

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MİMARLIK ANABİLİM DALI

FOTOBİYOREAKTÖRLERİN MİMARİDE KULLANIM ALANLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem SARIYILMAZ

**EKİM 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

FOTOBİYOREAKTÖRLERİN MİMARİDE KULLANIM ALANLARININ İNCELENMESİ

Gizem SARIYILMAZ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK MİMAR"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 09 2023

Tezin Savunma Tarihi : 25 10 2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sibel MAÇKA KALFA
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Fotobiyoreaktörlerin Mimaride Kullanım Alanlarının İncelenmesi” isimli bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim ve ez çalışmam boyunca, bilgisiyle, tecrübesiyle, güler yüzüyle bana anlayış ve sabırla yol gösteren, yanımda olan saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Sibel MAÇKA KALFA 'ya teşekkürü borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca yanımda olan, bana güvenen ve yardımlarını esirgemedi bana güç veren annem Sevilay SARIYILMAZ 'a, babam Serdar SARIYILMAZ 'a ve kardeşim Kemal Şahin SARIYILMAZ 'a çok teşekkür ederim. Ayrıca araştırma süreci boyunca, yardımlarıyla ve sabırlarıyla yanımda olan çok sevgili arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Gizem SARIYILMAZ

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Fotobiyoreaktörlerin Mimaride Kullanım Alanlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Sibel MAÇKA KALFA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/10/2023

Gizem SARIYILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLOLAR DİZİNİ	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Kapsam	2
1.3. Fotobiyoreaktör	2
1.4. Fotobiyoreaktör Bileşenleri	4
1.4.1. Algler	4
1.4.1.1. Alglerin Sınıflandırılması	5
1.4.1.2. Alglerin Fotosentezi ve Fotosentez Verimliliğini Etkileyen Faktörler	14
1.4.1.3. Alglerin Kullanım Alanları	18
1.4.2. Fotobiyoreaktör Malzemeleri	22
1.4.2.1. Metaller	23
1.4.2.2. Şeffaf Malzeme	23
1.4.2.3. Kaplama	24
1.4.2.4. Besleme Boruları/Tüpleri	25
1.4.3. Fotobiyoreaktörlerin Çalışma Prensibi	25
1.5. Fotobiyoreaktör Tarihçesi	27
1.6. Fotobiyoreaktör Türleri	36
1.6.1. Düz Panel Fotobiyoreaktör	37

1.6.2.	İçten Aydınlatmalı Fotobiyoreaktör	40
1.6.3.	Tübüler Fotobiyoreaktör	41
1.6.4.	Dikey Kolon Fotobiyoreaktör	44
1.6.5.	Karıştırmalı Tank Fotobiyoreaktör	45
1.6.6.	Hava Kaldırmalı Fotobiyoreaktör	46
1.6.7.	Plastik Torba Fotobiyoreaktör	47
1.7.	Fotobiyoreaktör Kullanım Alanları	50
1.8.	Fotobiyoreaktörlerin Mimaride Kullanımı	51
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	57
2.1.	Yöntem	57
2.1.1.	Bibliyografik Analiz	57
2.1.2.	Örnek Yapıların İncelenmesi	60
2.1.2.1.	BIQ House... ..	62
2.1.2.2.	In Vivo	68
2.1.2.3.	Algaevator	70
2.1.2.4.	EcoLogicStudio	71
2.1.2.4.1.	STEM V1.0	72
2.1.2.4.2.	Urban Algae Canopy	73
2.1.2.4.3.	Urban Algae Canopy 2.0	74
2.1.2.4.4.	Photo.Synth.Etica Curtain	77
2.1.2.4.5.	Habitat One	79
2.1.2.5.	Carbon Tunnel Algae Park	82
2.1.2.6.	GSA Ofis Binası	82
2.1.2.7.	Algae Green Loop	84
2.1.2.8.	Culture Urbaine	86
2.1.2.9.	Street Lamp	87
2.1.2.10.	Alg Kubbesi Space10	88
3.	BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	90
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER	95
5.	KAYNAKÇA	100
6.	EKLER	108
	ÖZGEÇMİŞ.....	111

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

FOTOBİYOREAKTÖRLERİN MİMARİDE KULLANIM ALANLARININ İNCELENMESİ

Gizem SARIYILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mimarlık Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sibel MAÇKA KALFA

2023, 124 Sayfa, 3 Sayfa Ek

Fotobiyoreaktörler, mimarlık alanında cephelerde ve kentsel donatılarda insanların fotobiyoreaktör sistemlerini canlı olarak deneyimlemesi, bu yenilenebilir enerji kaynağına teşvik sağlanması, enerji üretmesi gibi faydalarıyla bu çalışmaya konu edilmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde, kavramsal çerçevenin ortaya konulması amacıyla fotobiyoreaktörlerin tarihçesi, türleri, kullanım alanları, mimarideki yeri ve fotobiyoreaktörlerde yetiştirilen algler açıklanmaktadır. İkinci bölümünde yöntem açıklanarak çalışma kapsamında incelenen örnekler analiz edilmektedir. Çalışmada literatür taraması, bibliyografik analiz ve örnek yapı analizi olmak üzere 3 aşamalı bir yöntem kurgulanmaktadır. Çalışmanın amacı; fotobiyoreaktör kullanımının avantajları, dezavantajları, mimari yapılara sağladığı fayda, farklı işlevlerde kullanım potansiyeli ve beklenen oranda tercih edilmemesine sebep olan kısıtlamaları hakkında bilgi vermektir. Bununla birlikte, fotobiyoreaktörlerin gelecekte sürdürülebilir mimariye entegre edilebilmesinde literatüre katkı sağlaması hedeflenmektedir. Çalışmanın üçüncü bölümünde incelenen örnekler birbirleriyle kullanım alanı, kullanılan fotobiyoreaktör türü ve kullanım amacı olarak karşılaştırılmıştır. Dördüncü ve son bölümde ise literatürden elde edilen bilgiler, bibliyografik analizler ve incelenen yapılar aracılığıyla fotobiyoreaktörlerin mimarlık alanına sağladığı ve sağlayacağı katkılar üzerine öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fotobiyoreaktör, Fotobiyoreaktör Türleri, Fotobiyoreaktör Cephe Sistemleri, Alg Üretimi, Bibliyografik Analiz.

Master Thesis

SUMMARY

EXAMINATION OF THE USAGE AREAS OF PHOTOBIREACTORS IN ARCHITECTURE

Gizem SARIYILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Architectural Graduate Program
Supervisor: Doç. Dr. Sibel MAÇKA KALFA
2023, 124 Pages, 3 Pages Appendix

Photobioreactors have been the subject of this study with their benefits such as allowing people to experience photobioreactor systems live on facades and urban reinforcements in the field of architecture, providing incentives for this renewable energy source, and generating energy. In the first part of the study, the history of photobioreactors, their types, areas of use, their place in architecture and the algae grown in photobioreactors are explained in order to reveal the conceptual framework. In the second part, the methodology is explained and the examples examined within the scope of the study are analyzed. In the study, a 3-stage method is designed as literature review, bibliographic analysis and sample structure analysis. The aim of the study is to provide information about the advantages and disadvantages of photobioreactors, the benefits they provide to architectural structures, their potential for use in different functions and the limitations that cause them not to be preferred at the expected rate. In addition, it is aimed to contribute to the literature in integrating photobioreactors into sustainable architecture in the future. In the third part of the study, the examples examined are compared with each other in terms of area of use, type of photobioreactor used and intended use. In the fourth and final part, through the information obtained from the literature, bibliographic analysis and the structures examined, suggestions are presented on the contributions of photobioreactors to the field of architecture.

Keywords: Photobioreactor, Photobioreactor Types, Photobioreactor Facade Systems, Algae Production, Bibliographic Analysis.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Alg Hücresi	5
Şekil 2. Alglerin eko fizyolojik sınıflandırılması.....	6
Şekil 3. Alglerin eko taksonomik sınıflandırılması.....	6
Şekil 4. Alglerin büyüme koşullarını ve biyokütle üretimini etkileyen faktörler.....	14
Şekil 5. Mikroalg üretiminin dünya çapında dağılımı.....	19
Şekil 6. Fotobiyoreaktör Bileşenleri 1	22
Şekil 7. Fotobiyoreaktör Bileşenleri 2	22
Şekil 8. Fotobiyoreaktör Döngüsü	26
Şekil 9. SolarLeaf Cam Panel	27
Şekil 10. Fotobiyoreaktör zaman çizelgesi	28
Şekil 11. Açık Sistem Alg Üretim Tesisi	29
Şekil 12. Gelişmiş Entegre Atık Su Havuz Sistemi, Delhi, California	29
Şekil 13. Dunaliella üretimi için ticari bir tesis, Santa Ana, İspanya	30
Şekil 14. İtalya Floransa Üniversitesi alveol şeklindeki fotobiyoreaktör	31
Şekil 15. Yavan'da (Tacikistan) büyük ölçekli bir yatay tübüler fotobiyoreaktör sistemi ...	31
Şekil 16. Hidrobiologica SA tarafından inşa edilen fotobiyoreaktör	32
Şekil 17. Inalco S.p.A tarafından Floransa'da (İtalya) inşa edilen sarmal fotobiyoreaktör ..	33
Şekil 18. Microalgae S.p.A tarafından inşa edilen fotobiyoreaktör	33
Şekil 19. Biosynthesis Co (UK), çit benzeri fotobiyoreaktör	34
Şekil 20. Micro Gaia tarafından inşa edilen kubbe fotobiyoreaktör	35
Şekil 21. Addavita Ltd (Chesterfield, BK), Gelişmiş Alg Üretim Sistemi (AAPS)	35
Şekil 22. Günümüzde fotobiyoreaktör teknolojisi	36
Şekil 23. Fotobiyoreaktör Türleri	37
Şekil 24. Düz-Panel Fotobiyoreaktör Detaylı	38
Şekil 25. Düz Panel Fotobiyoreaktör Deneyisel	40
Şekil 26. İçten Aydınlatmalı Fotobiyoreaktör	41
Şekil 27. Tübüler Fotobiyoreaktör	42

Şekil 28. Yatay Tübüler Fotobiyoreaktör	43
Şekil 29. Dikey-Kolon Fotobiyoreaktör	44
Şekil 30. Karıştırılmalı Tank Fotobiyoreaktör	45
Şekil 31. Hava Kaldırılmalı Fotobiyoreaktör	46
Şekil 32. Plastik Torba Fotobiyoreaktör	47
Şekil 33. Deneyde kullanılan referans ofis yapıları.....	55
Şekil 34. Çalışmanın Yöntem Şeması	57
Şekil 35. Fotobiyoreaktör kavramı araştırmasının yıllara göre dağılımı	58
Şekil 36. Fotobiyoreaktör kavramının araştırma alanlarının dağılımı	58
Şekil 37. Fotobiyoreaktör kavramı araştırmalarının bölgelere göre dağılımı	59
Şekil 38. Fotobiyoreaktör kavramının sürdürülebilir gelişim hedefleri	60
Şekil 39. BIQ evi yapım aşamaları	63
Şekil 40. BIQ Evi Fotobiyoreaktör olan ve olmayan cephe görünüşü	64
Şekil 41. BIQ Evi Panel görünüşü	65
Şekil 42. BIQ House hareketli panel görünüşü	65
Şekil 43. BIQ Evi panelinde oluşan hava kabarcıklar	66
Şekil 44. BIQ evi enerji kavram şeması, sıcaklık sensör konumları (T1-T5) ve sayalardan geçen ısı akışı (HM1-HM4) oklarla gösterilmektedir	67
Şekil 45. Fotobiyoreaktör içindeki algleri besleye boru sistemi	68
Şekil 46. In Vivo projesini oluşturan 3 bina kullanımı modeli	69
Şekil 47. In Vivo yeşil ve fotobiyoreaktör cepheler	70
Şekil 48. Algaevator	71
Şekil 49. EcoLogicStudio fotobiyoreaktör örnekleri	72
Şekil 50. STEM V1.0	72
Şekil 51. Urban Algae Canopy	73
Şekil 52. Urban Algae Canopy'nin iç mekândan görünüşü ve beslenme sistemi	74
Şekil 53. Urban Algae Canopy 2.0	76
Şekil 54. Urban Algae Canopy renkli kesiti, Danimarka	76
Şekil 55. Photo.Synth.Etica cephe görünüşü	77
Şekil 56. Plastik Torba Fotobiyoreaktörün bina cephesindeki uygulaması	78
Şekil 57. Hyundai Motorstudio Seul binası görünüşü	79
Şekil 58. Tree One Heykeli	80

Şekil 59. Bio Laboratuvar plan ve perspektif görünüşü	81
Şekil 60. Bio Laboratuvar biyokütle toplama sistemi	81
Şekil 61. %25, %65 %80 açıklığa sahip panellerin model görüntüsü	83
Şekil 62. Doğal aydınlatma sağlayan atriyumların model görünüşü	84
Şekil 63. Green Loop Tower (Marina Şehir Kuleleri) enerji üreten cepheler	85
Şekil 64. Farklı Alg Sokak Lambası Tasarımları	86
Şekil 65. Culture Urbaine üst geçit alg tüpleri.....	88
Şekil 66. Alg Kubbesi Space 10	89



TABLO DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Mikroalg kültür koşulları.....	3
Tablo 2. Kapalı sistemlerin ve açık sistemlerin karşılaştırılması.....	4
Tablo 3. Bazı alg türlerinin taksonomik sınıflandırılması.....	7
Tablo 4. Alg Türlerinin kuru lipit miktarı	13
Tablo 5. Alg kültürü hasat yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları	17
Tablo 6. Günümüzde besin olarak tüketilen algler ve tüketilen ülkeler	18
Tablo 7. 01.01. 2023 tarihi itibariyle Bölümlere ait Türkiye algleri takson sayısı	20
Tablo 8. Tübüler fotobiyoreaktörlerin enerji içeriği ve fotobiyoreaktör şeffaf malzeme özellikleri.....	24
Tablo 9. Fotobiyoreaktör çeşitlerinin avantaj ve dezavantajları.....	48
Tablo 10. Fotobiyoreaktörlerin kullanım alanları.....	50
Tablo 11. Mimari eleman olarak kullanılan fotobiyoreaktörlerin avantaj ve dezavantajları.....	51
Tablo 12. Fotobiyoreaktör tasarımını etkileyen faktörler.....	52
Tablo 13. C. Reinhardtii ve C. vulgaris alg türlerinin farklı yoğunluklardaki enerji kullanımlarının deneysel sonuçları.....	54
Tablo 14. Fotobiyoreaktörlerin mimaride kullanım alanları.....	62
Tablo 15. Çalışma kapsamında incelenmek üzere seçilen örnekler.....	62
Tablo 16. 1. Örnek künyesi: BIQ House	63
Tablo 17. 2. Örnek künyesi: In Vivo.....	69
Tablo 18. 3. Örnek künyesi: Algaevator	71
Tablo 19. 5. örnek künyesi Urban Algae Canopy	74
Tablo 20. 6. örnek künyesi: Urban Algae Canopy 2.0	76
Tablo 21. 7. örnek künyesi: Photo.Synth.Etica.Curtain	78
Tablo 22. 9. örnek künyesi: Carbon Tunnel Algae Park	83
Tablo 23. 10. örnek künyesi: GSA Ofis Binası	84
Tablo 24. 11. örnek künyesi: Algae Green Loop	87
Tablo 25. 12. örnek künyesi: Culture Urbaine	88
Tablo 26. 13. örnek künyesi: Street Lamp	89

Tablo 27. 14. örnek künyesi: Alg Kubbesi Space 10	90
Tablo 28. Çalışma kapsamında incelenen örneklerin analizi	94



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Sayfa No

μm	: Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	: Derece
AB	: Avrupa Birliği
ATP	: Adenozin Trifosfat
CaCO_3	: Kalsiyum karbonat
cm	: Santimetre
CO_2	: Karbondioksit
CO_3^{2-}	: Karbonat
Cr	: Krom
DNA	: Deoksiribonükleik Asit
FBR	: Fotobiyoreaktör
g	: Gram
H	: Hidrojen
HCO_3^{-}	: Bikarbonat
J	: Joule (Enerji Birimi)
kg	: kilogram
kJ	: Kilojoule (Enerji Birimi)
km	: Kilometre
kWh	: Kilowatt saat (enerji birimi)
Ltd.	: Limited şirket
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen Film

LGS : Lamine Güvenlikli Cam (Laminated Safety Glass)

lux : Aydınlatma şiddeti

M : Molar

m : Metre

MJ : Megajoule

mm : milimetre

Mo : Molib

NaCl : Sodyum Klorür

NADPH₂ : İndirgenmiş Nikotinamid Adenin Dinükleotit Fosfat

Ni : Nikel

O₂ : Oksijen

PFA : Teflon

RNA : Ribonükleik Asit

SGHC : Güneş Isısı Kazanım Katsayısı

ppm : Milyonda parça

PV : Fotovoltaik Panel

PVC : Poli Vinil Klorür

U değeri : Birim zamanda geçen ısı miktarı

UV : Ultraviyole

VT : Görünür geçirgenlik

y : Yıl

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyada nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve sanayileşme ile enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için kullanılan yenilenemeyen fosil enerji kaynakları hızla tükenmeye başlamıştır. Yenilenemez fosil enerji kaynaklarının tükenmek üzere oluşu ve çevreye verdiği zararlardan kaynaklı kullanımlarının sınırlandırılması, bu kaynaklar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımlarının teşvik edilmesi gerekmektedir. Enerji; sanayi, teknoloji, ulaştırma, yapı vb. gibi sektörlerde tüketilmektedir. Sektörlere göre enerji tüketim oranları değişmekle birlikte bu tüketilen enerjinin yaklaşık % 40'ı binalarda tüketilmektedir. Bu oran oldukça fazladır. Bu nedenle binalarda tüketilen enerjinin azaltılması üzerine dünya genelinde birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar genellikle binalarda enerji tüketimini azaltmak ve kendi enerjilerini üretme yeteneklerini artırmak amacıyla farklı pasif ve aktif sistemlerin kullanımına odaklanmaktadır. Özellikle bina cephelerinde tercih edilen sistemler ile yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, dalga enerjisi ve biyokütle enerjisidir. Örneğin fotovoltaik paneller bina cephelerinde veya çatılarda kullanılır ve bu sayede güneş enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülerek binada kullanılabilir.

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyokütle enerjisi ön plana çıkmaktadır. Sağlıktan yakıta pek çok alanda biyokütle enerjisi kullanılarak enerji ihtiyaçları karşılanmaktadır. Biyokütle üreten bir kaynak olan algler, açık ve kapalı sistemlerde enerji ve biyokütle üretmektedir. Algler enerjiyi ve biyokütleyi fotosentez yaparak ürettiğinden kullanılan algin türü, güneş ışığı miktarı, ışık yoğunluğu, sıcaklık, CO₂ miktarı, besin ortamı ve fotobiyoreaktörün fiziksel boyutları gibi parametreler uygun şekilde sağlanmalıdır. Kentsel donatılarda algler, insanların biyokütleyle olan ilgisini çekmek amacıyla kullanılmaktadır. Algler bina cephelerinde ve kentsel donatılarda kapalı sistem olan fotobiyoreaktör olarak kullanılmaktadırlar.

Literatür araştırmasında, alglerin binalarda kullanımı için yapılan çalışmaların son yıllarda ivme kazandığı ancak uygulamanın yalnızca bir yapıyla sınırlı kullanıldığı görülmektedir. Bu bağlamda alglerin ilk kez cephede fotobiyoreaktör olarak kullanıldığı yapı BIQ House göze çarpmaktadır. Laboratuvar ortamında, bina cephelerinde etkin şekilde kullanılabilmesi için deneysel olarak birçok alg türü ve fotobiyoreaktör çeşidi üzerine çalışmalar sürmektedir. Mimarlıkta yapı ölçeğinde uygulanmış örneklerin çok sınırlı olması fotobiyoreaktörlerin özellikle kullanıcı açısından avantaj ve dezavantajları tam olarak değerlendirilememektedir. Bu noktada cephe elemanı dışında kullanım alanları arttırılmalıdır.

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, fotobiyoreaktörlerin mimaride etkin kullanımının sağlanması, alglerin büyümesi ve biyoenerji üretebilmesi için uygun olan koşullar araştırılmıştır. Dünyada mevcut ve tasarım aşamasında olan fotobiyoreaktörler incelenmektedir. Çalışmanın sonucunda fotobiyoreaktörün mimari cephe ile bütünleşmesi sağlamak amacıyla yapılacak tasarımları ve enerji verimliliğini etkileyen faktörler hakkında öneriler sunulmuştur.

Web of Science veri tabanı temel alınarak literatürde fotobiyoreaktörler ile ilgili yapılan çalışmaların, araştırma bölgeleri, araştırma yılları ve araştırma alanları incelenerek tartışılmıştır.

Bu çalışma kapsamında incelenen örnekler doğrultusunda; fotobiyoreaktörlerin mimari cephe ile bütünleşmesini sağlamak amacıyla, fotobiyoreaktör türü, alg türü, sürdürülebilirlik, iklim şartları, yapının işlevi ve estetik kaygı göz önünde bulundurulması gereken parametreler olarak belirlenmiştir.

1.3. Fotobiyoreaktör

Alg yetiştirebilen kapalı sistem olan fotobiyoreaktörler tekrarlanabilir yetiştirme koşulları, iyi ısı transferi kontrolü, daha iyi biyokütle verimi, daha iyi ürün kalitesi ve esnek teknik tasarım fırsatı sağlayan sistemlerdir. Standart bir fotobiyoreaktör; katı alg hücreleri,

sıvı ortam, gaz halindeki hidrojen (H_2) ve ışık gereksinimlerini içeren dört fazlı bir sistemdir (Tamburic B. vd., 2011). Fotobiyoreaktörler, ışığın kontrol edilmesi ve biyokimyasal süreçlerin izlenmesi açısından esneklik sağlayarak, birçok farklı uygulamada ve sektörde kullanılabilir. Bu sistemler, çevresel ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesi açısından büyük potansiyele sahiptir. Fotobiyoreaktör sistemlerin biyokütle üretiminin verimli olabilmesi için Tablo 1’de belirtilen şartları sağlaması gerekmektedir (Lavens & Sorgeloos, 2016).

Tablo 1. Mikroalg kültür koşulları

Parametre	Açıklama
Kültür ortamı	Alglerin ihtiyaç duydukları kültür ortamının kimyasal kompozisyonu deniz suyuna ya da doğal ortamlarına benzer olmalıdır.
Işık	Uzun süre stok halde saklanmak istenen kültürlerin ortalama ışık yoğunlukları 1000 lux, büyük hacimlerde hızlı bir büyüme elde etmek için 3500-10.000 lux gibi daha yüksek ışık yoğunlukları kullanılmalıdır.
pH	Yaygın olarak kültürü yapılan alg türleri için pH aralığı 7 ile 9 arasındadır, optimum pH aralığı ise 8,2-8,7’dir.
Havalandırma	Kültür ortamı ve atmosfer arasındaki gaz değişimini artırma, suyun homojen olması, popülasyondaki bütün hücrelerin besini ve ışığı eşit olarak alması ve alg kültürlerindeki çökmeyi önlemek için gereklidir.
Sıcaklık	Optimum sıcaklık genellikle 20 ve 24 °C arasındadır. Yaygın olarak kültürü yapılan türler 16 ve 27 °C arasındaki sıcaklığa toleranslı alglerdir.
Tuzluluk	%20-24 tuzluluğun hemen hemen bütün türler için uygundur.

Kapalı fotobiyoreaktör sistemler, açık havuz sistemlerinden daha kolay çevre kontrolü sağlanması nedeniyle alg yetiştiriciliği için daha verimlidir. Ancak günümüzde kapalı sistemlerde sorunlar ve kısıtlamalar devam etmektedir. Örneğin bu tür sistemlerin maliyeti yüksektir, işletimi karmaşıktır, temizlenmesi zor ve ölçeği büyütmesi zordur. Farklı alg türleri ve farklı kültür ortamları birbirinden farklı sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle fotobiyoreaktörler tasarlanırken detaylı şekilde düşünülmelidir (Ting vd., 2017).

Bu çalışmada bahsedilen kapalı kültür sistemi olan fotobiyoreaktörler ve alg yetiştiriciliğinin ilk adımı olan açık sistemlerin karşılaştırılması Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kapalı sistemlerin ve açık sistemlerin karşılaştırılması

Kapalı Kültür Sistemi	Durum	Açık Kültür Sistemi
Kolay	Kültür koşullarının kontrolü pH, sıcaklık, çözünmüş CO ₂	Orta
Düşük	Kültür bulaşmasına duyarlılık / Su Buharlaşması	Yüksek
Yüksek	m ² başına verimlilik	Orta
Yüksek	Enerji girişi / Yapı maliyeti	Düşük

Kültür koşullarının kontrolü kapalı sistemlerde daha kolay yapılabilirken açık sistemlerde de yeteri kadar yapılabilir. Açık sistemlerde alg kültürünün yayılması sınırlarının daha esnek olmasından dolayı daha kolaydır. Su buharlaşması da kapalı sistemlerin kapalı olmasından dolayı su buharlaşamaz panelin içinde kalır. İki kültür sistemi arasında en fazla verimlilik kapalı kültür sisteminden alınır. Üretim maliyeti açık sistemlerde daha az, kapalı sistemlerde ise yüksektir.

1.4. Fotobiyoreaktör Bileşenleri

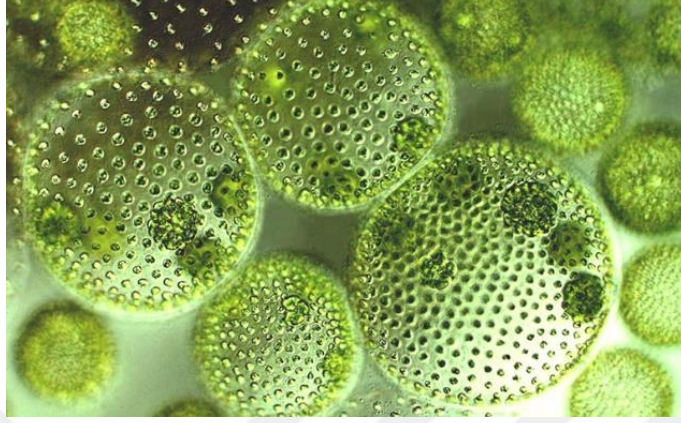
Fotobiyoreaktörler temel olarak dört kısımdan oluşmaktadır: Enerji kaynağı olan algler, kültür ortamına karbondioksit (CO₂), besini taşıyan borular ve oksijeni (O₂) tahliyesi yapan borular, kültür ortamını kaplayan şeffaf malzeme, bu sistemi taşıyan metal çerçeve.

Bu bölümde fotobiyoreaktörleri oluşturan kısımlar ve fotobiyoreaktörlerin çalışma prensibi detaylı olarak açıklanmıştır.

1.4.1. Algler

Algler (Şekil 1), birincil fotosentetik pigment olan klorofil a içeren, kökleri, gövdeleri ve yaprakları olmayan canlılardır. Alglerin çoğu tatlı su, acı su ve deniz suyunda yaşar ancak bazı türleri kayaların üzerinde, topraklarda ve çöl topraklarında koloni halinde yaşayabilmektedir. Çoğu yaşam alanında, güneş ışığından, karbondioksitten (CO₂) ve sudan organik madde üreten besin zincirindeki birincil üreticiler olarak işlev görmektedirler. Besin

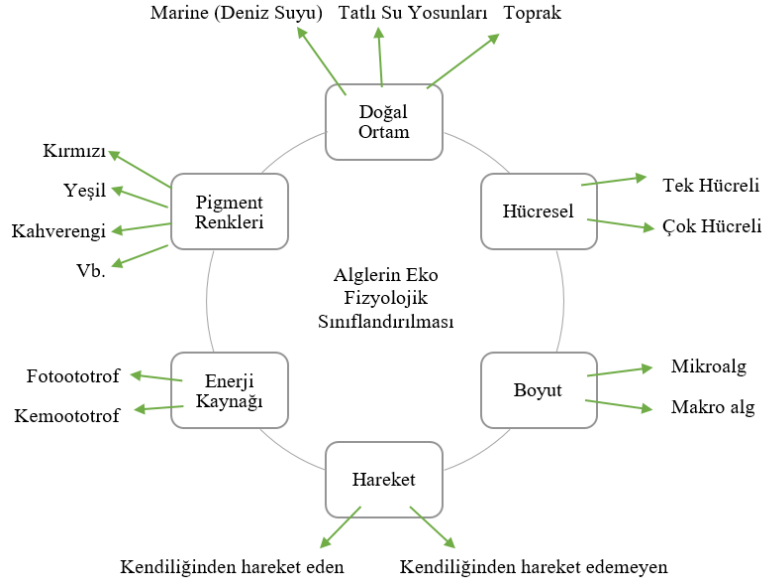
zincirinde temel besin kaynağını oluşturanın yanı sıra, tüketici organizmaların metabolizması için gerekli olan oksijeni (O_2) de üretebilmektedirler (Lee, 1980).



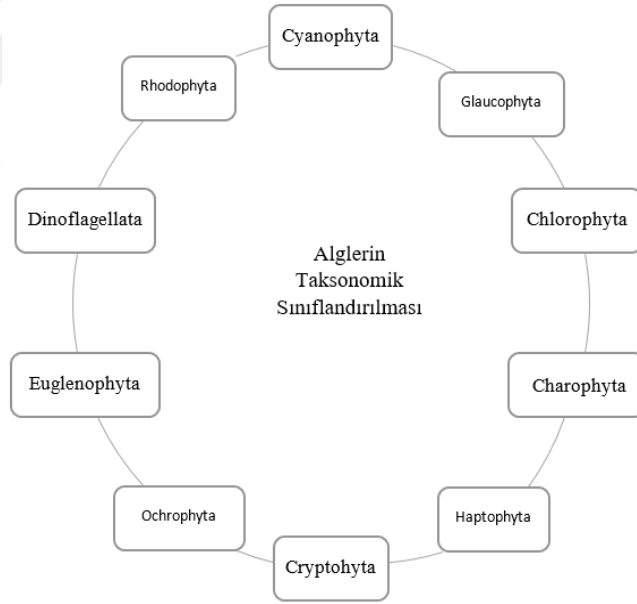
Şekil 1. Alg hücresi (URL-1, 2023)

1.4.1.1. Alglerin Sınıflandırılması

Algler CO_2 , ışık enerjisi ve besin kullanarak fotosentez yapabilen basit fotosentetik canlılardır (Duran vd., 2021). Besin zincirinin ilk halkasını oluşturan bu canlılar tek hücreli ya da çok hücreli yapıda olabilirler. (Aydın, 2019) 20.000 ile 26.000 arasında türü olduğu ancak sadece 50 türünün biyokimyası ve eko fizyolojisi tanımlandığı belirtilmektedir. Şekil 2’de alglerin eko fizyolojik ve Şekil 3’te olarak taksonomik sınıflandırılması gösterilmiştir (Eltanahy & Torky, 2021) . Eko fizyolojik olarak algler; doğal ortamlarına, hücre yapılarına, boyutlarına, hareket yeteneklerine, enerji kaynaklarına ve renk pigmentlerine göre sınıflandırılmaktadır. Taksonomik olarak ise *Cyanophyta*, *Glaucophyta*, *Chlorophyta*, *Charophyta*, *Haptophyta*, *Cryptophyta*, *Ochrophyta*, *Euglenophyta*, *Dinoflagellata* *Rhodophyta* şubelerine ayrılmaktadır.



Şekil 2. Alglerin eko fizyolojik sınıflandırılması



Şekil 3. Alglerin taksonomik sınıflandırılması

Algler, fotosentez yapabilen diğer canlılardan 10 kat daha fazla O₂ ve enerji üretebilmektedir. Bu durum, algleri sürdürülebilir ve yenilenebilir kaynakları arasında ön plana çıkarmaktadır (Duran vd., 2021).

Algal biyokütlenin üç ana bileşeni protein, karbonhidrat ve yağ asididir. Farklı türde alglerden üretilen biyokütlelerde bulunan protein, karbonhidrat ve yağ asidi oranına göre kullanım alanı değişmektedir. Biyoyakıt, kömür, eczacılık, kozmetik, sağlık, hayvan yemi, insanlar için besin gibi birçok alanda alglerden yararlanılmaktadır. Örneğin protein oranı fazla olan alglerden üretilen biyokütleler, kek ve hayvan yemlerinde kullanılabilir (Song vd., 2013).

Ökaryotik ototrofik mikroorganizmalar genellikle ışığı toplayan fotosentetik pigmentlerine göre ayrılır: *Rhodophyta* (kırmızı algler), *Chrysophyceae* (altın algler), *Phaeophyceae* (kahverengi algler) ve *Chlorophyta* (yeşil algler). Fotosentetik aparatları, değişen lipoprotein zar katmanları ve sıvı fazları, stroma içeren özel organellerden olan kloroplastlarda düzenlenmektedir (Staehelin & Dunahay, 1986). Yeşil algler a ve b klorofillere sahiptir. Besin depolama ürünü nişastadır. Yeşil algler *Chlorophytes* ve *Charophytes* olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Daha önce strüktürel özelliklere dayanarak tanımlanırken günümüzde gen dizisi verileri, kloroplast ve nükleer genom verileri ile tanısı desteklenmektedir. Kırmızı algler, klorofil a ve yığılaşmamış tilakoid membranların yüzeyinde bulunan fikobilizomlar içermektedir. Kırmızı algler üzerine yapılan çalışmalar onların çok çeşitli olabildiklerini göstermiştir. Tablo 3'te taksonomik sınıflandırması verilen alg türlerinin şubeleri ve cinsleri ile ilgili bilgiler verilmektedir.

Tablo 3. Bazı alg türlerinin taksonomik sınıflandırılması

Şube	Sınıf	Takım	Aile	Cins
<i>Cynaophyta</i>	<i>Oscillatoriales</i>	<i>Phormidiaceae</i>	<i>Spirulina</i>	<i>Spirulina platensis</i>
<i>Cynaophyta</i>	<i>Cyanophyceae</i>	<i>Oscillatoriales</i>	<i>Microcoleaceae</i>	<i>Arthrospira</i>
<i>Glaucophyta</i>	<i>Glaucophyceae</i>	<i>Glaucocystales</i>	<i>Glaucocystaceae</i>	<i>Cyanophora paradoxa</i>
<i>Glaucophyta</i>	<i>Glaucophyceae</i>	<i>Glaucocystales</i>	<i>Glaucocystaceae</i>	<i>Glaucocystis</i>
<i>Chlorophyta</i>	<i>Chlorophyceae</i>	<i>Chlamydomonadales</i>	<i>Dunaliellaceae</i>	<i>Dunaliella salina</i>
<i>Chlorophyta</i>	<i>Chlorophyceae</i>	<i>Volvocales</i>	<i>Haematococcaceae</i>	<i>Haematococcus pluvialis</i>
<i>Chlorophyta</i>	<i>Chlorococcales</i>	<i>Dictyosphaeriaceae</i>	<i>Botryococcus</i>	<i>Botryococcus braunii</i>
<i>Chlorophyta</i>	<i>Trebouxiophyceae</i>	<i>Chlorellales</i>	<i>Chlorellaceae</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>
<i>Chlorophyta</i>	<i>Chlorophyceae</i>	<i>Chlamydomonadales</i>	<i>Chlamydomonas</i>	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
<i>Haptophyta</i>	<i>Coccolithophyceae</i>	<i>Isochrysidales</i>	<i>Isochrysidaceae</i>	<i>Isochrysis</i>
<i>Ochrophyta-Bacillariophyta</i>	<i>Bacillariophyceae</i>	<i>Bacillariales</i>	<i>Bacillariaceae</i>	<i>Nitzschia thermalis</i>

Cynaophyta

Siyanobakteriler veya mavi-yeşil algler, prokaryotların ve ökaryotik alglerin karışık özellikleri ile karakterize edilen özel bir mikroalg grubudur. Kloroplastlar, çekirdek ve mitokondri gibi zara bağlı organellerden yoksundurlar. Mavi-yeşil algler hem deniz hem de tatlı su kütlelerinde yaygın olarak bulunmaktadır. İyi bilinen örnekler olarak *Arthrospira platensis*, *Nostoc Sphaeroides* ve *Anabaena cylindrica* ile bir sınıf “Cyanophyceae” tarafından temsil edilmektedir. *Spirulina* ve *Arthrospira*, tek hücreli bir protein olarak *Cyanophyta*'nın en yaygın cinsleridir (Eltanahy & Torky, 2021).

