktar gene yüksek, düşük veya ortalama olarak üretilemez, bu da özel uygulamanın ölçeğine bağlı olacaktır (Bogias, 2014).

Eğer mekan izin verirse, arazideki biyokütle işleme tesisi arazide de konumlandırılıp bina planlarına dahil edilmektedir. Yoksa, üretilen biyokütle toplanmakta ve arazi dışındaki işleme tesislerine gönderilmektedir. Bu sistemden iç mekanların gün ışığını almasında ve gölgelenmesinde yararlanıldığı düşünülürse, cephe boyunca kullanıldığında, iç mekanın gölgelenmesi için, çeşitli yapı elemanları veya buzlu camlar kullanılmaktayken alg dokumasının da kullanılması uygundur. Bu, iç mekandaki ışığı yumuşatmaya yardım edecek ve pasif soğutma çabalarına katkıda bulunacaktır. Ama aşırı gölgeleme, pasif ısıtma çabalarını azaltacaktır, o halde en uygun günışığı durumlarını elde etmek için şeffaf ve yarı şeffaf alanlar arasında, uygun bir dağılım oluşturulmalıdır (Bogias, 2014).

BÖLÜM BEŞ
BİYO ADAPTİF CEPHE ÖNERİSİ

Bölüm Dört'te de görüldüğü gibi bina cephelerine fotobiyoreaktörler eklenerek biyokütle üretiminin ve CO_2 tüketiminin sağlanması olasıdır. Yapılar kullanım ve kullanıcı ihtiyaçlarına uygun olarak tasarlanmakta ve üretilmektedir. Farklı kullanım ihtiyaçlarına uygun çeşitli yapı tipolojilerinden bahsetmek mümkündür. Sanayi yapıları, konutlar, ofis yapıları gibi farklı bina türlerinin tasarımları birbirinden farklı gelişmektedir. Bu farklılıkların arasında kütle, boyut, yön, biçimlenme ve cephelerdeki sağır ve saydam yüzey oranı bulunmaktadır. Bu çalışmada bina tipi, fotobiyoreaktör çeşidi, geometrisi, taşıyıcı sistemi konularına dikkat ederek fotobiyoreaktörlerin uygulanması için uygun bir biyo adaptif cephe tasarımı oluşturulmuştur.

5.1 Bina Tipolojisi

Bölüm Dört'teki örnek bina incelemelerinde biyo adaptif cephelerin çok çeşitli yapılarda uygulanması için tasarlandığı görülmüştür. Ancak bu çalışmada, fotobiyoreaktörlerin hangi yapı tiplerinde uygulanması ile daha fazla yüzey alanı yaratma potansiyeline sahip olacağı konusunda değerlendirme yapılması gerekli görülmüş ve kentlerde en yaygın gözlemlenen "sanayi", "konut" ve "ofis" bina tipolojileri için değerlendirmede bulunulmuştur.

Sanayi bölgelerindeki yapılar, genellikle büyük hangarlar, depolar ve sanayi tesislerinden oluşmaktadır ve 5-6 m yüksekliğinde sağır cephelere sahiptirler. Fotobiyoreaktörlerin sanayi bölgelerindeki yapılara uygulanması ile hem çevreye yaptıkları CO_2 salımını yine kendilerinin kullanmaları, hem de bundan elektrik, ısı ve biyoenerji üretmeleri sağlanabilecektir. Üstelik sanayi tesislerindeki binalar olduğundan daha sürdürülebilir bir yapı özelliği kazanacaktır ve cepheleri artık sağır olmaktan çıkıp, yeni bir işlev kazanmış olacaktır. Bu cepheler güneş ışığından yoksun bir yerde ise, istenilen biyokütle üretimini sağlamak için fotobiyoreaktörlerin açılı şekilde cephelere uygulanması gerekecektir.

Konut yapıları ise şehir merkezlerinde yoğunlaşmaktadır, genellikle çok katlıdır ve kat yüksekliği 2-2,5 m arasında değişmektedir. Şehir merkezlerindeki konutların cephelerine fotobiyoreaktör uygulanmak istendiğinde, güneş ışığından verimli şekilde faydalanmak için fotobiyoreaktörlerin ikinci kat ve üstü ya da en üst katlarda kullanımı uygun olacaktır. Oysa sanayi yapılarında bu yükseklik ve dolayısıyla cephe alanı daha fazla olacağından konutlardan elde edilen enerji sanayi yapılarına göre daha az olacaktır.

Ofis yapıları daha çok yoğun arazilerde inşa edilmekte ve çok katlı olmaktadırlar ve 3-4 m arasında kat yüksekliğine sahiptirler. Bu binalarda genellikle giydirme cephe ya da çift kabuk cephe tercih edilmektedir. Çünkü bu cepheler yapıyı kullanan şirket ya da kurum açısından saygınlık göstergesi olmaktadır. Ayrıca fotobiyoreaktörlerin bu cephe sistemlerine uygulanması daha kolay olacaktır. Fotobiyoreaktörlerden oluşan yapı kabuğu, güneş ışınımından yararlanarak elektrik ve ısı enerjisi üretebilecek, sıfır CO_2'e yaklaşacak ve ısı kayıplarını önleyerek enerji verimliliğini artıracaktır. Bütün bu özellikleri de binanın daha sürdürülebilir olmasına yardımcı olacaktır.

5.2 Fotobiyoreaktör Çeşidinin Seçimi

Bölüm Üç'de incelendiği üzere fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen başlıca değişkenler ışıklandırma, kütle aktarımı/karıştırma, ölçeklendirme, süreç yönetimi ve temizliktir. Bu çalışmada yapı ile bütünleşecek fotobiyoreaktör çeşidinin seçimi için yukarıda adı geçen değişkenler fotobiyoreaktör çeşitlerine göre fayda değer analizi yöntemi ile incelenmiştir (Savaşır, 2008; Sey ve Tapan, 1987). Bu incelemede öncellikle her değişkene bağlı kriterler oluşturulmuş, bu kriterler için notların değeri (Tablo 5.1) ve önem katsayıları (ÖK'ları) belirlenmiş, değişken tablolarında kriter ve katsayı göz önünde bulundurularak değişkenler farklı fotobiyoreaktör çeşitleri için hesaplanmıştır (Tablo 5.2-5.5). Ardından bu değişkenlerin önem katsayıları doğrultusunda fotobiyoreaktör çeşitleri değerlendirilmiştir (Tablo 5.6). Bu sayede, biyo adaptif cephe önerisi oluşturmak için cephelerde kullanıma en uygun fotobiyoreaktör çeşidi seçilmiştir.

Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenlerde ortaya çıkan kriterleri değerlendirmek için ilk önce Tablo 5.1'deki kriter değerlendirme sisteminde verilen notların değeri ve anlamı oluşturulmuştur.

Tablo 5.1 Değerlendirme sisteminde verilen notların değeri ve anlamı

Değeri	**Anlamı**
5	Çok iyi
4	İyi
3	Orta
2	Kötü
1	Çok kötü

Işıklandırma değişkeni için kriter olarak, ışık yolunun uzunluğu, yüzey-hacim oranı, dış ortamda uygulamaya uygunluk ve yapay ışıklandırma seçilmiştir. Işık yolu ne kadar kısa olursa, bu; fotobiyoreaktörler için o kadar iyi bir özelliktir. Yüzey-hacim oranının geniş olması, fotobiyoreaktörlere ışığın rahatça ulaşabilmesi açısından faydalıdır. Dış ortamda uygulamaya yatkın olmaları, bina cephelerinde kullanım açısından gereken bir özelliktir. Yapay ışıklandırma ise fotobiyoreaktörlerde enerji üretiminin gece de devam edebilmesi için gereklidir. Bu kriterlerin ÖK'ları ve fotobiyoreaktör çeşitlerinin bu kriterlere uyumluluğu Tablo 5.2'de görülmektedir.

Tablo 5.2 Işıklandırma değişkeninin değerlendirilmesi

ÖK	**Fotobiyoreaktör Çeşitleri** / **Işıklandırma Kriterleri**	**Düz-Panel**	**Tübüler**	**Dikey-Kolon**
3	Işık yolunun uzunluğu	5	4	3
3	Yüzey-hacim oranı	5	4	2
2	Dış ortamda uygulamaya yatkınlık	4	4	4
2	Yapay ışıklandırma	4	3	3
10	**Işıklandırma değişken değeri**	**4,6**	**3,8**	**2,9**

ÖK: Önem Katsayısı

Işıklandırma değişkeni açısından fotobiyoreaktör çeşitleri karşılaştırıldığında, düz-panel fotobiyoreaktörün aldığı 4,6'lık değerle, diğer çeşitlere göre daha üstün olduğu görülmektedir. Bunun nedeni en uygun ışıklandırmayı, en az alan işgaliyle yapıp, ışık yolunu mümkün olduğunca kısaltabilmesinden kaynaklanmaktadır. Tübüler fotobiyoreaktör de 3,8'lik değeri, ışıklandırma konusunda geniş yüzey alanına sahip olduğu için alabilmektedir. Dikey-kolon fotobiyoreaktör ise, yüzey-hacim oranı kriterinde aldığı düşük değerle, ışıklandırma değişkeninden 2,9 değer alarak bu konudan verimsiz bir fotobiyoreaktör çeşidi olarak kalmaktadır.

