



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **SIFIR KARBON BİNALARA ULAŞMADA ANAHTAR BİR CEPHE ÖNERİSİ**

**İLKNUR KÜKDAMAR  
AYÇA TOKUÇ  
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**





# SIFIR KARBON BİNALARA ULAŞMADA ANAHTAR BİR CEPHE ÖNERİSİ

**İlknur KÜKDAMAR**  
**Ayça TOKUÇ**

## ÖZET

Sürdürülebilirliğe ulaşmada, gelecek yıllarda daha geniş bir yere sahip olacağı öngörülen biyoenerjinin üretimi büyük öneme sahiptir. Bunun için kullanılan yöntemlerden biri fotobiyoreaktörler yardımı ile biyokütlenin üretimidir. Bu reaktörler, sızdırmaz ve şeffaf konteynerler olup, alg yetiştirilmesi için uygun ortam sağlamakta kullanılırlar. Fotobiyoreaktörler gün ışığını yakalamak, ulaştırmak, yönlendirmek ve yetiştirme alanı içine bu ışığı dağıtmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütlenin daha verimli kullanılması ancak uygun reaktör seçimi ve kullanımı ile mümkündür. Fotobiyoreaktörler bina cephelerine uygulandığında, cepheler yeni bir işlev kazanmakta ve enerji üretimi için kullanılacak alanlara dönüşmektedir. Bu sayede yapıların çevreye olan karbon salımlarını da azaltmaktadırlar. Bu çalışmada, reaktör türleri incelenmekte ve örnek bir yapı üzerinden cephelere fotobiyoreaktör eklenmesi ile biyoenerjinin verimliliği araştırılmaktadır. Sonuç olarak, cephe tasarımında fotobiyoreaktörlerin kullanımı için geliştirilen fikirler sunulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Fotobiyoreaktör, Biyokütle, Bina cephesi, Sürdürülebilir yapı, Alg.

## ABSTRACT

The production of bioenergy will have more impact to reach sustainability in the foreseeable future. One process for bioenergy is the production of biomass by photobioreactor utilization. These reactors are mainly sealed, transparent containers that are used for providing suitable environment to cultivate algae. Photobioreactors catch, transport, channel and distribute sunlight into the cultivation area. Efficient use of biomass is possible with selection and use of a suitable reactor. When photobioreactors are applied on building facades, these facades gain a new function and are transformed into an energy production area. Thus, they reduce the carbon emission of buildings to the environment. In this study, types of reactors are investigated and integrating photobioreactors on facades the efficiency of bioenergy is explored in terms of a built example. Consequently, suggestions on integration of photobioreactors into facades will be presented.

**Key Words:** Photobioreactor, Biomass, Building facade, Sustainable building, Algae.

## 1. GİRİŞ

Güneş dünyanın ve insanoğlunun varoluşundan bu yana, yaşamın devamlılığını sağlayan temel bir enerji kaynağıdır. Ancak teknolojinin gelişmesiyle, güneş enerjisine verilen önem azalmıştır. Özellikle 20. ve 21. yüzyıllarda fosil enerji kaynakları tercih edilerek, insanların güneş enerjisinin önemini farkındalığına varamamalarından dolayı, güneş ikinci plana itilmiştir. Fosil kaynakların ise günden güne azalmasıyla, insanların çevreyi, doğayı, havayı, kısaca dünyayı korumak amacıyla, yeşil ve yenilenebilir, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmeleri, güneş enerjisinin kullanımını ve önemini

tekrar arttırmıştır. Bu sürdürülebilir enerji kaynaklarından birisi de biyoenerjidir. Hatta biyoenerjinin üretimi güneş ışığı sayesinde sağlanmaktadır.

Sürdürülebilir enerjinin ön plana çıkmaya başlamasıyla, güneş ışığını kullanarak biyoenerjiyi üretmek pek çok meslek alanının ve sektörün ilgisini çekmeye başlamıştır. Mimarlık da çeşitli sürdürülebilir enerji kaynaklarına ilgi göstermekle birlikte, biyoenerjiye de ilgi duymaya başlamıştır. Ama hala, mimaride sürdürülebilir enerji çok ilgilenilmeyen bir alandır. Oysaki mimari, uygulama potansiyeli yüksek bir alan olduğu için bu konu üzerine daha çok çalışmalar ve araştırmalar yapılmalıdır. Biyoenerjinin binalar yardımıyla üretilmesi, kullanılan binaların sürdürülebilirliğine katkıda bulunacak ve bir adım daha ileri götürecektir.