Spirulina platensis

Spirulina ticari olarak yoğun miktarlarda üretilen ve geniş kitleler tarafından tüketilen önemli bir protein kaynağıdır. Özellikle başta Amerika olmak üzere Japonya, Tayvan, Tayland ve İsrail gibi ülkelerde yoğun olarak üretilmekte ve pazara sunulmaktadır. *Spirulina*, pH'ı yüksek alkali besin ortamlarında daha iyi gelişme göstermektedir. Yüksek seviyede karbonat ve bikarbonat içeren tropik ve subtropik bölgelerde büyük popülasyonlar oluşturur. Besin değerinden dolayı biyoteknolojide ve çevresel uygulamalarda önemli yeri olan bu alg yaklaşık %70 protein içeriğine sahiptir. Sıcaklık: 40 °C Aydınlatma: 1200 lux Işık Yoğunluğu: 30-60 W.m⁻² pH: en uygun pH değerlerinin 9 ve 10 olduğu rapor edilmiştir. pH 11.5'te de iyi gelişebilen algler pH 7'de ise gelişme gösterememişlerdir.

Glaucophyta

Kloroplastların genellikle siyaneller olarak adlandırılan endosim biyotik siyanobakterilerle değiştirildiği ve bazen siyanobakteriler ile ökaryotik otik algler arasında evrimsel bir köprü olarak kabul edilen nadir tek hücreli kamçılı algleri içeren *Glaucophyceae* sınıfı tarafından temsil edilmektedir. Toprakta ve tatlı suda bulunabilmektedirler. Pigmentasyon, fikobilizomlarda sadece klorofil a, karotenoidler ve fikobiliproteinlerini içerir. Yedek materyal, sitoplazmada bulunan nişasta granülleridir. Örnekler arasında *Cyanophora paradoxa* ve *Glaucocystis* bulunur (Eltanahy & Torky, 2021).

Chlorophyta

Chlorophyta, klorofil a ve b içeren ve β -karoten, ksantofiller ve lutein gibi yardımcı pigmentleri olan yeşil alglerdir. Çoğunlukla tatlı sularda yaşayan bu algler deniz ve kara yaşam alanlarında da bulunabilirler. Bu şube içinde çok çeşitli mikroskobik ve makroskobik canlılar bulunmaktadır. Selüloz, hücre duvarlarındaki ana bileşendir. Kloroplastlar farklı şekil ve boyutlarda bulunmaktadır. *Chlorophyta* altı sınıf içermektedir: *Chlorophyceae*, *Trebouxiophyceae*, *Chlorodendrophyceae*, *Prasinophyceae*, *Dasycladophyceae* ve *Ulvophyceae*. *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*, *Scenedesmus almeriensis* ve *Chlamydomonas reinhardtii* bu sınıfın ünlü temsilcileridir. Serbest yaşayan örnekleri arasında *Chlorella sp.* ve *Parachlorella sp.* yer almaktadır (Eltanahy & Torky, 2021).

Dunaliella salina

Chlamydomonas'a benzeyen yeşil bir alg olan *Dunaliella*'nın, uç koşullarda yaşamaya uyum sağlamış türleri vardır. Örneğin asitli sularda ya da yüksek tuzlu sularda yaşayabilmektedir. *Dunaliella salina*, Utah'ın Büyük Tuz Gölü gibi yerlerde yaygın olarak görülen tuz oranı yüksek sulara uyum sağlamıştır. *Dunaliella salina*'nın iki çeşidi vardır. İlki, 0,5 M ve üzeri NaCl konsantrasyonlarında büyüeyebilen küçük yeşil hücrelere sahiptir. İkincisi, yalnızca 2 M'ın üzerindeki tuzlu su konsantrasyonlarında büyüeyebilen büyük kırmızı hücrelere sahiptir (Lee, 2008).

Haematococcus pluvialis

H. pluvialis hücre büyüklüğü 8-50 μ m çapında değişkenlik gösterebilen, vejetatif safhada oval yapıda, tek hücreli bir tatlı su mikroalg türüdür. Genel olarak düşük bir büyüme hızına sahip olan *H. pluvialis*'in özellikle yüksek hacimli kültürlerinin, özellikle daha hızlı büyüyen diğer algler tarafından kontaminasyon riski yüksektir. *H. pluvialis* hücreleri stres koşulları oluştuğunda ise (ışık şiddetinin artması, nitrat ve fosfat eksikliği, yüksek sıcaklık vb.) yeşil vejetatif formdan kırmızı hematokist veya aplanosporlar (kalın çeperli, kamçısı olmayan ve hareket edemeyen) oluşturur (Eltanahy & Torky, 2021).

Botryococcus braunii

B. braunii yüksek lipit içeriğinden dolayı, lipit araştırmalarıyla ilgili birçok çalışmada kullanılmaktadır. Elde edilen verilere göre lipit miktarı kuru ağırlığın %28,6 ile %42'si arasında değişmektedir. Bununla birlikte uygun büyüme şartları sağlandığında, kuru

ağırlıklarının %80'i kadar, hidrokarbonca zengin yağları üretir ve biriktirirler. Hidrokarbonların yüksek oranlarda üretildiği dönemlerde büyüme yavaşlamaktadır. Laboratuvar şartlarında yetiştirildiği zaman rengi yeşil olan *B. Braunii* doğada turuncu veya turuncuya yakın bir renk almaktadır. *B. Braunii* için uygun sıcaklık değeri 25-30 °C arasındadır. Yapılan çalışmalarda 3 M tuzluluğa kadar olan ortamlarda yaşayabildiği vurgulanmıştır. Fakat *B. braunii* maksimum verimi 0,25 M tuzluluğa sahip besin ortamlarında gerçekleştirmiştir. Tuzluluğun 0.5 M'a çıktığı besin ortamlarında algal gelişimin durma noktasına geldiği, 0.7 M tuzlulukta ise alglerde yüksek oranda ölümlerin olduğu bildirilmiştir. Işık yoğunluğu 30-60 W.m⁻² ve pH 7,5'te uygun gelişme ortamı oluşturulmaktadır (Eltanahy & Torky, 2021).

Chlorella vulgaris

Chlorella türleri tek hücreli yeşil alglerdir. Fotosentetik pigment olarak klorofil a ve klorofil b içermektedir (Singh & Singh, 2015). *Chlorella*'nın tek hücreli yapısı ile birlikte vitamin, protein, mineral, aminoasitler, nükleik asitler (RNA, DNA), temel yağ asitleri, enzimler ve karotenoidleri bünyesinde bulundurmaktadır. *Chlorella*, %50-60 oranında proteinden oluşmakta olup klorofilin doğada bilinen en yüksek oranlı kaynağıdır. Ayrıca demir, iyot, çinko, magnezyum, fosfor ve kalsiyum da içermektedir. *Chlorella*, sığır karaciğerinin içermekte olduğu B12 vitamininden daha fazla B12 vitamini içerir. Phang (1992) *Chlorella vulgaris*'in kimyasal kompozisyonunu %51-58 protein, %14-22 lipid, %12-17 karbonhidrat ve 55-10 mineral olarak tanımlamaktadır (Eltanahy & Torky, 2021).

Charophyta

Charophytes kara bitkileriyle güçlü bir şekilde ilişkilidir ve yapılarına, biyokimyalarına ve moleküler özelliklerine göre *Mesostigmatophyceae*, *Klebsormidiophyceae*, *Charophyceae* ve *Zygnematophyceae* olarak sınıflandırılır. Klorofil a ve klorofil b ve karoten (α , β , γ) sahiptir. Ana ksantofil olarak lutein bulunmaktadır (Eltanahy & Torky, 2021).

Haptophyta

Bu şube sadece iki sınıf tarafından temsil edilmektedir. Mevcut ana pigmentler klorofil a ve klorofil c'dir, hücreler zarsız, organik veya mineralize (CaCO_3) pullarla kaplı olabilmektedir ve beslenme şekli ototrofi veya fagositoz olabilmektedir (Eltanahy & Torky, 2021).

Isochrysis galbana

Isochrysis galbana, tek hücreli, uzunluğu 5-6 μ , kalınlığı 2,5-3 μ olan şekil itibarıyla yuvarlak ve kamçılı bir denizel mikroalgdir. İki eşit kamçı, anterior olarak ortaya çıkar ve uzunlukları hücrenin bir ila iki katı olabilir. Bu kamçılar sayesinde hareket etme yeteneğine sahiptir.

Cryptophyta

Cryptophytes veya *Cryptomonads*, *Cryptophyceae* adı verilen bir sınıfta gruplandırılmaktadır. 10 cinse sınıflandırılan yaklaşık 200 türden oluşan bir gruptur. Hem tatlı su hem de deniz suyu ortamlarında bulunmaktadır. Çoğunlukla ototrofiktir, ancak bazı türleri heterotrofiktir. Genellikle tek hücreli, asimetrik ve çift kamçılılardır (Eltanahy & Torky, 2021).

Ochrophyta

İki kamçılı olan bu şube türleri tatlı su, acı su ve deniz suyu gibi farklı habitatlarda yaşayabilmektedir. Yardımcı pigmentlerin baskınlığının sonucunda yeşil yerine altın sarısı bir renk almaktadırlar. Diatomlar veya *Bacillariophyceae*, üst üste binen iki parçadan oluşan hücre duvarı ile çevrili, kahverengi tek hücreli alglerin ayrı bir grubudur. Genellikle serbest yaşamaktadırlar ancak bazı türleri simbiyoz halinde de bulunabilmektedir (Eltanahy & Torky, 2021).

Nitzschia thermalis

Bacillariophyceae sınıfına ait olan bu diatomun cinsi *Nitzschia* 'dır. *Nitzschia*, Türkiye sularında en çok bulunan diatom cinsilerinden biridir. Sıklıkla zincir veya serbest yaşayan

hücreler şeklinde bulunabilir. *Nitzschia thermalis* 'in uzunluğu 28 ila 50 µm arasında, genişliği ise 2,5 ila 5 µm arasında değişmektedir.

Euglenophyta

Öglenoitler, çoğu genellikle bir çift kamçıya sahip olan biri uzun diğeri tamamen kısaltılmış uzun iğ şeklindeki tek hücreli organizmalar olan bir *Euglenophyceae* sınıfı tarafından temsil edilmektedir. Sarı ile kahverengi renklerinden değişken karotenoid içeriğinden kaynaklanmaktadır. Astaksantin birikimi ise *Euglena sanguinea* çiçeklerinde gözlemlendiği gibi parlak kırmızı renklenmeye neden olabilmektedir (Eltanahy & Torky, 2021).

Dinoflagellata

Dinophyceae adlı tek bir sınıfta sınıflandırılan *Dinoflagellata*'lar, tipik olarak tek hücreli iki kamçılı deniz yosunlarıdır. Üç zarla çevrili kloroplastlar, yardımcı pigmentler olarak peridinin, dinoksantin ve fukoksantin yanı sıra klorofil a, c1 ve c2 içermektedir. Hücre boyutu *Parvodinium inconspicuum*'da olduğu gibi 12 µm uzunluğundan bazı *Ceratium* türlerinde olduğu gibi 400 µm uzunluğundadır (Eltanahy & Torky, 2021).

Rhodophyta

Phylum Rhodophyta iki alt şubeden oluşmaktadır: bir *Cyanidiophyceae* sınıfına sahip *Cyanidiophytina* ve farklı altı sınıfa sahip *Rhodophytina*. Kırmızı algler esas olarak deniz yosunlarıdır ancak birkaç cins tek hücreli mikroalglerdir. Deniz sistemlerinde yaygın olarak bulunurken tatlı su ve karasal habitatlarda da bulunabilirler. Kloroplastlar sadece klorofil a içermektedir. *Cyanidiophyceae* üyeleri, yüksek sıcaklık, düşük pH gibi elverişsiz kötü koşullar altında ve toksik kimyasalların varlığında hayatta kalabilen tek hücreli alglerdir. *Porphyridiophyceae*, *Rhodellophyceae* ve *Stylonematophyceae* sınıfları ayrıca *Porphyridium cruentum* ve *Rhodellavioleacea* gibi birçok türü de içermektedir.

Mimari cephelerde kullanılacak fotobiyoreaktörler için en uygun alg seçiminde çeşitli hususlar dikkate alınmalıdır. Organizmanın fizyolojik ihtiyaçlarından, CO₂ tutma verimliliğine, ışık emme yeteneklerine, atık su arıtma kapasitesine, kirleticilerin toleransına ve üretilen biyokütle üretme yeteneğine kadar birçok parametre seçilecek türü etkilemektedir (Verso vd., 2019). Estetik açıdan alglerin renginin değişmemesi ve fotobiyoreaktörlerin camlarına yapışıp kalmaması önemlidir. Ayrıca üretilen biyokütle hasatları düzenli şekilde yapılmalıdır. Böylece alglerin fotobiyoreaktör içerisinde birikmesi ve birbirilerini gölgelemesi engellenmektedir. Çevresel parametrelerin dışında alglerin fizyolojik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Algler çeşitli amino asitlerden oluşan proteinler içerir. Yağ asitleri ve lipitler enerji depolamaya ve hücre işlevlerini gerçekleştirmek için destek sağlamaktadır. Işık şiddeti, nitrojen ve fosfor miktarı, pH derecesi gibi faktörler alg hücrelerinde lipit miktarını etkilemektedir (Forján vd., 2014). Lipit miktarı ne kadar fazlaysa enerji üretme potansiyeli o kadar fazladır. Ancak fazla lipit miktarına sahip alg türlerinde enerji ihtiyacı daha fazla olabilir. Bu durum fazla tercih edilmemelerine sebep olmaktadır. Tablo 4’te bazı alg türlerinin içerdiği lipit miktarları verilmiştir.

Tablo 4. Alg Türlerinin kuru lipit miktarı (Kargın, 2020)

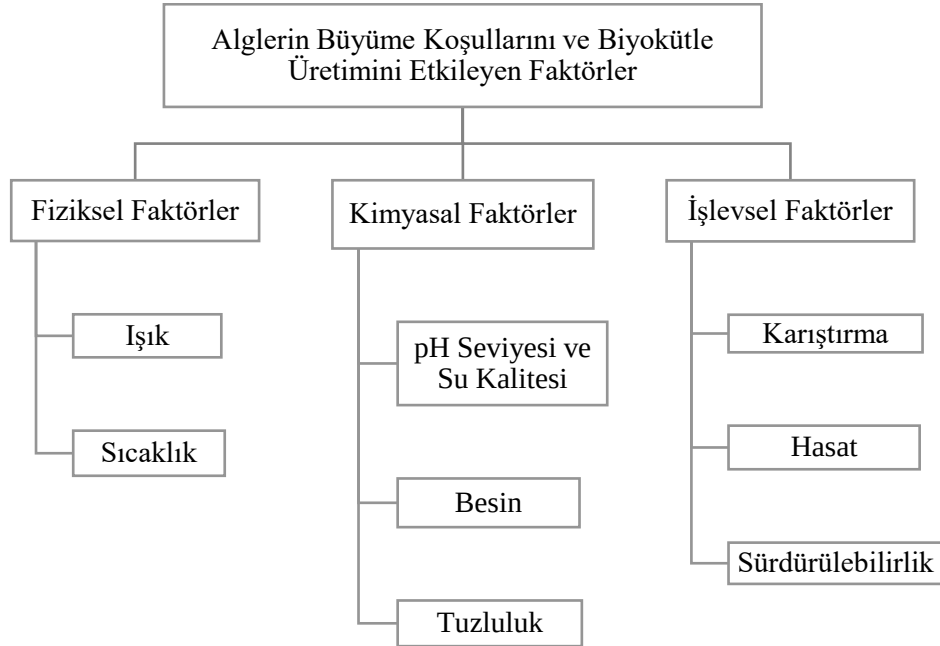
Alg Türü	Yağ İçeriği (% Kuru Ağırlık)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella sp.</i>	28-32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16-37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Dunaliella salina sp.</i>	28-42
<i>Isochrysis sp.</i>	25-33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris sp.</i>	20-35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31-68
<i>Nitzschia sp.</i>	54-47
<i>Schizochytrium sp.</i>	50-77

1.4.1.2. Alglerin Fotosentezi ve Fotosentez Verimliliğini Etkileyen Faktörler

Alg kültürleri için özellikle yakıt ve enerji üretimi için güneş enerjisinin dönüşüm verimliliği önemlidir (Benemann, 2004). Bu süreçte inorganik bileşikler ve ışık enerjisi foto ototroflar tarafından organik maddeye dönüştürülmektedir. Dünya üzerindeki tüm yaşam formları, metabolizmaları ve büyümeleri için bir enerji kaynağı olarak doğrudan veya dolaylı olarak fotosenteze bağlıdır (Masojidek vd., 2004).

Dönüşüm geleneksel olarak ışık reaksiyonları ve karanlık reaksiyonlar olarak adlandırılan iki aşamaya ayrılır. Fotosentetik zarlara bağlanan ışık reaksiyonlarında, ışık enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülerek bir biyokimyasal indirgeyici NADPH_2 ve yüksek enerjili bir bileşik ATP elde edilir. Stromada gerçekleşen karanlık reaksiyonlarda, NADPH_2 ve ATP, karbondioksitin (CO_2) karbonhidratlara ardışık biyokimyasal indirgenmesinde kullanılır. Fotosentetik aktivitenin klasik tanımı, ışık tepkisi (P/I) eğrisi olarak adlandırılan ışık yoğunluğuyla orantılı olarak oksijen (O_2) evriminin ölçümlerine dayanır (Masojidek vd., 2004).

Algler fotosentetik özelliklere sahip canlılar olduğundan Şekil 4 'te verilen fotosentezi etkileyen faktörler, alglerin büyümesini ve biyokütle üretimini etkilemektedir.



Şekil 4. Alglerin büyüme koşullarını ve biyokütle üretimini etkileyen faktörler

a. Fiziksel Faktörler

Işık: Işık en önemli çevresel faktörlerden biridir. Algin büyüme oranını, hücre boyutunu, biyokimyasal yapısını ve besin ihtiyacını etkiler (Juneja vd., 2013). Fotosentezin temel enerji kaynağı olan ışığın dalga boyu ve yoğunluğu da farklı alg türlerinde farklı yağ asidi birikimini etkilemektedir. Örneğin *Botryococcus branuii* türünün bulunduğu ortamın ışık yoğunluğu 42 lux'den 168 lux'e arttırıldığında yağ asidi içeriğinin %26,6'dan %40,1'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Doğal ya da yapay aydınlatma kullanılarak ışık ihtiyacı karşılanabilmektedir. Uzun süre yüksek ışığa maruz kalan alg hücrelerinde ise foto inhibisyon meydana gelebilmektedir (Conk Dalay vd., 2008).

Sıcaklık: Algler türe, bölgeye ve mevsime bağlı olarak geniş bir sıcaklık aralığında yaşayabilmekte ve büyüebilmektedir (15-40°C). Algler için sıcaklık; hücrenin lipit miktarını, besin maddesi, karbon alımını ve büyüme hızını etkileyen önemli bir faktördür. Örneğin bir deneyde her ikisi de uygun büyüme sıcaklığı 25 °C olan *Nannochloropsis oculata* ve *Chlorella vulgaris* olan algler kullanılarak büyüme sıcaklığı 20 °C'den 25 °C'ye yükselmiştir. *N. Oculata* alg türündeki lipit içeriği iki katına çıkmıştır (%7,90 'dan %14,92 'ye). Sıcaklık 25 °C 'den 30 °C 'ye çıkarıldığında, *C. vulgaris* alg türündeki lipit içeriğini %14,71'den %5,90'a düşürmüştür.

b. Kimyasal Faktörler

pH Seviyesi ve Su Kalitesi: Algin büyümesini sağlayan önemli faktörlerden biri pH seviyesidir. pH değeri alglerin metabolik faaliyetlerini etkilemektedir ve besin alımıyla doğrudan ilişkilidir (Elcik & Çakmacı, 2017). Çoğu alg türü nötr pH seviyesinde yaşayabilmektedir ancak bazı türleri yüksek pH toleransına sahipken bazı türleri de düşük pH toleransına sahiptir. Örneğin *Spirulina platensis* türü pH 9 seviyesinde, *Chlorococcum littorale* pH 4 seviyesinde yaşayabilmektedir (URL-2, 2010; Singh & Ahluwalia, 2013).

Besin: Alglerin besin ortamlarının yaklaşık olarak %50'si karbon, %10'u azot ve %2'si fosfordan oluşmaktadır. Bu elementlerin yanında potasyum, magnezyum, demir, çinko, kalsiyum, molibden, kobalt, selenyum ve nikel gibi mineraller eser miktarda bulunmaktadır (Oktor, 2018).

-Karbon: Algler CO₂/O₂ dönüştürücüsü olan fotosentetik canlılar olduklarından karbondioksiti (CO₂) atmosferden alabilmektedir (Oktor, 2018). Algler inorganik karbon kaynağı olarak öncelik sırasına göre karbondioksit (CO₂) > bikarbonat (HCO₃⁻¹) > karbonat

(CO³-₂)'ı kullanırlar (Elcik & Çakmakcı, 2017). Bazı alg türleri ise organik asitler, şekerler, asetat veya gliserol gibi organik karbon kaynaklarını kullanabilmektedir (Larsdotter, 2006).

-Azot: Algler için en önemli ikinci besin azottur. Büyüme, çoğalma ve diğer fizyolojik aktiviteler için gereklidir. Birçok biçimde bulunan azot, algler tarafından en yaygın olarak amonyum ve nitrat olarak kullanılır (Larsdotter, 2006; Oktor, 2018). Azot eksikliği alglerin yapısındaki lipid türlerini değiştirmektedir (Zhila vd., 2005; Elcik & Çakmakcı, 2017).

-Fosfor: Algler tarafından fosfat olarak alınan ve algin büyümesi için gerekli olan bir makro besindir. Hücre gelişimi ve alg metabolizması için gerekli bir besin olup enerji transferi, hücresel sinyal iletimi, fotosentez ve solunum gibi süreçlerde önemli rol oynamaktadır (Oktor, 2018; Larsdotter, 2006). Fosfatlar, alg hücresinin plazma zarı boyunca enerji verilmiş taşıma ile aktarılır. Algler sadece fosforun inorganik formlarını kullanmakla kalmaz, aynı zamanda bazı alg çeşitleri büyüme için organik esterlerde bulunan fosforu kullanabilir (Cai vd., 2013).

-Diğer Besinler: Eser miktarda bulunması gereken mikro elementlerin (potasyum, magnezyum, demir, çinko, kalsiyum, molibden, kobalt, selenyum ve nikel gibi) besin ortamında fazla olması durumu alglerin büyüme fonksiyonlarını olumsuz etkilemektedir (Cai vd., 2013). Alglerin yetiştirilmesinde hem doğal hem de yapay besin ortamları kullanılmaktadır. Doğal besin ortamları ekonomik olarak genellikle daha uygun olduğundan tercih edilmek istense de alglerin büyümesi için gerekli besinleri yeterli miktarda içermeyebilir. Yapay besin ortamlarında ise alglerin türüne göre uygun besin ortamı oluşturmak daha kolaydır (Rashid vd., 2014).

Tuzluluk: Alglerin büyüme ortamları denizler, tatlı sular, atık sular ve nadir olarak karada toprak, ağaç ve kayalara yapışarak yaşayabilmektedir (Aktar & Cebe, 2010). Bununla birlikte farklı alg türlerinin tuzluluk toleransları farklılık göstermektedir. Denizde büyüyen alg türü olan *Nannochloropsis salina* tuz toleransı daha yüksekken tatlı sularda yetişen alg türü olan *Chlamydomonas* tuz toleransı daha düşüktür (Elcik & Çakmakcı, 2017).

c. İşlevsel Faktörler

Karıştırma: Fotobiyoreaktör içinde yetiştirilen alglerin karıştırılması kapalı sistem içerisinde yer alan tüm alglerin homojen olarak ışıktan, besinlerde, sıcaklıktan ve ortamdaki gazlardan faydalanabilmesi için önemlidir. Kapalı sistemlerde farklı karıştırma şekiller kullanılmaktadır. Örneğin tübüler fotobiyoreaktörlerde kültürlerin havalandırılması ve

kariştirilmesi genellikle hava pompası veya hava taşıma sistemleri kullanılır (Ugwu vd., 2008). Kariştirme işleminde kullanılan yöntemin yanı sıra kariştirmanın hızı da kültür ortamındaki algler için önem taşımaktadır. Kariştirme, kültür sisteminin ölçeğine bağlı olarak, günlük olarak elle (tüpler), havalandırma ile (torbalar, tanklar), çarklı pedallar ve pompalar (havuzlar) ile gerçekleştirilir. Bununla birlikte, bazı türlerin kuvvetli kariştırmaya toleransları yoktur (Becker, 2004; Conk Dalay vd., 2008). Kariştirme işlemi çok yavaş olursa karanlık bölgede kalan algler büyüme faaliyeti sonlanabilir. Çok hızlı kariştirılması durumunda oluşan kesme kuvveti ile algler parçalanabilir (Elcik & Çakmakcı, 2017)

Hasat: Mikroalglerin hasat işlemi, toplam mikroalg üretim maliyetinin yaklaşık %20-30 arasında olmaktadır. Bu maliyetin temel nedeni, kültür ortamının yoğunluğunun düşük olması, mikroalglerin boyutunun küçük olması (3-30 µm çapında) ve büyük hacimli suları işleme almanın zorluğundan kaynaklanmaktadır. İdeal bir hasat yöntemi, alg türlerinin birçoğu için uygulanabilmeli ve düşük işletme maliyetleriyle yüksek biyokütle konsantrasyonlarına ulaşabilmelidir. Doğru hasat yönteminin seçimi, elde edilecek ürünün özelliğine bağlıdır. Tablo 5'te hasat yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 5. Alg kültürü hasat yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Hasat Yöntemi	Avantaj	Dezavantaj
Kimyasal koagülasyon /flokülasyon	Basit ve hızlı bir yöntemdir. Enerji gereksinimi yoktur.	Kimyasal flokülant pahalıdır ve algal biyokütle için toksik olabilir. Kültür ortamının tekrar kullanımı sınırlıdır.
Biyo flokülasyon	Pahalı olmayan bir yöntemdir. Kültür ortamı tekrar kullanılabilir. Alg biyokütle için toksik değildir.	Hücre konsantrasyonunda değişiklik. Mikrobiyolojik kontaminasyon olabilir.
Yerçekimi Çöktürme	Basit ve pahalı olmayan bir yöntemdir.	Zaman ihtiyacı fazladır. Biyokütlenin bozulma ihtimali vardır.
Flotasyon	Büyük hacimli uygulamalar için uygundur. Maliyeti düşük bir yöntemdir. Alan ihtiyacı azdır.	Genellikle kimyasal flokülant ihtiyacı gerekir. Deniz alglerinin hasadı için uygun bir hasat yöntemi değildir.
Elektriksel Esaslı Gelişmeler	Birçok mikroalg türü için uygulanabilir. Ek kimyasal flokülant ihtiyacı gerektirmez.	Düşük konsantrasyon üretimine sebep olmaktadır. Yüksek enerji ve ekipman maliyeti yüksektir.
Filtrasyon	Yüksek geri kazanım verimi sağlamaktadır. Hassas türlerin ayrışımına izin verir.	Filtre tıkanma durumları işletme maliyetini artırabilir. Membran düzenli olarak temizlenmelidir.
Santrifüj	Hızlı bir hasat yöntemidir. Yüksek geri kazanım verimi sağlar. Neredeyse bütün mikroalg türleri için uygulanabilir.	Pahalı bir hasat yöntemidir. Enerji gereksinimi yüksektir. Sadece yüksek değerli ürünlerin geri kazanımında uygundur. Hücre yapısına zarar verebilir.

Sürdürülebilirlik: Algler, çevrenin temiz tutulmasında da faydaları ile ilgi çekmektedirler. Bu nedenle alglerin kullanımı sürdürülebilir enerjide unsurlardan biridir. Fotobiyoreaktör içerisinde fotosentez yaparak enerji üreten alglerin önemli besin kaynaklarından biri karbondioksittir. Atık sularda yaşayabildiklerinden dolayı su döngüsüne de fayda sağlamaktadırlar.

1.4.1.3. Alglerin Kullanım Alanları

Algler üzerine yapılan biyoteknolojik çalışmalar, tarımda, gıda, yem, ilaç ve eczacılık da kozmetik, diyet ürünü olarak kullanımlarını yaygınlaştırma üzerine olmaktadır. Algler sözü edilen bu alanlardaki katkılarından dolayı; alg üretimi biyoteknolojik bir tabana dayandırılmalıdır (Gezici vd., 2012)

Alglerin birçok türü gıda maddesi olarak kullanılmaktadır. Hatta Uzakdoğu ülkelerinde gelecekteki alternatif gıdalardan olacağı varsayılmaktadır. Protein, yağ ve lifin yanında mineraller ve vitaminler açısından da zengindir (İrkin, 2020). Günümüzde besin olarak tüketilen alg türleri ve tüketildiği ülkeler Tablo 6’da gösterilmektedir.

Tablo 6. Günümüzde besin olarak tüketilen algler ve tüketilen ülkeler

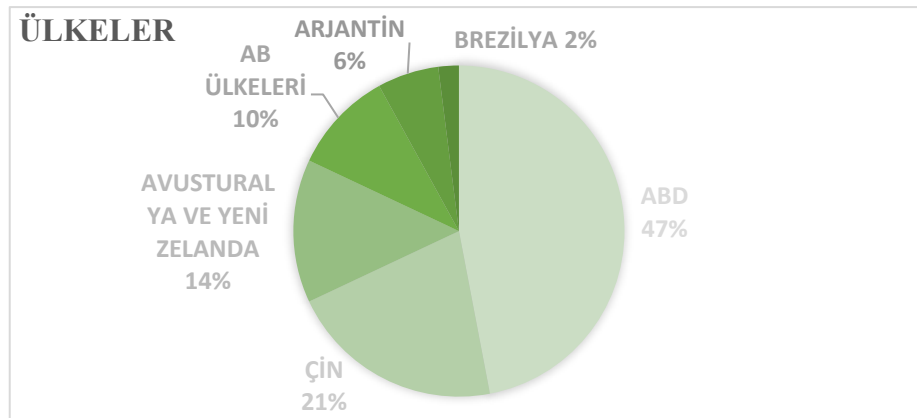
Alg Türünün Genel Adı	Besin Olarak Tüketildiği Ülke	Bilimsel Adı
Kombu/Konbu, Dashima Hai dai, Kelp, Oarweed Tangleweed, Sea Girdle, Sea Tangle, Sea Ribbon	Japonya, Kore, Çin	<i>L. digitata</i> , <i>L. Japonica</i> , <i>L. Longissima</i> , <i>L. Angustata</i> , <i>L. Coriacea</i> , <i>L. ochotensis</i>
Nori, Mor Laver	Japonya, Kore, Çin	<i>Porphyra umbilicalis</i>
Aonori, Yeşil Laver	Japonya, Kore Cumhuriyeti	<i>Undaria pinnatifida</i>
Deniz Marulu	İskandinavya, Büyük Britanya, İrlanda, Çin ve Japonya	<i>Ulva lactuca</i> , <i>Enteromorpha spp.</i>
Düğümlü Yosun, Kaya otu	Kanada, Norveç, İskoçya	<i>Ascophyllum nodosum</i>
Royal veya Tatlı Kombu	İrlanda, İngiltere, Avrupa’nın ve Kuzey Amerika’nın Atlantik Kıyıları	<i>Laminaria saccharina</i>
Deniz Spagettisi	Kuzeydoğu Atlantik Okyanusu ve Kuzey Denizi	<i>Himanthalia elongata</i>
Deniz üzümü veya yeşil havyar	Japonya, Filipinler	<i>Caulerpa lentillifera</i>

Algler aynı zamanda tarım ve hayvancılıkta da kullanılmaktadır. Gübre olarak tercih edilen alglerin toprağı havalandırıcı özelliğı, nem tutma kapasitesi, azot yönünden çiftlik gübresi kadar zengin olması, absisik asit ve sitokinin gibi biyo bileşenler içermesi nedeniyle tercih edilmektedir. Alglerde bulunan biyoaktif maddeler, çimlenme, köklenme, fide oluşumu, çiçeklenme, ürün verimi, raf ömrü ve zararlılara karşı dayanıklılık gibi etkilere sahip olması açısından son derece önemlidir.

Kişisel temizlik ürünlerinde (şampuan, tıraş köpüğü, sabun ve yüz maskeleri gibi) kullanılır (İrkin, 2020). Kozmetik alanında kullanılan türlere *Porphyra*, *Gelidium*, *Hypnea*, *Halopteris*, *Dictyopteris*, *Stilophora*, *Sargassum*, *Cystoseira*, *Ulva*, *Enteromorpha*, *Codium*, *Gigartina*, *Gracilaria* örnek olarak verilebilir ve bütün bu türler ülkemizde bulunmaktadır (Cirik, 2011).

Endüstriyel alanda yüksek sıcaklıkta yumuşak, düşük sıcaklıkta sertleşen ve jel formuna dönüşen alg, boya, tekstil, kâğıt, plastik kauçuk ve deri sanayiinde sıklıkla kullanılmaktadır. Mobilya sanayiinde yapıştırıcı olarak, deri sanayiinde parlaklık ve sağlamlık verici, film endüstrisinde jelatin inceltici ve sıcaklığa olan dayanıklılığı artırıcı olarak faydalanılmaktadır (İrkin, 2020).

Alglerin uzak doğuda gübre olarak kullanılması bilinen en eski uygulama alanıdır. 12. yüzyılda Avrupa'nın geniş kıyılara sahip bazı ülkelerinde benzer uygulamalar yapılmıştır. 17. yüzyılda Fransa, 1720 yılından sonra İngiltere mikroalg uygulamalarına geçmiş ve 18. yüzyıl sonunda İskoçya'da mikroalg uygulamalarına başlayarak yıllık mikroalg üretiminin kuru alg olarak 20.000 ton olduğu raporlanmıştır. Bu miktarda yaklaşık 400.000 ton yaş alge denk gelmektedir. 2009 yılında yapılan araştırmaya göre Şekil 5'te ülkelerdeki mikroalg üretim oranları verilmiştir (Kargın, 2020).



Şekil 5. Mikroalg üretiminin dünya çapında dağılımı

Spirulina spp., *Chlorella spp.*, *Haematococcus pluvialis* ve *Nannochloropsis spp.* türü mikroalglerin yetiştirilmesi işi, üretim hacmi büyük miktarda ticari üretime değişmekte olup ülkelerde insanlar için besin desteği ve diğer alanlarda kullanılmak üzere iyi bir yapıda kurulmuştur.

Türkiye algleri veri tabanı Prof. Dr. Arif Gönüloğlu tarafından hazırlanan koleksiyonunda bulunan taksonlardan oluşmaktadır. Bu koleksiyon Hitit Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümünde muhafaza edilmektedir. Tablo 7’de 1 Ocak 2023 tarihi itibarıyla ülkemizde yer alan alglerin divizyonu gösterilmektedir (Gönüloğlu & Maraşlıoğlu, 2023).