Kütle aktarımı/karıştırma kriterleri ise aydınlık karanlık döngüsünün ortamda sağlanması, kesme kuvvetinin büyüklüğü ve algal bozulma olasılığıdır. Kütle aktarımının ve karıştırmanın gerçekleşmesi ne kadar iyi olursa, kültür ortamı içindeki aydınlık karanlık döngüsünün sağlanmasına o kadar yardımcı olmaktadır. Algler üzerinde oluşan hidrodinamik basınçla kesme kuvvetinin yüksek olması halinde alg kültüründe kayıplar olacağından, kesme kuvvetinin düşük olması olumlu bir özelliktir. Algal bozulma olasılığı ise karıştırmanın iyi olmasıyla önlenebilmektedir. Bu kriterler ve ÖK'lar Tablo 5.3'de değerlendirilmektedir.

Tablo 5.3 Kütle aktarımı/karıştırma değişkeninin değerlendirilmesi

ÖK	Fotobiyoreaktör Çeşitleri / Karıştırma Kriterleri	Düz-Panel	Tübüler	Dikey-Kolon
4	Aydınlık karanlık döngüsünün ortamda sağlanması	4	3	3
2	Kesme kuvvetinin büyüklüğü	4	2	3
4	Algal bozulma olasılığı	2	1	2
10	**Karıştırma değişken değeri**	**3,2**	**2**	**2,6**

ÖK: Önem Katsayısı

Kütle aktarımı/karıştırma değişkeni yönünden fotobiyoreaktörleri birbiriyle kıyasladığımızda, kütle aktarımı/karıştırmanın aynı anda yapılması düz-panel ve dikey-kolon fotobiyoreaktörlerde, hem aydınlık karanlık döngüsünü hem de algler üzerinde düşük kesme kuvvetinin olmasını sağlamaktadır. Fakat bu iki kriter düz-

panel fotobiyoreaktörlerde dikey-kolona göre daha iyi sağlanmaktadır. Bu nedenle düz-panel fotobiyoreaktör, dikey-kolona göre 0,6'lık değer farkıyla bu değişken yönünden 3,2'lik değer almaktadır. Tübüler fotobiyoreaktör ise bu değişken konusunda üç çeşit arasından 2'lik değer alarak daha yetersiz kalmaktadır.

Fotobiyoreaktörlerde ölçeklendirme değişkenine bakılırsa, ölçek büyütmeye uygunluk kriteri fotobiyoreaktör çeşitlerine göre farklı şekillerde olmaktadır. Düz-panel fotobiyoreaktörlerde ölçek büyütme genişlik-yükseklik artmasıyla olurken, tübüler fotobiyoreaktörlerde, çap-uzunluk artması, dikey-kolon fotobiyoreaktörlerde çap-yükseklik artması şeklinde yapılmaktadır. Boyutun büyümesiyle verimin ilişkisi kriterinde ise boyut büyütüldüğünde çoğunlukla alglerin yetişme veriminin azaldığı görülmektedir. Ama bu azalma her fotobiyoreaktör çeşidi için farklılık göstermektedir. Tablo 5.4'de kriterlerin ÖK'ları ve bu kriterlere fotobiyoreaktörlerin nasıl cevap verdiği görülmektedir.

Tablo 5.4 Ölçeklendirme değişkeninin değerlendirilmesi

ÖK	Fotobiyoreaktör Çeşitleri / Ölçeklendirme Kriterleri	Düz-Panel	Tübüler	Dikey-Kolon
5	Ölçek büyütmeye uygunluk	3	3	4
5	Boyut büyütmeyle verimin ilişkisi	3	2	2
10	**Ölçeklendirme değişken değeri**	**3**	**2,5**	**3**

ÖK: Önem Katsayısı

Ölçeklendirme değişkeninde fotobiyoreaktör çeşitlerini incelediğimizde, düz-panel fotobiyoreaktör boyut büyütüldüğünde verimin daha az düşmesi, dikey-kolon fotobiyoreaktör ise ölçek büyütmeye düz-panelden daha uygun olması kriterinden dolayı yüksek değer almaktadır ve bunların sonucunda ikisi de 3 değerinde görülmektedir. Tübüler fotobiyoreaktör ise aldığı 2,5'lik değer ile her iki kriter açısından diğer iki çeşitten daha düşük bir değere sahiptir.

Süreç yönetimi ve temizlik değişkenindeki kriterler ise, işletim kolaylığı, temizlik kolaylığı, parçalı kuruluma bağlı esneklik ve binada uygulama kolaylığı olarak ele alınmaktadır. İşletim kolaylığı, fotobiyoreaktörün parçalarının doğru kurgulanması

sonucunda daha az sorun çıkarmasını sağlamaktadır. Temizlik kolaylığının ise işletim sürecinde sürekli olması gerekmektedir. Parçalı kuruluma bağlı esneklik arttıkça arazide kurulabilme olasılığı artmakta ve gereken iş gücü azalmaktadır. Binada uygulama kolaylığı ise geometri ve kullanım açılarından bina ile bütünleşebilme ve bina cephelerinde uygulanabilme olasılığını artırmaktadır. Tablo 5.5'de fotobiyoreaktör çeşitlerine göre bu kriterler ÖK'larına değerlendirilmektedir.

Tablo 5.5 Süreç yönetimi ve temizlik değişkeninin değerlendirilmesi

ÖK	Fotobiyoreaktör Çeşitleri / Süreç Yönetimi Kriterleri	Düz-panel	Tübüler	Dikey-kolon
2	İşletim kolaylığı	4	3	5
2	Temizlik kolaylığı	3	2	4
2	Parçalı kuruluma bağlı esneklik	4	2	3
4	Binada uygulama kolaylığı	5	4	2
10	**Süreç yönetimi değişken değeri**	**4,2**	**3**	**3,2**

ÖK: Önem Katsayısı

Süreç yönetimi ve temizlik değişkenine baktığımızda, dikey-kolon fotobiyoreaktör işletim ve temizlik kolaylığı kriterlerinde diğer iki çeşide göre üstünlüğe sahiptir ve 3,2'lik değer almaktadır. Ama düz-panel fotobiyoreaktörün parçalı kuruluma bağlı olarak esnek olması ve bina cephelerinde uygulama kolaylığı kriterleri dikey-kolondan daha çok tercih edilmesine neden olmaktadır ve onun değerini 4,2'ye yükseltmektedir. Tübüler fotobiyoreaktörler ise bina cephelerinde uygulama kolaylığı olmasına rağmen, temizlenmesinin zor olması ve parçalı kuruluma yatkın olmaması nedeniyle bu kriterlerden aldığı düşük değerle dikey-kolon fotobiyoreaktörlerin biraz altında kalarak 3 değerini almaktadır.

Bütün bu değişkenlere bağlı olarak kriterlerin her fotobiyoreaktör çeşidi için elde edilen değişken değerleri ÖK'larıyla çarpılıp, toplanmakta ve ÖK'ları toplamına bölünmektedir. Bu sayede fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenlere bağlı olarak fotobiyoreaktör çeşitleri karşılaştırılmakta ve hangi fotobiyoreaktör

çeşidinin seçilmesinin en iyi sonucu vereceği ortaya konmaktadır. Bu sonuçlar Tablo 5.6'da verilmektedir.

Tablo 5.6 Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenlere bağlı olarak fotobiyoreaktör çeşitlerinin fayda değer analizi sonuçları

ÖK	Fotobiyoreaktör Çeşitleri / Değişkenler	Düz-panel	Tübüler	Dikey-kolon
4	Işıklandırma	4,6	3,8	2,9
2	KütleAktarımı/Karıştırma	3,2	2	2,6
1	Ölçeklendirme	3	2,5	3
3	Süreç Yönetimi ve Temizlik	4,2	3	3,2
10	**Fayda Değer**	**4,04**	**3,07**	**2,94**

ÖK: Önem Katsayısı

Bu değerlendirmeler ışığında, değişkenler gözetilerek fotobiyoreaktör çeşitleri için yapılan fayda değer analizi sonucunda, düz-panel fotobiyoreaktörün 4,04'lük değer, tübüler fotobiyoreaktörün 3,07'lik değer ve dikey-kolon fotobiyoreaktörün 2,94'lük bir değer aldığı görülmektedir. Yapılan bu fayda değer analizi hangi fotobiyoreaktör çeşidinin bir cephe önerisinde bulunmak için daha elverişli olacağını göstermektedir. Bu analizden yapılan çıkarımla bu tezde önerilecek olan biyo adaptif cephe için diğer iki reaktör çeşidine göre aldığı 4,04'lük değerle düz-panel fotobiyoreaktör kullanılmasının en uygun çözüm olacağına karar verilmiştir.