Tablo 7. 01.01. 2023 tarihi itibarıyla Bölümlere (Divizyo) ait Türkiye algleri takson sayısı

Bölüm (Divizyo)	Takson Sayısı (sp. + Subsp. + var. + f.)	Künye Belirsizliği Takson Sayısı	Toplam Takson Sayısı	%
<i>Bacillariophyta</i>	1839	16	1855	33,9
<i>Bigyra</i>	2	-	2	0,0
<i>Charophyta</i>	569	3	572	10,5
<i>Chlorophyta</i>	825	12	837	15,3
<i>Cryptophyta</i>	34	-	34	0,6
<i>Cyanobacteria</i>	600	3	603	11,0
<i>Dinophyta</i>	414	1	415	7,5
<i>Euglenophyta</i>	339	1	340	6,2
<i>Haptophyta</i>	30	1	31	0,5
<i>Ochrophyta</i>	382	-	382	7,0
<i>Prasinodermatophyta</i>	1	-	1	0,0
<i>Rhodophyta</i>	407	1	408	7,5
Toplam	5442	38	5480	100,0

Tablo 7’ye bakıldığında Türkiye Alg Florasında %33,9 oranı ile en fazla bulunan divizyo *Bacillariophyta* türünü %15,3 oranı ile *Chlorophyta* takip etmektedir. Ülkemizde enerji üretmek, biyoyakıt üretmek ve mimaride kullanılmak üzere fotobiyoreaktör kültürlerinde bu türler kaynağın çok olması ve enerji verimliliklerinin yüksek olması sebebiyle kullanılabilir.

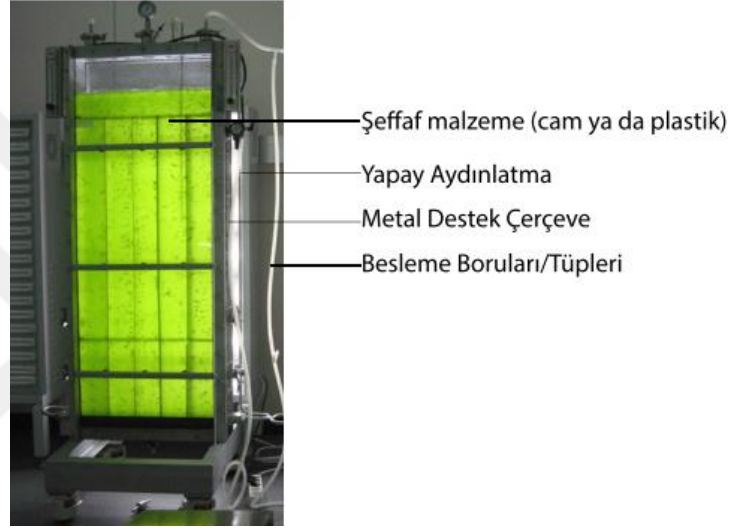
Türkiye tatlı su alglerine yeni kaydedilen 30 *Ochrophyta* takson tanımlanmıştır. *Ochrophyta* sınıfında bulunan taksonlar, *Bicosoeca*, *Bitrichia*, *Chromulina*, *Ochromonas*, *Chrysococcus*, *Dinobryon*, *Kephyrion*, *Kephyriopsis*, *Pseudokephyrion*, *Chrysosphaerella*, *Mallomonas*, *Phacomonas*, *Centritractus*, *Pseudotetraedron* ve *Ducellieriacinsleri* içinde dağılım göstermiştir. Daha önce Türkiye’de yapılan çalışmalarda *Bicosoeca* cinsine ait 2, *Dinobryon* cinsine ait 12, *Pseudokephyrion* cinsine ait 1, *Mallomonas* cinsine ait 4, *Centritractus* cinsine ait 1 takson rapor edilmiştir. Bununla birlikte bu çalışma ile ilk defa 10 cinse (*Bitrichia*, *Chromulina*, *Ochromonas*, *Chrysococcus*, *Kephyrion*, *Kephyriopsis*, *Chrysosphaerella*, *Phacomonas*, *Pseudotetraedron*, *Ducellieria*) ait taksonlar Türkiye alg florası için yeni kaydolarak belirlenmiş bulunmaktadır (Demir vd., 2021).

Trabzon Üniversitesi Fatih Eğitim Fakültesi Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü Biyoloji Eğitimi Anabilim Dalı Öğretim Üyesi, tatlı su bilimi (Limnoloji) uzmanı Prof. Dr. Bülent Şahin, 2013 yılında başladığı çalışmasıyla Artabel Gölleri Tabiat Parkı’ndaki 18 göl ve 1 göletten örnekler toplamıştır. Yapılan araştırma sonucunda *Bacillariophyta*, *Chlorophyta*, *Charophyta*, *Ochrophyta* ve *Euglenophyta* bölümlerine ait toplam 256 alg türü tespit edilmiştir. Bu türlerden 41 tanesi ise, ilk defa yeni kaydolarak Türkiye’nin tatlı su alg florasına kazandırılmıştır (Şahin B. , 2021).

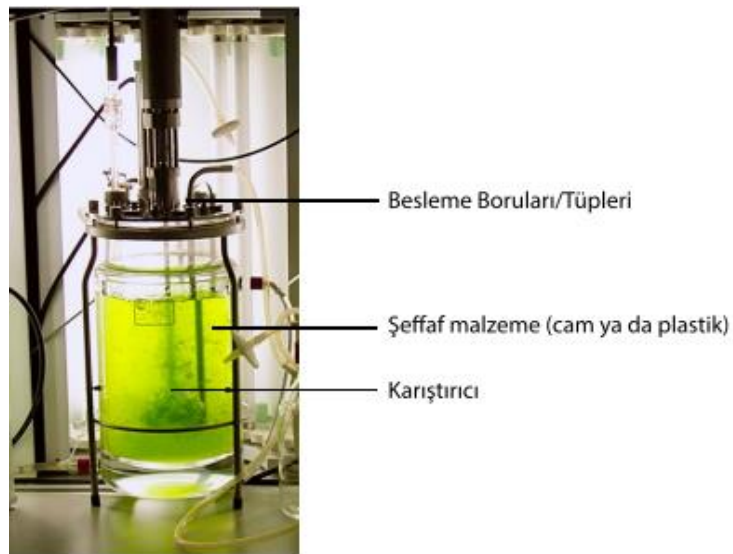
Boğaziçi Üniversitesi’nin son yıllarda en kapsamlı projelerinden biri olan, Avrupa Birliği (AB) ile Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Rekabetçi Sektörler Programı kapsamında desteklenen Biyoekonomi Odaklı Kalkınma için Entegre Biyorafineri Konsepti Projesi (INDEPENDENT) ile enerji, sağlık, gıda, tarım, hayvancılık ve çevre sektörlerine yönelik biyoyakıt, fonksiyonel gıda, biyo-gübre başta olmak üzere 11 farklı yosun tabanlı biyoteknolojik ürünün, biyoekonomi odaklı bir büyüme modeline dayanan bütünleşmiş bir üretim sistemiyle elde edilmesi hedeflenmektedir. INDEPENDENT projesi sadece Avrupa değil, dünyayı derinden etkileyen küresel iklim krizi ile salgın nedeniyle oluşan ham madde tedarigi sıkıntılarına çözüm önerileri getirmek için tasarlanmış bir projedir. Dünya nüfusunun artışına bağlı olarak özellikle enerji ve gıda ihtiyacı her geçen gün yükselmektedir. Enerji ihtiyacımızın büyük çoğunluğunu hala fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu nedenle tüm dünyada küresel karbondioksit (CO₂) miktarları 417 ppm seviyelerine gelmiş olduğundan dünyayı iklim felaketleriyle karşı karşıya bırakırken, özellikle tarımsal arazilerin zarar görmesinden dolayı tarım ve hayvancılık sektörlerini de olumsuz etkilenmektedir (Haznedaroğlu vd., 2022).

1.4.2. Fotobiyoreaktör Malzemeleri

Fotobiyoreaktörün farklı bileşenleri için kullanılan malzemeler, ısı direnci, oksidasyon/korozyona karşı direnç, dayanıklılık, piyasada bulunabilirlik, hidrojen kaçağı, ağırlık, gerektiğinde şeffaflık mikroalg kültürleri üzerindeki potansiyel olumsuz etkiler gibi parametrelere bağlı olarak tercih edilmektedir (Skjånes vd., 2016). Şekil 6 ve Şekil 7’de fotobiyoreaktörü oluşturan malzemeler gösterilmektedir.



Şekil 6. Fotobiyoreaktör Bileşenleri 1 (Limited, 2023)



Şekil 7. Fotobiyoreaktör Bileşenleri 2 (Hohe, 2008)

Uygun bir fotobiyoreaktörün tasarlanması için temel faktör, fotoğraf sahnesi için kullanılan malzemedir. Fotobiyoreaktör için malzemeler toksisite içermemeli, yüksek şeffaflığa, yüksek mekanik güce, yüksek dayanıklılığa (hava koşullarına karşı direnç), kimyasal kararlılığa ve düşük maliyete sahip olmalıdır. Temizlik kolaylığı da bir diğer önemli işlevsel sürdürülebilirlik için önemlidir (Tredici M. R., 2004).

1.4.2.1. Metaller

İç çerçeve, kolayca kalıplanabilen, yüksek mukavemetli bir malzeme olan paslanmaz çelikten yapılmalıdır. Alaşım, korozyona karşı direncine göre seçilmelidir. Sıcaklık, pH ve tuzluluk gibi birçok parametre çelik alaşımlarının korozyon eğilimini etkilemektedir. Paslanmaz çeliğin korozyona karşı korunması Teflon kaplama sayesinde gerçekleşmektedir. Dış çerçeveler, amacı için yeterli mukavemete sahip hafif bir malzeme olan alüminyum alaşımından yapılabilmektedir. Bu alaşım, diğer alüminyum alaşımlarına göre korozyona karşı daha dirençli olmalıdır. İç çerçevenin çelik alaşımı fotobiyoreaktörü oldukça ağır yaptığından, dış çerçeve için hafif bir metal kullanmak özellikle önemlidir (Skjånes vd., 2016).

1.4.2.2. Şeffaf Malzeme

Fotobiyoreaktör için kullanılan malzemeler arasında cam, pleksiglas, akrilik veya Poli Vinil Klorür (PVC) ve en yaygın olanı polietilen bulunmaktadır. Fotobiyoreaktörlerin cam pencereleri güçlendirilmiş soda-kireç-silika camdan yapılabilmektedir. Bu cam çerçeveye monte edildiğinde cam ve metal çerçeve arasındaki gerilimin neden olduğu fiziksel baskı altında otoklavlamaya karşı dirençli olduğu kanıtlanmıştır. Yaygın olarak Bwindow camı olarak bilinen standart soda-kireç-silika camın, otoklavlama sırasında çatlama eğilimi nedeniyle yetersiz olduğu kanıtlanmıştır (Skjånes vd., 2016).

Cam türleri arasında, fotobiyoreaktörün güneş enerjili sıcak su kolektöründe yaygın olarak borosilikat (Pyrex) cam kullanılmaktadır. Camın enerji içeriği pencere camı için 13 ile 18,6 MJ.kg⁻¹ arasında, düz cam için 15,9 MJ.kg⁻¹ ve sertleştirilmiş cam için 26,2 MJ.kg⁻¹ arasında değişmektedir. Camların fazla uzun olması durumunda taşıma ve montajı zorlaştırmaktadır (URL-2, 2010).

Bir polimer film reaktörünün genel tasarımı LDPE (Düşük Yoğunluklu Polietilen Film) filmi yaygın olarak sera gazı kaplaması olarak kullanılmaktadır. Yüksek görünür ışık ve yakın kızıl ötesi geçirgenlik, düşük UV geçirgenliği ve düşük maliyet gibi fotobiyoreaktör ile benzer gereksinimleri vardır (Burgess vd., 2006).

Dış çapları 30-60 mm aralığında ve duvar kalınlığı 3-5 mm olan bir dizi prototip fotobiyoreaktör sisteminde şeffaf akrilik boru kullanılmıştır. 1,6 mm kalınlığına sahip malzeme 25 mm'ye kadar ölçeklendirilebilmektedir. Küçük çaplı şeffaf akrilik tüplerin büyük ölçekli bir biyohidrojen tesisi için uygun olmadığı düşünülmektedir (Burgess vd., 2006). Tablo 8'de, bahsedilen 3 şeffaf fotobiyoreaktör parçasının (tübüler fotobiyoreaktör üzerinde denenmiş) özellikleri verilmiştir (Burgess vd., 2006).

Tablo 8. Tübüler fotobiyoreaktörlerin enerji içeriği ve fotobiyoreaktör şeffaf malzeme özellikleri (Burgess vd., 2006)

	Malzemenin Enerji İçeriği	Malzemenin Kullanım Süresi	Malzeme Yoğunluğu	Önerilen Duvar Kalınlığı	Enerji İçeriği	Kullanım Süresi/Ağırlık Enerji İçeriği
Malzeme	MJ.kg ⁻¹	y	kg.m ⁻³	mm	MJ.m ⁻²	MJ.m ⁻² y ⁻¹
Cam	25	20	2470	1,6	310	15,5
LDPE	78	3	920	0,18	40,5	13,5
Şeffaf Akrilik	131	20	1180	3,0	1456	72,8

Fotobiyoreaktörde kullanılan şeffaf malzemenin seçiminin yanında bu malzemelerin konumlanması da önemlidir. Çünkü kullanılan doğal ya da yapay ışığın fotobiyoreaktör içine girişi ve içindeki hareketi fotosentez verimliliğini etkilemektedir. Işık yolu ne kadar az olursa hacimsel üretkenlik o kadar fazla olmaktadır. Şeffaf panellerin yönlenmesi, mesafesi, kalınlığı da verimliliği etkilemektedir. (Tredici M. R., 2004)

1.4.2.3. Kaplama

Algler üzerinde potansiyel olarak inhibe edici etkileri olabilecek fotobiyoreaktörler oluşturmak için yaygın olarak kullanılan birçok malzeme vardır. Potansiyel zararlı elementler krom (Cr), nikel (Ni) ve molibden (Mo) oluşan alaşımdan oluşan paslanmaz

elikten yapılmış  ereve, genellikle malzeme grubuna ait bir malzeme olan teflon (PFA) ile kaplanmıştır. Birçok teflon reçinesi renk içerir. Bunun nedeni artan uygulama kolaylığıdır. Bununla birlikte, PFA reçinelerinin renk bileşenlerinin sıklıkla, malzemeden salındıkları takdirde algler izerinde potansiyel olarak zararlı etkileri olabilecek belirli metal oksitler içerdiğine dair araştırmalar vardır. Algi metalden korumak için bir baz görevi gören siyah bir primer ile renksiz bir bileşim seçilmiştir (Skjnes vb., 2016).

1.4.2.4. Besleme Boruları/Tüpleri

Fotobiyoreaktörlerde besleme boruları için şeffaf ve esnek silikon peroksit tüpler kullanılabilmektedir. Alg büyümesinde köpürme aşamasında hava/CO₂ karışımı için giriş tüpü, reaktör odasında dolaşan sıcaklık düzenleme suyunun giriş ve çıkışı ve hidrojen (H) iretim aşamasında gaz toplama initesine takılı suyun yer değiştirmesi için çıkış borusu olarak kullanılmaktadır (Skjnes vb., 2016).

1.4.3. Fotobiyoreaktör alışma Prensibi

Fotobiyoreaktörler, fotosentetik organizmaların büyüme koşullarını ve reaksiyon koşullarını kontrol ederek belirli irnleri elde etmek veya biyokimyasal reaksiyonları hızlandırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu reaksiyonlar biyoyakıt ietimi, biyoplastik ietimi, eczacılık sektörü ve diğer endüstriyel veya araştırma amaçları için uygulanmaktadır.

Alg kullanılarak elde edilen enerjide kullanılan biyoyakıtlar, dönüştürme teknolojilerine termo-kimyasal dönüşüm, biyokimyasal dönüşüm, transesterifikasyon ve fotosentetik mikrobiyal yakıt hücresi olmak izere dört kategoriye ayrılmaktadır (Chew vd., 2017). Kültür için uygun besin maddelerinin seçimi, evre koşulları ve uygun biyoreaktör biyoyakıt verimini etkileyen önemli parametrelerdir (Elçik & akmakı, 2017).

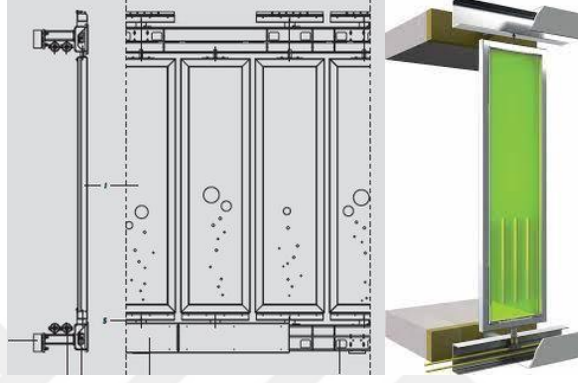


Şekil 8. Fotobiyoreaktör döngüsü, Yazara ait

Dikey cam panel olarak kullanılan Şekil 8’de görülen fotobiyoreaktör sistemler, gün ışığını ve karbondioksiti (CO_2) fotosentezin biyokimyasal süreci yoluyla alg biyokütlesine dönüştüren besinler içeren suyla doldurulur; aynı zamanda güneş-termal etkilerle su ısıtılabilir. Karbondioksit (CO_2) kullanımı ve fotosentez yardımıyla da oksijen (O_2) üretimi ayrıca havanın kalitesini de arttırmaktadır.

Fotobiyoreaktörün tabanına belirli zaman aralıklarında basınçlı hava verilmektedir. Gaz, büyük hava kabarcıkları olarak ortaya çıkar ve algler tarafından CO_2 ve ışık alımını teşvik etmek için yukarı yönde bir su akışı ve karışım oluşturulmaktadır. Işığın biyokütleyle dönüşümü, mikroalg adı verilen mikroskobik boyuttaki alglerin gerçekleştirdiği biyokimyasal bir süreçtir. Algler fotosentetik işlem için güneş ışığını kullanmaktadır. Bu, karbondioksitin (CO_2) organik maddeye dönüşüm süreciyle bağlantılıdır. Aslında algler, her biri fotosentez yapabilen tek hücrelerden oluştuğu için ışığın biyokütleyle dönüştürülmesinde oldukça etkili canlılardır (FEEM). Üretilen her 1 gram kuru biyokütle yaklaşık 23 kJ enerji içermektedir (Lakenbrink, 2013).

Cephe elemanları tarafından üretilen biyokütle ve ısı, her iki enerji formunun sırasıyla bir ayırıcı ve bir ısı dönüştürücü tarafından değiştirildiği bitki odasına kapalı bir döngü sistemi ile taşınmaktadır. Sıcak su temini ve binanın ısıtılması için bir sıcak su pompası kullanılarak üretilen ısıнын sıcaklık seviyeleri arttırılabilir. Fazla ısı bir jeotermal sistem kullanılarak depolanabilir (SolarLeaf Bioreactor Facade).

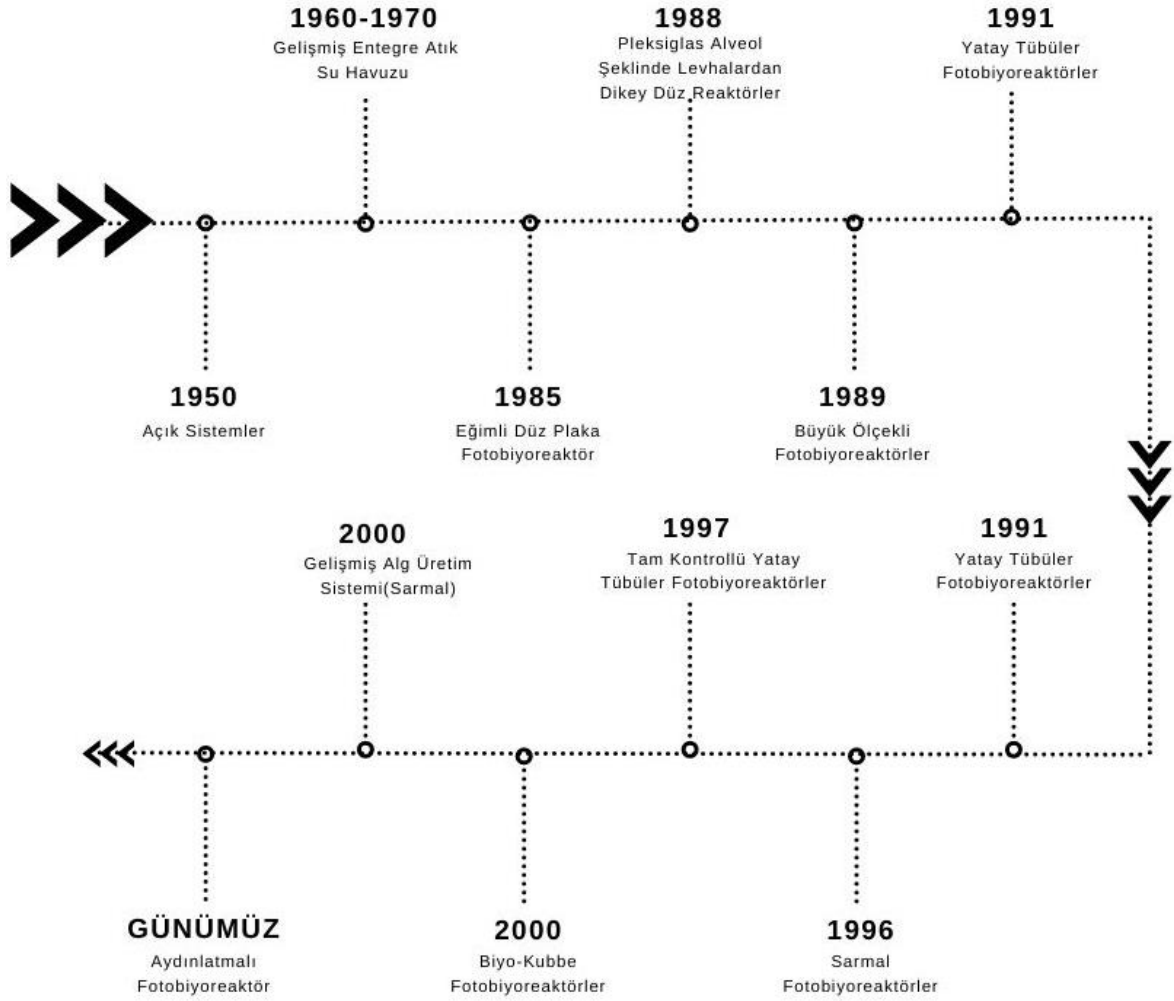


Şekil 9. SolarLeaf Dikey Cam Panel

1.5. Fotobiyoreaktör Tarihçesi

Algler, geçmişten günümüze sağlıktan yakıta pek çok farklı sektörde kullanılmaktadır. Dünyada hemen her bölgede yerli halk tarafından binlerce yıldır alg türlerinden *Spirulina* ve *Aphanizomenon* insanlar için besin kaynağı olarak kullanılırken, sanayinin geliştiği ülkelerde algler enerji üretmektedir. (Jensen vd., 2001). Teknolojinin ilerlemesi ve fotobiyoreaktörler üzerine yapılan çalışmalar sayesinde alg yetiştiriciliği gelişmeye devam etmektedir. Başlangıçta sadece açık havuz sistemlerinde enerji üretmek için kullanılan algler, günümüzde ortam koşulları kontrol edilebilen kapalı sistemlerde üretilmektedir. Araştırmacılar ve alg yetiştiricileri, uygun koşullarda fotosentez verimini arttırmak amacıyla parametreleri değiştirerek farklı form ve sistemlerde fotobiyoreaktör tasarımı çalışmaları yapmaktadır.

Fotobiyoreaktörlerin tarih içerisinde gelişimi Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Fotobiyoreaktör zaman çizelgesi, Yazara aittir.

Ticari olarak kullanılmaya başlanan algler, 1950'li yılların başından beri farklı formlarda kurulan açık havuz sistemlerinde üretilmeye başlanmıştır. İlk yıllarda açık havuzların tercih edilmesinde açık kültür havuzlarının inşasının ve işletilmesinin kolay olması en önemli iki etken olmuştur (Tredici & Materassi, 1992).

Açık havuzlar, doğal su kaynakları (göller, lagünler, göletler) ve yapay havuzlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. En sık kullanılan sistemler arasında sığ büyük havuzlar, tanklar, dairesel havuzlar ve kanal havuzları yer almaktadır. Açık sistemlerde, parametrelerin kontrolü kapalı sisteme göre daha zor olmaktadır. Şekil 11'de bir örneği gösterilen açık sistemlerin kurulumunda, kapalı sistemlere göre oldukça fazla arazi gereksinimine ihtiyaç duyulmaktadır (Ugwu vd., 2008).



Şekil 11. Açık Sistem Alg Üretim Tesisi (Roshdy, 2019)

Açık alg üretim sistemlerinin kısıtlılıkları nedeniyle, kontrol edilmesi daha kolay olan kapalı alg üretim sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Alglerin toplu üretimi için tasarlanan ilk kapalı besin ortamı, 1953 yılında Milner tarafından *Chlorella* alg türünü yetiştirmek için kapalı sistem olan fotobiyoreaktör, düz-panel şeklinde üretilmiştir. Alglerin yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanımı ilk kez 1970'li yıllarda yaşanan enerji krizi sonrası uzmanlar tarafından araştırılmaya başlanmıştır (Spolaore vd., 2006).

1960'ların sonları ve 1970'lerin başlarında, Amerika Birleşik Devletleri'nde atık suyun kalitesini artırmak için alg kullanılan 'Gelişmiş Entegre Atık Su Havuzu Sistemleri' inşa edilmiştir (Spolaore vd., 2006).



Şekil 12. Gelişmiş Entegre Atık Su Havuz Sistemi, Delhi, California (Ertas & Ponce, 2007)

1980'lerin sonlarında Güney İspanya'da kurulan Photo Bioreactors Ltd. şirketi tarafından Santa Ana kentinde *Dunaliella* alg türü üretimi için ticari bir tesis kurulmuştur. Tesisin tam ölçekli faaliyetine 1990 yılının mayıs ayında toplam 125.000 m boru uzunluğu

için dikey tübüler fotobiyoreaktörlere bağlanan 1,2 cm çapında, 50 m uzunluğunda polietilen borulardan yapılmış çit benzeri bir sistem kullanılarak başlanmıştır. Ancak fotobiyoreaktörlerin tasarımında sınırlandırıcı durumlar olduğu gözlemlenmiştir. Bu sınırlandırıcı faktörler; tüplerin çapı etkili karıştırma için çok dar olması, kullanılan malzeme güneş ışığı altında hızla bozulması, gaz giderme çözümünün yetersiz kalması ve sıcaklık kontrolü sağlanamaması olarak belirtilmiştir. Dolaşımın yetersizliği ve kültürün yanlış yönetimi ile tüplerin uzunluğuna göre çok yüksek yüzey/hacim oranı, alglerin yetersiz büyümesine, biyolojik kirlenmeye ve ağır kirliliğe yol açmıştır. Bu nedenlerden dolayı 1990'lı yılların başında tesis kapatılmıştır (Tredici M. R., 2004).



Şekil 13. *Dunaliella* üretimi için ticari bir tesis, Santa Ana, İspanya (Tredici M. R., 2004)

1985 yılında ilk olarak Samson ve Leduy tarafından tanımlanan düz plakalı 10 cm kalınlığındaki fobiyoreaktörlerde *A. Maxima* alg türünü, her iki taraftan floresan lambalarla aydınlatılmış ve havalandırma ile karıştırılmıştır (Xu vd., 2009).

1985 yılında yapılan bir diğer çalışma Anderson ve Eakin tarafından tasarlanan, *Porphyridium cruentum* alg türünden polisakkarit üretimi için kullanılan 3 m² eğimli düz-plaka şeklinde bir sistemdir (Tredici M. R., 2004) .

1988 yılında Tredici ve Floransa Üniversitesi'ndeki iş arkadaşları, %95 şeffaf ve ticari olarak temin edilebilen 16 mm kalınlığındaki pleksiglas (plexiglas) alveol şeklinde levhalardan dikey düz reaktörler yapma fikrini ortaya atmışlardır (Tredici M. R., 2004).



Şekil 14. İtalya Floransa Üniversitesi alveol şeklindeki fotobiyoreaktör (Tredici M. R., 2004)

1991 yılında Sagdiana PGT tarafından Javan'da (Tacikistan) büyük ölçekli bir yatay tübüler fotobiyoreaktör sistemi inşa edilmiştir. Ticari olarak sık sık kullanılan bir alg türü olan *Chlorella*'nın yetiştirilmesi için kullanılmıştır. Sistem, yaklaşık 41.000 m boru için her biri 73,5 m uzunluğunda yirmi sekiz adet 5,7 cm cam tüpten oluşan iki sıra içeren on ünitelerden oluşmaktadır. Ancak fotobiyoreaktör sistemi, düşük verime sahip olduğundan 3 ay içerisinde kapatılmıştır (Tredici M. R., 2004).



Şekil 15. Javan'da (Tacikistan) büyük ölçekli bir yatay tübüler fotobiyoreaktör sistemi (Tredici M. R., 2004)

1996 yılında Hidrobiologica SA tarafından, yaklaşık 72 milyonluk bir yatırımla Kuzey Arjantin’de dönemin bilinen en büyük fotobiyoreaktörü inşa edilmiştir. Sistem 120 m uzunluğunda ve 25,5 cm çapında 96 polietilen tüpten oluşmaktadır. Borular zemine paralel olarak yerleştirilmiş ve betondan yapılmış besleme, bağlantı ve toplama kanalları ile tübüler formda düzenlenmiştir. Uzun dönemde, yetersiz karıştırma ve düşük akış hızından kaynaklanan biyolojik kirlenme ve kültürün tüpler arasında homojen olmayan dağılımı gibi çeşitli sorunlar ortaya çıkmıştır. Sıcaklığı kontrol etme kapasitesinin sınırlı olması, yazın büyük bir dezavantaj olması ve boruların yarısında sağlanan gaz çıkışlarına rağmen oksijenin (O₂) tehlikeli seviyelere çıkması gibi sebeplerden dolayı tesis 1999 yılı sonlarında kapatılmıştır (Tredici M. R., 2004).



Şekil 16. Hidrobiologica SA tarafından inşa edilen fotobiyoreaktör, Arjantin (Tredici M. R., 2004)

1996 yılında Inalco (S.p.A) tarafından Floransa kenti (İtalya) yakınlarında, 3000 litrelik sarmal bir fotobiyoreaktör inşa edilmiştir. 7 m yüksekliğinde ve yaklaşık 40 m² bir alanı kaplayan birim, dirseklerle bağlanmış ve yatayda yaklaşık 1,4 eğimle dik bir demir altıgen çerçeveye sabitlenmiş 5 cm çapında polikarbonat borulardan oluşturulmuştur. Fotobiyoreaktör *A. Platensis* alg türü yetiştirilmesinde altı aydan fazla verimli bir şekilde kullanılmasına rağmen, şirket 1998 yılında faaliyetlerini durdurmuştur (Tredici M. R., 2004).



Şekil 17. Inalco (S.p.A) tarafından Floransa'da (İtalya) inşa edilen sarmal fotobiyoreaktör (Tredici M. R., 2004)

1997 yılında Microalgae (S.p.A.) tarafından, Taranto kenti (İtalya) yakınlarındaki Crispiano'da 14 m^3 tam kontrollü yatay tübüler fotobiyoreaktör inşa edilmiştir. 1999 yılında şirket, yaklaşık 3 cm dış çaplı ve toplam 85 m^3 kapasiteli 80 km'lik sert plastik borulardan yapılmış altı ünite ile faaliyetine başlamıştır. Karıştırma, hava kaldırma yöntemi ile yapılmaktadır. Hat içi gaz gidericiler, fotosentetik olarak üretilen oksijen (O_2) için çıkış sağlamaktır. Şirket aynı yıl bilinmeyen bir nedenle faaliyetini durdurmuştur (Tredici M. R., 2004).



Şekil 18. Microalgae S.p.A tarafından inşa edilen fotobiyoreaktör, Toronto/İtalya (Tredici M. R., 2004)

1999 yılında Biosynthesis (UK), çit benzeri bir yapılanmada tübüler fotobiyoreaktörlere bağlı dikey bir dizi yatay tüpten oluşan biyolojik çit olarak bilinen ticari bir reaktördür. Biyolojik çit tasarımının temelindeki hedef, dikey boru diziliminde yukarıdan aşağıya doğru akış hızının düşmesine neden olan hidrostatik basıncı önlemek ve böylece alg kültürüne uygun homojen bir akışı sağlamaktır. Bu yapılanmada hem sert borular hem de esnek malzeme kullanılabilmektedir (Tredici M. R., 2004).



Şekil 19. Biosynthesis Co (UK), çit benzeri fotobiyoreaktör (Tredici M. R., 2004)

2000 yılında 'Micro Gaia Incorporated' şirketi tarafından, Hawaii adasındaki Maui Araştırma ve Teknoloji Parkı'nda yaklaşık 8 hektarlık bir alana, patentli biyo-kubbe fotobiyoreaktöre dayalı bir tesis kurulmuştur. 2001'in ocak ayında şirket, Japon pazarı için *astaksantin* alg türü üretimine başlamıştır. 2001 yılının haziran ayına kadar 1000 adet 1,2 m çapında biyo-kubbe kurulmuştur. Biyo-kubbe, 2,5-10 cm genişliğinde birer yarım küre besin ortamlarının üst üste getirilmesiyle oluşturulan ayrıntılı bir sistemdir. Kürenin tabanı boyunca zıplayarak hareket eden bir parça yardımıyla kültür ortamı karıştırılmaktadır ve gaz birikimi engellenmektedir. Dış kubbenin üstündeki silindirik açıklık, kabarcıklı hava ve gazların çıkışını sağlamaktadır. Soğutma için fotobiyoreaktörün tepesinden su püskürtülür. Bu sistemin önemli derecede iki dezavantajı vardır: ticari bir tesisi gerçekleştirmek için binlerce birbirine bağlı birim inşa edilmesi gerekmektedir ve temizliği zor gerçekleştirilmektedir (Tredici M. R., 2004).



Şekil 20. Micro Gaia tarafından inşa edilen kubbe fotobiyoreaktör, Hawaii (Olaizola & Huntley, 2003)

2000’li yıllarda ‘Addavita Ltd (Chesterfield, BK)’ şirketi, Gelişmiş Alg Üretim Sistemi (AAPS) adı verilen sarmal bir yetiştirme sistemini 400, 1000, 2000 ve 5000 litrelik modüler halinde ticari amaçla kullanmıştır. Yetiştirilen alglerin türüne göre kültürün sirkülasyonu bir pompa veya bir hava kaldırma yöntemi ile sağlanmıştır. Akışı uygun hale getirebilmek için boruların eğimi değiştirilebilmekteydi. Ancak sistemin soğutulması ve temizlenmesi zor olduğundan başarısız olmuştur (Tredici M. R., 2004).



Şekil 21. Addavita Ltd (Chesterfield, BK), Gelişmiş Alg Üretim Sistemi (AAPS) (Tredici M. R., 2004)

Dünya genelinde ve ülkemizde alg üretimi için fotobiyoreaktör kullanımı, eczacılık, kozmetik, hayvan yemi, enerji üretimi, biyoyakıt gibi pek çok sektörde de artarak devam etmektedir. Günümüzde laboratuvar koşullarında Şekil 22’de görüldüğü gibi farklı karıştırma ve aydınlatma türleriyle birçok firma tarafından fotobiyoreaktörler tasarlanıp özellikle biyoyakıt üretimi için kullanılmaktadır.



Şekil 22. Günümüzde fotobiyoreaktör teknolojisi (Akuamakx, 2023)

Gelecekte tasarlanacak olan fotobiyoreaktörler teoride bahsedilen maksimum etkiye yaklaşmak, daha yüksek biyo kütleye ulaşmak, kullanılan enerjiyi azaltmak ve en düşük yatırım maliyetini sağlayabilmek için daha iyi fotosentetik yetkinliklere sahip olacak şekilde geliştirilmelidir. Fotosentetik verimlilik iki katına çıkarken malzemelerin üretim ve tasarım maliyeti önemli ölçüde azalmalıdır. (Posten, 2009)

1.6.Fotobiyoreaktör Türleri

Fotobiyoreaktörlerin biyokütle üretiminde verimli olabilmesi için ışık oldukça önemlidir ve bu sistemler doğal ışıkla ya da yapay ışıkla aydınlatılabilirler. Fotobiyoreaktörler bu nedenle şeffaf ve iyi ölçülendirilmiş yüzey alanlarına sahip olmalıdır. Şekil 23’te fotobiyoreaktör türleri gösterilmektedir.

Fotobiyoreaktör türleri,

- Düz-Panel Fotobiyoreaktör (Şekil 2a),
- İçten Aydınlatmalı Fotobiyoreaktör (Şekil 2b)
- Tübüler Fotobiyoreaktör (Şekil 2c),
- Dikey-Kolon Fotobiyoreaktör (Şekil 2d),
- Karıştırılmalı Tank Fotobiyoreaktör (Şekil 2e),

- Hava Kaldırmalı Fotobiyoreaktör (Şekil 2f),
- Plastik Torba Fotobiyoreaktör (Şekil 2g)

olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 23. Fotobiyoreaktör Türleri (URL-3, 2023) (Huo vd., 2018) (Jones, 2014) (Kaşdoğan, 2018)

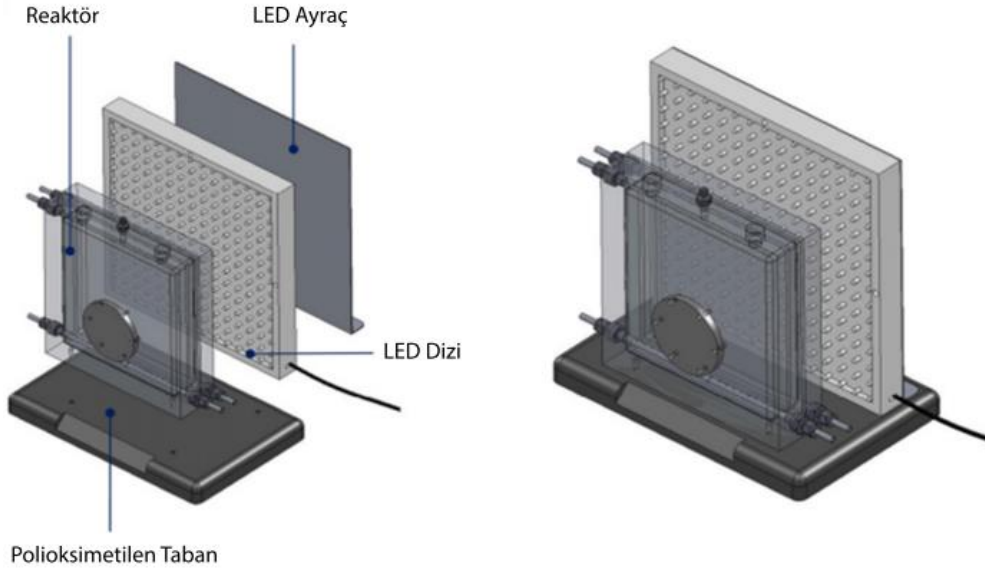
1.6.1. Düz Panel Fotobiyoreaktör

Düz panel fotobiyoreaktörler geniş aydınlatma yüzeyine sahip olduğundan alglerin yetiştirilmesinde en fazla tercih edilen türlerden biri olmuştur. Güneş ışığından en üst seviyede fayda sağlayabilmek için şeffaf malzemelerden yapılmaktadır (Ugwu vd., 2008). Kullanılan şeffaf malzemeler düz, şeffaf cam, pleksiglas, polikarbonat veya polietilen filminden oluşabilmektedir (Singh & Sharma, 2012). Ticari olarak kullanılmasının yanı sıra mimari olarak da cephelerde tercih edilmektedir. Fotobiyoreaktörün kesiti dar olmasına rağmen alg besin ortamında ışığın ve besinlerin homojen dağılmış olduğundan emin olmak için karıştırılmaya ihtiyaç duymaktadır (Ugwu vd., 2008).

Düz panel fotobiyoreaktörlerin biyokütle verimlilikleri yüksektir (Rawat vd., 2013). Aynı zamanda maliyeti düşüktür, tasarımı basittir ve temin edilmesi kolaydır. Ancak algler yüzeye yapışma eğiliminde olduğundan ve fotobiyoreaktör geniş yüzey alanına sahip olduğundan sıcaklık ve CO₂ hızını kontrol etmek güç olabilmektedir (Kargın, 2020).

Alg hücrelerinin düz plakalar arasında kendiliğinden gölgelenmesi, fotosentez sürecini ve alg etkinliğini engelleyebilmektedir. Bu nedenle kültürde ışığın verimli kullanılmasını sağlamak ve ışığın nüfuz etmesini artırmak için ek iç mekân aydınlatmasında optik fiberler veya LED ışıklar kullanılabilmektedir (Kerestecioğlu & Pekmezci, 2019).

Düz panel fotobiyoreaktörler, geniş aydınlatma yüzey alanları nedeniyle fotosentetik mikroorganizmaların yetiştirilmesinde tercih edilen yetiştirme ortamları olmuştur. 1953 yılında Milner tarafından yapılan deneyde, alg yetiştiriciliği için düz besin kültürü ortamlarının kullanılmasına başlanmıştır. 1985 yılında Samson ve Leduy floresan lambalarla donatılmış düz bir reaktör geliştirmiştir. 1986 yılında Ramos de Ortega ve Roux kalın şeffaf PVC malzemeler kullanarak dış mekânda kullanılmak üzere düz panel reaktör geliştirmiştir (Tredici M. R., 2004).



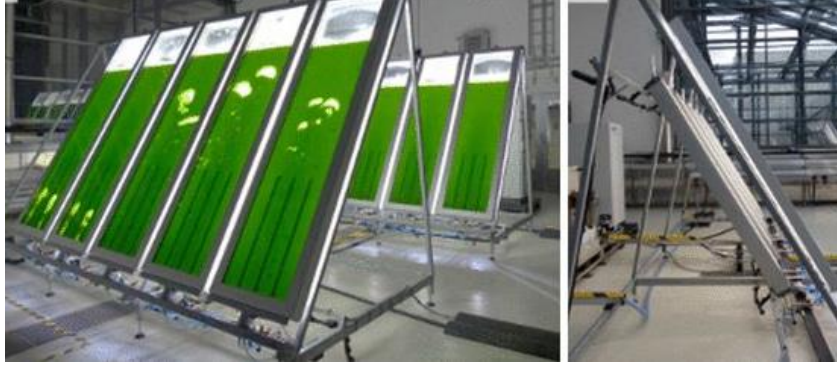
Şekil 24. Düz-Panel Fotobiyoreaktör Detaylı (Tamburic B. vd., 2011)

Genel olarak, düz plakalı fotobiyoreaktörler, güneş ışığı enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmak için şeffaf malzemelerden yapılır. Düz plakalı fotobiyoreaktörlerde çözünmüş oksijen birikimi, yatay tübüler fotobiyoreaktörlere kıyasla nispeten düşüktür

(Ugwu vd., 2008). Ayrıca ışık yolu biyokütle yoğunluğu ile ters orantılıdır. Yani biyokütle yoğunluğu arttıkça ışık yolu sınırlanmaktadır. (Xu vd., 2009)

Düz panel fotobiyoreaktörün yüzey/hacim ilişkisi avantajından dolayı tübüler fotobiyoreaktörlere göre daha az alan kaplamaktadır. Güneşe bakan uygun bir açıda dik ya da eğimli şekilde cephelerde mimari eleman olarak kullanılabilir. Yapılan deneylerde doğu/batı yönlenmesiyle kıyaslandığında kuzey/güney yönlü fotobiyoreaktörlerde alg büyümesi daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu deneysel bulguya bir çelişki olarak Kurano ve Miyachi, düz levha reaktörlerini doğu/batı yönüne yerleştirdiklerinde daha yüksek biyokütle elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Birbiriyle uyuşmayan deney sonuçlarını, Sierra ve arkadaşları (2008) 2008 yılında güneş radyasyonu dünyanın enlemine göre değiştiğini belirterek açıklamıştır. Doğu/batı yönelimli düz levhalar, 351K'nın üzerindeki enlemler için kuzey/güneyden daha fazla güneş radyasyonunu yakalayabilirken, ekvatora 351K'nın altındaki enlemler için doğu/batıdan daha fazla güneş radyasyonu yakalayabilmektedir (Xu vd., 2009).

Doğal ışığın yetersiz olduğu mevsimlerde ya da bölgelerde yapay aydınlatma kullanılmaktadır. Yapay ışık kaynakları maliyeti etkilemekle birlikte sisteme ek bir enerji tüketimi de yükleyen bir faktör olmasına rağmen aydınlatma açısından uygun kültür ortamını sürekli olarak sağlayabilmektedir. Doğal aydınlatmalı sistemlerde değişen günlük ışık yoğunlukları nedeniyle hücre büyümesi etkilenebilmektedir (Öncel & Köse, 2016). Fotobiyoreaktördeki ışık yoğunluğunu artırmak ve yapay ışık tarafından sağlanan enerjiden tasarruf etmek için LED ışık kaynağını farklı ışık yollarıyla yerleştiren bir optik düz panel fotobiyoreaktör Choi tarafından tasarlanmıştır (Choi H.-J. , 2014).



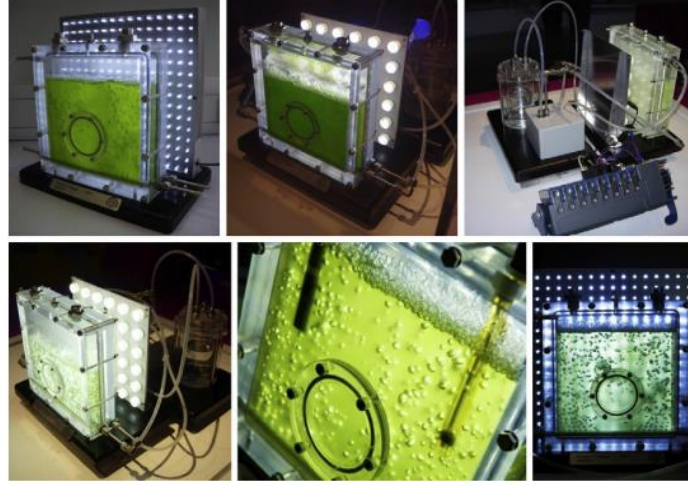
Şekil 25. Düz Panel Fotobiyoreaktör Deneysel (Koller vd., 2018)

Düz panel fotobiyoreaktörlerin avantajları: yüksek yüzey alanı/hacim oranı, çok ciddi olmayan çözünmüş oksijen birikimi, temizlemeye uygun olması-rahat temizlenebilmesi, panelin esnek olması ve ölçek büyötmeye uygun olmasıdır (Ting vd., 2017). Işık yolunun kısaltılarak verimli bir ışık kullanımı sağlanması, gerektiğinde fotobiyoreaktörlere farklı açılarda eğim verilebilmesi, gerektiğinde yapay ışıklandırma ile de çalışmaya izin ermesi, ortam koşullarının kontrolünün mümkün olması, sistemin az sayıda parça ile oluşturulabilmesi diğer avantajlarıdır (Conk Dalay vd., 2008).

Düz panel fotobiyoreaktörlerin dezavantajları ise: sıcaklığı kontrol etmenin maliyetinin yüksek olması, havalandırma ile üretilen hidrodinamik stres, iç yüzeye yakın biyolojik kirlenmesidir. (Ting vd., 2017)

1.6.2. İçten Aydınlatmalı Fotobiyoreaktör

İçten aydınlatmalı fotobiyoreaktörler hem doğal aydınlatma kullanabilmekte hem de yapay aydınlatma ile floresan lambalarla aydınlatılabilmektedir. Güneş ışığından elde edilen fayda uygun değerin altına düştüğünde ya da gece olduğunda yapay aydınlatma kullanılabilir. Fotobiyoreaktörün bulunduğu bölgeye göre yapay aydınlatmaya duyulan ihtiyaç değişmektedir. İçten aydınlatmalı fotobiyoreaktörün en önemli avantajlarından biri basınç altında ısıyla temizlenebilmesidir. Bu sayede reaktörlerin kirlenmesi en aza indirilebilmektedir (Ugwu vd., 2008).



Şekil 26. İçten Aydınlatmalı Fotobiyoreaktör (Tamburic B. vd., 2011)

1.6.3. Tübüler Fotobiyoreaktör

Tübüler fotobiyoreaktörler, yaygın kullanılan kapalı alg yetiştirme sistemlerinden biridir (Ting vd., 2017). Tübüler fotobiyoreaktörler, genellikle şeffaf plastik veya camdan yapılmış bir dizi düz, sarmal veya ilmekli şeffaf tüplerden oluşmaktadır. Algler, bir pompa veya hava taşıma teknolojisi ile tüpler içinde dolaştırılmaktadır. Bu hava kaldırma işlemi karbondioksitin (CO_2) ve oksijenin (O_2) besin ortamı ile havalandırma arasında geçişini sağlamaktadır (Xu vd., 2009).

Tübüler fotobiyoreaktörler temel tasarımları itibariyle; kültür ortamını içinde bulunduran tüplerden oluşmuş kısım, sistem içinde biriken gazın atılmasını sağlayan ünite ve hava dolaşımını gerçekleştiren pompa sistemi olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Temel tasarım hedefi diğer fotobiyoreaktör sistemlerinde olduğu gibi en iyi şekilde güneş ışığından faydalanmak ve uygun koşulların sağlanmasıdır (Conk Dalay vd., 2008). En yaygın kullanılan çeşidi yatay tüplerden oluşan tübüler fotobiyoreaktörler tek sıra halinde ve ardışık çoklu sıralar halinde, düz/kıvrımlı/halkasal formda ve yatay veya dikey olarak tasarlanabilmektedir (Kerestecioğlu & Pekmezci, 2019).



Şekil 27. Tübüler Fotobiyoreaktör

Tübüler fotobiyoreaktör, açık hava kitle kültürleri için en uygun türdeki fotobiyoreaktörlerden biridir. Dış mekânda kullanılan tübüler fotobiyoreaktörler genellikle cam veya plastik tüple yapılmaktadır. Kültürlerin karıştırılması ise pompayla ya da hava taşıma sistemiyle sağlanmaktadır (Ugwu vd., 2008). Tübüler fotobiyoreaktörlerin sıcaklık kontrolünün su havuzu içinde yüzdürülerek ya da batırılarak sağlandığı gözlemlenmiştir (Xu vd., 2009). Ayrıca kültür sıcaklığını korumak için bir diğer yöntem termostatla donatılabilmesidir. Ancak bu çok pahalı ve uygulanması zor bir yöntemdir (Ugwu vd., 2008). Tübüler fotobiyoreaktörlerde alg yetiştiriciliği, çok fazla güneş ışığı olduğunda korumasız olabilmektedir. Yüksek ışık yoğunluğu nedeniyle fotobiyoreaktörde büyümeleri gecikebilir (Kerestecioğlu & Pekmezci, 2019). Böylece dış mekân tübüler fotobiyoreaktörlerde foto inhibisyon yaygın hale gelmektedir (Ugwu vd., 2008).

Tübüler fotobiyoreaktörlerin çapı genişletildiğinde kültür içerisindeki alglerin gölgede kalma ihtimali artmaktadır. İyi bir karıştırma sağlanmalıdır. Çapın genişletilmesi dışında tüplerin boyunun uzatılması da yüzey/hacim ilişkisini arttırabilmektedir. Ancak bu durumun da kısıtlamaları vardır. Çok uzun tüpler, fotosentez sırasında üretilen oksijenin (O_2) birikmesine neden olur. Böylece hava doygunluğunu aşılabilir ve bu durum da fotosentezi engelleyebilir (Xu vd., 2009). Özdeş boru biçimli modüllerin çoğaltılmasıyla ölçeklendirme dışında, hacmi artırmanın tek yolu uzunluk ve/veya çapı artırmaktır. Bununla birlikte, Camacho Rubio ve arkadaşlarının (1999) yapmış olduğu kütle transfer modeline dayalı simülasyonlarda, sabit bir çap için artan tüp uzunluğunun, tüp çıkışındaki kültür pH'ını, çıkan sıvının çözünmüş oksijen (O_2) içeriğini ve karbondioksiti (CO_2) değiştireceğini öne sürmektedir (Grima vd., 1999). Ayrıca Grima ve arkadaşları (1999) tübüler fotobiyoreaktörlerin boru çapı 0,1 m'den fazla olmayacak şekilde, sürekli boru uzunluğunun 80 m ve debisinin 0,3-0,5 m/s olacak şekilde tasarlanmasını önermiştir (Grima vd., 1999; Kerestecioğlu & Pekmezci, 2019).

Tübüler fotobiyoreaktörler için temel tasarım anlayışı, kültürün karıştırılması ve dolaşımı için uygun pompalama sistemlerinin yönetimidir (Kerestecioğlu & Pekmezci, 2019).

Tübüler fotobiyoreaktörün bir türü olan yatay tübüler tipte fotobiyoreaktör, yüksek üretkenlik nedeniyle yüksek ölçekli alg üretimi için yaygın olarak kullanılan bir tasarımdır (Slegers vd., 2013). Yatay tüpler genellikle oldukça incedir ve yüksek bir yüzey/hacim oranı sağlamaktadır. Arazi alanının en az kullanımı için uygun ışık yakalama verimliliği sağlamak üzere çit benzeri yapılar şeklinde tasarlanabilmektedir. Bu yapılarda sıcaklık kontrolü zor olabilmektedir. Sıcak iklimlerde kullanıldığında, su püskürtme yöntemi kullanılarak soğutulabilmektedir. Kültürün yatay borulu reaktörlerde çalkalanması, kültürün pompalar kullanılarak tüpler içerisinde dolaşım sağlanmaktadır.

Yatay tübüler fotobiyoreaktörlerin kullanılmasının dezavantajlarından biri düşük gaz değişimi ve gaz değişiminin çoğunun ayrı bir bölümde yürütülmesinden kaynaklanan olumsuz durumlardır. Diğer dezavantajları ise yüksek enerji kullanımı ve bazı durumlarda tüplerde biriken biyokütledir (Xu vd., 2009; Molina vd.,2001; Posten, 2009; Slegers vd., 2013).



Şekil 28. Yatay Tübüler Fotobiyoreaktör

Tübüler şekilde sarmal fotobiyoreaktörler de yatay tübüler fotobiyoreaktöre benzemektedir. Karıştırma ve gaz değişimi pompalar tarafından sağlanmaktadır. Sıcaklık, su püskürtme kullanılarak kontrol edilebilir (Skjånes vd., 2016).

Avantajları, yüksek yüzey/hacim oranı ve arazi alanı başına etkili hasat veriminin konik bir sarmal şekil ile artırılabilmesidir. Dezavantajları, düşük gaz değişimi, yüksek kesme gerilimi, tüplerde biyokütle birikmesi ve yüksek enerji girişidir (Skjånes vd., 2016).

1.6.4. Dikey-Kolon Fotobiyoreaktör

Dikey-kolon fotobiyoreaktörlerde, alg kültürü büyük hacimli silindirik kaplarda büyütülmektedir. Düşük maliyetli, yoğun çalışabilen ve işletmesi kolay fotobiyoreaktörlerdir (Kerestecioğlu & Pekmezci, 2019).

Alglerin yetiştirilmesi için dikey kolon fotobiyoreaktörlerin çeşitli tasarımları ve ölçekleri araştırmacılar tarafından (Choi vd., 2003; Vega-Estrada vd., 2005; Lopez vd., 2006; Kaewpintong vd., 2007) test edilmiştir. Büyük ölçekli alg yetiştiriciliği için uygun ölçeklendirme avantajlarına sahiptir (Ugwu vd., 2008). Tasarım formları ve çalışma prensipleri ile alg kültürünün foto inhibisyona maruz kalmasını engelleyerek ışıktan kaynaklanabilecek oksitlenmeyi azaltmaktadır. Ölçeğinin artırılmasıyla, dikey kolon fotobiyoreaktörlerde ışık kullanımı boyut olarak ters orantılı olarak azalmaktadır. Dolayısıyla dikey-kolon fotobiyoreaktörlerde en yüksek verim yaz aylarında ölçülmektedir (Kerestecioğlu & Pekmezci, 2019).

Dezavantajları ise: aydınlatılan yüzey alanları nispeten dar olması, özel malzeme gereksinimidir (Ugwu vd., 2008).



Şekil 29. Dikey Kolon Fotobiyoreaktörler (Kargın, 2020)

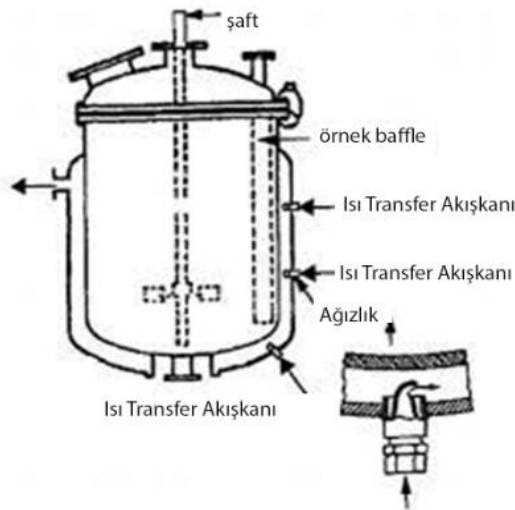
Dikey-kolon fotobiyoreaktörler genellikle hava püskürtmeyle dolaşımı sağlamaktadır. İstisnai olarak bazı reaktörlerde karıştırma yöntemi ile dolaşım sağlanmaktadır. Sıcaklık kontrolü su püskürtme yöntemi ile yapılmaktadır (Skjånes vd., 2016).

Dikey-kolon fotobiyoreaktörler etkili gaz sirkülasyonu, düşük kayma gerilimi, karıştırılmaya uygun olması, düşük enerji tüketimi ve düşük maliyetiyle ticari olarak alg yetiştiriciliğinde faydalıdır. Üretilen biyokütlenin transferinde başarılı bir transfer sistemine sahiptir (Skjånes vd., 2016; Ting vd., 2017).

Dezavantajları, güneş enerjisinden yeterince faydalanamaması, hidrojen üretimi için elverişsiz olmasıdır (Skjånes vd., 2016).

1.6.5. Karıştırmalı Tank Fotobiyoreaktörler

Karıştırmalı tank fotobiyoreaktörlerin hacminin sadece %70-80'i besin ortamı ile doludur. Bu nedenle kalan boşluk oluşan gaz değişimi uygun ortam oluşturmaktadır. Karıştırmalı tank, iç mekân alg biyokütlesi üretiminde çalkalama, karıştırma ve aktarma ile iyi bir performansa sahiptir (Ting vd., 2017). Karıştırmalı fotobiyoreaktörlerde kullanılan çarklar gölgelemeden kaçınmak için pleksiglas malzeme tercih edilebilmektedir. (Skjånes vd., 2016). Ancak bu düzeyde bir karıştırma sağlanması yüksek enerji harcamasına neden olmaktadır. Ayrıca, çok düşük yüzey alanı/hacim oranı, ışığın istenilen bir şekilde nüfuz etmesini engellemektedir. Bu durum alglerin fotosentetik etkinliğini önemli ölçüde azaltmaktadır (Ting vd., 2017).

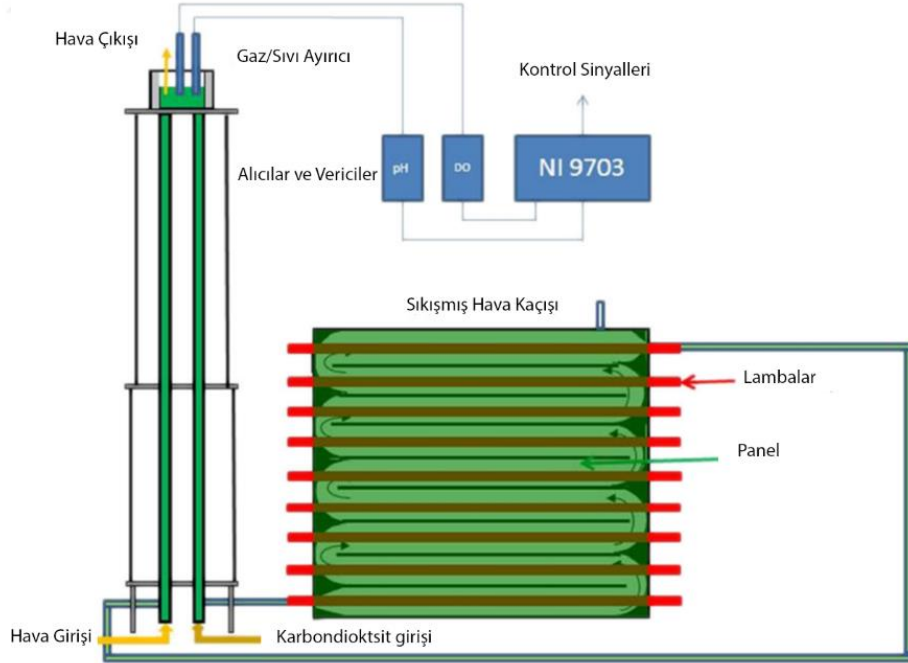


Şekil 30. Karıştırmalı Tank Fotobiyoreaktör
(Anonim: Bölüm 3: Reaktör Tasarımı)

Karıştırılmalı tank fotobiyoreaktörlerin faydaları arasında homojen kültür dağılımı, tam kontrol imkânı, saf kültürle çalışma imkânı, farklı aydınlatma sistemlerinin uyum sağlayabilmesi, farklı beslenme kültürlerinde yetiştirilebilmesidir (Conk Dalay vd., 2008).

1.6.6. Hava Kaldırmalı Fotobiyoreaktör

Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler karıştırmanın ve gaz transferlerinin hava beslemesi ile aynı anda gerçekleştirilebildiği sistemlerdir. Farklı boyutlarda ve tasarımlarda olabilmektedirler (Conk Dalay vd., 2008). Kompakt bir sistem olan hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerin alan ihtiyacı ve enerji tüketimi azdır. Kütle transferi yüksektir ancak biyokütle arttıkça verim düşmektedir. Temizliği diğer türlere nispeten kolaydır. Karıştırma verimi iyidir. Ancak çarklar kültür ortamına gölgeleme yapabilmektedir. Bu nedenle aydınlatma alanı dardır. Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörün tasarımı karmaşık olduğundan ölçek büyütmesi zordur. Ayrıcı kurum maliyeti yüksektir (Elçik & Çakmakçı, 2017).



Şekil 31. Hava Kaldırmalı Fotobiyoreaktör (Li vd., 2014)

Fotosentez yoluyla üretilen oksijen (O_2), hava taşıma bölgesine dönene kadar birikmektedir. Hava taşıma kolonun üst kısmındaki bir gaz-sıvı ayırıcı, gaz kabarcıklarının güneş enerjisi kolektörüne yeniden dönmesini önlemektedir. Güneş döngüsü, güneş ışığını verimli bir şekilde toplamak, akışa karşı direnci en aza indirmek ve kullanılacak alanı azaltmak üzere tasarlanmıştır (Molina vd., 2001).

1.6.7. Plastik Torba Fotobiyoreaktör

Plastik torba fotobiyoreaktörler genellikle atık su üretiminde kullanılan uygun maliyetleri biyoreaktörlerdir. Plastik torba fotobiyoreaktör plastik torbalar, çerçeve ve havalandırma sistemi olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır (Ting vd., 2017). Şeffaf ve tek kullanımlık torbalar genellikle farklı yöntemlerle desteklenerek dikey olarak düzenlenmektedir. Örneğin dikey çerçeve bir strüktüre asılarak kullanılabilir (Muller-Feuga, 2004).



Şekil 32. Plastik Torba Fotobiyoreaktör (Placzek vd., 2017)

Plastik torba kültürlerin önemli bir avantajı, çok temiz koşullar altında açık havada kültür bakımının kolaylaştırılmasıdır. Torbalar, tam otomatik bir sistem sağlayarak, büyüme ortamı ve aşılamanın yanı sıra hasadı kolaylaştırmak için uygun borularla kolayca birbirine bağlanabilir. Plastik torba fotobiyoreaktörler ile ilgili bir dezavantaj, torbaların duvar büyümesi geliştirme eğiliminde olan türler için ideal olmamasıdır. Her torba ayrı bir üretim

birimi olduğundan, büyük ölçekli ekonomi, birimlerin oldukça büyük olmasını zorunlu kılmaktadır (Muller-Feuga, 2004).

Kurulumun kalıcı, dış ortama açık ve kamu kullanımına yönelik olduğu dikkate alındığında plastik torba fotobiyoreaktörlerin kırılabilirlikleri nedeniyle diğer fotobiyoreaktör türlerine göre daha az kullanışlı olduğu görülmektedir. Kullanılabilen en yaygın fotobiyoreaktör türleri tübüler ve düz panel fotobiyoreaktörlerdir. Düz panel fotobiyoreaktörlerin, kütle transfer sistemleri hava kaldırma türü karıştırmaya dayalı olduğundan ve düz panel fotobiyoreaktörlerin yatay yerleşiminin uygulanabilir hale gelmesi için yeni bir kütle transferi yöntemi gerektireceğinden, dikey kurulumlarda daha etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle mimaride kullanılan ilk örnek olan BIQ House evinde de düz panel fotobiyoreaktörlerde cephede dikey olarak kullanılmıştır (Verso vd., 2019).

Fotobiyoreaktör türlerinin detaylı anlatımları ilgili fotobiyoreaktör türünün bağlı olduğu altında açıklanmaktadır. Tablo 9’da fotobiyoreaktör türleri ve avantaj-dezavantajları genel çerçevesiyle gösterilmiştir (Ting vd., 2017; İmamoğlu vd., 2008).

Tablo 9.Fotobiyoreaktör çeşitlerinin avantaj ve dezavantajları

	Avantaj	Dezavantaj
Düz- Panel Fotobiyoreaktör	Yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptir.	Sıcaklığı kontrol etmek pahalıdır.
	Çözünmüş oksijenin çok önemli miktarda olmaz.	Havalandırma tarafından üretilen hidrodinamik stresin olumsuz etkileri vardır.
	Temizlemeye elverişlidir.	Alglerin ölmesi durumunda ya da biyokütle hasadının aksaması halinde iç yüzeye yakın biyolojik kirlilik meydana gelebilmektedir.
	Ünite esnektir ve ölçek büyütme uygundur.	
İçten Aydınlatmalı Fotobiyoreaktör	Işık miktarı ve dalga boyu kontrol edilebilir.	Yüksek kalitede yapay ışık kaynakları ve ışık kontrol sistemleri maliyetli olabilir
	Hava kirliliğinin fotosentez performansına olan olumsuz etkisi daha az olabilir.	Güneş ışığına göre yapay ışık, fotosentez verimliliğini aynı seviyede sağlayamayabilir.
	Hava koşullarına bağlı kalmadan yıl boyu sürekli biyokütle üretimi sağlayabilir.	Yapay aydınlatma sistemi ısı üretebilir ve fotobiyoreaktör içinde ısının kontrolü zor olabilir.
	Işık koşullarının hassas bir şekilde ayarlanması, ürün kalitesini ve bileşimini kontrol etmeyi kolaylaştırabilir.	Işık sağlamak için enerji tüketimine yol açar. Bu, işletme maliyetlerini artırabilir ve çevresel etki yaratabilir.

Tablo 9'un devamı

Tübüler Fotobiyoreaktör	İşığı verimli kullanmaktadır.	Radyal yönlerde eşit olmayan kütle transferine sebep olur.
	Sistem kullanımı kolaydır	Homojen olmayan sıcaklık ve CO ₂ dağılımlarına neden olması ve çözünmüş oksijen birikimine yol açması çok kolaydır.
	İşletme kontrolü kolay sağlanabilmektedir.	Yüksek düzeyde arazi kullanımı gereksinimi ve ticari ekimde ekonomik değildir.
Dikey Kolon Fotobiyoreaktör	Yüksek yüzey alanı/hacim oranı	Dar ışıklandırma yüzey alanına sahiptir.
	İyi karıştırma koşullarında yüksek biyokütle transferi ve düşük kesme kuvveti	İnşa edilebilmeleri için nitelikli malzeme gereksinimi duymaktadır.
	Enerji tüketimi düşüktür ve kurulum maliyeti nispeten daha azdır.	Yeterli karıştırma olmadığında alg kültürlerinin üstüne yüksek kesme kuvveti binmektedir.
Karıştırılan Tank Fotobiyoreaktör	Sistemlerinin homojen kültür dağılımı kolaylıkla sağlanabilir.	Maliyetli bir üretime sahiptir.
	Saf kültürle çalışma imkânı/ kültürün farklı beslenme durumlarında yetiştirilebilmektedir.	Ölçeklendirme problemi vardır.
	Tam kontrol imkânı sağlamaktadır.	Kolay temizlenememektedir.
	Farklı aydınlatma sistemleri uyarlanabilir.	Çalıştırılmasının kolay değildir.
Hava Kaldırmalı Fotobiyoreaktör	Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerde oksijenin organizmalar tarafından emilimi ve fotosentezde kullanılması, atmosferik oksijenin tüketilmesine göre daha verimlidir.	Hava kabarcıkları, ışığın su içinde daha fazla dağılmasına neden olabilir, bu da alt katmanlarda ışık eksikliğine yol açabilir.
	Hava kabarcıklarının dolaşımı, fotobiyoreaktör içindeki ısının homojen dağılımını sağlayabilir.	Hava girişi, dışarıdan kontaminasyon riskini artırabilir ve büyük hava kabarcıkları, sıvı içinde gaz transferi zorluklarına yol açabilir.
	Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerin işletilmesi, içten aydınlatmalı sistemlere göre genellikle daha az enerji tüketebilir.	Bazı durumlarda hava kabarcıkları yeterince homojen bir karışım sağlamayabilir, bu da organizmaların besin ve ışık kaynaklarına eşit erişimini zorlaştırabilir.
	Mekân verimliliği açısından içten aydınlatmalı sistemlere göre daha avantajlı olabilir.	Hava kabarcıkları, köpük oluşumuna neden olabilir, bu da karışımı ve gaz transferini zorlaştırabilir.
Plastik Torba Fotobiyoreaktör	Kurulum maliyetleri düşüktür, ucuz malzemelerden üretilir.	Uzun vadede ekonomik değildirler. Çünkü temizlik ve sızıntı problemleri nedeniyle ömürleri kısadır.
	Hafif ve taşınabilir.	Torba malzemeler yapısı bakımından kırılgandır.
	Şekilleri ve büyüklükleri ihtiyaca ve isteğe göre tasarlanabilir.	Yerçekimi nedeniyle foto limitasyon oluşmaktadır.

Tablo 9’da gösterilen fotobiyoreaktör (FBR) türlerinden düz-panel fotobiyoreaktörler ve tübüler fotobiyoreaktörler, mimari tasarımda diğer türlerden daha fazla tercih edilmektedir. Düz paneller, ışığın kültür sıvısına kolayca nüfuz etmesine izin veren çok kısa bir ışık yoluna sahiptir. Fotobiyoreaktörleri diğer akıllı yapı malzemelerden ayıran en önemli özelliklerden biri çevresinde salınan CO₂ miktarını önemli ölçüde kullandığından havayı temizlemesidir.

1.7.Fotobiyoreaktör Kullanım Alanları

Fotobiyoreaktörler birçok farklı sektörde kullanılabilmektedir. Bunlardan ilki, hangi endüstride kullanıldığına bakılmaksızın hava temizleme özelliğidir. Biyokütle üretirken fotosentez ile karbondioksit (CO₂) kullanarak oksijen (O₂) üreten fotobiyoreaktörler, bir ormandan (normal yapraklı ağaçlar) yaklaşık 10-100 kat fazla oksijen (O₂) üretebilmektedir (Uçmaz vd., 2021). Böylece yakın çevresindeki karbondioksiti (CO₂) temizlemektedir.