5.3 Geometri

Bölüm Dört'te irdelenen örnek bina cephelerindeki fotobiyoreaktörlerin çoğunluğunda düz-panel fotobiyoreaktörlerin kullanıldığı; tasarımına ve uygulama detaylarına bakıldığında, genellikle parçalı ve esnek yapıların oluşturulduğu görülmektedir. Fotobiyoreaktörleri oluşturan parçalar ya taşıyıcı bir yapıya bağlanmaktadır ya da o taşıyıcı yapıyla bütünleşik uygulanmaktadır. Ayrıca parçaların esnek olması da tekrar bir destekleyici sistemi gerektirmemekte, varolan taşıyıcı sisteme bağlanabilmesini sağlamaktadır. Parçalı tasarımlar

fotobiyoreaktörlerin bakımı, tamiri ve temizliği açısından kullanışlı olmaktadır. Ayrıca, farklı bir yerde parçaları önceden hazırlanıp, daha sonra uygulanacak olan bina cephesinin olduğu arazide tekrar birleştirilebilmektedirler. Parçalı olduğu için küçük boyutlu elemanlara sahip olacağından, taşınabilirliği artmış, kurulum süreci ve iş yükü azalmış, yani fotobiyoreaktörlerin cephelere uygulanması kolaylaştırılmış olmaktadır. Fotobiyoreaktörleri oluşturan parçaların geometrisi ve esnekliği göz önüne alındığında, bu parçaların hafif, değişken geometrili olması, bağlantı noktaları açısından düzenli dört noktadan oluşması yerine, düzenli üç noktadan oluşması ve yarı periyodik olması parçaların esnekliğini artırabilecektir. Hafifliği sağlaması için de şeffaf yüzeyler için ya polikarbonat ya da pleksiglas malzeme kullanımı daha uygundur.

Bu verilerin sonucunda, tasarlanan cephe önerisi eşkenar üçgen parçaların birleşmesiyle oluşan altıgen yapılı düz-panel fotobiyoreaktörlerin birbirlerine bağlanmasıyla meydana gelmektedir.

5.4 Taşıyıcı Sistem

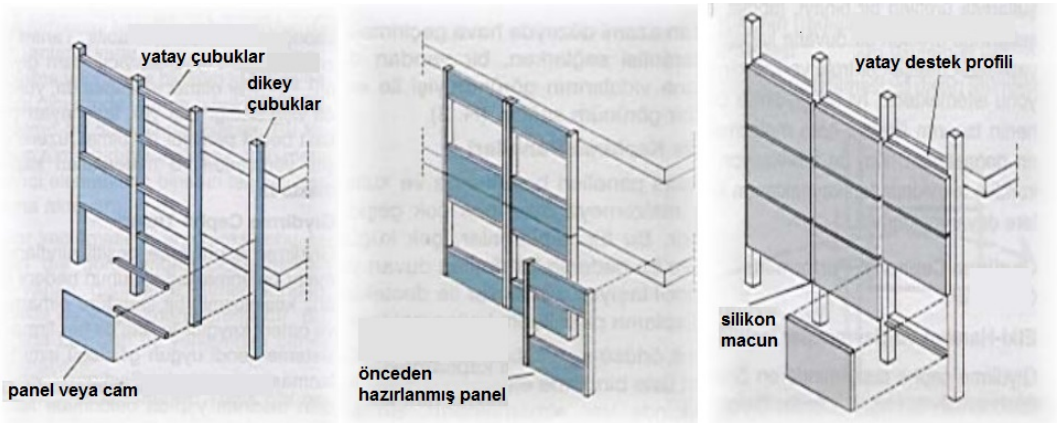
Günümüz mimarisinde çok katlı ve yüksek binalar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu binaların önemi modern mimarinin gitgide yaygınlaşmaya başlamasıyla 1950'lerden sonraki dönemde artmıştır. İşlevselliğin estetik kaygıların önüne geçmesiyle birlikte cepheler taşıyıcı sistemlerden ayrılmış, böylece giydirme cephe sistemleri gelişmeye ve kullanım alanları da artmaya başlamıştır (Sev ve Başarır, 2011).

Giydirme cepheler, bina taşıyıcı sisteminden bağımsız olup bina cephelerine giydirilen, yük taşımayan ancak yükünü ileten bağlantı elemanlarından oluşan, binanın dış ortam ile ilişkisini iki yönlü bir filtre görevi yaparak sağlayan ve taşıyıcı olmayan yapı elemanlarıdır. Giydirme cepheler çoğunlukla taşıyıcı sistemin önüne asılarak taşıtılmaktadırlar. Dış yükleri ve kendi ağırlıklarını bağlantı noktalarından yapının taşıyıcı sistemine aktarmaktadırlar (Ersoy, 2008).

Giydirme cepheler, kat arası pencere boşluklarını, kat arası kiriş ve pencere eteklerini, korkuluk duvarlarını, asma kat tesisat boşluklarının önlerini ve sağır cepheleri kaplayabilmektedir. Yani, boşluk veya dolu yüzeylerin önleri cam yüzeylerle kaplanabilmektedir (Kahraman, 2003).

Giydirme cepheler farklı şekillerde sınıflandırılabilmektedir. Kullanılan elemanların ağırlıklarına göre sınıflandırma yapıldığında ağır giydirme cephe ve hafif giydirme cephe olarak ikiye ayrılmaktadır. Ağır giydirme cepheler, ağırlıkları 100 kg/m^2'nin üzerinde olan, genellikle beton veya metal esaslı panellerden oluşan elemanlardır. Ekonomik olmaları, kolay yapım ile zamandan kazanım sağlamaları ve büyük boyutlar halinde taşınabilir olarak üretilebilmeleri, dış duvarların tamamen dış hava koşullarından korunabilmesi gibi üstünlüklerinin yanında, üretildiği yerden inşa alanına taşınması, depolanmaları için büyük alanlara ihtiyaç duyulması ve cepheye eklenmesi için vinç gibi araçları gerektirmesi nedeniyle kısıtlayıcı özellikleri de bulunmaktadır (Gür, 2001; Kahraman, 2003).

Hafif giydirme cepheler ise ağırlıkları 100 kg/m^2'yi aşmayan, farklı bileşenlerin bir araya getirilerek bütünleştirilmesiyle oluşan panellerden meydana gelen elemanlardır. Bu bileşenler taşıyıcı ve örtü olarak en yaygın şekilde metal çerçeve ile cam malzemelerden oluşmaktadır. Hafif giydirme cepheler taşıyıcı iskelet türüne göre üç çeşide ayrılmaktadır. Bunlar çubuk sistemler, panel sistemler ve yarı panel sistemlerdir (Şekil 5.1) (Gür, 2001; Kahraman, 2003).



Şekil 5.1 Hafif giydirme cephelerde çubuk, panel ve yarı panel sistemler (Alüminyum giydirme cephe, b.t).

Çubuk sistemlerde bina cephelerine aks aralarında dikey çubuklar asılmaktadır. Bu çubukların aralarına da yatay çubuklar yerleştirilmektedir. Daha sonra çubuklar arasındaki boşluklara içten veya dıştan cam takılmaktadır. Genellikle sadece çubuklar taşıyıcı sisteme bağlanmakta, özel durumlarda camlar da asılabilmektedir. Taşıyıcı sisteme sabitlenen çubukların üzerindeki yük böylece azalmış olmaktadır. Çubuk sistemlerin bütün bileşenleri yerinde uygulanabilmektedir. Ancak yatay ve düşey hareketlere uyumu zayıf olduğu için işçiliğe özen gösterilmesi ve uygulamasının uzman ekiplerce yapılması gerekmektedir. Bu nedenle çok katlı binalar için üretici firmalar tarafından önerilmemektedir. Bu sistem Türkiye'de de yaygın olarak kullanılmaktadır ve diğer sistemlere göre daha ekonomiktir (Gür, 2001; Kahraman, 2003).