Araştırmacılar atık suyu arıtmak için de fotobiyoreaktörleri kullanmışlardır. Doğal aydınlatma veya yapay aydınlatma kullanılarak fotokatalitik reaksiyonlarla suyun kirden arındırılması sağlanabilmektedir (Ting vd., 2017).

Birçok bölgede algler biyoyakıt ve biyogaz üretmek için kullanılmaktadır. Biyoyakıt kaynaklarının %95’inden fazlası birinci nesil tarımsal yenilebilir bitki yağlarıdır. Atık yemeklik yağ ve hayvansal yağlar gibi ikinci nesil biyoyakıtlardır. Mevcut alternatif, sosyal ve ekonomik kabul edilebilirlik ve daha fazla enerji güvenliği açısından, alg yağı üçüncü nesil biyoyakıt kaynağı olarak kabul edilmektedir. Alg üretkenlikleri daha hızlı büyüme oranına sahiptir. Tarım alanı olarak bakıldığında tarımsal bitkilerin veriminden yirmi katı fazla olabilmektedir. Tarıma uygun olmayan çok tuzlu sularda ve atık sularda büyüebilmektedir. Alglerin lipid içeriği, kuru hücre ağırlığı genellikle %20 ile %40 arasında değişmektedir. Algler kolayca biyoyakıta dönüştürülebilmektedir. (Rawat vd., 2013)

Hava, deniz ve tatlı su ekosistemlerinin yönetimi ve temizliği için de kullanılabilmektedir. Mikroalglerin su kalitesinin iyileştirilmesine veya korunmasına en belirgin katkısı, temel olarak besin açısından sınırlı yüzey sularının çoğu türünde fotosentetik oksijen (O₂) üretimidir (Soeder, 2004).

Güneş enerjisini dönüştürerek yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilmektedir. Fotobiyoreaktörler, fotosentetik organizmaların güneş enerjisini gıdalar ve biyoyakıtlar gibi

arzu edilen bileşiklere dönüştürme kabiliyetini kullanarak biyokütle üretmek için su ve karbondioksiti (CO_2) geri dönüştürmek üzere tasarlanmıştır. Teorik olarak güneş enerjisi dönüşümünün maksimum veriminin %10 ile %12 arasında olduğu tahmin edilmekte ve bugüne kadar ortalama fotosentetik verim tam güneş ışığında bazı alg türleri için %2 ile %5 arasındadır (Iluz & Abu-Ghosh, 2016).

Tablo 10’da bahsedilen kullanım alanları ve kullanım amaçları gösterilmektedir.

Tablo 10. Fotobiyoreaktörlerin kullanım alanları

Kullanım Alanı	Kullanım Amacı
Bina Cephe	Yapının enerji ihtiyacının büyük çoğunluğunu sağlar ve çevresindeki atmosferi temizler. Kullanıcılara konforlu ve estetik mekânlar sunabilmektedir.
Biyoyakıt Üretimi	Güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek yakıt üretir.
Yenilenebilir Enerji	Güneş enerjisini kullanarak hidrojen üretimi sağlamaktadır.
Oksijen (O_2) Üretimi	Karbondioksit (CO_2) kullanarak fotosentez sayesinde oksijen (O_2) üreterek havayı temizlemektedir.
Su Arıtımı	Yaşam alanları geniş olduğundan biyokütle üretiminde atık su kullanılabilir. Dolayısıyla su arıtımında kullanılmaktadır.
Eczacılık	İlaç enstitüsünde fayda sağlamaktadır.
Deneyisel Çalışmalar	Geometrisi, yönelimi, kullanılan alg türü gibi değişen durumlar için uygun değerleri incelemek, farklı karıştırma seçeneklerinin enerji verimliliği hakkında bilgi vermek amacıyla laboratuvar ortamlarında kullanılır.

1.8. Fotobiyoreaktörlerin Mimaride Kullanımı

Fotobiyoreaktör cepheler, alg biyokütlenin cepheye bütünleşmiş sistemlerde yetişmesini sağlayarak yapı kabuğuna yeni bir işlev kazandıran, bu sayede binanın enerji verimliliğini arttıran sistemlerdir (Özbalta & Kükdamar, 2019). Bu sisteme olan ilginin son yıllarda artmasının sebebi kamuoyunda iklim değişikliği, küresel ısınma ve yeşil alanların hızla kaybedilmesi konusundaki endişelerin artmasıdır (Öncel & Köse, 2015). Fotobiyoreaktörlerin mimari bir eleman olarak kullanıldığında meydana gelen avantajları ve dezavantajları Tablo 11’de gösterilmektedir (Özbalta & Kükdamar, 2019).

Tablo 11. Mimari eleman olarak kullanılan fotobiyoreaktörlerin avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Güneş ışığını biyoenerjiye ve ısıya dönüştürebilmektedir.	Ölçeklenebilirlik sorunları vardır.
Güneş enerjisi kullanılabilir ve yerel depolama alanlarına sahiptir.	Yapı entegrasyonu ve işlev iyi düşünülmelidir.
Kültür ortamı için binanın atık suyunu kullanarak geri dönüştürmektedir.	Buharlaşıma yapabilen soğutmaya sahip olmadıkları için sıcaklık bakımı gerektirmektedir.
Binanın sıfır CO ₂ oranına yaklaşmasını sağlamaktadır.	Maksimum ışığa maruz kalma ihtiyacı vardır.
Gölgeleme etkisi ve iç mekan konforunu arttırabilmektedir.	Işığın etkin kullanılmadığı durumlarda alg kültürleri ölebilmektedir.
Oluşan hava kabarcıkları ve alg renklerinin çeşitlenmesiyle yaratılan, yaşayan ve dinamik kullanıcı deneyimi sağlamaktadır.	Biyofilm oluşumu nedeniyle periyodik temizlik gerektirebilmektedir.
Yüksek ısı ve akustik yalıtım sağlama, kentsel ısı adası etkisini azaltmaktadır.	

Fotobiyoreaktörlerin kullanışlı olabilmesi için bina yüzeyinde güneş gören cephelerde kullanılması gerekmektedir. Geniş giydirme cephelere (ofis, fabrika, alışveriş merkezi, havaalanı, tren garı gibi) sahip yapılarda iç mekân konforu göz önünde bulundurulduğu takdirde kullanıma uygun olabilmektedir. Aydınlanmanın önemli olduğu mekânlara sahip yapılarda (konut ve kütüphane gibi) ise fotobiyoreaktörlerin cephelerde nasıl konumlanacaklarının iyi düşünülmesi gerektirmektedir (Tokuç vd., 2019). Güneş yoğunluğu bağlı, şeffaflık ve toplam enerji iletimi derecesi değişiklik gösterdiğinde ortaya çıkan hava kabarcıkları canlı ve dinamik kullanıcı deneyimi sağlamaktadır (SolarLeaf Bioreactor Facade).

Yeni araştırmalar fotobiyoreaktörlerin doğrudan yapılı çevre ile bütünleştirilmesinin faydalarını öngörmektedir (Proksch, 2012). Kapalı döngü sistemlerinde, binanın çevresinde bulunan karbondioksit (CO₂), fotobiyoreaktörü beslemek için kullanılabilir. Böylece bina çevresine oksijen (O₂) sağlayabilir. Dünyanın oksijen (O₂) kaynağına önemli katkı sağladığı söylenen algler mimarlığı karbon sıfır yapılara bir adım daha yaklaştıracak potansiyeli vardır. Bir binanın gri ya da atık suyu, fotobiyoreaktördeki algler için su ve besin kaynağı görevi görebilmektedir. Binanın gri suyu atık olarak değerlendirilmek yerine sahadaki suyu arıtmak için kullanılabilir (Decker vd., 2016).

Fotobiyoreaktörler bir mimari yapı elemanı olarak bina cephesinde gölgeleme veya kaplama elemanı olarak kullanılabilir. Ancak yeteri kadar uygulanmış örneği

olmadığından yapı ölçeğinde fotobiyoreaktör, sadece bir yapıda cephe elemanı olarak literatürde yer almaktadır. Tasarım ve uygulama aşamasında kolay takılıp sökülebilir, boyutsal olarak koordine edilebilen, seri üretime uygun ve esnek tasarıma olanak sağlayan şekilde üretilebilmesi mimari tasarımda kullanımını ve uygulanabilirliğini arttıran faydalar olabilir. Bununla birlikte kullanıcı konforu ve iç mekândan estetik olarak deneyimi göz ardı edilmemelidir. Fotobiyoreaktörlerin verimliliği, tasarım kararlarını etkileyen faktörler Tablo 12’de gösterilmektedir (Tokuç vd., 2019).

Tablo 12. Fotobiyoreaktör tasarımını etkileyen faktörler (Tokuç vd., 2019)

Fotobiyoreaktörden Beklenen Mimari Fayda	Fotobiyoreaktörlerin Bina Sistemleri ile Bütünleşik Çalışma
Binalarda çevresel farkındalık oluşturulması	Kullanıcı konforunun sağlanması
Yenilikçi bir elemanın mimari dilde yer bulması	İç-dış ortam arasında ışık ve görüş geçişi-gölgeleme elemanı olarak kullanımı
Yeşil mimari estetiği desteklemesi	Panel sistemlerde doluluk ve hasat oranının uygun şartlarda kalmasının sağlanması
Fotobiyoreaktörlerin yapı elemanı olarak kullanılabilme potansiyelinin geliştirilmesi	Aydınlatma sistemi; güneş kontrolü, doğal aydınlatma, alg türünün rengi-büyüme hızı ve yoğunluğu
Binanın cephesinde gölgeleme veya kaplama olarak estetik ve taşıyıcı kolon olarak yapısal kullanımının gelişmesi	Ayrıca sıfır süreç binasının kavramsal tasarımında, iklimlendirme ve pis su sistemleriyle beraber çalışacak karbon ve pis su filtreleme önerilerinin sunulması

Literatürde bazı araştırmacıların fotobiyoreaktörlerin mimari olarak mekân ölçeğinde deneysel ya da simülasyon programları ile ilgili çalışmalarına yer verilmiştir.

Pruvost ve arkadaşları (2016) tarafından bir fotobiyoreaktörün yapı ile bütünleşmesinin yapının çalışmasını nasıl etkileyebileceğini tanımlamak için düz panel bir fotobiyoreaktör üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu çalışma fotobiyoreaktör ile bina cephesi arasındaki ortak yaşamın, güneş enerjisiyle çalışan bağımsız biyoreaktörlerle karşılaştırıldığında alg kültürü için enerji ihtiyacını önemli ölçüde azaltabildiğini göstermiştir (Pruvost vd., 2016).

Kerner ve arkadaşları (2019), alg ve ısı üretimi için optimum koşulları sağlayacak bir sistem geliştirmiştir. Fotobiyoreaktör cephesi tarafından üretilen ısıнын %80’inin binaya ısı sağlayan sistemi için kullanılabileceğini göstermişlerdir (Kerner vd., 2019).

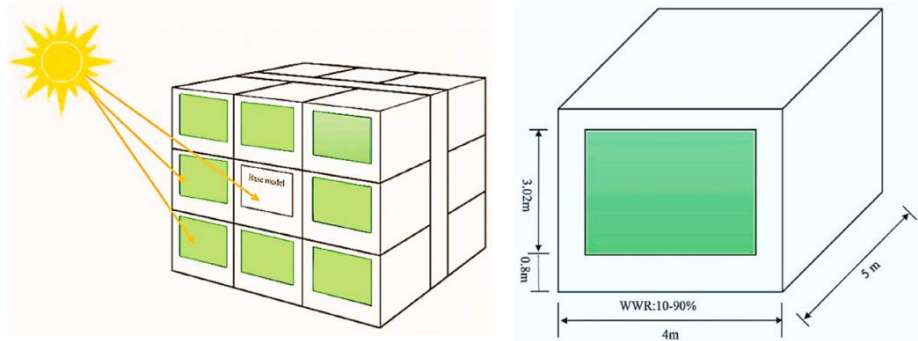
Negev ve arkadaşları (2019) tarafından bir alg biyoreaktörünün Akdeniz iklimindeki binaların enerji tüketimi üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Yaptıkları deneyde, bir alg penceresinin U değerini, Güneş Isısı Kazanım Katsayısını (SHGC) ve görünür geçirgenliği (VT) ölçmüşlerdir. Alg konsantrasyonunun, pencere boyutunun ve alg konsantrasyonu ile pencere boyutu kombinasyonunun enerji tüketimini nasıl azaltabileceğini incelediler. Sonuç olarak Kuzey Yarım Küredeki sıcak iklim bölgelerinde, alg pencerelerinin bina cephesine yoğunlukla batı ve güney yönelimlerinde konumlanması diğer yönlerle kıyasla daha fazla enerji tasarrufu sağladığını göstermiştir. Kullanılan her alg türü için de algin konsantrasyonu, pencere açıklığını ve alg ile pencere boyutunun kombinasyonu enerji tüketiminin azaltılmasında yarar sağlamaktadır. Tablo 13'te farklı alg konsantrasyonlarında enerji kullanım değişimi, panelin bulunduğu yöne ve pencere boyutuna göre gösterilmektedir. Ayrıca Alg penceresinin fotobiyoreaktör olarak biyo-enerji üretme potansiyeli ile enerji tasarrufu sağlama yeteneği yapıdaki enerji verimliliğini büyük ölçüde artırabilmektedir (Negeva vd., 2019).

Tablo 13. *C. Reinhardtii* ve *C. vulgaris* alg türlerinin farklı yoğunluklardaki enerji kullanımlarının deneysel sonuçları (Negeva vd., 2019)

Alg Türü	Yön	Pencere Boyutu	Farklı Alg Konsantrasyonlarında Enerji Kullanım Değişimi	
			%100	%30
<i>C. reinhardtii</i>	Güney	%15	11,9	4,6
		%90	-13,9	-7,5
	Doğu	%15	10,9	5,4
		%90	-3,6	-4,5
	Batı	%15	12,3	5,7
		%90	-9,7	-7,5
	Kuzey	%15	8,4	5,1
		%90	14,0	4,2
<i>C. vulgaris</i>	Güney	%15	13,3	4,3
		%90	-8,3	-6,8
	Doğu	%15	11,7	4,9
		%90	-1,7	-4,7
	Batı	%15	135,	-0,4
		%90	-7,6	-7,6
	Kuzey	%15	-7,6	4,5
		%90	17,0	4,2

Lo Verso ve arkadaşları (2019) tarafından Brisbane'deki Queensland Eyalet Kütüphanesi'nin açık terasında yer alan çalışma alanı için gölgeleme sistemi olarak fotobiyoreaktör uygulanmıştır. Özel olarak tasarlanmış fotobiyoreaktör sisteminin uygulanmasının anlatılmıştır. Ayrıca fotobiyoreaktör sisteminin kurulduğu dış mekânın gün ışığı performansı değerlendirilmiştir. Değişken hava koşulları ve doğrudan güneş ışığıyla karşılaşmak ve çalışma ortamına görsel konfor sağlamak için çeşitli biyokütle yoğunlukları, geniş bir ışık geçirgenliği aralığı sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Gün ışığı sonuçları, açık havada uygun konfor aralığında kalabilmek için fotobiyoreaktör sonuçlarının maksimum T_v 'sinin %5 – %20 aralığında olması gerektiğini ve kabul edilebilir konfor aralığında kalabilmek için T_v 'nin %20–%30 aralıkta olması gerektiğini göstermiştir (Verso vd., 2019).

Talaei ve arkadaşları (2021) yaptıkları deneyde, kendine özgü ısı özelliklerine sahip 8 farklı alg yoğunluğu ve dört ana yönde 6 farklı pencere-duvar alanı temel almıştır. Çift camlı pencere (DG-Win), tek camlı pencere (SG-Win) ve su pencere (Water-Win) modellerle karşılaştırıldığında, alg penceresini içeren modelin enerji tüketimindeki değişiklikleri gözlemlemişlerdir. Dört ana yönde de sonuçlar potansiyel enerji tasarrufunun alg yoğunluğuna, pencere-duvar oranına ve cephe yönelimine bağlı olarak farklı olduğunu göstermektedir. Güney ve doğu yönlerinde en büyük enerji tasarrufu %70 alg yoğunluğu ve %90 duvar/pencere oranı ile alg penceresinde meydana geldiği görülmektedir. Tek camlı pencereye kıyasla sırasıyla 179,08 ve 205,99 kWh/m²/y enerji tasarrufu sağlamaktadır. Kuzeyde, en yüksek enerji tasarrufu potansiyeli %90 duvar/pencere oranı ve %20 alg yoğunluğuyla alg penceresinde meydana gelir ve tek camlı modelle karşılaştırıldığında 18,66 kWh/m²/y enerji tasarrufu sağlamaktadır (Talaei vd., 2021).



Şekil 33. Deneyde kullanılan referans ofis yapıları (Talaei vd., 2021).

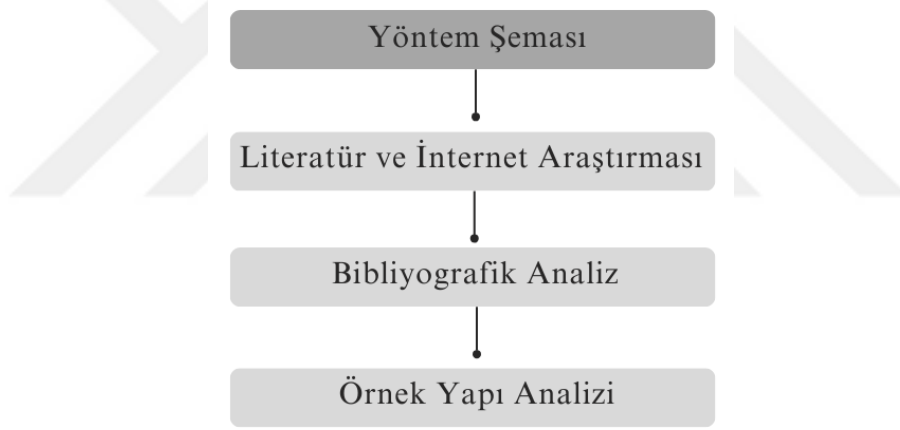
2022 yılında Köktürk ve arkadaşları (2022) Ankara ikliminde biyokütle üreten bir cephe elemanının enerji, aydınlatma ve ısı konforu üzerine analiz gerçekleştirmiştir. Çok katlı bir binanın ara katında yer alan, 3,2 x 4,8 x 3,2 metrelik tek bölge çalışma alanına sahip bir ofis odası ele alınmıştır. Tasarım değişkenleri olarak biyokütleyle bağlı değişen ışık geçirgenliğine (%20, %30, %40, %50, %60, %70, %85, %100) ve pencere-duvar oranına (%10-95 arasında %5 aralıkta değişimlerle) karar verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda pencere duvar oranı açısından değerlendirildiğinde aynı ışık geçirgenliğinde pencere duvar oranı arttıkça elverişli günışığı aydınlatması ve enerji kullanım yoğunluğunun arttığı görülmektedir. En düşük enerji kullanım yoğunluğu değeri en küçük pencere duvar oranı olan %10 ve %20 biyokütle oranında çıkarken, en yüksek enerji kullanım yoğunluğu değeri ise %95 ve %100 biyoküttele elde edilmiştir. En düşük elverişli günışığı aydınlatması değeri çok az ışık geçirmesinden dolayı %100 alg konsantrasyonunda ve küçük pencere duvar oranı olan %10'da elde edilirken, en yüksek elverişli günışığı aydınlatması değeri ise %30 alg konsantrasyonunda olup %65 pencere duvar oranında elde edilmiştir (Köktürk vd., 2022)

Fotobiyoreaktörler sürdürülebilir olmayan bina uygulamalarının olumsuz etkilerini azaltma potansiyeli, biyo-etkin cephe sistemleri, yenilenebilir enerji üretimine yardımcı olma kapasiteleri incelenmeye devam etmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Yöntem

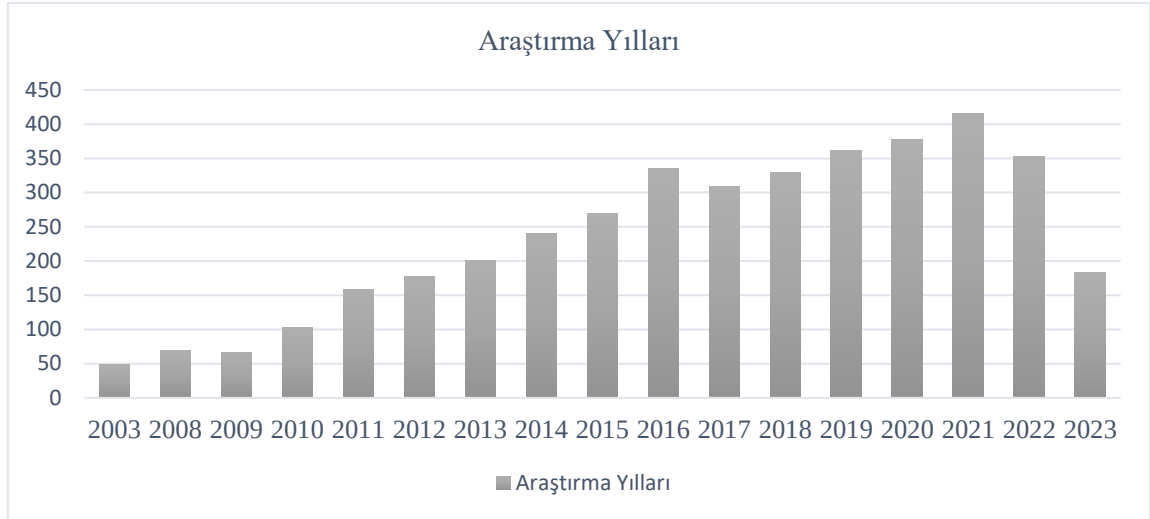
Bu çalışmada üç aşamalı bir yöntem izlenmiştir. İlk aşamada verilerin elde edilmesi amacıyla literatür taraması ve internet araştırması yapılmıştır. İkinci aşamada bibliyografik analiz yöntemi ile fotobiyoreaktörlerin gelişimi ve son dönemdeki durumu incelenmiştir. Üçüncü aşamada seçilen örnek yapıların ve donatıların incelenmesiyle fotobiyoreaktörlerin sürdürülebilir mimaride kullanım alanları sorgulanmıştır. Bu bağlamda mimarlık alanında hem mevcut yapılarda hem de deneysel çalışmalarda hangi tip fotobiyoreaktörlerin tercih edildiği irdelenmiştir.



Şekil 34. Çalışmanın Yöntem Şeması

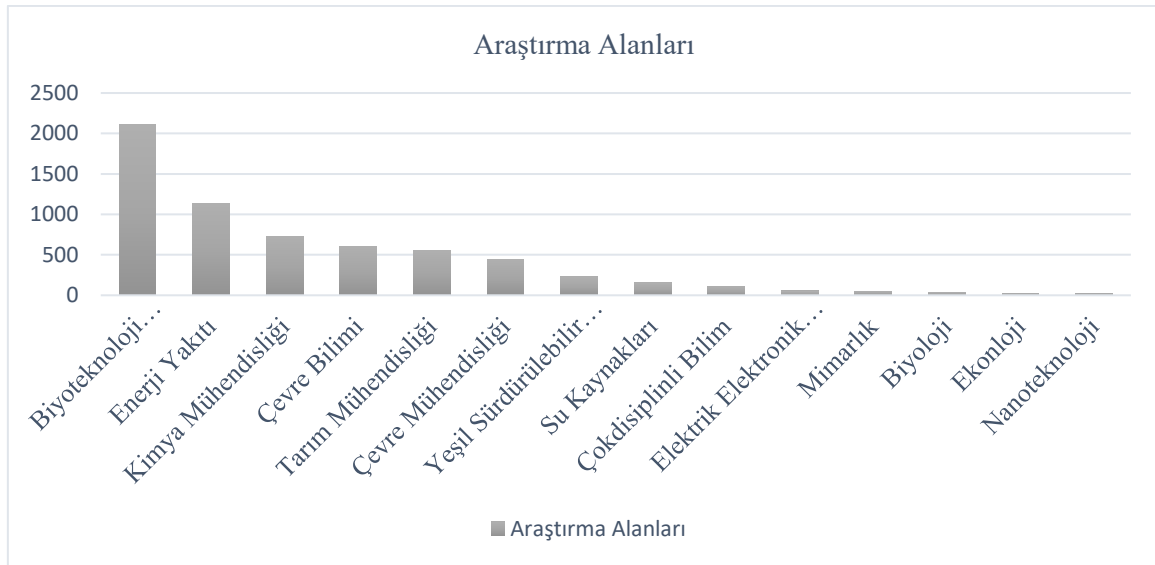
2.1.1. Bibliyografik Analiz

Çalışma kapsamında fotobiyoreaktörler ile ilgili yayınların mevcut durumunun ve araştırma alanlarının belirlenmesi için bibliyografik analiz yöntemi kullanılmıştır. İlgili yayınların araştırma yıllarına, araştırma alanlarına, araştırma bölgelerine ve sürdürülebilir gelişim hedeflerine yönelik istatistiksel durumu ve süreçteki gelişimi gösterilmiştir. Yapılan incelemelerde Web of Science verileri temel alınmıştır.



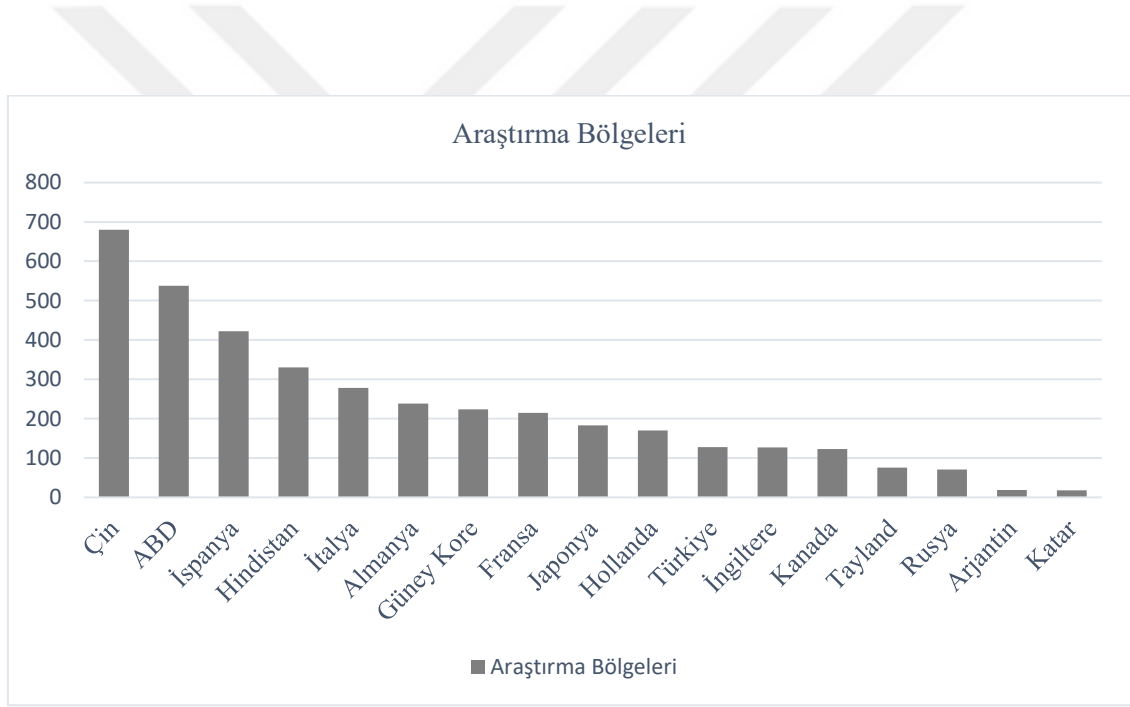
Şekil 35. Fotobiyoreaktör kavramı araştırmasının yıllara göre dağılımı (Web of Science)

Yıllar içerisinde fotobiyoreaktör alanında yapılan araştırmaların ivme kazanarak arttığı görülmektedir. Bu artışın sürdürülebilir mimari ve sürdürülebilirlik alandaki deneysel çalışmalara gösterilen ilgi neden olduğu düşünülmektedir. Fotobiyoreaktörler, 2013 yılında BIQ House evinin inşa edilmesiyle özellikle mimarlık alanında araştırmalara konu olmaya başlamıştır. Bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına alternatif arayan araştırmacıların yeni bir enerji kaynağı olarak ilgisini çekmesi ve laboratuvar ortamlarındaki deneylerine kaynak olması da bu artışın nedenleri arasındadır.



Şekil 36. Fotobiyoreaktör kavramının araştırma alanlarının dağılımı (Web of Science)

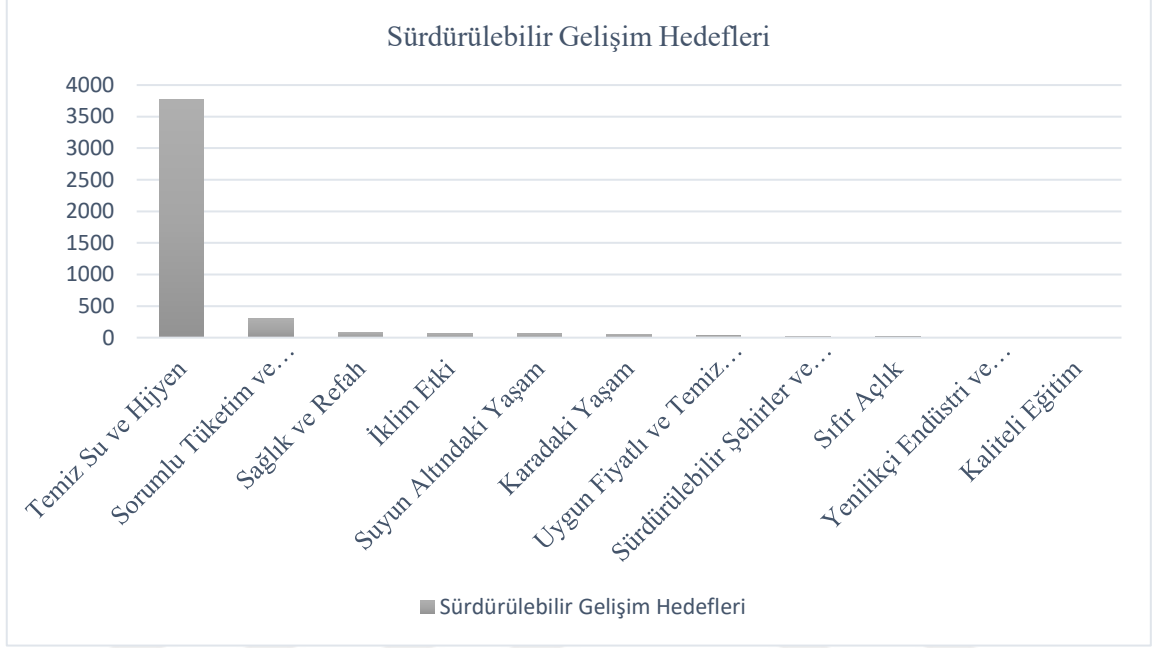
Fotobiyoreaktörler alg yetiştiren sistemler olduğundan öncelikli kullanım ve araştırma alanı olarak biyoteknoloji uygulamalarında öne çıkmaktadır. Alg yetiştiriciliği yenilenebilir enerji kaynağı alternatifi olarak biyoyakıt, çevre bilimi, yeşil sürdürülebilir teknoloji, mimarlık, ekoloji ve nanoteknoloji gibi çeşitli alanlarda araştırma konusu olmaktadır. Ayrıca su arıtma tesislerinde ve daha küçük çapta atık su kullanımlarında da tercih edilen bir teknoloji haline gelmektedir. Mimarlık alanındaki çalışmaların diğer çalışma alanlarına göre daha kısıtlı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, fotobiyoreaktörlerin yapıda kullanımında estetik kaygı duyulması, maliyetlerin yüksek olması ve reaktörlerin temizlik kısıtlılığı gibi problemlerle karşılaşılmasıdır. Yapı ölçeğinde mevcut örnek sayısının oldukça az olması bu tür sınırlamaların çözümünün gecikmesine neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 37. Fotobiyoreaktör kavramı araştırmalarının bölgelere göre dağılımı (Web of Science)

Yapılan araştırmaların yoğun olduğu bölgeler incelendiğinde iklim koşullarının alg yetiştiriciliği için esnek olduğunu görülmektedir. Alglerin yetişmesi için uygun sıcaklık değerleri, her bir türü için farklı olduğundan çok sıcak ya da çok soğuk bölgelerde bile yetiştirme imkânı sağlamaktadır. Bunun yanında ülkelerin su kaynakları ile olan ilişkileri de araştırma sayısını doğrudan etkilemektedir. Alglerin kullanım alanlarının geniş olması sayesinde farklı ülkeler farklı amaçlarla alg üretimi gerçekleştirmektedir. Örneğin Çin ve Japonya gibi uzak doğu ülkelerinde insanlar için besin kaynağı olarak kullanılmaktadır.

ABD, İngiltere gibi sanayi ülkelerinde de genellikle alternatif enerji kaynağı olarak araştırılmaktadır. Sayısal oranlara bakıldığında ülkemizde yapılan çalışmaların gün geçtikçe artış gösterdiği görülmektedir. Ülkemizde araştırma alanı genellikle sürdürülebilir enerji üretimi ve biyoyakıt üretimi üzerinedir.



Şekil 38. Fotobiyoreaktör kavramının sürdürülebilir gelişim hedefleri (Web of Science)

Dünyamızda temiz su kaynaklarının azalması, küresel ısınma ve sera gazı emisyonu gibi evrensel problemlerin çözümü için üretilen fikirler arasında alg üretimi de yer almaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmaların çoğu temiz su üretimi ile ilgili olmaktadır. Bunun yanında mimarlık alanında sürdürülebilir kentler ve uygun fiyatlı temiz enerji üretimi konularıyla ilgili araştırmalar yapılmaktadır.

2.1.2. Örnek Yapıların İncelenmesi

Fotobiyoreaktörlerin kullanım alanları arasında, biyoyakıt üretimi, oksijen (O₂) üretimi, atık su arıtımı vardır. Bu faydalarının yanında mimari yapıların cephelerinde, strüktüründe ve kentsel donatılarda da kullanılabilirliği test edilmektedir. Hem sürdürülebilir hem de estetik tasarımlar deneysel ölçeğe bulunmaktadır. Fotobiyoreaktörlerin mimarlık alanında, gölgeleme sağlamayı, bina için enerji üretimini, yapı çevresinde kirli havayı

kullanarak oksijen (O₂) üretimini ve yapının gri suyunu etkin şekilde kullanmayı vadetmektedir. Ancak sürdürülebilirlik bağlamında faydalarının yanında, bakım-temizlik, ölçeklenebilirlik ve yapım aşamasındaki maliyeti gibi sınırlamaları vardır. Mimari ve kentsel bağlamda çoğunlukla deneysel olarak düşünülen kullanım alanları Tablo 14’te gösterilmiştir.

Tablo 14. Fotobiyoreaktörlerin mimaride kullanım alanları

Mimaride Kullanım Alanları	
Alg ile Çalışan Cepheler	Cephelerde ikincil cephe olarak çalışarak gölgeleme sağlayabilir. Aydınlatmanın çok önemli olmadığı yapılarda (fabrikalar, alışveriş merkezleri gibi) masif cephelerde kullanılarak yapının ihtiyacı olan enerjinin büyük çoğunluğunu karşılayabilir.
Kentsel Donatılar	Duraklar, aydınlatma direkleri, binaların kullanılmayan çatıları, gölgelikler gibi kentsel donatılarda kullanılarak havayı temizleyebilir ve elektrik üretebilir.