Panel sistemlerde doğrama elemanları taşınabilir ölçüde, bir- iki aks uzunluğunda ve kat yüksekliğinde elemanlar halinde hazırlanmaktadır. Kolondan kolana devam eden panel çerçeveleri ön üretimli olarak uygulanabilmektedir. Bu elemanlar camları takılı olarak çerçeveli paneller halinde inşa alanına getirilmekte, özel ekipmanlarla taşıyıcı iskelete doğrudan bağlanmakta ve her panel kendi çerçevesinden asılmaktadırlar. Yalnız panellerin üç yönde de hareket edebilecek şekilde uygulanmasına dikkat edilmelidir. Paneller başka bir yardımcı elemana gerek olmadan yan yana gelmektedir. Panel sistemlerin özellikleri kapalı, sadece paneller arasında derz bulunan cepheler oluşturması, parapet panelleriyle pencereleri yatay bir düzende belirgin hale getirmesidir. Kendi içinde kapalı bir sistem olması nedeniyle, geçirimsizlik açısından diğer sistemlerden daha üstündür. Ayrıca yatay ve düşey hareketlere uyumu yüksek olan bu sistem, kısa zamanda uygulanabilmekte, titiz bir işçilik gerektirmemektedir. Panellerin bina içinden takılabilmesi ve kapalı özelliği istenen işleve en olumlu uyumu göstermesi açısından yararlıdır. Bu sistem pahalı bir sistem olduğu için Türkiye'de çok uygulama olasılığı bulamamış olsa da, üstünlükleri sayesinde öneminin artacağı düşünülmektedir. Maliyetin artmasının nedeni ise yatay ve dikey derzlerde profil miktarının artmasından kaynaklanmaktadır (Gür, 2001; Kahraman, 2003).

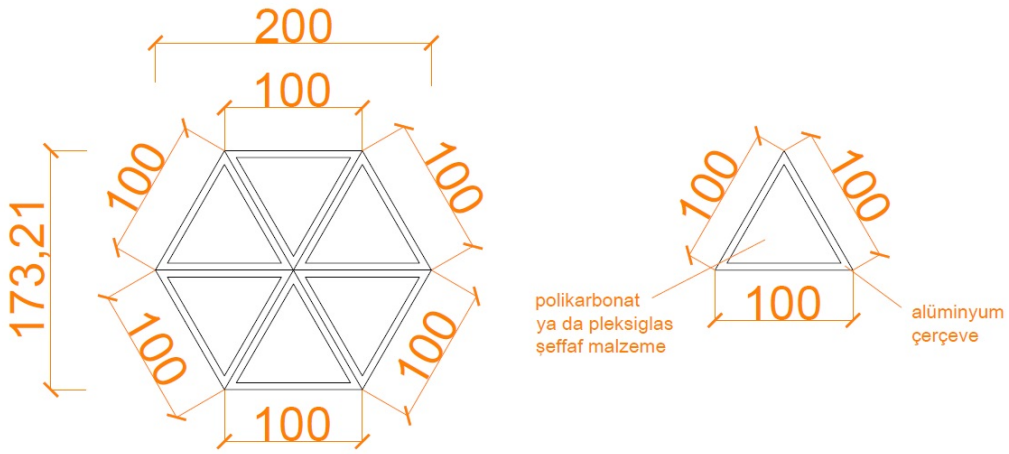
Yarı panel sistemlerde doğrama elemanları kat ölçeğinde, yatay ve dikey profiller halinde hazırlanmaktadır. Ayrı parçalar halinde inşa alanına getirilmekte, çubuk sistemdeki gibi yerinde uygulanmaktadır, ama dikey profiller, katlarda yatay profillerle bağlanarak, sistem kattan kata uygulanan bir sürekli eleman haline gelmektedir, camlar içten vaya dıştan takılmaktadır. Uygulamada paneller bina içerisinden takılabilmekte, ama parapet panellerinin takılabilmesi için binanın dışından bir asansöre ihtiyaç duyulmaktadır. Yarı panel sistem, çubuk sistemin ekonomik olmasıyla, panel sistemin yüksek binalarda, yatay ve düşey hareketlere uyumunun yüksek olması ve uygulama kolaylığı özelliklerinin bir araya getirilmesiyle ortaya çıkmış bir sistemdir (Gür, 2001; Kahraman, 2003).

Sağır cephelere de kaplanabiliyor olma ve taşıyıcı sisteme bağlanabilmesi özelliğiyle, bütün bu giydirme cephe sistemleri incelendiğinde, düz-panel fotobiyoreaktörlerin cepheye uygulanmasında, sistemin hafif olması gerekliliği düşünüldüğünde hafif giydirme cephe sistemlerinden birinin daha elverişli olacağı görülmektedir. Hafif giydirme cephe çeşitlerinden de panel sistemlerin, parçalı yapıda olma, parçaların ön üretimle hazırlanarak, inşa alanında uygulanabilme, kısa zamanda kurulabilme gibi geometrik önerilere, istenirse güneş ışığının yönüne göre açılı olarak döndürülebilmesi için üç yönde hareket edebilme özelliğine, çerçeveli olarak üretilebilip, kapalı bir sistem olma ve diğer tesisat, boru sistemlerinin rahatça geçirilebilmesi için derzlere sahip olmasından dolayı bir biyo adaptif bir cephe önerisi için düz-panel fotobiyoreaktörlere daha uygun olduğu düşünülmektedir.

5.5 Biyo Adaptif Cephe Önerisi

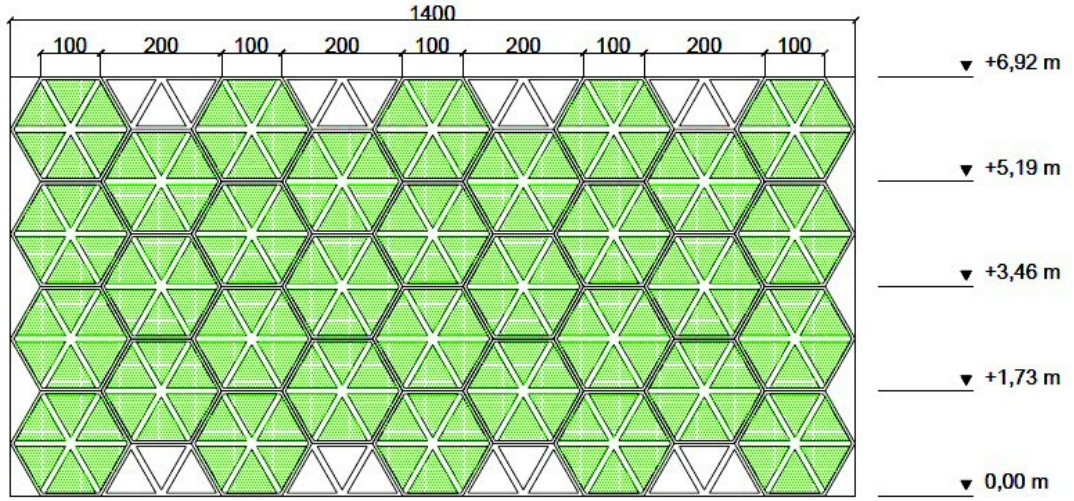
İncelenen bina tipolojilerinden yol çıkarak tasarlanacak biyo adaptif cephe önerisinin bir fabrikanın sağır cephesine uygulanmasının daha yararlı olacağına karar verilmiştir. Düz-panel fotobiyoreaktörlerden oluşacak olan bu cephenin fotobiyoreaktörleri düzgün altıgen şeklindedir, bir kenarı 100 santimetre (cm) uzunluğundadır, yaklaşık 2,6 m^2 yüzey alanı kaplamaktadır ve bu altıgen, eşkenar üçgenlerden oluşan, altı adet üçgensel fotobiyoreaktör parçasına ayrılmaktadır, böylece hem parçalı hem de üçgensel yapı elde edilmiş olacaktır. Bakım, onarım ya

da temizlik yapılmak istendiğinde bütün altıgen fotobiyoreaktörün tamamen sökülmesine gerek olmadan sadece üçgen parçalar sökülerek sistemin işletim kolaylığı ve esnekliği sağlanacaktır. Bu üçgen panel reaktörler dışlarında alüminyum çerçeveye sahiptir ve bu çerçeveye polikarbonat ya da pleksiglas şeffaf plastik malzemeden yüzeyler oturmaktadır (Şekil 5.2).