Çalışmada örnek yapıların incelenmesiyle fotobiyoreaktörlerin mimarideki kullanım alanları sorgulanmıştır. Bu doğrultuda hangi tiplerin sıklıkla kullanıldığı, bu kullanımlarda ne tür fonksiyonel ve estetik zorluklarla karşılaşıldığı literatürde öne çıkan örnekler üzerinden analiz edilmiştir. Bu örnekler kentsel donatı tasarımı, cephe tasarımı ve deneysel tasarım gibi farklı kullanım alanlarına yönelik yapılardan oluşmaktadır. Fotobiyoreaktör kullanımı için inşa edilen yapılar, var olan yapılara entegre edilerek enerji tasarrufu sağlanan yapılar, insanların deneyimleyebilmesi ve fotobiyoreaktör sistemi ile tanışabilmesi için kentsel donatı olarak meydanlarda kurulan pavyonlar ve kentsel donatıların parçalarında kullanılan fotobiyoreaktör sistemlerine sahip yapılar incelenmiştir. Literatürde fotobiyoreaktör kullanılarak tasarlanan az sayıda mimari yapı vardır. Bu nedenle mimari alanda kullanılan ve literatürde yer alan; düz-panel, plastik torba ve tübüler fotobiyoreaktör türlerine ait yapı ve kentsel donatı tasarımları belirlenerek 14 örnek seçilmiştir. Bu örnekler, binalar ve kentsel donatılar Tablo 15’te verilmektedir.

Tablo 15. Çalışma kapsamında incelenmek üzere seçilen örnekler

Örnek No	Yapı Adı	Yapım Yılı	Kullanılan Fotobiyoreaktör Türü
1	BIQ House	2013	Düz-Panel Fotobiyoreaktör
2	“In Vivo” Yeşil Projesi	2016	Düz-Panel Fotobiyoreaktör
3	Algaevator	2016	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör
4	STEM V1.0	2006	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör
5	Urban Algae Canopy	2013	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör
6	Urban Algae Canopy 2.0	2017	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör
7	Photo.Synth.Etica.Curtain	2018	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör
8	Habitat One	2023	Tübüler Fotobiyoreaktör
9	Carbon Tunnel Algae Park	2009	Tübüler Fotobiyoreaktör
10	GSA Ofis Binası	2011	Tübüler Fotobiyoreaktör
11	Algae Green Loop	2011	Tübüler Fotobiyoreaktör
12	Culture Urbaine	2011	Tübüler Fotobiyoreaktör
13	Street Lamp	2015	Tübüler Fotobiyoreaktör
14	Alg Kubbesi (Space 10)	2017	Tübüler Fotobiyoreaktör

2.1.2.1. BIQ House

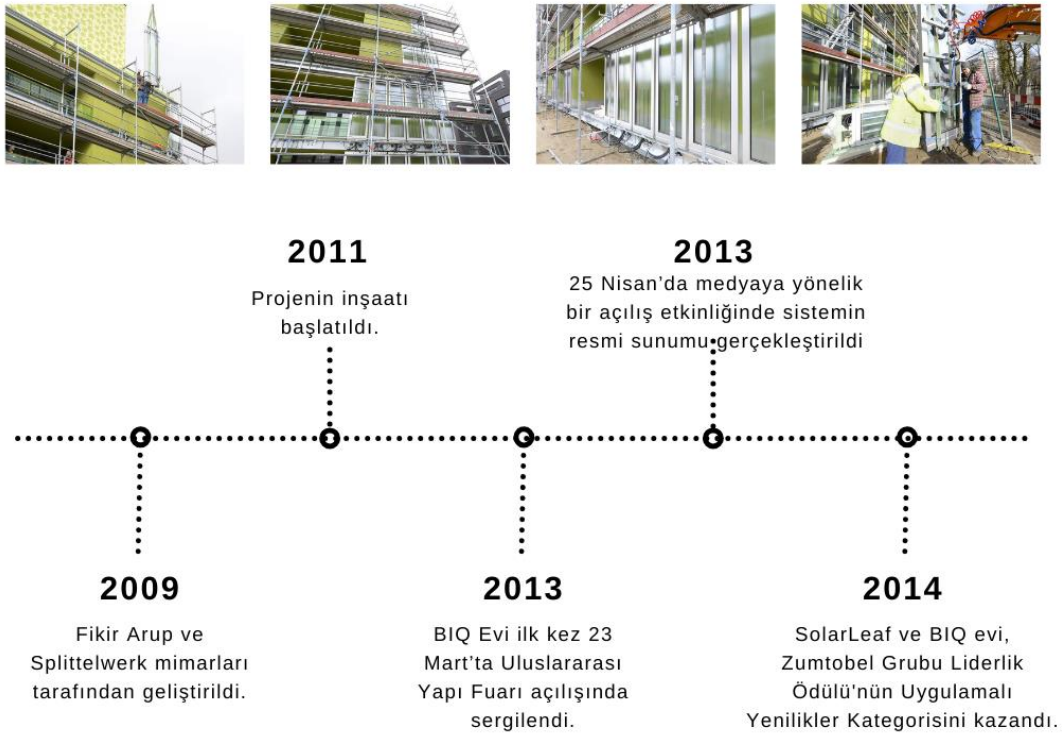
Tablo 16. 1. Örnek künyesi: BIQ House

Yapının Adı	BIQ HOUSE	
Yapı Türü	Konut	
Yapının Mimarı	Splitterwerk - ARUP	
Yapım Yeri	Hamburg/Almanya	
Yapım Yılı	2013	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Düz Panel Fotobiyoreaktör	
Fotobiyoreaktörün Kullanıldığı Yer	Bina Cephesi	
Kullanım amacı	Bina için enerji üretmek	

Tablo 16'nın devamı.

Üretilen Enerji		
Sıcaklıktan Üretilen Net Enerji	Yaklaşık 6.000 kWh/yıl	
Biyometan Üretimi	612 m3 metan/yıl	
Metandaki Enerji	6487 kWh/yıl	
Karbondioksit (CO ₂) Emisyonunda Net Azalış	Yıllık 6 ton	
Biyokütle Üretimi	900 kg/yıl	
Biyokütleden Üretilen Enerji	345 kJ/m ² / gün	

BIQ Evi, Splitterwerk mimarlık firması tarafından tasarlanmış olan beş katlı bir evdir. Dünyanın fotobiyoreaktör cephesine sahip binasının güneydoğu ve güneybatı taraflarında biyoreaktör cepheler konumlandırılmıştır (Lakenbrink, 2013). BIQ Evi projesinin fikir aşamaları ve projenin yapım süreci Şekil 39'da gösterilmektedir.



Şekil 39. BIQ evi yapım aşamaları

5 katlı BIQ Evi, 15 daire ve 1600 m² taban alanına sahiptir. Fotobiyoreaktör olmayan cephenin yeşil rengi, alglerin karbondioksiti (CO₂) parçalayıp fotosentez yoluyla oksijene (O₂) dönüştürüldüğünü anlatmaktadır. Böylece yenilenebilir enerji üretimi dışarıdan görülebilmektedir ve mimari kavramın bir parçasını oluşturmaktadır (Lakenbrink, 2013).



Şekil 40. BIQ Evi Fotobiyoreaktör olan ve olmayan cephe görünüşü (URL-4, 2015)

Fotobiyoreaktör cephesi 2,5 x 0,7 m cam plaka ve alüminyum çerçeve ile desteklenmekte olup cephede toplam 129 panel 170 m² alan kaplamaktadır (Kerner vd., 2019). Fotobiyoreaktör içindeki algler bu paneller içerisinde yetişmektedir. Farklı enerji türlerinin dönüştürülmesini, binanın ısı ve elektrik ihtiyacının karşılanmasını sağlamaktadır. Alg biyokütlesi arttığından dolayı toplanmalar meydana gelebilmektedir. Bunun engellenebilmesi için düzenli olarak hasat edilmesi, panel içerisinde sürekli sirkülasyonun sağlanması gerekmektedir. Panel içerisindeki algler güneş ışığından, CO₂'ten ve besinlerden homojen olarak faydalanmalıdır (Wilkinson vd., 2017). BIQ evi fotobiyoreaktör panelleri sürekli olarak hava kaldırma yoluyla karıştırılmaktadır. Panelin iç yüzeyi boyunca yüksek akış hızı ve panel içindeki kazıyıcılar alg birikimini ve biyolojik kirlenmeyi önlemektedir (Lakenbrink, 2013).



Şekil 41. BIQ Evi Panel görünüşü (Nef, 2015)

Sistemin ana noktası, güneşten gelen ısıнын, alglerin kapalı döngüde depolandığı ve sıcak su üretmek için kullanıldığı tam otomatik enerji yönetim merkezidir. Böylece su ısıtma sistemi doğrudan bina için kullanılmaktadır. Enerji yönetim merkezinde ısı eşanjörü sayesinde ısı alg çözeltisinden geri kazandırılır. Üretilen biyokütle ise başka bir yerde biyogaza dönüştürülmekte ve bu enerji şehre enerji üretmek için kullanılmaktadır (FEEM; Lakenbrink, 2013; Wilkinson vd., 2017).



Şekil 42. BIQ House hareketli panel görünüşü (Rackard, 2013)

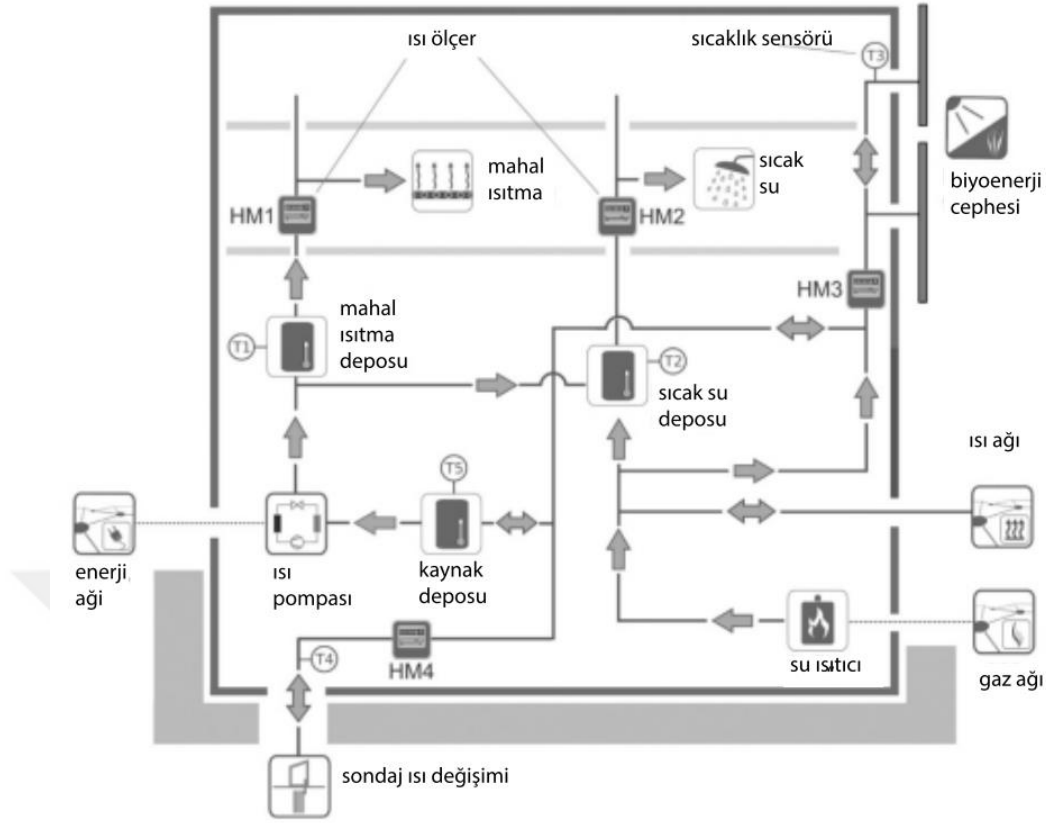
Şekil 42’de görülen hareketli yapıya sahip olan paneller güneş geliş açısına göre dikey ekseninde hareket edebilmektedir. Tamamen kapalı olduğu konumda bina cephesi için sürekli

bir dış yüzey oluşturmaktadır. Suyun ve besinin dolaşımının sağlandığı panel 24 litre kapasiteli ve 18 mm kalınlığındadır. Hem güvenlik hem de ısı tutma kapasitesi açısından kullanılan cam lamine emniyet camı (LGS) olarak tercih edilmiştir. Panellerin iç yüzeyleri de insanların görebileceği şekilde görüldüğü gibi su ve hava karışımı ile yıkanmaktadır (FEEM). Geleneksel bir güneş enerji depolama kaynağına kıyasla %60-65'e kıyasla %38 verimliliğe sahiptir. Geleneksel bir fotovoltaiik panel (PV) ile karşılaştırıldığında %12-15'e kıyasla %10 verimliliğe sahiptir (Wilkinson vd., 2017).



Şekil 43. BIQ Evi panelinde oluşan hava kabarcıkları (Nef, 2015)

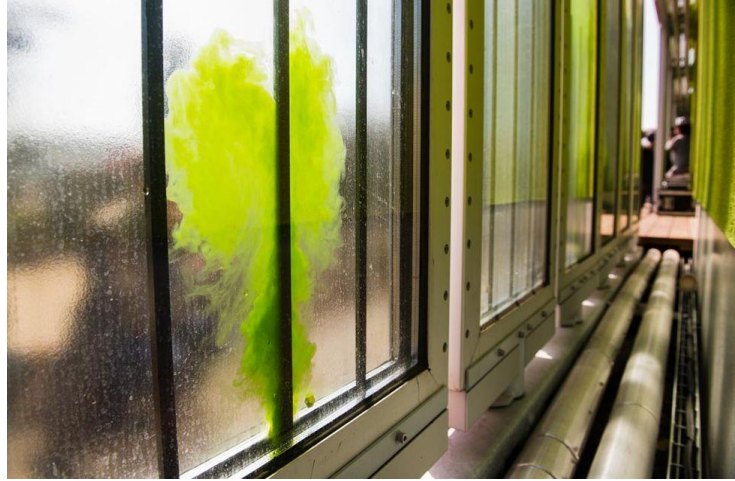
Yaz aylarında ortalama 18 °C sıcaklık değeri ile yaklaşık %43'lük maksimum verimlilik elde edilmiştir. Sıcaklık 6 °C dereceye düştüğünde verimlilik yaklaşık %30'a gerilemektedir. Mart-Kasım dönemi için ortalama dönüşüm verimliliği %38 olarak hesaplanmıştır (Kerner vd., 2019). Şekil 44'te Karner ve arkadaşları (2019) tarafından BIQ evinin enerji kavramı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 44. BIQ evi enerji kavram şeması, sıcaklık sensor konumları (T1-T5) ve sayılardan geçen ısı akışı (HM1-HM4) oklarla gösterilmektedir. (Kerner vd., 2019)

Algler tarafından üretilen biyokütlenin metan gazına dönüştürülmesi için gerekli olan teknolojinin henüz konut binalarında kullanılabilecek düzeyde olmaması nedeniyle binada yapılmamaktadır. Harici olarak bir biyogaz tesisinde üretim gerçekleştirilmektedir (Lakenbrink, 2013).

Fotobiyoreaktörü beslemek için cephede biri basınçlı hava sistemi diğeri bir su sistemi olmak üzere Şekil 45'teki gibi iki boru sistemi kullanılmaktadır. Hava akışını sağlamak için her panelin bağlı olduğu boruda yaklaşık 2 bar basınçlı hava bulunmaktadır. Her 4 saniyede bir hava akışı, suyun akışı gibi hareketler, cephenin taşıyıcı sistemi ile bütünleşik çalışan manyetik valfler tarafından kontrol edilmektedir. Her bir fotobiyoreaktör paneli bir giriş ve bir çıkış yoluyla su sistemine bağlanmaktadır. Binanın her katı için ayrı devre bulunmaktadır. Dört devre enerji merkezinde bir araya toplanmaktadır. Her katta ilgili kontrol devrelerinin vanalarını kontrol etmek için bir akım dağıtım panosu bulunmaktadır. Farklı katlardaki dağıtım panoları enerji merkezinde bir ana dağıtım panosu halinde birleştirilmiştir (Lakenbrink, 2013).



Şekil 45. Fotobiyoreaktör içindeki algleri besleye boru sistem (Nef, 2015)

2.1.2.2. In Vivo

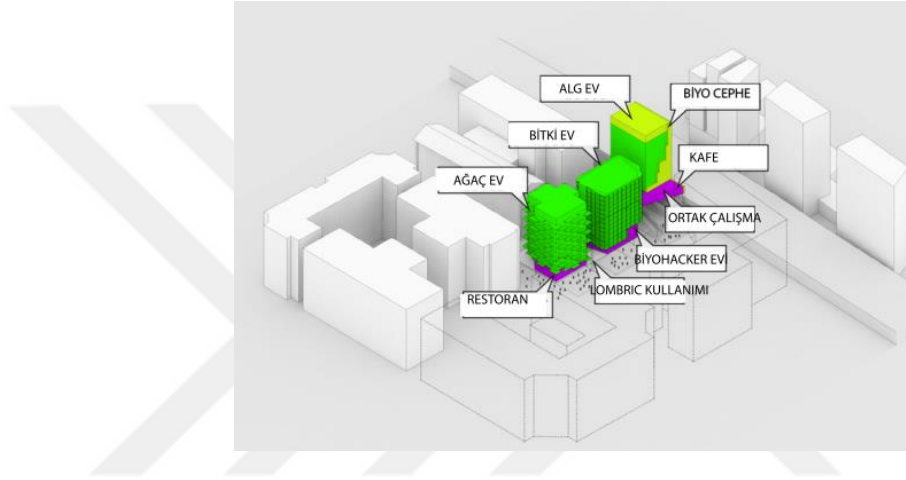
Tablo 17. 2.Örnek künyesi: In Vivo

Yapının Adı	“In Vivo” Yeşil Proje	
Yapı Türü	Konut	
Kavramsal Tasarım Ekibi	XTU Architects, BPD Marignan ve MU Architects	
Proje Yeri	Fransa	
Proje Yılı	2016	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Düz-Panel Fotobiyoreaktör	
Fotobiyoreaktörün Kullanıldığı Yer	Bina cephesi	
Yıllık Hedeflenen Enerji Tasarrufu	Binaların enerji tüketiminin 48 kWh/ m ² 'nin altına düşmesi beklenmektedir.	

Reinventer Paris Kentsel Proje yarışmasını kazanan bir yeşil proje olan “In Vivo”, betonlaşmış şehirler içinde insan ile doğayı birleştirmeyi ve sürdürülebilir esnek bir kent oluşturmayı hedeflemektedir. Şekil 46’da görüldüğü gibi 3 farklı binanın oluşturulması

kullanıcılara, doğal manzara, açıklıklar, doğal aydınlatma, doğal havalandırma kanallarının yanı sıra kentsel bütünleşmeye uygun mekânlar sağlamaktadır (URL-5, 2023).

- Ağaç Ev, büyüyen ağaçlar ve tüm cephelerinde büyük çiçek saksı gibi kullanılan balkonlarda kentsel biyoçeşitlilik sağlanmaktadır.
- Bitki Evi, çatı altlarında ya da sundurmalarda sebze bahçesi ve seralar gibi dış mekânlarda küçük ölçekli kentsel tarıma ayrılmış mekânları oluşturmaktadır.
- Alg Evi, alglerin yetiştirildiği fotobiyoreaktörlerin cepheye bütünleştirildiği binadır.



Şekil 46. In Vivo projesini oluşturan 3 bina kullanımı modeli (XTU Architects)

Fotobiyoreaktörler ile bütünleştirilmiş 900 m² biyolojik yeni nesil cephesi olan Alg Evinin tıbbi araştırmalar için biyokütle üretmesi amaçlanmıştır. Ayrıca fotobiyoreaktörlerin toplamış olduğu ısı depolanacak ve konutlarda sıcak su ve ısıtmada kullanılacaktır. Böylece binalarda enerji tüketiminin senede 48 kWh/m²'nin altına düşmesi beklenmektedir (URL-5, 2023). Alg Evi'nin çatısında bulunan laboratuvarlarda fotobiyoreaktörlerin beslenmesi için gerekli olan besinlerin temini gerçekleştirilecektir. Fotobiyoreaktörler binanın yüzeyine giydirmce cephe olarak uygulanacak ve alglerin fotosentez yapabilmesi için gerekli olan CO₂ binadaki bir karbondioksit kaynağından sisteme verilecektir. Fotosentez yaparak büyüyen alg biyokütlesi gün aşırı ya da iki günde bir toplanacaktır ve biyoenerjiye dönüştürülmesi için biyo depolara gönderilecektir (Kükdamar, 2017).



Şekil 47. In Vivo yeşil ve fotobiyoreaktör cepheler (XTU Architects)

2.1.2.3. Algaevator

Tablo 18. 3. Örnek künyesi: Algaevator

Yapının Adı	Algaevator	
Yapı Türü	Kentsel Donatı	
Kavramsal Tasarım Ekibi	Jie Zhang, Tyler Stevermer	
Proje Yeri	Cambridge, Londra	
Proje Yılı	2016	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Plastik Torba Fotobiyoreaktör	

Alg fotobiyoreaktörü, yavaş hareket, karbondioksit (CO₂) ve güneş ışığına daha fazla erişim sağlanması yoluyla alg üretimini artırmak için kullanılan yapay bir kültür ortamıdır. Algaevator tasarımı, günlük çevremizde hem mekânsal hem de tarımsal üretkenlik katabilecek şekilde hava koşullarına uygun olarak yapılmıştır.



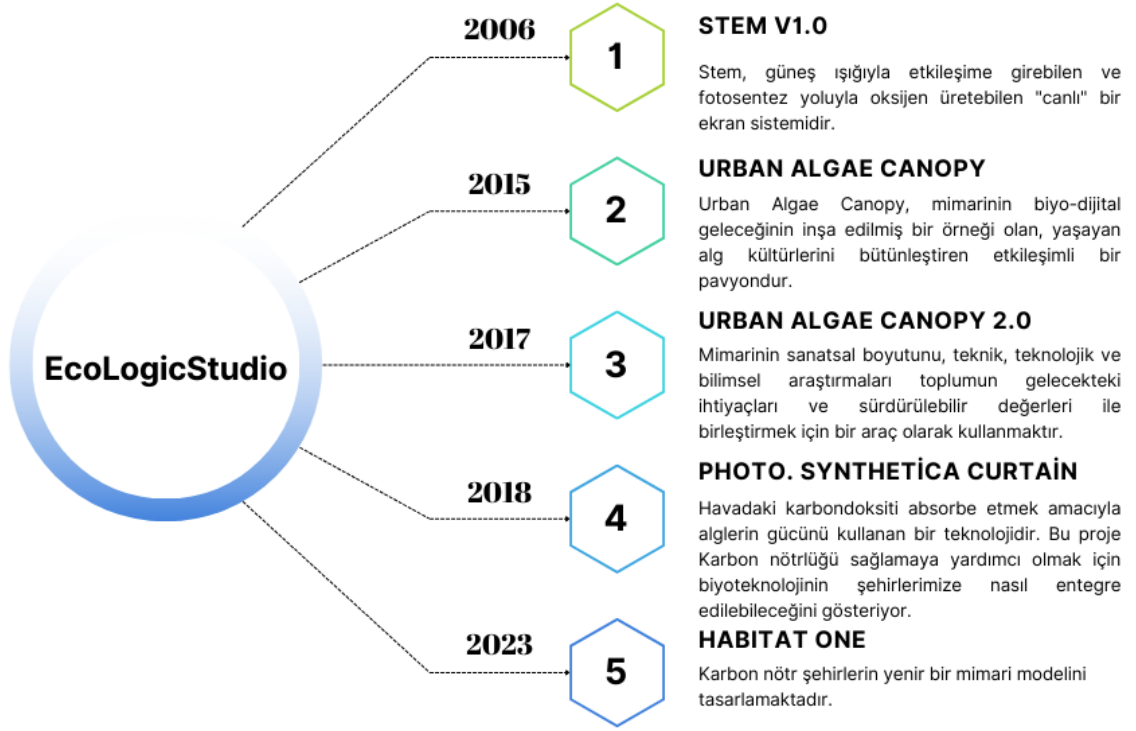
Şekil 48. Algae Evaporator, (Iwan Baan)

Araştırmalar, fotobiyoreaktörlerin pompa ile karıştırılmasından ziyade hava kabarcıkları ve yerçekiminden faydalanarak karıştırılması daha yumuşak bir hareket biçimi ve karbondioksit girişi sağladığı için verimi artırdığını göstermektedir. Tasarımının huni şeklinde olması alglerin güneş ışığını uygun şekilde almasına sağlarken Algae Evaporator pavyonunun yağmur suyunu toplayıp kullanılmasına da olanak vermektedir (Domus, 2016).

2.1.2.4. EcoLogicStudio

2005 yılında Londra’da Claudia Pasquero ve Marco Poletto tarafından ortaklaşa kurulan EcoLogicStudio, yapılı çevre için biyoteknoloji konusunda uzmanlaşmış bir mimari ve tasarım inovasyon firmasıdır.

Çalışma kapsamında EcoLogicStudio tarafından alg teknolojisi kullanarak tasarlanan ve incelenen örnekler Şekil 49’da yer almaktadır.



Şekil 49. EcoLogicStudio fotobiyoreaktör örnekleri

2.1.2.4.1. STEM V1.0

STEM, güneş ışığıyla olan ilişkisiyle fiziksel olarak algleri büyütür ve geliştirir. Fotosentetik işlemler için ışık filtrelenir ve yakalanır; karbondioksit (CO_2) kullanılarak oksijen (O_2) üretilmektedir. Daha fazla ışık, daha fazla oksijen (O_2) üretimine yol açmaktadır; daha az ışık daha az fotosenteze ve daha fazla şeffaflığa dönüşmektedir.



Şekil 50. STEM V1.0 (URL-6, 2006)

Sistemin genel konfigürasyonu, sıvı şeffaflığı ve nefes alma potansiyeli uzaydaki radyasyon gradyanları tarafından tanımlanmaktadır. Ancak canlı malzeme büyüyüp geliştikçe parametreler birbirini etkiler ve sistem sürekli dönüşüme tabi tutulmaktadır (URL-6, 2006).

2.1.2.4.2. Urban Algae Canopy

Tablo 19. 5. örnek künyesi Urban Algae Canopy

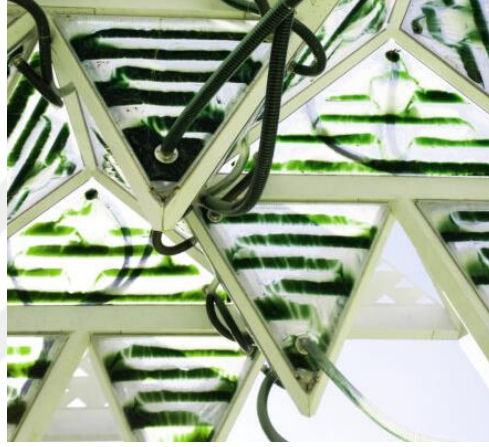
Yapının Adı	Urban Algae Canopy	
Yapı Türü	Kanopi	
Kavramsal Tasarım Ekibi	EcoLogicStudio	
Proje Yeri	Milano	
Proje Yılı	2015	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Plastik Torba Fotobiyoreaktör	

EXPO Milano 2015 yılında EcoLogicStudio tarafından tasarlanan ve bölgenin girişinde yer alan Urban Algae Canopy mimarının biyo-dijital geleceğinin inşa edilmiş bir örneği olan, yaşayan alg kültürlerini bütünleştiren etkileşimli bir pavyondur.



Şekil 51. Urban Algae Canopy, Milano

Alglerin, örneğin *Spirulina* türü, fotosentetik kabiliyetleri oldukça yüksektir. Mineraller ve bitkisel proteinler gibi insan vücudu için temel olan besinleri içermelerinin yanı sıra havayı temizlemektedir. Kentsel atmosferdeki karbondioksiti (CO₂) büyük ağaçlara göre on kat daha etkili bir şekilde dönüştürebilmektedir. Alg kanopinin yenilikçi mimarisi hem *Spirulina*'nın büyümesini teşvik etmekte hem de kullanıcıların konforunu sağlamak için ideal yaşam alanını sağlamayı amaçlamaktadır. Örneğin güneşli yaz günlerinde algler hızla büyüme eğilimi göstereceğinden mimari cephelerde gölgeleme işlevi artacaktır. Bu da kullanıcının konforunu arttıracaktır (URL-7, 2015).



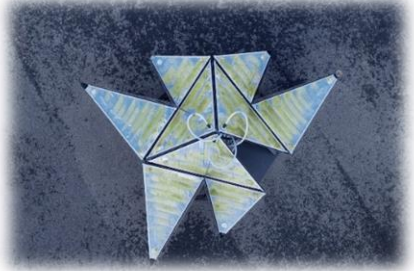
Şekil 52. Urban Algae Canopy'nin iç mekândan görünüşü ve beslenme sistemi (URL-7, 2015)

2.1.2.4.3. Urban Algae Canopy 2.0

Tablo 20. 6. örnek künyesi: Urban Algae Canopy 2.0

Yapının Adı	Urban Algae Canopy 2.0	
Yapı Türü	Kanopi	
Kavramsal Tasarım Ekibi	EcoLogicStudio	
Proje Yeri	Danimarka	
Proje Yılı	2017	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Plastik Torba Fotobiyoreaktör	

Tablo 20'nin devamı.

Yıllık Hedeflenen Enerji Üretimi		
Oksijen (O₂) Üretimi	137 kg/yıl	
Karbondiyoksit (CO₂) Üretimi	183 kg/yıl	
Protein Üretimi	102 kg/yıl	
Biyoyakıt Üretimi	91 kg/yıl	
Enerji Üretimi	949 kWh/yıl	

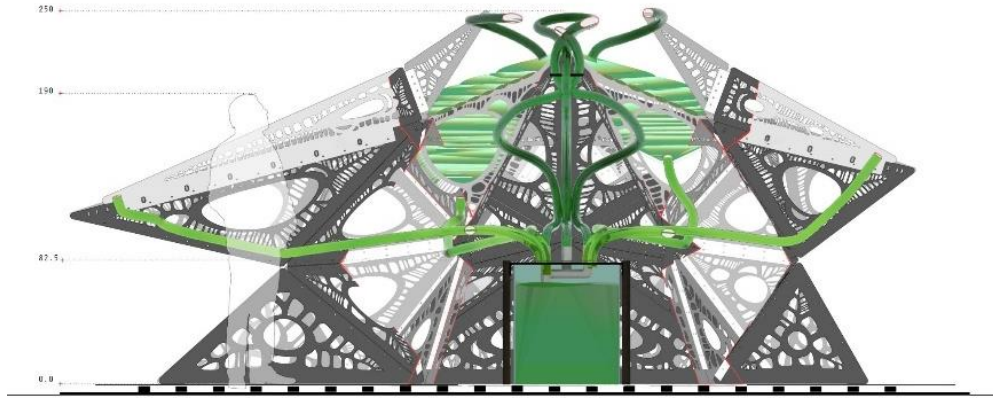
Danimarka'da 2017 yılında sergilenen Urban Algae Canopy 2.0 projesinin amacı, mimarinin sanatsal boyutunu, teknik, teknolojik ve bilimsel araştırmaları toplumun gelecekteki ihtiyaçları ve sürdürülebilir değerleri ile birleştirmek için bir araç olarak kullanmaktır. Urban Algae Canopy, günde 500 g karbondiyoksit (CO₂) emer ve 375 g oksijen (O₂) üretmektedir. Karbondiyoksit (CO₂) absorbe etme yeteneği, bir kişinin oksijen (O₂) ihtiyacını karşılayacak yıllık ağaç miktarına karşılık gelen 8 büyük ağaca eşdeğerdir. Yıllık protein üretimi 102 kg olup, bu da küçük bir ineğin protein etine eşdeğerdir. Günde 168 g petrol üretebilir ve bundan yaklaşık 250 g biyoyakıt yaklaşık 2,6 KWh enerji üretebilmektedir. Bu, Danimarka'da bir ekolojik eve enerji sağlamak için yeterlidir. Tablo 20'de beklenen enerji üretim miktarları gösterilmektedir (URL-8, 2017).

Kentsel kamusal alanlar alg kanopiler ile açık hava laboratuvarlar olarak işlev sağlamaktadır. Toplumumuzun temel değerlerinin şekillendiği ve günümüzde de şekillenmeye devam ettiği yerler olan kamusal alanlar bu projede halkın katılımıyla, "kolektif kentsel hasat" denilen yöntemin için oldukça önemlidir. Bu tür yöntemlerin ana amacı, sanatı ve mimariyi teşvik etmek olduğu kadar, dayanıklı ve sürdürülebilir gelecek kentsel planları geliştirmeye yönelik araçlardır (URL-8, 2017).



Şekil 53. Urban Algae Canopy 2.0, NAARO (fotoğraf sahibi)

Urban Algae Canopy 'de kullanılan *Chlorella vulgaris* fotosentetik özellikleri, bunların özel olarak tasarlanmış yumuşak ETFE kaplama sistemi içerisinde yetiştirilmesiyle güçlendirilmektedir. Besleyici ortamın içinde akışkan dinamiği davranışının tasarlamasına ve kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. Güneş enerjisi, su ve oksijen (O_2) akışları, hava koşullarına ve ziyaretçi hareketlerine gerçek zamanlı olarak yanıt verecek ve uyum sağlayacak şekilde düzenlenmektedir. Güneş ışınlarının geliş açıları, geliş miktarı değişikçe alglerin torbalar içindeki hareketleri ve miktarları değişim göstermektedir (URL-8, 2017).



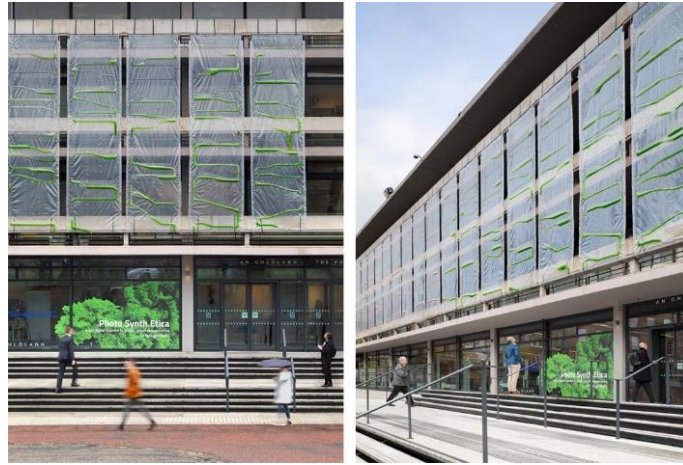
Şekil 54. Urban Algae Canopy renkli kesiti, Danimarka (EcoLogicStudio, 2017)

2.1.2.4.4. Photo.Synth.Etica Curtain

Tablo 21. 7. örnek künyesi: Photo.Synth.Etica.Curtain

Yapının Adı	Photo.Synth.Etica Curtain	
Yapı Türü	Sergi-Gösteri Merkezi	
Kavramsal Tasarım Ekibi	EcoLogicStudio	
Proje Yeri	İrlanda	
Proje Yılı	2018	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Plastik Torba Fotobiyoreaktör	
Fotobiyoreaktörün Kullanıldığı Yer	Bina cephesi (kentsel perde)	

Photo.Synth.Etica, küresel iklim değişikliğine yönelik çözümleri hızlandırmayı amaçlayan, önemli bir iklim inovasyon girişimi olan Climate-KIC ile işbirliği içinde tasarlanan büyük ölçekli bir alg sistemidir. Bir “kent perdesi” olarak tasarlanan, İklim İnovasyon Zirvesi 2018 haftasında İrlanda’da sunulan Photo.Synth.Etica, atmosferdeki karbondioksiti toplamaktadır. Bir gün içinde yaklaşık 1 kg karbondioksit (CO₂) tutabilen sistem 20 büyük ağacın yakalayabildiği karbondioksit (CO₂) verimliliğine sahiptir (URL-9, 2023).

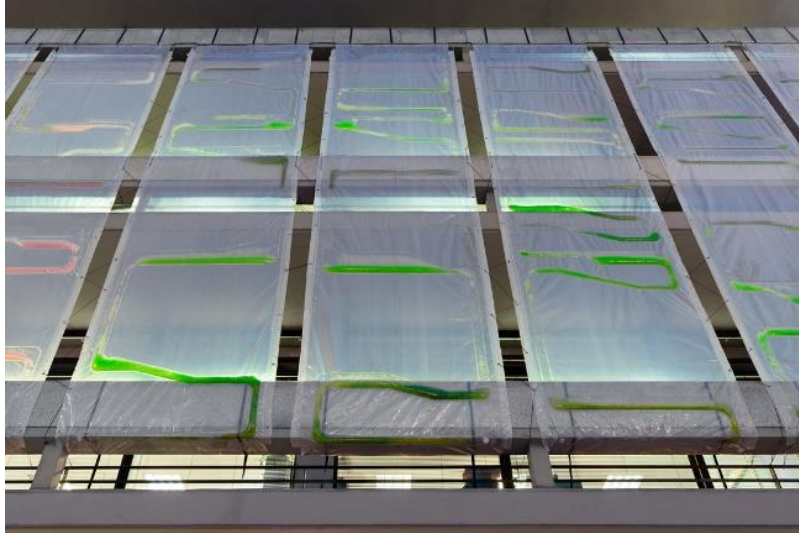


Şekil 55. Photo.Synth.Etica cephe görünüşü (URL-10, 2018)

16 adet 2 x 7 metrelik modülden oluşan perde cephe sistemi, Dublin Kalesi'ndeki Printworks binasının ana cephesinin birinci ve ikinci katlarını kaplamaktadır. Her modül, canlı mikro alg kültürlerini beslemek için gün ışığından yararlanan ve geceleri ısıldayan gölgeler yayan, dijital olarak tasarlanmış ve özel yapım bir biyoplastik olan plastik torba bir fotobiyoreaktör olarak çalışmaktadır (URL-10, 2018). Tasarım ekibinin alg sistemini bina cephesine entegre etmesindeki amaçları,

- Fotosentezin yapı ortamına taşınması,
- Güneş enerjisini ekolojik olarak depolayabilmek,
- Şehirleri karbondan arındırırken bitkilere-ağaçlara destek olmak,
- Kamusal alanı kolektif olarak işleyebilmek,
- Binaları biyoenerji santrallerine dönüştürmek,
- Biyo-Akıllı sektörüne öncülük etmek,
- Kirliliği hammaddeye dönüştürmek (atık su, karbondioksit (CO₂)),
- Mimariye sürdürülebilir fırsatlar sunabilmek,
- Eko-sistemik kentsel büyümeyi mümkün kılabilmek,
- Biyo-bilinçli şehirler için yeni teknolojiler tasarlamak,

olarak ifade edilmektedir.



Şekil 56. Plastik Torba Fotobiyoreaktörün bina cephesindeki uygulaması (URL-10, 2018)

2.1.2.4.5. Habitat One

Güney Kore'deki Hyundai Motorstudio Seul'da 18 Mart 2023'te sergilenen Habitat One, karbon nötr şehrin yeni bir mimari modelini tasarlamaktadır. Proje, insanlara üç parçada deneyimletilmektedir; ileri görüşlü yapay zekâ videosu, Tree One adlı canlı bir fotosentetik 3D baskılı heykel ve kentsel biyo laboratuvarı (URL-11, 2023).



Şekil 57. Hyundai Motorstudio Seul binası görünüşü
(URL-11, 2023)

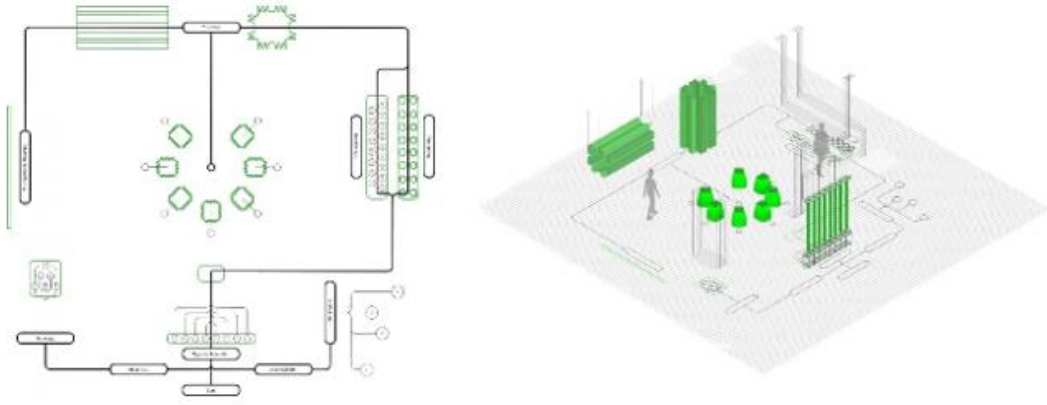
Yapay zekâ tarafından üretilen videolardan biri Hyundai Motorstudio'nun cephesine yansıtılmaktadır. Seul'un karbon nötr bir şehre dönüşmesini öngören çeşitli senaryoları simüle etmektedir.

Ağaçlar ve binalar, Şekil 58'de görüldüğü gibi Tree One heykelinde öncülük edilen dairesel modeli takip ederek birbirlerinden evrimleşerek değişmektedir. Her mimari küme, kendi kendine yeterliliği ve kirleticilerin maddi kaynaklara dönüştürülmesini sağlayan bir grup fotosentetik sistemden büyürken betimlenmektedir (URL-11, 2023).



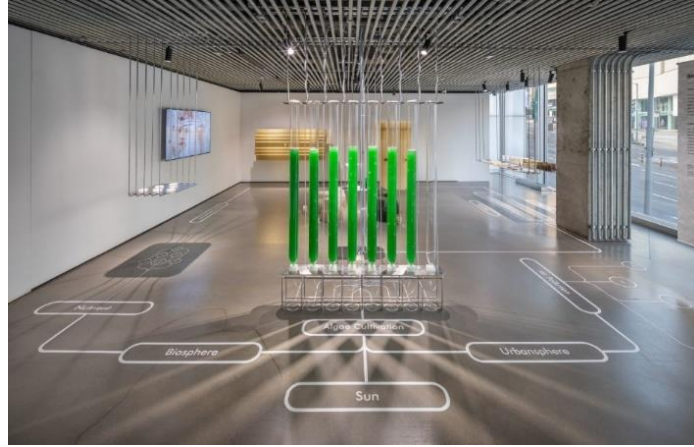
Şekil 58. Tree One Heykeli (URL-11, 2023)

Ana sergi katının merkezinde, yapay zekâ tarafından tasarlanan ve biyo-dijital olarak yetiştirilen canlı karbon yakalayan heykel olan Tree One yer almaktadır. Heykel, karbon moleküllerini yeniden metabolize edip gövdesinde ve kanopisinde depolarken, fotosentezin sonucu olarak atmosfere oksijen (O_2) salmaktadır. Hyundai Motorstudio Seul’da sergilenen Tree One, 500 litre canlı *Cyanidium* alg kültürünü barındıran 40 cam tübüler fotobiyoreaktörü birleştirmektedir. Bu biyoreaktörler, küçük bir şehir ormanına eşdeğer olan 12 büyük ağaç kadar karbondioksit (CO_2) tutabilmektedir. Tree One’ın gövdesi tamamen alg temel alınan biyoreaktörlerden yapılmıştır. Lifli sistem, galeri katının üzerinde asılı duran yüzlerce ince gölgeleme dalları şeklindeki büyük 3D baskılı kanopide devam etmektedir (URL-11, 2023).



Şekil 59. Biyo Laboratuvar plan ve perspektif görünüşü (URL-11, 2023)

Açık bir laboratuvar olarak tasarlanan Biyo-Laboratuvar, EcoLogicStudio'nun hâlihazırda yürütmekte olduğu somut araştırma ve yenilikleri insanlara göstererek ilham vermeye çalışan serginin eğitimsel bileşenidir. Serginin desteklediği sürdürülebilir tasarım imkânlarını gerçeğe dönüştürmektir hedeflenmektedir (URL-11, 2023).



Şekil 60. Biyo Laboratuvar biyokütle toplama sistemi (URL-11, 2023)

Biyo Laboratuvarının girişinde biyokütle toplama sistemini entegre eden bir PhotoSynthEtica reaktör duvarı bulunmaktadır. Bu reaktör duvarı, biyosferden gelen besinler ve binanın bulunduğu çevreden gelen karbondioksit ile beslenmektedir. Karbon nötr bir şehir hayal etmek, tüm üretim, inşaat ve atık geri dönüşüm süreçlerimizin tamamen yeniden tanımlanması anlamına gelmektedir (URL-11, 2023).

2.1.2.5. Carbon Tunnel Algae Park

Tablo 22. 9. örnek künyesi: Carbon Tunnel Algae Park

Yapının Adı	Carbon Tunnel Algae Park	
Yapı Türü	Kentsel Tasarım	
Kavramsal Tasarım Ekibi	PORT Urbanism	
Proje Yeri	Philadelphia, ABD	
Proje Yılı	2009	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Tübüler Fotobiyoreaktör	

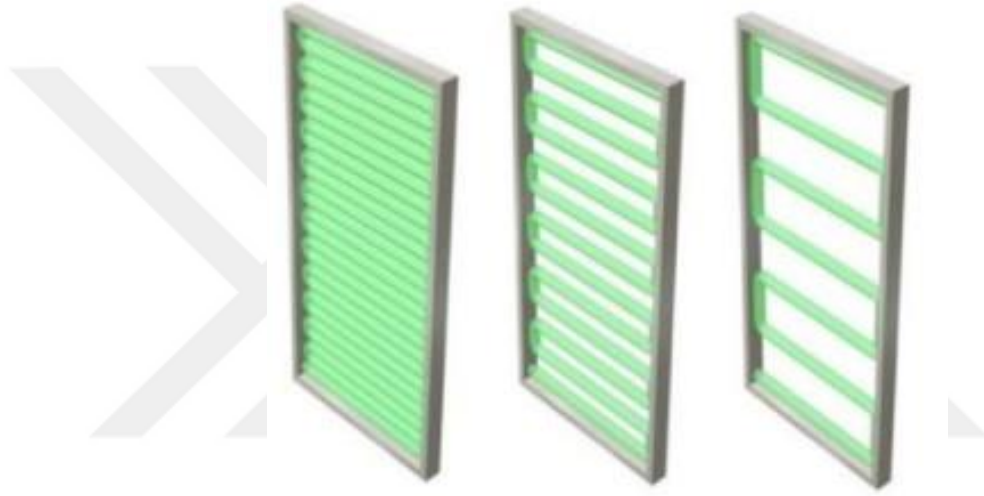
Brooklyn-Battery tünelinin havalandırma sistemine bağlı bir dizi iskele benzeri fotobiyoreaktörler tasarlanmıştır. Okyanusun üzerine konumlandırılan yapay alg tarlaları geniş yüzey alanı/hacim ile oldukça yüksek etki sağlayabilmektedir. Bu yeni altyapı fikri oksijen, biyoyakıt, biyoplastik, besin üretmeyi hedeflemektedir (Kerestecioğlu & Pekmezci, 2019).

2.1.2.6. GSA Ofis Binası

Tablo 23. 10. örnek künyesi: GSA Ofis Binası

Yapının Adı	GSA Ofis Binası (Sıfır Süreç Güçlendirme Çözümü)	
Yapı Türü	Ofis	
Kavramsal Tasarım Ekibi	HOK ve Vanderwail Mühendislik	
Proje Yeri	Los Angeles, ABD	
Proje Yılı	2011	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Tübüler Fotobiyoreaktör	
Fotobiyoreaktörün Kullanıldığı Yer	Bina cephesi	
Yıllık Hedeflenen Enerji Tasarrufu	%84 enerji tasarrufu hedeflenmektedir. (Fotovoltaik paneller ve güneş enerjisi ile)	

HOK ve Vanderweil mimarlık firmaları tarafından, Los Angeles'taki 46 yıllık GSA (Genel Hizmetler İdaresi) ofis binası için bir güçlendirme çözümü olarak “Sıfır Süreç Güçlendirme Çözümü” fikri için fotobiyoreaktör kullanılarak bir tasarım yapılmıştır. 2011 yılında yapılan Yeni Nesil Tasarım yarışmasında, 2020 yılına kadar bina emisyonlarını %30 oranında azaltmak hedefi ile “Sıfır Süreç Güçlendirme Çözümü” yarışmayı kazanmıştır. Alg yetiştiricisi olan fotobiyoreaktörler, ofis binası cephesinde yaklaşık 2.322,5 m² bir alan kaplamaktadır (Eldin & İbrahim, 2021). Şekil 61'deki modelde görüldüğü gibi tübüler fotobiyoreaktörler bina içindeki mekânlar için gölgeleme görevi görmektedir.



Şekil 61. %25, %65 %80 açıklığa sahip panellerin model görüntüsü (Elrayies, 2018)

Enerji tasarrufu ve yenileme stratejileri, binanın enerji gereksiniminde %84'lük bir azalma sağlayabileceğini göstermektedir. Tasarım ekibinin, binanın cephesi boyunca yer alan modüler tübüler alg reaktörleri sistemi jürinin dikkatini çeken yeni nesil çözümlerden olmuştur. Tübüler fotobiyoreaktörlerin, yenileme sonrasında binanın güç kaynağının %9'unu üreteceği ön görülmüştür (URL-12, 2011).

Yapının cephe tasarımı doğayı taklit ederek tasarlanmıştır. Binanın cephesinde, güneş ışığını alabilecek ve uygun gölgeleme koşullarını sağlayacak şekilde, %25, %60 ve %80 oranında açıklık içeren, 2.322,5 m² alan kaplayan şekilde gösterilen tübüler fotobiyoreaktörler algler için biyokütle üretme alanı sağlamaktadır (Kükdamar, 2017). Besin kaynağı olarak binanın atık suyunu, karbondioksit (CO₂) kaynağı olarak da binanın çevresindeki otoyolun ürettiği karbondioksit (CO₂) kullanılmaktadır (Eldin & İbrahim, 2021).



Şekil 62. Doğal aydınlatma sağlayan atriyumların model görünüşü (EC&M, 2011)

Tübüler fotobiyoreaktör sistemi dışında da yenilenebilir enerji sistemleri kullanımı öngörülmüştür. İnce film fotovoltaik panel güneş kırıcı sistemi; çatı üstü fotovoltaik paneller, sıcak su için bütünleşmiş güneş-thermal paneller, jeotermal soğutma, enerji geri kazanımla mekanik havalandırma, doğal ışık ve doğal havalandırma için merkezi atriyum (Şekil 62), katların tavanlarında faz değiştiren yalıtım malzemesi, güneş ışığı kontrolü ile yapay aydınlatma enerji tüketiminin %75 azaltılması gibi yöntemler projeye eklenmiştir (EC&M, 2011; Kükdamar, 2017).

2.1.2.7. Algae Green Loop

Tablo 24. 11. örnek künyesi: Algae Green Loop

Yapının Adı	Alg Green Loop (Marina Şehir Kuleleri)	
Yapı Türü	Konut	
Kavramsal Tasarım Ekibi	Influx Studio	
Proje Yeri	Chicago, ABD	
Proje Yılı	2011	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Tübüler Fotobiyoreaktör	
Fotobiyoreaktörün Kullanıldığı Yer	Bina cephesi	

Chicago gibi dünyanın dört bir yanındaki büyük şehirler, yaşanabilir bir gelecek hayal etmek için daha büyük bir ekonomik kalkınmayı desteklemektedir. Bu büyümenin bir sonucu olarak meydana gelen sera gazı emisyonlarını sürdürülebilir kentler yaratmak için azaltmalıdır.



Şekil 63. Green Loop Tower (Marina Şehir Kuleleri) enerji üreten cepheler (Furuto, 2011)

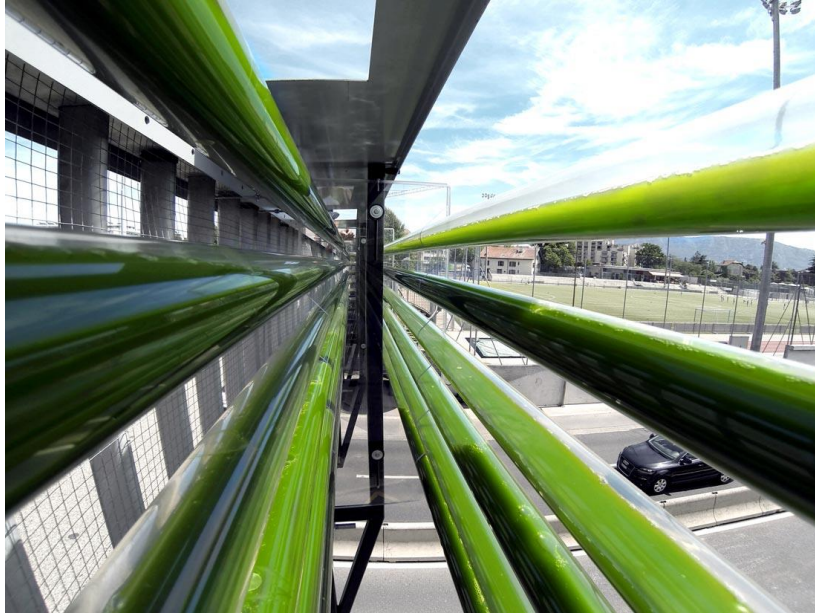
Marina Şehir Kuleleri'nde yenilenebilir enerji sağlanması, karbondioksit (CO_2) emisyonlarının azaltılması ve soğurulması ve son olarak sürdürülebilir ekonomik büyümeye olanak sağlanması amacıyla yeni bir sürdürülebilir model olarak alg teknolojisi kullanılmaktadır. 1964 yılında dünyanın en yüksek apartmanı ve ilk karma kullanımlı kompleksi olma unvanına sahip olan bu kuleler yapılı çevredeki fosil yakıt ekonomisinin modelini yansıtmaktaydı. Chicago Karbon Nötr Planı'nın ve alglerin mevcut binalara nasıl bütünleşebileceğini gösteren bu proje, güçlendirme işleminden ileri giderek karbon ayak izini azaltmayı amaçlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında güçlü bir alternatif olan algler bina cephesinde, tamamen yeni bir karbondioksit (CO_2) temizleme aracı, atık su dönüştürme sistemi olarak kullanılmaktadır (Furuto, 2011).

2.1.2.8. Culture Urbaine

Tablo 25. 12. örnek künyesi: Culture Urbaine

Yapının Adı	Culture Urbaine	
Yapı Türü	Konut	
Kavramsal Tasarım Ekibi	Collective Cloud	
Proje Yeri	Cenevre, İsviçre	
Proje Yılı	2011	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Tübüler Fotobiyoreaktör	
Fotobiyoreaktörün Kullanıldığı Yer	Üst geçit	

Küçük bir otoyolun üzerinde üst geçit ile bütünleşen tübüler fotobiyoreaktör sistemi, fotosentez için gerekli olan karbondioksiti arabaların atmosfere saldıgı egzoz gazlarından temin edip havayı temizlemek amacıyla tasarlanmıştır (Burke, 2022).



Şekil 64. Culture Urbaine üst geçit alg tüpleri. (urbanNext, 2023)

Üst geçit üzerine konumlanan şeffaf tüplerden oluşan kapalı sistem, her ikisi de atmosferde bol miktarda bulunan, yalnızca güneş ışığı ve CO₂ ile büyüyen alglerin üretimi için kullanılmaktadır. Bu algler havayı filtrelemek için, yanıcı biyokütle olarak ve hatta farklı sektörlerde kullanılmak için hammadde olarak kullanılabilir. Pompalar, filtreler ve güneş panelleri gibi tüm ikincil ekipmanları destekleyen çelik yapı, kentsel ortamda besin üretimi, yeşil alanın korunması ve mevcut altyapıların yeniden yorumlanmasına olanak sağlamaktadır (urbanNext, 2023).

2.1.2.9. Street Lamp

Tablo 26. 13. örnek künyesi: Street Lamp

Yapının Adı	Street Lamp	
Yapı Türü	Kentsel Donatı	
Proje Yeri	Fransa	
Proje Yılı	2015	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Tübüler Fotobiyoreaktör	
Fotobiyoreaktörün Kullanıldığı Yer	Sokak Lambası	
Yıllık Hedeflenen Enerji Tasarrufu	Yılda 1 ton karbondioksit (CO ₂) dönüşümü	

Lambayı geliştiren araştırmacılar, bu lambanın yılda 1 ton karbondioksiti atmosferden uzaklaştırabildiğini dile getirmektedir. Bu yaprak dökmeyen bir ağacının yılda depoladığı ve tuttuğu yaklaşık 0,1 ton karbondioksitin on katıdır. Lambalardaki algler öldüğünde toplanıp biyoyakıt olarak kullanılabileceğini öne sürmektedirler. Alg lambası, organizmaların fotosentezinden yararlanarak pil, işlem sırasında üretilen enerjinin bir kısmını kullanarak yeniden şarj olmaktadır. Alg ile çalışan sokak lambalarının bazı tasarımları Şekil 65’te gösterilmektedir.



Şekil 65. Farklı Alg Sokak Lambası Tasarımları (Buchman, 2015)

Ancak alg lambaların bakımı ve temizliği ile ilgili bir sonuca henüz varılmamıştır. Alglerin sık sık değiştirilmesi ve ölmekte olan alg gövdelerinin temizlenmesi gereksinimi vardır. Ayrıca alglerin aşırı hava koşullarına duyarlılığının da değerlendirilmesi gerekmektedir (Buchman, 2015).

2.1.2.10. Alg Kubbesi Space 10

Tablo 27. 14. örnek künyesi: Alg Kubbesi Space 10

Yapının Adı	Alg Kubbesi Space 10	
Yapı Türü	Kentsel Donatı	
Kavramsal Tasarım Ekibi	Keenan Pinto, Aleksander Wadas, Rafal Wroblewski ve Anna Stempniewicz	
Proje Yeri	Cenevre, İsviçre	
Proje Yılı	2017	
Kullanılan Fotobiyoreaktör	Tübüler Fotobiyoreaktör	
Fotobiyoreaktörün Kullanıldığı Yer	Kubbe	

SPACE10 dünyanın hemen yer yerinde yetiştirilebilecek alglerin üretimini kolaylaştıran bir fotobiyoreaktör olarak inşa edilmiştir. Bir alg türü olan *Spirulina*, sağlık ve çevre üzerinde etkisi nedeniyle kırk yıl önce Birleşmiş Milletler tarafından "insanlık için ideal gıda" olarak görülmekteydi. Diğer besin kaynaklarından daha fazla protein içermesi ve vitamin-minerallerle dolu olması algleri ideal besin yapmaktadır. Fotosentetik bir organizma olarak, kullanılabilir enerji ve oksijen üretmek için karbondioksiti absorbe etmektedir.



Şekil 66. Alg Kubbesi Space 10, (Niklas Adrian Vindelev)

Mimarlıkta kullanılan biyolojik teknolojiler, dünyadaki fosil kaynak eksikliğine ve hava kirliliğine çözüm ve farkındalık sağlamak amacıyla giderek daha popüler hale gelmektedir (Thorns, 2014).

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada, Web of Science aracılığıyla fotobiyoreaktör ile ilgili son yıllarda yapılan araştırmaların yıllara, bölgelere, araştırma alanlarına ve sürdürülebilir gelişim hedeflerine göre istatistiksel verileri elde edilmiştir. Bu bağlamda her geçen yıl fotobiyoreaktörler ve algler üzerine yapılan araştırmaların arttığı görülmektedir. Alglerin fotosentez kabiliyetlerinin, biyokütle üretiminde ve oksijen üretiminde yüksek olması; fotobiyoreaktörleri enerji üretiminde, atık su arıtımında ve oksijen üretiminde ön plana çıkarmaktadır.

Araştırmaların büyük kısmı Çin, Amerika, İspanya, Hindistan ve İtalya gibi su kaynaklarına yakın, alg kültürünü insanlar için besin kaynağı olarak kullanan, çeşitli sanayi sektörlerinde alg biyokütlesi ve bu üründen üretilen enerjiyi endüstriyel alanda kullanan ülkelerde yapılmaktadır. Fotobiyoreaktörlerin yaygın kullanım alanı olan biyoteknolojik uygulamalarında eczacılık –ilaç ve sağlık alanları-, enerji üretimi, tarım-hayvancılık ve gıda sanayi ön plandadır. Son yıllarda ise bu uygulamalara ek olarak sürdürülebilir mimarlık alanında da fotobiyoreaktörlerin daha çok araştırma ölçeğinde yaygınlaştığı gözlemlenmiştir. Sayısal verilere bakıldığında deneysel olarak laboratuvar ölçeğinde ve kentsel donatı olarak tasarlanan küçük ölçekli pavyonlarda, tübüler fotobiyoreaktör araştırmaları diğer fotobiyoreaktör türlerine göre daha fazla çalışmaya konu edilmiştir. Mimarlık alanında yapılan çalışmalara bakıldığında ise düz-panel fotobiyoreaktörlerin bina cephe tasarımlarında daha fazla tercih edilebileceği gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında fotobiyoreaktörlerin mimari kullanımına ilişkin öne çıkan 14 örneği incelenmiştir. İncelenen örneklerden sadece bir tanesi bu amaca yönelik planlanıp inşa edilmiştir. Bina cephesinde enerji üretmek amacıyla fikir proje ve uygulanmış proje olarak 5 örnek analiz edilmiştir. 8 örnekte ise farklı amaçlara hizmet eden kentsel donatılar seçilmiştir. Bir örnek ise sadece laboratuvar ortamında deneysel olarak alg üretmektedir.

Seçilen örneklerde fotobiyoreaktör türü olarak 2 düz-panel fotobiyoreaktör, 5 plastik-torba fotobiyoreaktör ve 7 tübüler fotobiyoreaktör kullanılmıştır. Örnekler Tablo 35'te ifade edildiği şekliyle kendi aralarında yapım tarihlerine göre kronolojik olarak sıralanarak gelişimleri ile ilgili analiz yapılmıştır.

Tablo 28. Çalışma kapsamında incelenen örneklerin analizi

Örnek No	Yapı Adı	Yapım Yılı	Kullanılan Fotobiyoreaktör Türü	Kullanım Alanı	Kullanım Amacı
1	BIQ House	2013	Düz-Panel Fotobiyoreaktör	Bina cephesi	Cepheye entegre edilmiş düz panel fotobiyoreaktörler ile binanın enerji ihtiyacının nerdeyse tamamının karşılanması hedeflenmiştir.
2	“In Vivo” Yeşil Projesi	2016	Düz-Panel Fotobiyoreaktör	Bina cephesi	Binada enerji tüketiminin düşürülmesi amacı ile tasarlanmıştır.
3	Algaevator	2016	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör	Kentsel Donatı (Pavyon)	Alg üretiminin artırılması için yapay bir kültür ortamı oluşturulmuştur.
4	STEM V1.0	2006	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör	Deneysel	Oksijen üretebilen canlı bir ekran sistemi oluşturulmak istenmiştir.
5	Urban Algae Canopy	2013	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör	Kentsel Donatı (Pavyon)	Kamusal alanlarda sürdürülebilir kentsel mimariyi teşvik etmek amacıyla kurgulanmıştır.
6	Urban Algae Canopy 2.0	2017	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör	Kentsel Donatı (Pavyon)	Mimarinin sanatsal boyutunu ve bilimsel araştırmaları toplumun gelecekteki ihtiyaçları ve sürdürülebilir değerleri ile birleştirmek amacıyla tasarlanmıştır.
7	Photo.Synth.Etica.Curtain	2018	Plastik-Torba Fotobiyoreaktör	Bina Cephesi	Mevcut kamusal bir yapının cephesinde yaşayan bir perde cephe uygulanmıştır.
8	Habitat One	2023	Tübüler Fotobiyoreaktör	Sergi Alanı	Kamusal bir yapının giriş bölümünde biyo-dijital olarak yetiştirilen ve karbon tutan ağaç şeklinde bir heykel olarak sergilenmiştir.

Tablo 28'in devamı

9	Carbon Tunnel Algae Park	2009	Tübüler Fotobiyoreaktör	Kentsel Alt Yapı (Fikir Projesi)	Okyanus üzerinde alg yetiştirebilen ve okyanus altındaki tünelin kirli havasını temizleyebilen alg tarlaları düşünülerek kurgulanmıştır.
10	GSA Ofis Binası	2011	Tübüler Fotobiyoreaktör	Bina Cephesi	Yapı cephesinde fotobiyoreaktörler gölgeleme amacıyla kullanılarak, cephenin enerji üretmesi ve binanın sebep olduğu karbon ayak izinin düşürülmesi amaçlanmıştır.
11	Algae Green Loop	2011	Tübüler Fotobiyoreaktör	Bina Cephesi	Kalabalık şehirlerde sera gazı emisyonunu azaltmak için dikey alg tarlaları kurgulanmıştır.
12	Culture Urbaine	2011	Tübüler Fotobiyoreaktör	Kentsel Donatı (Üst Geçit)	Arabalardan salınan karbondioksitin kullanılmasıyla oksijen üretimi sağlanarak üst geçit korkuluğuna entegre edilmiştir.
13	Street Lamp	2015	Tübüler Fotobiyoreaktör	Kentsel Donatı (Otopark)	Kapalı ortamlarda fotosentez yaparak hem kirli havanın temizlenmesi hem de ürettiği enerjinin aydınlatmada kullanılabilmesi beklenmiştir.
14	Alg Kubbesi (Space 10)	2017	Tübüler Fotobiyoreaktör	Kentsel Donatı (Pavyon)	Kent meydanlarında insanların deneyimleyebileceği duraklar ya da bekleme alanları ile farkındalık oluşturma amacıyla tasarlanmıştır.

Çalışmaya dâhil edilen örnekler arasında düz panel fotobiyoreaktörler, 2013 yılında inşa edilen BIQ House ve 2016 yılında kurgulanan In Vivo fikir projesinde kullanılmıştır. BIQ House projesinde günde $345 \text{ kJ/m}^2/\text{gün}$ enerji üretildiği ölçülmüştür. In Vivo fikir projesinde ise enerji tüketiminin yılda 48 kWh/m^2 'nin altına düşmesi hedeflenmektedir. BIQ House cephesindeki fotobiyoreaktörlerin ürettiği enerji şehrin enerji ihtiyacı için kullanılmaktadır. Benzer şekilde, 900 m^2 fotobiyoreaktör cepheye sahip In Vivo projesinin, tıbbi araştırmalar için biyokütle sağlaması beklenmektedir. Konut yapılarında kurgulanan fotobiyoreaktör sisteminde, toplanan ısı sistem odalarında depolanarak sıcak su, ısıtma gibi enerji gerektiren ihtiyaçlarda kullanılmaktadır. Ayrıca binaların gri suyu kullanılarak alglerin besin ortamına dahil edilebilmekte ve arıtılarak geri dönüştürülebilmektedir.

BIQ House yapısında cepheye entegre edilen paneller kullanıcılar ile dış ortam arasında bir perde görevi görmektedir. İç mekânda kullanıcı açısından sürekli hareket eden canlı ve yeşil bir cephe deneyimi farklı kullanıcıların da görüşleri alınarak sorgulanmalıdır. Düz-panel fotobiyoreaktörler dikdörtgen veya kare formda yatay olarak düzenlenmiş düz, şeffaf panellerden oluşmaktadır. Bu nedenle alglerin ürettiği biyokütlelerin düzenli olarak hasat edilmesi böylece panellerin temiz kalması da estetik açıdan önem arz etmektedir. Tübüler fotobiyoreaktörlere göre daha ince tasarlandığından alglerin ışık alma oranı daha yüksektir. Tübüler fotobiyoreaktörler ek olarak karıştırma elemanları kullanılıp alglerin homojen şekilde dağılması ve eşit miktarda ışık alması sağlanmaktadır. Tübüler fotobiyoreaktörlerin, ölçeklendirilerek geniş yüzeylerde kullanılma oranı düz-panel fotobiyoreaktörlere göre strüktürel olarak daha kolay olmaktadır.

Tübüler fotobiyoreaktör ve plastik-torba fotobiyoreaktör cephe tasarımlarına sahip olan yapılar var olan kamusal binaların cephelerinde gölgeleme elemanı olarak kullanılmaktadır. Plastik-torba fotobiyoreaktörler esnek tasarım imkanları sağlarken, şeffaf malzeme olarak cam kullanılan tübüler fotobiyoreaktörlerin iklim şartlarına daha kolay uyum sağladığı görülmektedir. Tübüler fotobiyoreaktör ve plastik-torba fotobiyoreaktör sistemler cephe uygulamalarının yanında kentsel donatılarda daha fazla denenmektedir. İncelenen örnekler arasında tübüler fotobiyoreaktörler kullanılarak sokak lambası, insanların kent meydanlarında deneyimleyebileceği pavyonlar ve araç yoğunluğunun fazla olduğu yollarda salınan karbonu azaltmak amacıyla üst geçitlere eklenen sistemler kullanılmaktadır.

Sokak lambalarında enerji üretici olarak kullanılan fotobiyoreaktörler ise gün içinde depoladıkları enerjiyi gece kullanabilmektedir. Ancak iklim şartlarının ve lambanın kullanıldığı

ortamın (otopark gibi karanlık mekanlar) güneş ışığı alma süresi uygun değeri sağlamazsa alg kültürü yeterli performansı göstermemektedir. Yapay aydınlatma kullanılarak alg biyokütlesi üretmek sisteme yeni enerji yükü yüklemektedir.

Üst geçit korkuluğuna entegre edilmiş olan tübüler fotobiyoreaktör sisteminde iklim koşullarına bağlı olarak kontrolsüz bir şekilde sürekli güneş ışığına maruz kaldığından alg hücrelerinin ölmesine sebep olabilmektedir. Projede, uygulama alanı çevresindeki altyapı sistemleri ile bağlantısı olmadığından fotobiyoreaktörlerin kültür ortamına besin-karbondioksit sağlamak, biyokütlenin ve oksijenin hasadını sağlamak işlevsel problemler olarak görülmektedir.

Fikir aşamasında olan Green Loop Tower projesinde, kalabalık kentlerin sera gazı emisyonunu azaltması amacıyla gökdelen cephesinde dikey alg tarlaları kurgulanmaktadır. Yapı kabuğu, ısıtma ve soğutma, sıcak su, aydınlatma sistemleri gibi konularda, son yıllarda önem kazanan alg teknolojisinin potansiyelini göstermeyi amaçlamaktadır.

Plastik-torba fotobiyoreaktör kullanılarak uygulanan pavyon örneklerinde membran içerisinde yetiştirilen alglerin büyüme potansiyeli diğer reaktör türlerine göre daha sınırlıdır. Çok sıcak ya da çok soğuk havalarda cam panellere göre hem fiziksel hem de alg kültürü içinde zarar görmeleri daha olasıdır.