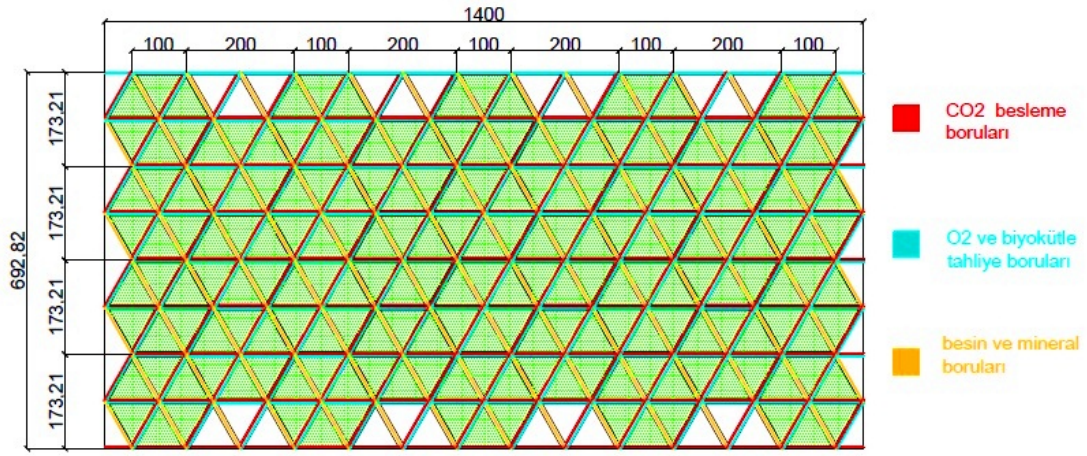
Şekil 5.2 Altıgen düz-panel fotobiyoreaktör ve fotobiyoreaktörün üçgensel parçası

Bu altıgen düz-panel fotobiyoreaktörler başka bir yardımcı elemana gerek duymadan yan yana gelerek bütün cepheyi kaplayacaktır. Bunun gerçekleşmesi için bu fotobiyoreaktörlerin giydirme cephe şeklinde olması uygun görülmüştür. Bu cephenin boyutlarının, bir fabrika binasının sahip olabileceği yüksekliğe yakın olarak yaklaşık 7 m boyunda, 14 m eninde olduğu düşünülmüştür, yaklaşık 97 m^2 yüzey alanını kaplamaktadır (Şekil 5.3). Fotobiyoreaktörleri, binanın taşıyıcı sistemine doğrudan bağlamak için de hafif giydirme cephe çeşitlerinden panel sistem tercih edilecektir. Panellerin, alüminyum çerçeveleri ön üretimle başka bir yerde hazırlanıp, daha sonra inşa alanına getirilecek ve her panel kendi çerçevesinden binanın taşıyıcı sistemine asılacaktır. Bu paneller istenirse gelen güneş ışığına göre açılı olarak üç yönde hareket edebilecek şekilde uygulanmalıdır. Bu giydirme cephe çeşidinin kapalı bir sisteme sahip olması ve geçirimsizliğinden dolayı da fotobiyoreaktörlerin istenen işlevine en olumlu uyumu göstermesi açısından yararlı olacaktır.



Şekil 5.3 Altıgen düz-panel fotobiyoreaktörlerden oluşan giydirme cephenin görünümü

Bu hafif giydirme cephe çeşitlerinden seçilen panel sistemin taşıyıcı sisteme bağlanacak olan alüminyum çerçeveleri aynı zamanda altıgen düz-panel fotobiyoreaktörlerin çerçevelerini de oluşturmaktadır. Panel sistemde alüminyum çerçevelerin aralarında kalan derzlerden fotobiyoreaktörlerin içindeki algleri besleyecek olan CO_2 besleme boruları, O_2 tahliye boruları ve alglerin ihtiyacı olan diğer besin ve minarellerin sisteme verileceği borular geçecektir (Şekil 5.4)

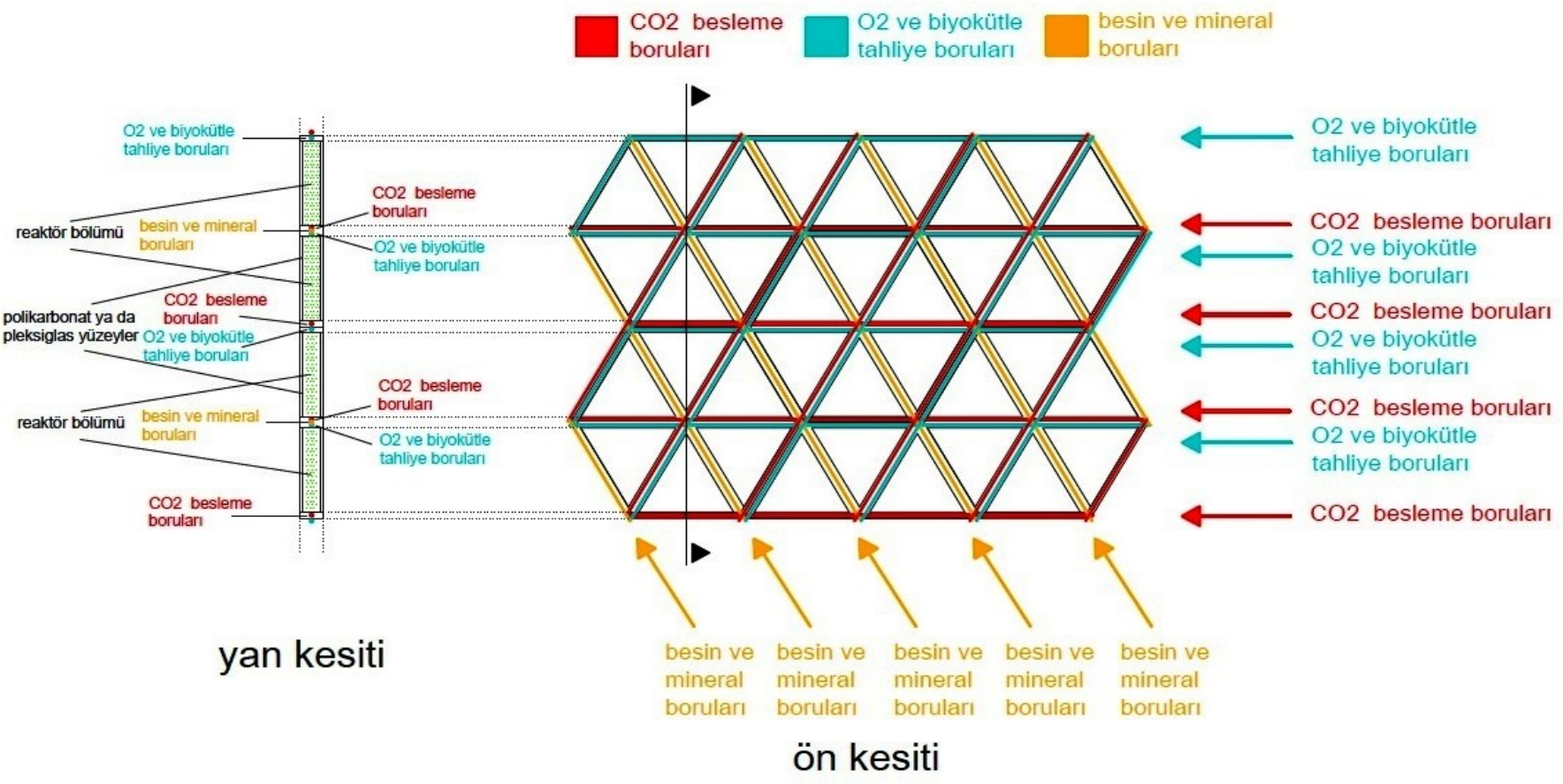


Şekil 5.4 Giydirme cephenin tümünden altıgen düz-panel fotobiyoreaktörlerin CO_2 besleme boruları, O_2 tahliye boruları ve besin, mineral borularının geçişinin görünümü

Türkiye'de yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saattir. Yapılarda güneş enerjisinden yararlanmakta yaygın kullanılan başlıca teknolojiler fotovoltaik

paneller, sıcak su eldesi, ısı pompaları ve pasif sistemlerdir. Fotovoltaik panellerden güneş enerjisinin elektriğe çevrimi %12-15 verimlidir ve Türkiye ortalamasına göre günde 3,6 kWh/m^2 elektrik üretilebilmektedir, ancak bu sistemlerin soğutma sorunu bulunmaktadır. Güneşle sıcak su elde sistemleri ise %60-65 verimliliğe sahiptir ve günde elde edilebilecek enerji miktarı ise 308,0 cal/cm^2'dir. (Türkiye'de güneş enerjisi, b.t). Fotobiyoreaktörlerin verimi günümüzde diğer güneş enerjisi sistemleri ile karşılaştırıldığında, daha düşük olsa da geliştirilmekte olan bir teknolojidir.

Önerilen altıgen düz panel fotobiyoreaktörün reaktör bölümünün kalınlığı 15 cm'dir. Her bir üçgensel parçanın reaktör bölümünün yüzey alanının yaklaşık 0,3 m^2 olarak hesaplandığında, bir üçgensel reaktör parçasının hacmi yaklaşık 0,045 m^3'tür, toplam 6 parçanın oluşturduğu bu altıgen fotobiyoreaktörün yüzey alanı yaklaşık 1,8 m^2, hacmi ise yaklaşık 0,27 m^3'tür. Bu cephenin %100 akış verimliliğine ve Bogias'ın (2014) aktardığına göre; bilimsel çalışmalarda bir fotobiyoreaktör için her günde metrekare başına 30 gr biyokütle üretimine sahip olduğu düşünülmektedir. Böylece bir altıgen fotobiyoreaktörden 54 gr biyokütle, tüm cepheden ise yaklaşık 1950 gr biyokütle üretileceği tahmin edilmektedir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Giydirme cephedeki panel sistemin çerçeveleri arasındaki derzlerden CO_2 besleme boruları, O_2 tahliye boruları ve besin, mineral borularının geçişini gösteren altıgen düz-panel fotobiyoreaktörün yan ve ön kesiti

BÖLÜM ALTI
SONUÇLAR

Yenilenebilir enerji çeşitlerinden biyoenerjinin ham maddesi çeşitli biyokütle kaynaklarından elde edilebilmektedir. Bu tezde biyokütle kaynağı olarak algler üzerinde yoğunlaşılmıştır. Algler CO_2'i ve H_2O'yu kullanıp güneş enerjisi yardımıyla fotosentez yaparak hem kendileri için gerekli olan enerjiyi üretmekte hem de CO_2'i O_2'e dönüştürerek karbon salımını azaltmaktadır. Fotosentez alglerin büyümesindeki en önemli anahtardır, bu nedenle fotosentezin içerdiği bütün öğeler ve değişkenler, alglerin yetiştirilmesini de etkilemektedir. Bu öğeler ve değişkenler, ışık yoğunluğu, sıcaklık, karıştırma, besin, pH, CO_2 tüketimi, ortamdan O_2 uzaklaştırılması ve su tüketimidir.

Biyoenerjinin alglerden üretilmesine yönelik talebin son yıllarda artmasıyla beraber, alg yetiştirme sistemlerinin de önemi artmaya başlamıştır. Uzun yıllardır maliyetin düşük olması ve basit işletime sahip olmaları nedeniyle zaten kullanımda olan açık sistemlerin üretim verimliliğinin yıl içinde farklılık göstermesi, geniş alan kaplamaları, buharlaşma kayıpları, atmosfere CO_2 kayıpları, pislenme ve kirlilik gibi olumsuz özellikleri son dönemlerde kapalı sistemlere olan ilgiyi artırmıştır. Kapalı sistemler biyoenerji üretiminin ihtiyaç duyduğu alg kültürünün yetiştirme ortamını en iyi seviyede tutabilecek, istenen koşulları denetlemeyi sağlayacak, ek tarımsal alanlara gerek olmadan, ekonomik kaliteyi ve verimi artıracak şekilde tasarlanmaktadır. Bu kapalı sistemlere fotobiyoreaktör denmektedir. Farklı alg türlerini yetiştirmek için istenen amaca ve verime bağlı olarak farklı fotobiyoreaktör çeşitleri kullanılmaktadır.

Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini ışıklandırma, kütle aktarımı/karıştırma, ölçeklendirme, süreç yönetimi ve temizlik gibi ana değişkenler etkilemektedir. Bu değişkenlere her fotobiyoreaktör çeşidi farklı cevap vermektedir. Fotobiyoreaktörler düz-panel, tübüler ve dikey-kolon olmak üzere üç çeşide ayrılmaktadır. Bu değişkenler ve çeşitler incelenerek fotobiyoreaktörlerin verimleri, üstünlükleri ve kısıtlamaları değerlendirilmiştir. Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen

değişkenlere göre fotobiyoreaktör çeşitlerinin olumlu ve olumsuz özellikleri ortaya çıkmıştır.

Biyoenerjinin yapılardan sağlanmasında, bina cephelerinde fotobiyoreaktörlerin kullanımına dair örnekler incelenmiştir. Bu örnek binaların genellikle, dünyadaki karbon salımını ve sera etkisini azaltmaya yönelik ülkelerin uyguladığı politikalar, aldığı önlemler, yürürlüğe konan sözleşmeler ve yenilenebilir enerjinin kullanımını artırmaya dair verdiği teşvikler doğrultusunda, CO_2 salınımını en düşük noktaya getirebilmek, binaların karbon ayak izini azaltmak için, cepheler ve özellikle diğer sistemler arasındaki işbirliğini kurgulamak için tasarlandığı gözlemlenmiştir. Burada işbirliği yapılan bu çeşitli sistemler arasında bina teknolojisi, biyoenerjinin elektrik ve ısı enerjisine dönüşümü, binaya dağılımı ve atık su dolaşımı bulunmaktadır. Örneklerin sonucunda çeşitli fotobiyoreaktör türlerinden yola çıkılarak, uygulanması, onarımı, bakımı ve verimliliği açısından farklı önerilerin olduğu görülmüştür. Ulaşılan genel kanıya göre, fotobiyoreaktörler bina cephelerine uygulandığında, cepheler yeni bir işlev daha kazanmakta, dış ve iç mekan arasındaki bağlantıyı sağlamasının dışında, biyoenerjinin üretilebilmesi için, yeni bir üretim alanı sağlanarak, yenilenebilir enerji kullanımı yaygınlaştırılmakta, binalar hem enerji etkin hale getirilmekte hem de sürdürülebilir yapı özelliği kazanmaktadır.

Bu tezde bina cephelerinde fotobiyoreaktörlerin nasıl uygulanabileceği ve mimariyle fotobiyoreaktörleri bir araya getirerek, binalara nasıl sürdürülebilir yapı özelliği kazandırılabileceği konusu bir biyo adaptif cephe önerisi üzerinden irdelenmiştir. Öneriyi gerçekleştirmek için öncelikle bina tipolojileri analiz edilmiştir. Daha sonra fotobiyoreaktör çeşitlerinin alg üretimini etkileyen değişkenlere göre fayda değer analizine dayanarak hangi fotobiyoreaktör çeşidinin seçileceğine dair bir çıkarımda bulunulmuştur. Bu amaçla ışıklandırma, kütle aktarımı/karıştırma, ölçeklendirme, süreç yönetimi ve temizlik ana değişkenleri göz önüne alınmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda en kullanışlı fotobiyoreaktör çeşidinin düz-panel olduğuna karar verilmiş, geometrik şekil olarak da bu düz-panel fotobiyoreaktörün, temizliği, bakımı, uygulanabilirliği, taşınırlığı kolay, parçalı yapıda olmasına, eşkenar üçgen parçaların birleşerek altıgen yapılı bir düz-panel

fotobiyoreaktör oluşturulmasına karar verilmiştir. Bu önerilen fotobiyoreaktörün uygulanacak cepheye fazla yük bindirm emesi, taşıyıcı sistemin ve reaktörün kendisinin hafif olması gerektiği düşünülmüş, ayrıca var olan bina cephelerine de kolaylıkla uygulanabilmesi için hafif giydirme cephe sistemlerinden birinin seçilmesi daha mantıklı görünmüştür. Hafif giydirme cephe sistemlerinden ise panel sistemlerin, biyo adaptif bina cephesi önerisinde istenilen sonucu vereceği öngörülmüştür.

Bina cephelerinden biyoenerji üretimini yapabilmek için önerilen biyo adaptif cephe önerisine bina tipolojileri üzerinden bakıldığında, sanayi bölgelerindeki fabrikaların ve tesislerin cephelerine bu öneri uygulandığında daha yararlı olacağı düşünülmüştür. Çünkü fabrikaların ve sanayi tesislerinin 5-6 m yüksekliğinde, alglerin yetişmesi için gerekli güneş ışığını alan geniş sağır cepheleri bulunmaktadır. Sanayi yapılarının ve biyo adaptif cephe önerisinin birleşimi, verimli bir bütünleşmeyle iki sistem için de karşılıklı faydaların olacağı çeşitli fırsatların önünü açmaktadır. Günümüzde fotobiyoreaktör teknolojileri üretim, kültür durumlarının denetlenmesi ve yetiştirmenin çeşitli alg türlerinde uygulanabilmesi açısından daha büyük potansiyel sunmasına rağmen, dünya çapında biyokütle üretiminin %90'ı hala açık sistemlerde yapılmaktadır. Bugün fotobiyoreaktör teknolojisinin fabrika cephelerinde yayılması hem fotobiyoreaktörlerin binalarla ortak yaşamasını hem biyo adaptif cephe önerileri sayesinde aynı zamanda maliyetin de azalmasını, böylece sanayi tesislerinin fotobiyoreaktörleri daha çok tercih etmelerini sağlayacaktır. Algleri yetiştirmek için tarımsal üretim alanlarını işgal etmeden, fabrikalardaki geniş biyo adaptif cepheler bunu yerine getirecektir. Fabrikaların zararlı atıklarını salmasını engellemesi ve enerji tüketimlerini azaltması gibi faydalarıyla biyo adaptif cephe önerileri işletme giderlerini de azaltmak için doğru bir yol olacaktır.