Çalışma kapsamında 2023 yılında bir sergi için üç boyutlu olarak üretilen ağaç heykel bir ağacın fotosentez kabiliyetine sahiptir. Diğer örnekler arasında alg teknolojisinde yeni bir başlangıcı simgeleyen yapay zekâ ağacıdır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fotobiyoreaktörler, alglere ortam şartları kontrol edilebilir kültür ortamı sağlayan kapalı sistemlerdir. Sürdürülebilir mimari kapsamında bina cephesine entegre edilen fotobiyoreaktör sistemler, yapı kabuğuna yeni bir işlev kazandırmaktadır. Kültür ortamı içerisinde algler, fotosentez ile biyokütle ve oksijen üretmektedir. Üretilen biyokütle toplanmakta ve sistem odalarında dönüştürülerek binalarda elektrik enerjisi olarak kullanılmaktadır. Bina cephesinde toplanan ısı, ısıtma gereksinimi için depolanmaktadır. Binanın dışında bir tesiste biyoyakıta dönüştürülüp kullanılan biyokütlenin, mimari alanda kullanımı kısıtlı olduğundan sanayi alanında ticari amaçlı kullanımı daha yaygındır. Yapı cephesine ikincil bir cephe olarak entegre edilen fotobiyoreaktör sistemi sadece binaya değil bulunduğu çevreye de fayda sağlamaktadır. Bir ağaç gibi havada bulunan karbondioksiti kullanarak oksijen üretebilmektedir. Bu sayede yakın çevresindeki kirli havayı temizlemektedir. Algler farklı sulak alanlarda yaşayabilmektedir. Bu nedenle algler, besin ortamı için binanın atık suyunu ve toplanan yağmur suyunu kullanabilmektedir. Böylece binada atık su geri dönüştürülebilmektedir.

Bu çalışmada bibliyografik analiz yöntemi ile fotobiyoreaktör sistemlerinin Web of Science veri tabanında hangi yıllarda, hangi ülkelerde ve hangi araştırma alanlarına konu olduğu incelenmiştir. Yapılan bu analizde, fotobiyoreaktör ve alg teknolojisinin yıllar içerisinde ivme kazanarak artış gösterdiği ancak mimarlık alanında henüz yeterince araştırma yapılmadığı görülmektedir. Laboratuvar ve bilgisayar ortamında deneysel boyutta yapılan çalışmalar, fotobiyoreaktörlerin bina entegrasyonunda ne tür faydalara ve ne tür problemlere sebep olacağına yanıt vermekte yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle sadece deney ölçeğinde değil bina ölçeğinde de fotobiyoreaktör tasarımları yapılmalıdır. Günümüzde teknolojik gelişmeler sayesinde fotobiyoreaktörlerin tasarımı, alglerin uygun yetiştirilme koşulları sağlandığı takdirde istenilen formda üretilebileceği ön görülmektedir.

Fotobiyoreaktör kullanımında, iklim şartları, güneşlenme süresi, alg kültürünün homojen şekilde kalması için karıştırılması ve üretilen biyokütle ile oksijenin gerekli zamanlarda tahliye edilmesi gibi bağlayıcı unsurlar vardır. Bu koşullar sağlanmadığı takdirde ölen alg hücreleri ve tahliye edilmeyen biyokütle, panellere yapışarak iç ortam

konforunu bozmaktadır. Bu bağlamda fotobiyoreaktör sistemlerin temizliğinin zor olması mimarlık alanında henüz beklenen gelişimi göstermemesinde çözüm üretilmesi gereken önemli bir sorundur.

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak enerji üreten diğer sistemlerde (fotovoltaik paneller, rüzgâr tribünleri, vb.) olduğu gibi bina cephesine entegre fotobiyoreaktör kurulması maliyet gerektiren bir sistemdir. Kullanım döneminde, farklı olumsuz koşullardan kaynaklı meydana gelebilecek hasarların onarımları, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji üreten panellere göre daha zorlu olmaktadır. Bu nedenle alg kültürünün optimum değerleri sürekli olarak sabit tutulmalı ve ürün hasatları zamanında yapılmalıdır.

Kullanılan fotobiyoreaktör panel türü ve yetiştirilen alg türü öncelikli olarak bölgenin iklim şartlarına göre tercih edilmelidir. Bina cephesinde fotobiyoreaktör panellerin kullanım sıklığı ve kullanım amacı projenin tasarımına ve hedeflenen enerji üretim performansına göre değişmektedir. Yapının kullanım amacı panellerin cephede konumunu belirleyecek bir diğer faktördür. Konut ve ofis gibi gün ışığının ve aydınlatmanın önemli olduğu kullanımlarda kullanıcı konforu göz önünde bulundurularak cephede panel sıklığı belirlenmelidir. Fabrika, alışveriş merkezleri, hangar ve depo gibi doğal aydınlatmaya daha az ilgi duyulan kullanım alanlarına sahip mekanlarda ise masif cepheler tamamen fotobiyoreaktör paneller ile kaplanarak yapı için gereken enerji ihtiyacını karşılayabilir.

İç ortam ile dış ortam arasında bir bağlantı sağlayan fotobiyoreaktör paneller, geniş kullanıcı kitleleri tarafından belirli bir süre deneyimlendikten sonra yapılacak anketler ile kullanıcının estetik algısına göre ‘alglerin görsel etkinliğinin insan üzerindeki etkisi’ hakkında daha genel bir yorum yapılabilir.

Çalışma kapsamında incelenmek üzere 14 örnek seçilmiş ve analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, mimarlık alanında fotobiyoreaktör kullanımının son yıllarda bina ölçeğinden ziyade kentsel donatı ölçeğinde örneklerinin arttığı görülmektedir. Kullanıcı deneyiminin artması ve farklı iklim koşullarında alglerin enerji verimliliğinin gözlemlenmesi açısından, kentsel donatılar olarak fotobiyoreaktör kullanımının yaygınlaşması bina ölçeği için kılavuz oluşturabilir.

Fotobiyoreaktörlerde şeffaf malzeme olarak dayanımı daha yüksek olduğu için genellikle cam tercih edilmektedir. İncelenen örneklerle bakıldığında plastik torba fotobiyoreaktör kullanımının bina cephesinde ve kentsel donatı olarak pavyonlarda arttığı

görülmektedir. Ancak sürdürülebilirlik göz önünde bulundurulduğunda cam paneller, geri dönüştürülebilmeleri bakımından plastik torba fotobiyoreaktörlere göre kullanımı daha sürdürülebilir çözümlerdir.

Düz panel fotobiyoreaktör ve tübüler fotobiyoreaktör kullanılan örnekler bakıldığında, tübüler fotobiyoreaktör bina cephelerinin yanında kentsel donatılarda da tercih edilmektedir. Düz panel fotobiyoreaktörler sadece yatay olarak kullanılabilirken tübüler fotobiyoreaktörler hem yatay hem de dikey kullanılabilir. Tübüler fotobiyoreaktörler hem yatay hem dikey olarak kullanılabilirdi için tasarım açısından kolaylık sağlayabileceği düşünülmektedir. Düz panel fotobiyoreaktörlerin yüzey/hacim oranı daha yüksek olduğundan tübüler fotobiyoreaktörlere göre daha fazla ışık yakalama potansiyeline sahiptir. Ancak tübüler fotobiyoreaktörlere farklı boyutlarda cam silindirler eklenerek bu sınırlanması ortadan kaldırılabilir. Düz panellerin panel açıklığı tübüler fotobiyoreaktörlere göre daha dar olduğu için temizliğini sağlama noktasında sorunlar meydana gelebilir.

Çalışmanın sonucunda, fotobiyoreaktörlerin sürdürülebilir mimaride kullanımında göz önünde bulundurulması gereken parametreler belirlenmiştir.

- Fotobiyoreaktör türü: Teknolojinin gelişmesiyle fotobiyoreaktörlerin temizlik, ölçeklendirilme ve maliyeti gibi problemlerine çözümler üretilebileceği ön görülmektedir. Günümüzde ise kullanım alanına göre sürdürülebilir malzemelerden oluşan, genellikle yapay ışık yerine doğal ışıktan faydalanan, karıştırma ve hasat işlemlerini fotobiyoreaktör sistemine en az yük olacak şekilde kullanan sistemler üzerinde denemeler gerçekleştirilebilir.
- Alg Türü: Alglerin yaşam alanları oldukça geniş olduğundan türe göre optimum şartlar sağlandığında fotobiyoreaktör sistem enerji üretebilir. Alglerin farklı renklerde türleri olduğundan panel renkleri ve panelde bulunan kültür miktarı beklenen enerji faydasına göre çeşitlilik gösterebilir. Enerji üretimi, alglerin fotosentez verimliliğinden etkilenmektedir. Bu bağlamda tercih edilen türün ilk olarak fotosentez yeteneği göz önünde bulundurulmalıdır.
- Sürdürülebilirlik: Yenilenebilir enerji kaynakları arasında son yıllarda popülerlik kazanan algler, bir ağaç gibi davranarak çevresindeki kirli havayı temizleyebilmektedir. Dikey tarla olarak kurgulanan fotobiyoreaktörler, kalabalık

ve betonlaşmış kentlerde binaların cephelerinde, çatılarında ve balkonlarında yer bularak kentlerin sera gazı emisyonunu azaltıp oksijen üretebilmektedir.

- İklim şartları: Özellikle fotobiyoreaktörlerin ne kadar süre doğal ışık kaynağına maruz kaldığı ve sıcaklık için uygun değerin sürekli olarak sağlanıp sağlanamadığı açısından önemlidir. Alg kültürünün canlı kalabilmesi ve enerji üretiminin devam edebilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Güneş ışının geliş açısına göre fotobiyoreaktör sistemler dikey veya yatak ekseninde hareket edebilir, sabit olabilir ya da binanın cephesi dışında bir yapı elamanı olarak kullanılmasaı sağlanabilir.
- Yapının İşlevi: Mimari kullanımda fotobiyoreaktörler cephelerde kullanıldığında iç mekânlara gölgeleme sağlamaktadır. Yapının işlevine göre cephelerde oluşturulan doluluk ve boşluklar değışiklik göstermektedir. Örneğın konut ve ofis binaları nispeten daha kısıtlı cephelere sahip ve daha aydınlık mekânlar olurken, fabrika ve alışveriş merkezleri gibi geniş yüzey alanına sahip yapılarda daha esnek şekilde konumlanabilir. Panel sayısı arttıkça enerji performansının da artış göstermesi beklenmektedir.
- Estetik Kaygı: Fotobiyoreaktörler, genellikle cephelerde canlı ve hareketli perde halinde gölgelendirme elamanı olarak kullanılmaktadır. Tasarıma dâhil edilmek istenmediğı durumlarda fotobiyoreaktör sistemlerden çatı gibi göz önünde olmayan ancak güneş ile ilişkili mekânlarda işlevsel olarak faydalanılabilir.

5. KAYNAKÇA

- Aktar, S. ve Cebe, G. E., 2010. Alglerin genel özellikleri, kullanım alanları ve eczacılıktaki önemi. Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi, 237-264.
- Akuamakx., 2023. Alg Üretim Fotobioreaktörleri. Akuamakx: <https://www.akuamaks.com/tr/detail/alg-uretim-fotobioreaktörleri> adresinden alındı 30 Ağustos 2023
- Becker, W., 2004. Microalgae in Human and Animal Nutrition. A. Richmond içinde, Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology, 312-351.
- Benemann, J. R., 2004. Hydrogen and Methane Production by Microalgae. A. Richmond içinde, Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Publishing Ltd.
- Bolton, J. R., 1996. Solar photoproduction of hydrogen: A review. Solar Energy 57, 1, s. 37-50.
- Buchman, J. <https://sustainable-nano.com/2015/03/03/algae-lamps/#ref> Sustainable Lamps Powered by Algae, 3 Mart 2013.
- Burgess, G., Fernández-Velasco, J. ve Lovegrove, K., 2006. Materials, geometry, and net energy ratio of tubular photobioreactors for microalgal hydrogen production . WHEC 16, 1-12.
- Burke, S., <https://greenerideal.com/news/environment/1119-amazing-algae-farm-gobbles-pollution-highway/> This Amazing Algae Farm Gobbles Up Pollution From the Highway Below it! 5 Ağustos 2022
- Cai, T., Park, S. ve Li, Y., 2013. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 360-369.
- Cheng, J., Xu, J., Lu, H., Ye, Q., Liu, J. ve Zhou, J., 2018. Generating cycle flow between dark and light zones with double paddlewheels to improve microalgal growth in a flat plate photo-bioreactor. Bioresource Technology, 151-157
- Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C. ve Chang, J.-S., 2017. Microalgae biorefinery: High value products perspectives. Bioresource Technology, 53-62.
- Choi, H.-J., 2014. Effect of optical panel distance in a photobioreactor for nutrient removal and cultivation of microalgae. World J Microbiol Biotechnol.

- Choi, S.-L., Suh, I. S. ve Lee, C.-G., 2003. Lumostatic operation of bubble column photobioreactors for *Haematococcus pluvialis* cultures using a specific light uptake rate as a control parameter. Enzyme and Microbial Technology 33, 403-409.
- Cirik, Ş., 2011. Su Bitkileri I (DenizBitkilerinin Biyolojisi, Ekolojisi, Yetiştirme Teknikleri). İzmir: Ege Üniversitesi Yayınları, Su ürünleri Fakültesi Yayınları, 58.
- Conk Dalay, M., İmamoğlu, E. ve Öncel, S., 2008. Mikroalgal Biyokütle Üretimi için Düşük Maliyetli Fotobiyoreaktör Tasarımı. Proje No: 104M354. İzmir, Türkiye.
- Decker, M., Hahn, G. ve Harris, L. M. Bio-Enable Façade Systems. Material Studies Applications 1, 603-612.
- Demir, N., Öterler, B., Sömek, H., Sevindik, T. O., Soylu, E. N., Karaaslan, Y. ve Manavoğlu, D. C., 2021. Türkiye’deki 25 Nehir Havzasından Türkiye Tatlı Su Alg Florası için Yeni KAYıtlar, BÖlüm IV: Ochrophyta. Turkish Journal of Water Science Management, 204-229.
- Domus., 2016
https://www.domusweb.it/en/news/2016/07/01/algaevator_zhang_stevermer.html
Algaevator, 1 Temmuz 2016.
- Duran, S. K., Kumar, P. ve Sandhu, S. S., 2021). A review on microalgae strains, cultivation, harvesting, biodiesel conversion and engine implementation. Biofuels 12, 91-102.
- Elçik, H. ve Çakmakçı, M., 2017. Mikroalg üretimi ve mikroalglerden biyoyakıt eldesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 32:3, 795-820.
- Eldin, M. S., ve İbrahim, S. H., 2021. The Role of Bio Facedes in Energy Conservation. International Journal of Architectural Engineering andUrban Research 4, 95-113.
- Elrayies, G. M. (2018). Microalgae: Prospects for greener future buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 81, 1175-1191.
- Eltanahy, E. ve Torky, A., 2021. Microalgae as Cell Factories: Food and Feed-grade High value Metabolites. A. Shekh, P. Cchenk, & R. Sarada içinde, Microalgal Biotechnology - Recent Advances, Market Potential, and Sustainability, 1-35. Royal Society of Chemistry.
- Ertas, T. ve Ponce, V. M., 2007. Advanced integrated wastewater pond systems. <https://ponce.sdsu.edu/aiwps.html> adresinden alındı.
- FEEM. BIQ House+SolarLeaf – the use of microalgae. *Pocacito*.

- Forján, E., Navarro, F., Cuaresm, M., Vaquero, I., Ruízdomínguez, M. C., Gojkovic, ž. ve Garbayo, I., 2014. Microalgae: fast-growth sustainable green factories. Critical Reviews in Environmental Science and Technology.
- Furuto, A., 2011, <https://www.archdaily.com/191229/algae-green-loop-influx-studio> Algae Green Loop / Influx Studio, 13 Aralık 2011.
- Gezici, M., Eliçin, K. ve Gürhan, R. (2012). Biyoyakıt Amaçlı Mikroalg Üretimi İçin Bazı Yetiştirme Parametrelerinin Belirlenmesi. Tarım Makinaları Bilim Dergisi, 223-231.
- Grima, E. M., Fernandez, F. A., Camacho, F. G. ve Chisti, Y., 1999. Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. Journal of Biotechnology, 231-247.
- Haznedaroğlu, B., İnci, M. N., Varank, M., Dönmez, F. ve Meyer-Landrut, N., 2022. <https://haberler.boun.edu.tr/tr/haber/bogazici-universitesinde-avrupanin-ilk-karbon-negatif-biyorafinerisi-acildi> Boğaziçi Üniversitesi Haberler, 7 Ocak 2022.
- Hohe, A., 2008. https://en.wikipedia.org/wiki/Photobioreactor#/media/File:Bioreaktor_quer2.jpg Photobioreactors, 2008.
- Huo, S., Wang, Z., Zhu, S., Dong, R., Qin, L., Zhou, W. ve Yuan, Z., 2018. Biomass Accumulation of *Chlorella Zofingiensis* G1 Cultures Grown Outdoors in Photobioreactors. Frontiers in Energy Research.
- Iluz, D. ve Abu-Ghosh, S., 2016. A novel photobioreactor creating fluctuating light from solar energy for a higher light-to-biomass conversion efficiency. Energy Conversion and Management, 767-773.
- İmamoğlu, E., Dalay, M. C. ve Öncel, S., 2008. Mikroalgal Biyokütle Üretimi için Düşük Maliyetli Fotobiyoreaktör Tasarımı.
- İrkin, L. C., 2020. Akuakültürlerde Alglerin Önemi ve Kullanım Alanları. Çanakkale: İksad Publishing House.
- Jensen, G. S., Ginsberg, D. I. ve Drapeau, C., 2001. Blue-Green Algae as an Immuno-Enhancer and Biomodulator. JANA 3, 4, 24-30.
- Jones, S., 2014. <https://www.news.uct.ac.za/article/-2014-09-05-moving-algae-the-key-to-renewable-oil-production> adresinden alındı Moving algae the key o renewable oil production, 5 Eylül 2014.
- Kaewpintong, K., Shotipruk, A., Powtongsook, S. ve Pavasant, P., 2007. Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor. Bioresource Technology 98, 288-295.

- Kargın, H., 2020. Akuakültürde Kullanılan Mikroalg Üretim Sistemleri Fotobiyoreaktörler Dünyada ve Ülkemizde Kullanımı. Mediterranean Fisheries ve Aquaculture Research, 112-130.
- Kaşdoğan, D., 2018. <https://birartibir.org/mikroalglerin-aynasinda-tekno-kapitalizm/> Üçüncü Nesil Biyoyakıtlar: Algler, Ağustos 2018.
- Kerestecioğlu, F. Ö. ve Pekmezci, Y. T., 2019. Defining the Problems in Integration of Microalgae Photobioreactor Systems to Architecture. International Journal of Engineering Science and Application, 52-70.
- Kerner, M., Gebken, T., Sundarrao, I., Hindersin, S. ve Sauss, D., 2019 Development of a control system to cover the demand for heat in a Development of a control system to cover the demand for heat in a. Energy & Buildings 184, 65-71.
- Koller, A. P., Wolf, L., Brück, h. ve Weuster-Botz, D., 2018. Studies on the scale-up of biomass production with *Scenedesmus* spp. in flat-plate gas-lift photobioreactors. Bioprocess Biosyst Eng, 213-220.
- Kükdamar, İ., 2017. Cephelerde Fotobiyoreaktör Kullanımının Binaların Sürdürülebilirliğine Etkisi. 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi-Bina Fiziği Sempozyumu, 2015-2030. İzmir: Makine Mühendisleri Odası.
- Lakenbrink, H., 2013. Smart Material House BIQ. Hamburg : IBA Hamburg
- Larsdotter, K., 2006. Wastewater treatment with microalgae- a literature review. Vatten 62, 31-38.
- Lavens, P., ve Sorgeloos, P., 2016. Manual on the Production and Use of Live Food for Aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper.
- Lee, R. E., 2008. Phycology. Fourth Edition.
- Li, J., Jeffries, C., Stamato, M., Velliou, E. ve Agathos, S. N., 2014. Design and characterization of a scalable airlift flat panel photobioreactor for microalgae cultivation. Journal of Applied Phycology, 1-13.
- Limited, D., 2023). <http://www.dogalimited.com/en/product/biotron-plate-photo-bioreactor> Biotron Plate Photo Bioreactor. 31 Ağustos 2023.
- Masojidek, J., Koblizek, M. ve Torzillo, G., 2004. Photosynthesis in Microalgae. A. Richmond içinde, Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Publishing Ltd.
- Molina, E., Fernandez, J., Acien, F. G. ve Chisti, Y., 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. Journal of Biotechnology 92, 113-131.

- Muller-Feuga, A., 2004. Microalgae for Aquaculture. A. Richmond içinde, Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Publishing Ltd.
- Nef, P., 2015. <https://www.bryla.pl/bryla/1,85298,18589522,budynki-ktore-zyja-to-juz-nie-jest-jedynie-domena-science.html> Buildings that live? It's not just science fiction anymore, 18 Ağustos 2015.
- Negeva, E., Yezioro, A., Polikovsky, M., Kribus, A., Cory, J., Shashua-Bar, L. ve Golberg, A., 2019. Algae Window for reducing energy consumption of building structures in the Mediterranean city of Tel-Aviv, Israel. Energy & Buildings 204, 109460.
- Oktor, K., 2018. Mikroalglerin Çevre Teknolojilerindeki Yeri. Çevre Bilim Ve Teknoloji, 337-338.
- Olaizola, M. ve Huntley, M., 2003. Recent advances in commercial production of astaxanthin from microalgae. Recent Advances in Marine Biotechnology 9, 143-164.
- Öncel, S. S. ve Köse, A., 2016. Photobioreactors for Sustainable Buildings. Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 77-88.
- Özbalta, T. G. ve Kükdamar, İ. (2019). Enerji Etkin Tasarımda Yeşil Cepheler ile Fotobiyoreaktör Cephelerin Karşılaştırılması. International Design and Engineering Symposium, 388-398. İzmir: İzmir Demokrasi Üniversitesi.
- Pagliolico, S. L., Verso, V. R., Zublena, M. Ve Giovannini, L., 2019. Preliminary results on a novel photo-bio-screen as a shading system in a kindergarten: Visible transmittance, visual comfort and energy demand for lighting. Solar Energy 185, 41-58.
- Placzek, M., Patyna, A. ve Witczak, S., 2017. Technical evaluation of photobioreactors for microalgae cultivation. 1-10.
- Posten, C., 2009. Design principles of photobioreactors for cultivation of microalgae. Engineering in Life Sciences 9, 3, 165-177.
- Proksch, G., 2012. Growing Sustainability - Integrating Algae Cultivation into the Built Environment. EAR 33.
- Pruvost, J., Gouic, B., Lepine, O., Legrand, J. ve Borgne, F., 2016. Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. Chemical Engineering Journal, 850-861.
- Rackard, N., 2013. <https://www.archdaily.com/339451/worlds-first-algae-bioreactor-facade-nears-completion> World's First Algae Bioreactor Facade Nears Completion, 4 Mart 2013.

- Rashid, N., Rehman, M. S., Sadiq, M., Mahmood, T. ve Han, J.-I., 2014. Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 760-778.
- Rawat, I., Kumar, R. R., Bux, F. ve Mutanda, T., 2013. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. Applied Energy 103, 444-467.
- Roshdy, A., 2019. Utilizing Wastewater As A Nutrition Source For The Cultivation Of *Chlorella Vulgaris*. Master of Science in Environmental Engineering.
- Singh, R. N. ve Sharma, S., 2012. Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2347-2353.
- Singh, S. P. ve Singh, P., 2015. Effect of temperature and light on the growth of algae species, A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 50, 431-444.
- Singh, U. B. ve Ahluwalia, A. S., 2013. Microalage: a promising tool for carbon sequestration. Mitig Adapt Strateg Glob Change, 73-95.
- Skjånes, K., Andesen, U., Heidorn, T. ve Borgvang, S. A., 2016. Design and construction of a photobioreactor for hydrogen production, including status in the field. J Appl Phycol, 2205-2223.
- Slegers, P. M., van Beveren, P. M., Wijffels, R. H., van Straten, G. ve van Boxtel, A. B., 2013. Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors. Applied Energy 105, 395-406.
- Soeder, C. J., 2004. Water Pollution and Bioremediation by Microalgae. A. Richmond içinde, Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Publishing Ltd.
- SolarLeaf Bioreactor Facade.
- Song, M., Pei, H., Hu, W. Ve Ma, G., 2013. Evaluation of the potential of 10 microalgal strains for biodiesel production. Bioresource Technology 141, 245-251.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. ve Isambert, A., 2006. Review: Commercial Applications of Microalgae. Journal of Bioscience and Bioengineering, 87-96.
- Staehelin, L. A. ve Dunahay, T., 1986. Isolation and characterization of a new minor chlorophyll a/b protein complex (CP 24) from spinach. Plant Physiol 80, 429-434.
- Şahin, B., 2021. <https://www.trthaber.com/haber/turkiye/karadenizde-41-yeni-alg-turu-613965.html> Karadeniz'de 41 yeni alg türü. 4 Ekim 2021.
- Şahin, Y. Ve Akyurt, İ. (2010). Planktonlar ve Fotobiyoreaktörler. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, s. 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 hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 36, 6578-6591.
- Tamburic, B., Zemichael, F., Crudge, P., Maitland, G. ve Hellgardt, K., 2011. Design of a Novel Flat-Plate Photobioreactor System for Green Design of a Novel Flat-Plate Photobioreactor System for Green. Hydroge Energy 30, 6578-6591.
- Thorns, E., 2014. <https://www.archdaily.com/879269/algae-dome-by-space10-could-combat-chronic-malnutrition> Algae Dome by SPACE10 Could 'Combat Chronic Malnutrition, 12 Eylül 2014.
- Ting, H., Haifeng, L., Shanshan, M., Zhang, Y., Zhidan, L. ve Na, D. (2017, Ocak). Progress in microalgae cultivation photobioreactors and pplications in wastewater treatment: A review. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, s. 1-25.
- Tokuç, A., Köktürk, G. ve Savaşır, K., 2019. Alglerle Yetişen Cepheler. Yapı Teknolojisi ve Malzeme, 59-63.
- Tredici, M. R., 2004. Mass Production of Microalgae: Photobioreactors. A. Richmond içinde, Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology, 178-214. Balckwell Publishing Lts.
- Tredici, M. ve Materassi, R., 1992. From open ponds to vertical alveolar panels: the Italian experience in the development of reactors for the mass cultivation of phototrophic microorganisms. Journal of Applied Phycology 4, 221-231.
- Uçmaz, N., Sert, B., Aygün, C. ve Sarıbyık, O., 2021. Fotobiyoreaktörde Işığın ve Beslemenin Alglerin Büyümeleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 475-480.
- Ugwu, C. U., Aoyagi, H. ve Uchiyama, H., 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. Bioresource Technology 99, 4021-4028.
- URL-1, <https://www.nhm.ac.uk/our-science/data/algaevision.html> AlgaeVision, 28 Ağustos 2023
- URL-2, http://www.oilgae.com/ref/downloads/materials_used_in_PBR_construction.pdf Materials Used in Photobioreactor Design, 2010.
- URL-3, <https://fibropol.com/urunler/alg-tanki/> Akuakültür Mikroalg Kültür Sistemleri, 8 Ağustos 2023.
- URL-4, <https://www.internationale-bauausstellung-hamburg.de/en/druckansicht/projects/the-building-exhibition-within-the-building-exhibition/smart-material-houses/biq/projekt/biq.html> BIQ, 2015.
- URL-5, <https://archello.com/project/in-vivo> In Vivo, 2023.

- URL-6, <https://www.ecologicstudio.com/projects/stem-london-architecture-biennale> STEMcloud v1.0, 2006.
- URL-7, <https://www.ecologicstudio.com/projects/expo-milano-2015-urban-algae-folly> Urban Algae Canopy, 2015.
- URL-8, <https://www.ecologicstudio.com/projects/urban-algae-folly-2-0> Urban Algae Folly 2.0., 2017.
- URL-9, <https://urbannext.net/photo-synth-etica/> Photo.Synth.Etica: A Bio-digital Urban Curtain, 8 Eylül 2023
- URL- 10, <https://www.ecologicstudio.com/projects/photo-synth-etica> Photo. SynthEtica Curtain, 2018.
- URL-11, <https://www.ecologicstudio.com/projects/habitat-one-the-architecture-of-carbon-neutral-city> Habitat One, 2023.
- URL-12, <https://www.ecmweb.com/construction/article/20891927/hokvanderweil-team-wins-national-competition-with-process-zero-building-retrofit-proposal> HOK/Vanderweil Team Wins National Competition with Process Zero Building Retrofit Proposal, 7 Haziran 2011
- Vega-Estrada, J., Montes-Horcasitas, M. C., Domínguez-Bocanegra, A. R. ve Cañizares-Villanueva, R. O., 2005. Haematococcus pluvialis cultivation in split-cylinder internal-loop airlift photobioreactor under aeration conditions avoiding cell damage. Appl Microbiol Biotechnol, 31-35.
- Verso, V. R., Javadi, M. H., Pagliolico, S., Carbonaro, C. ve Sassi, G., 2019. Photobioreactors as a dynamic shading system conceived for an outdoor Workspace of the State Library of Queensland in Brisbane: Study of Daylighting Performances. Journal of Daylighting 6, 148-168.
- Vonshak, A. ve Torzillo, G., 2004. Environmental Stress Physiology. A. Richmond içinde, Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology, 57-82. Blackwell Publishing Ltd.
- Wilkinson, S., Stoller, P., Ralph, P., Hamdorf, B., Catana, L. N. ve Kuzava, G. S. (2017). Exploring the feasibility of algae building technology in NSW. Procedia Engineering 180 , s. 1121-1130.
- Xu, L., Weathers, P. J., Xiong, X.-R. ve Liu, Z.-Z. (2009). Microalgal Bioreactors: Challenges and Opportunities. Eng. Life Sci., s. 178-189.

- Zhang, A., Bokel, R., Dobbelsteen, A. v., Sun, Y., Huang, Q. ve a, Q. Z. (2017). Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China. Energy and Buildings 139, s. 371-384.
- Zhila, N., Kalacheva, G. ve Volova, T. (2005). Influence of nitrogen deficiency on biochemical composition of the green alga. Journal of Applied Phycology, s. 309-315.



6. EKLER

Ek 1. Kavramlar Sözlüğü

Aplanospor: Kalın çeperli, kamçısı olmayan ve hareket edemeyen, sporangiyumlarda meydana gelen sporlara denir.

Astaksantin: Astaksantin yengeç, karides, ıstakoz ve kerevit gibi bazı kabuklularda, somon balığında, flamingo ve kızıl aynak gibi bazı kuşların tüylerinde bulunan ve karotenoidler arasında yer alan bir pigmenttir.

B Karoten: Bitkilerde bulunan ve bitkilere sarı ve turuncu rengini veren bir pigmenttir.

Diatom: Ökaryotik su yosunlarının fitoplanktonları oluşturan temel gruplarından. Diatomlar, silisli sert kabukları olan ve fosilleri, kalın yer katmanları oluşturan bir algler familyasıdır. Tek hücreli ve koloni halinde yaşayan alglerdir.

Divizyo: Bölüm

Endosim: Bir organizmanın diğer bir organizmanın içinde yaşaması biçiminde ortak yaşama.

Fagositoz: Bir hücrenin diğer bir hücre veya partikülü sitoplazması içine almasına fagositoz, bunu yapan hücreye de fagosit denir.

Fikobilizom: Fikobiliproteinler, fikobilizom olarak adlandırılan fotosentetik mambranlara bağlı olan gruplar halinde bulunurlar.

Fikobiliprotein: Siyanobakterilerde ve ökaryot kırmızı alg kloroplastlarında, ışık hasatlayan sistemin ana elemanları olarak bulunurlar.

Fotoinhibitasyon: Işığın etkisiyle canlılarda herhangi bir fizyolojik sürecin yavaşlaması ya da durması.

Fotosentez: Bitkilerin başta yaprakları olmak üzere yeşil dokularında su ve karbondioksitin güneş ışığı etkisi ve klorofil aracılığıyla karbonhidratlar gibi organik moleküllere dönüştürüldüğü doğal süreç.

Fotoototrof: Enerjilerini ışık enerjisinden, hücresel işlevlerinde gereksinim duyulan karbonu ise karbondioksitten elde eden bitki, alg ve bazı bakteriler gibi kendi beslek organizmalar.

Fukoksantin: Fukoksantin, yenilebilir kahverengi alglerde bol miktarda bulunan bir ksantofildir. Biyolojik etkilerini ortaya çıkaran eşsiz bir kimyasal yapıya sahiptir. Bu kimyasal yapı antienflamatuar etki ve güçlü bir antioksidan kapasite verir

Heterotrof: Ekosistemde fotosentez yapmayan, yaşamları için gerekli olan enerjiyi organik maddelerden sağlayan organizmalar.

Karotenoid: Bitki, algler, bakteri ve funguslar tarafından üretilen, havuç, mısır, muz, yumurta sarısı gibi gıda maddelerine karakteristik rengini veren organik pigmentler.

Kloroplast: Yeşil renkli klorofil pigmentlerini içeren, kendi DNA replikasyonunu yapabilen, fotosentezin gerçekleştiği sitoplazma organeli ya da plastit.

Klorofil: Fotosentetik hücrelerde bulunan, farklı dalga boylarındaki güneş ışınlarını toplayarak ışık enerjisinin kimyasal enerjiye dönüşümünü sağlayan ve fotosentezde aktif rol oynayan, yeşil renkli pigment.

Ksantofiller: Özellikle yeşil yapraklarda klorofil ve karotenle birlikte bulunan, ayrıca yumurta sarısında ve kivide de rastlanan, vitamin aktivitesi göstermeyen, flavoksantin, lutein, kriptoksantin, rubiksantin, rodoksantin, kantaksantini de kapsayan hidroksillenmiş karotenoidler.

LDPE: Düşük yoğunluklu polietilen, petrolden meydana gelen bir termoplastiktir.

Lutein: Yeşil ve kahverengi alglerde, yeşil otlarda, ıspanak ve karalahana gibi yeşil sebzelerin yapraklarında bulunan, antioksidan özellik taşıyan, sarı, havuç kırmızısı karotenoid pigment.

Ototrof: Işık enerjisi ya da kimyasal enerji kullanarak anorganik maddelerden kendi organik besinini üretebilen bakteri.

Selüloz: Bitkilerin koruyucu hücre duvarı ve özellikle ağaç dal, gövde ve odunsu dokularında yer alan, lifli yapıda, sert, suda çözünmeyen, zayıf asitlerden etkilenmeyen, kuvvetli asitlerle ısıtıldığında selobiyoz ve D-glikoz birimlerine parçalanan, D-glikoz

birimleri birbirine 1,4 β -glikozit bağları ile bağlanmış ve bitkilerde en fazla bulunan yapısal polisakarit.

Simbiyoz: Farklı canlı gruplarının bir arada veya bir türün diğer tür içerisinde ortaklaşa olarak birbirleri lehine ve yakın etkileşim halinde yaşamaları.

Stroma: Kloroplast ve mitokondrilerin iç zarının içindeki renksiz, sıvımsı temel madde.

Sitoplazma: Hücre zarı içerisinde olan, ama hücre çekirdeği dışında kalan hücre içeriği.

Takson: Organizmaların bilimsel sınıflandırılmalarında oluşturulan sınıf, takım, aile cins, tür gibi çeşitli sistematik seviyelerin her biri ya da özel bir sisteme göre birlikte sınıflandırılan organizmalar topluluğu.

Tilakoit: Tilakoit lümeni ve onu çevreleyen tilakoit zarından oluşan, fotosentezdeki ışık tepkimelerinin yer aldığı kloroplastları ve siyanobakterileri içeren bölme.

Transesterifikasyon: Triasilgliserollerin dizel yakıtların yerine kullanılabilmesi için gereken kimyasal modifikasyonlar arasında en çok tercih edilen anahtar basamak niteliğindeki yöntem

Ultraviyole (UV): Dalga boyu görünür ışıktan kısa, ancak X-ışınlarından uzun olan bir elektromanyetik radyasyon şeklidir.

Vejetatif Dönem: Bitki yaşamında tohum çimlenmesinden çiçeklenme aşamasına kadar geçen, kökün, gövdenin, sapların, yaprak ve diğer somatik aksamın büyüdüğü süre.

ÖZGEÇMİŞ

Aynı şehirde ilkokul, ortaokul ve liseyi tamamladı. 2016 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'nden, 2020 yılında 3,24 ortalama ile mezun oldu. 2020 yılı yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Sibel MAÇKA KALFA danışmanlığına yüksek lisans eğitimine başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