Bu biyo adaptif cephe önerisi, cephedeki fotobiyoreaktörlerde alglerin biyoenerji üretebilmek için fotosentez yapmasıyla, bir sanayi tesisinde bina tarafından salınan baca gazı içindeki CO_2'i toplamak ve bu CO_2'i yine alglerin kullanmasıyla, hem fabrikanın sıfır CO_2'e yaklaşan bir yapı olmasını sağlayıp O_2 üretmek, hem de

üretilen biyoenerjiyle fabrika binasının tükettiği ısı ve elektrik için gereken enerjiyi üreterek, enerji tüketimini önemli ölçüde azaltacaktır. Böylece fabrika binaları enerji etkin bir yapı haline gelecek, enerji performansı artırılacak ve sürdürülebilir yapı özelliği kazanacaktır.

Fotobiyoreaktörlerin fabrika cepheleriyle bütünleşmesiyle, camlama gibi bazı giderler paylaşılabilecek, fotobiyoreaktörler binanın sağır cephelerine giydirildiğinde, binanın ısıl düzenleme ihtiyacını azaltacak, bina cephesine yalıtım sağlayacaktır. Fabrikanın cephesiyle fotobiyoreaktörden oluşan giydirme cephe arasındaki ortak yaşamda verimin karşılıklı olması önemlidir çünkü bu biyo adaptif cephe önerisinin asıl faydası binanın ihtiyaçları ile alglerin ihtiyaçları arasındaki karşılıklı yararlardan ortaya çıkacaktır. Fotobiyoreaktörsüz bir fabrika cephesinin veya yalnız duran bir fotobiyoreaktörün biyo adaptif bir cephe önerisinden daha ucuz olacağı açıktır. Bu nedenle, biyo adaptif cephe önerileri yapılırken, bina cephesiyle fotobiyoreaktörün en yüksek verimde, en uygun haliyle bütünleşmesi için yeni öneriler geliştirilmeye devam edilmelidir.

Sonuç olarak, bina cephelerine fotobiyoreaktör eklenmesi ile hem cephe elemanlarının sürdürülebilirliği, hem de biyokütle enerjisinin etkinliğinin artırılması önerilmektedir. Yıllar geçtikçe fotobiyoreaktörlerin cephelerde kullanımının, teknolojik gelişmeler sayesinde artmaya devam edeceği öngörülmektedir. Bu gelişmeler arasında cephe teknolojilerinin yapısal ilerlemeleri ve yenilenebilir enerji üzerine yapılan çalışmaların geliştirilmesi sayılabilmektedir. Fotobiyoreaktörlerin araştırılan özellikleri, daha pratik ve farklı malzeme kullanımlarıyla, farklı birleşim şekilleriyle geliştirilecek ve enerji verimliliği daha yüksek fotobiyoreaktörler farklı bina tiplerinde denenerek yaygınlığı ve tercih edilebilirliği artırılacaktır. Bu tezde yapılan biyo adaptif cephe önerisinin uygulanması sayesinde mimariyle fotobiyoreaktörleri bir araya getirerek yapılarda sürdürülebilirliği sağlamaya bir adım daha yaklaşılacaktır.

Gelecek çalışmalarda bu tezde tasarlanan sistemin prototipinin oluşturulması ve denenmesi düşünülmektedir. Ayrıca maliyeti düşürme, buna bağlı olarak etkinliği ve

uygulamayı yaygınlaştırma gibi alanlarda sistemin en uygun duruma getirilmesi veya diğer fotobiyoreaktör sistemlerinin binalarla bütünleşmesi araştırılabilecek konular arasındadır.

KAYNAKLAR

Akkerman, I., Janssen, M., Rocha, J. ve Wijffels, R. H. (2002). Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design. *International Journal of Hydrogen Energy, 27*, 1195-1208.

Alg, (2015). 23 Aralık 2014, http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_bilimsanat&arama=kelime&guid=TDK.GTS.5499d0cfeb0a84.85303587

Alg üretim sistemleri, (2013). 25 Aralık 2014. http://denizyosunuspirulina.blogspot.com.tr/2013/06/alg-uretim-sistemleri.html

Algae biotechnology, (b.t). 23 Haziran 2016, http://burkartlab.ucsd.edu/algae_clip_image002_0000.jpg

Algae can make truly green buildings, (2012). 21 Nisan 2016, http://www.algaeobserver.com/algae-green-buildings-ennesy

Algae powers design of net zero energy building retrofit, (b.t). 14 Nisan 2016, http://www.hok.com/about/sustainability/process-zero-concept-building/

Algler nedir? görevleri nelerdir?, (b.t). 25 Aralık 2014, http://www.bilgiustam.com/resimler/2013/07/4267_alg2-300x200.jpg

Allinger, P. ve Warthmann, T. (2011). *How microalgae bind carbon dioxide and how they are used as sources for material and energy production*, 25 Aralık 2014, https://www.biooekonomie-bw.de/files/cache/e45f4b29039fcbc6b1c3ab6b49d4f3c0_f9161.jpg

Alüminyum giydirme cephe, (b.t). 23 Haziran 2016, http://slideplayer.biz.tr/slide/5606172/

Arup, solarleaf bioreactor façade, (2013). 28 Ekim 2014, http://www.coltinfo.co.uk/files/pdf/UK/SolarLeaf%20bioreactor%20facade.pdf

Bahadar, A.ve Khan, M. B. (2013). Progress in energy from microalgae: a review. *Renewables and Sustainable Energy Reviews, 27*,128-148.

Bernard, M. (2011). *HOK / Vanderweil Process Zero Concept Building: as green as... algae?*, 14 Nisan 2016, http://buildipedia.com/aec-pros/featured-architecture/hok-vanderweil-process-zero-concept-building-as-green-asalgae

Biyokütle, (1998). 3 Kasım 2015, http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_bts&arama=kelime&guid=TDK.GTS.5637f5fc0d46c6.31691854

Biyoenerji, (b.t). 3 Kasım 2015, http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_bts&arama=kelime&guid=TDK.GTS.5637f602c6a518.62605116

Bogias, P. (2014). *Algae textile, a lightweight photobioreactor for urban buildings.* Yüksek Lisans Tezi, Waterloo Üniversitesi, Ontario, Kanada.

Bojovic, M. (2014). *Algaetecture: algae urban canopy for Milan Expo 2015.* 1 Nisan 2016, http://www.evolo.us/architecture/algaetecture-algae-urban-canopy-for-milan-expo-2015/

Cervera-Sarda, R., Gomez-Pioz, J. ve Ruiz-de-Elvira, A. (2014). Architecture as an energy factory: pushing the envelope. *Construction and Building Research,* 209-217.

Conk Dalay, M., İmamoğlu, E. ve Öncel, S. (2008). *Mikroalgal biyokütle üretimi için düşük maliyetli fotobiyoreaktör tasarımı. TÜBİTAK MAG, Proje No: 104M354.* 19 Ekim 2014,

http://uvt.ulakbim.gov.tr/uvt/index.php?cwid=3&vtadi=TPRJ%2CTTAR%2CTTIP%2CTMUH%2CTSOS%2CTHUK&c=google&s_f=_5&detailed=1&keyword=99218

Cuaresma, M., Janssen, M., Vilchez, C. ve Wijffels, R. H. (2011). Horizontal or vertical photobioreactors? How to improve microalgae photosynthetic efficiency. *Bioresource Technology, 102,* 5129-5137.

Çukurova Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Su Ürünleri Temel Bilimleri Bölümü,(b.t). 25 Aralık 2014, http://suf.cu.edu.tr/tr/image/temelbiltan/img36.jpg

Doğal yaşam ortamı deniz olan bir alg türünün diğer canlılarla olan ortak özellikleri nelerdir?, (b.t). 25 Aralık 2014, http://img5.mynet.com/ha6/a/acayip-soru1.jpg

Ersoy, M. S. (2008). *Transparan cephe sistemlerinin sınıflandırılması, yapım ve kullanım performanslarının karşılaştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Fermentor bioreactor, (b.t). 25 Aralık 2014, http://3.imimg.com/data3/VB/YC/MY-2056557/photo-bioreactors-500x500.jpg

Fernandes, B. D., Mota, A., Teixeira, J. A. ve Vicente, A. A. (2015). Continuous cultivation of photosynthetic microorganisms: approaches, applications and future trends. *Biotechnology Advances, 33,* 1228-1245.

Fotosentez, (2007). 26 Kasım 2015, http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_bts&arama=kelime&guid=TDK.GTS.5767a072884e05.32799129

Fotosentez nedir? nasıl meydana gelir?, (b.t). 7 Aralık 2015, http://www.bilgiustam.com/resimler/2014/07/fotosentez-i%C5%9Fleyi%C5%9Fi.jpg

Gao, X., Kong, B. ve Vigil, R. D. (2015). Characteristic time scales of mixing, mass transfer and biomass growth in a Taylor vortex algal photobioreactor. *Bioresource Technology, 198,* 283-291.

GICON and Anhalt University of Applied Sciences receive Hugo Junkers Award for the "Christmas Tree Reactor" for cultivation of microalgae, (2013). 25 Aralık 2014, http://www.gicon.de/typo3temp/_processed_/csm_Photobioreaktoren_01_08679956d0.jpg

Going green: biofuels from algae, (2009). 23 Haziran 2016, http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/dimensions-dimensions/images/issue4/Seambiotic-2009.jpg

Greenhouse up and running, (b.t). 25 Aralık 2014, http://iowaepscor.org/sites/default/files/News/News2013/epscor_algae_flatpanel_0630.png

Griffa, C. (2014). *Algaetecture, Expo 2015 preview: algae systems to design and feed the city.* 1 Nisan 2016, https://cesaregriffa.com/2014/04/07/algaetecture-expo-2015-preview-algae-systems-to-design-and-feed-the-city/

Griffa, C. (2015). *Vertical algae farm 2014.* 1 Nisan 2016, https://cesaregriffa.com/2015/03/16/vertical-algae-farm-2014/

Grima, E. M., Fernandez, F. G. A., Camacho, F. G. ve Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Journal of Biotechnology, 70,* 231-247.

Grima, E. M., Fernandez, F. G. A., Camacho, F. G., Rubio, F. C. ve Chisti, Y. (2000). Scale-up of tubular photobioreactors. *Journal of Applied Phycology, 12,* 355-368.

Guo, X., Yao, L. ve Huang, Q. (2015). Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae. *Bioresource Technology, 190,* 189-195.

Gür, V. (2001). *Hafif giydirme cephe sistemlerinin analiz ve değerlendirilmesi için bir model.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Hales, L. (2011). *Group effort: The Next Generation 2011 winner.* 14 Nisan 2016, http://www.metropolismag.com/May-2011/Group-Effort-The-Next-Generation-2011-Winner/

How microalgae bind carbon dioxide and how they are used as sources for material and energy production, (2011). 25 Aralık 2014, https://www.biooekonomie-bw.de/files/cache/e45f4b29039fcbc6b1c3ab6b49d4f3c0_f9161.jpg

In Vivo, (b.t). 7 Nisan 2016, http://www.x-tu.com/

Jacob-Lopes, E., Scoparo, C. H. G., Lacerda, L. M. C. F. ve Franco, T. T. (2009). Effect of light cycles (night/day) on CO_2 fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 48,* 306-310.

Kahraman, İ. (2003). *Cam malzemenin türleri, özellikleri ve yapılarda kullanımının sistematik olarak sınıflandırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Kendirli, K. (2010). *Spirulina kültürlerinde besin elementlerinin farklı oranlarda kullanımının kuru madde, protein ve klorofil-a düzeyine etkisi.* Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Kunjapur, A. M. ve Eldridge, R.B. (2010). Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 49,* 3516-3526.

Loomans, T. (2012). *New urban algae system generates energy while cleaning wastewater in Paris,* 21 Nisan 2016, http://inhabitat.com/new-urban-algae-system-generates-energy-while-cleaning-sewage-water-in-paris/

Marine microalgal biotechnology, (b.t). 25 Aralık 2014, https://www.niot.res.in/niot/img/osti_img06.jpg

Meyers, G. (2013). *Origin Oil & Ennesys use Paris building wastewater to grow algae for energy.* 21 Nisan 2016, http://greenbuildingelements.com/2013/01/11/origin-oil-ennesys-use-paris-building-wastewater-to-grow-algae-for-energy/

Ogbonna, J. C. ve Tanaka, H. (2000). Light requirement and photosynthetic cell cultivation- development of process for efficient light utilization in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology, 12,* 207-218.

Onurbaş Avcıoğlu A., Türker U., Demirel Atasoy Z., Koçtürk D. (2011). Biyokütle enerjiler. A. Onurbaş Avcıoğlu, (Ed.), *Tarımsal kökenli yenilenebilir enerjiler biyoyakıtlar* içinde (1-42). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

Organic chlorella (green algae), (2007). 23 Haziran 2016, http://www.lamolina.net/image/chlorella-pond_resize.jpg

OriginOil ships first production system to Paris-based Ennesys, its European urban algae venture, (b.t). 21 Nisan 2016, http://www.originclear.com/company-news/8009

Öncel, S. S. (2013). Microalgae for a macro energy world. *Renewables and Sustainable Energy Reviews, 26,* 241-264.

Photobioreactor, (b.t). 25 Aralık 2014, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photobioreactor_PBR_500_P_IGV_Biotech.jpg

Quinn, J. C., Turner, C. W. ve Bradley, T. H. (2012). Scale-up of flat plate photobioreactors considering diffuse and direct light characteristics. *Biotechnology and Bioengineering, 19* (2), 363-370.

Research and practice: the bio-responsive façade, (2013). 25 Aralık 2014, http://www.detail-online.com/inspiration/research-and-practice-the-bio-responsive-facade-106313.html

Santos, S. (2016). *XTU Architects' "In Vivo" green project among winners of Réinventer.Paris Competition.* 7 Nisan 2016, http://www.archdaily.com/781923/xtu-architects-in-vivo-green-project-among-winners-of-reinventearis-competition

Savaşır, K. (2008). *Afet sonrası uygulanacak ve geçiciden kalıcıya dönüştürülecek konut tasarımları için Türkiye koşullarına uygun yapım sistemlerinin irdelenmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Sevilla, J. M. F., Garcia, M. C. C., Miron, A. S., Belarbi, E. H., Camacho, F. G. ve Grima, E. M. (2004). Pilot-plant-scale outdoor mixotrophic cultures of *Phaeodactylum tricornutum* using glycerol in vertical bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch mode. *Biotechnology Progress, 20,* (3), 728-736.

Sey, Y. ve Tapan, M. (1976). *Değerlendirmede temel sorunlar ve mimarlıkta değerlendirme.* İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Yapı Araştırma Kurumu Yayınları.

Spektrum, (2007). 23 Aralık 2015, http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_bts&arama=kelime&guid=TDK.GTS.567a03c73b59e8.19589251

Spirulina yetiştiriciliği, (2013). 25 Aralık 2014, http://denizyosunuspirulina.blogspot.com.tr/2013/09/spirulina-yetistiriciligi.html

Spirulina yetiştiriciliği, (b.t.). 25 Aralık 2014, http://www.yenibiriskurmak.com/wp-content/uploads/2016/02/t%C3%BCb%C3%BCler-640x311.jpg

Su yosunları, (b.t). 23 Aralık 2014, http://tr.wikipedia.org/wiki/Su_yosunlar%C4%B1

SymBIO$_2$ biofaçades, (b.t). 7 Nisan 2016, http://www.parisdelavenir.paris/wp-content/uploads/expo/hotel/xtu-symbio2-fr.pdf

SymBIO$_2$ biofaçades, (b.t). 7 Nisan 2016, https://www.facebook.com/symbio2.biofacades/photos

Şahin, Y. ve Akyurt, İ. (2010). Planktonlar ve fotobiyoreaktörler. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 1* (2), 83-92.

Tamburic, B., Zemichael, F. W., Crudge, P., Maitland, G. C. ve Hellgardt, K. (2011). Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hygrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*, 6578–6591.

Türe, S. (2001). *Biyokütle enerjisi.* Ankara: Tübitak Matbaası.

Türkiye'de güneş enerjisi, (b.t). 1 Haziran 2016, http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/gunes/tgunes.html

Ugwu, C. U., Aoyagi H. ve Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology, 99,* 4021-4028.

Ulusoy, Y. (b.t). *Enerji ve algler (mikro-makro algler).* 23 Temmuz 2014, http://yahyau.home.uludag.edu.tr/documents/algler.pdf

Uzaktan algılama, (b.t). 5 Ocak 2016, http://www.mta.gov.tr/v2.0/birimler/RSC_WEB/spectrum.gif

Vandu, C. O. ve Krishna, R. (2004). Influence of scale on the volumetric mass transfer coefficients in bubble columns. *Chemical Engineering and Processing, 43,* 575-579.

Wang, C., Fu, C. ve Liu, Y. (2007). Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of Spirulina platensis. *Biochemical Engineering Journal, 37,* 21-25.

Wurm, J. (2013). The bio-responsive facade. *Detail Green, 2013* (1), 62-65.

Yüceer, N. S. (2015). *Yapıda çevre ve enerji.* Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

Zijffers, J. W. F., Janssen, M., Tramper, J. ve Wijffels, R. H. (2008). Design process of an area-efficient photobioreactor. *Marine Biotechnology, 10,* 404-415.