Biyoenerjinin yapılardan sağlanmasında, binanın elemanlarından biri olan cephelerde fotobiyoreaktörlerin kullanımı araştırılabilecek konular arasındadır. Fotobiyoreaktörler bina cephelerine uygulandığında, cepheler yeni bir işlev kazanmakta ve enerji üretimi için kullanılacak alanlara dönüşmektedirler. Cephelere fotobiyoreaktör eklenmesi ile hem cephe elemanlarının sürdürülebilirliği, hem de biyokütle enerjisinin etkinliği artırılabilir. Ancak cephelerde fotobiyoreaktör kullanımının nasıl geliştirileceği sorusuna yanıt bulmak gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, fotobiyoreaktörlerin tanıtılması ve çalışma koşullarının detaylı bir şekilde incelenmesi, yapı cephesinde hangi çeşitlerin daha verimli olduğu ve cephede fotobiyoreaktör uygulamasının bir örnekle gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, çalışmaya öncelikle fotobiyoreaktörlerle enerji üretiminde görevli algler genel olarak incelenerek başlanacaktır. Kavram olarak fotobiyoreaktör tanımı yapılacak, özelliklerine ve çalışma koşullarına bakılacak ve bu reaktörlerin sınıflandırılacaktır. Sonrasında cephesinde fotobiyoreaktör kullanılmış bir bina örneği tanıtılacaktır. Sonuç olarak, cephe tasarımında fotobiyoreaktörlerin kullanımı için geliştirilen fikirler sunulacaktır.

## 2. FOTOBİYOREAKTÖRLERLE ENERJİ ELDESİ

Fotobiyoreaktörlerle enerji eldesinden bahsederken, öncelikle güneş enerjisini kullanarak büyüyen algleri ve büyüme ortamları olan fotobiyoreaktörleri irdelemek gereklidir.

### 2.1. Algler

Günümüzde algler yiyeceklerin üretiminde, biyoaktif bileşimlerde, kimyasallarda kullanılmaktadırlar. Ayrıca biyokütle çeşitleri arasında da bulunmaktadır, hatta dünyanın bitki biyokütlesinin üçte birini algler oluşturmaktadırlar. Algler, çevrenin temiz tutulmasında da faydaları ile ilgi çekmektedirler [1]. Bu nedenle alglerin kullanımı sürdürülebilir enerjide unsurlardan biridir [2].

Algler, büyük çoğunluğu fotosentetik olmasına ve bitkilere benzemesine karşın, bitkiler alemiyle yakın akraba olmayan, vücut yapıları gerçek kök, gövde ve yaprak olarak farklılaşmamış olan, iletim demetleri bulunmayan ve klorofil-a içeren sucul canlılardır (Şekil 1) [3,4]. Algler tüm fotosentetik prokaryotik ve fotosentetik ökaryotik organizmaları temsil etmektedirler [5]. Birçok alg sucul ortamda yaşamakta olup, biyolojik karbondioksit (CO<sub>2</sub>) / oksijen (O<sub>2</sub>) döngüsünde görev almaktadır [5,6]. Diğer bitkiler gibi, algler de fotosentez yapabilmek için güneş ışığını kullanmaktadırlar. Üstelik algler fotosentez konusunda diğer gelişmiş bitki türlerinden daha verimlidirler, çünkü algler hücresel organizmalardır ve alg kolonisi içindeki her hücre fotosentez yapabilmektedir [2].

Alglerin de dahil olduğu biyokütlenin enerjiye dönüşümü sırasında CO<sub>2</sub> sıfırlanmaktadır. Burada fotosentez en önemli anahtardır, çünkü enerjiye dönüşüm sırasında yanarak serbest kalan karbonun miktarı, alglerin büyümeleri sırasında yaptıkları fotosentez tarafından emilen karbon miktarına eşittir [2].

Alglerin hacimce büyümesinin temelinde fotosentez vardır. Bu sebeple fotosentezin içerdiği bütün öğeler ve değişkenleri alglerin yetiştirilmesinde önemlidir. Bu öğeler ışıklandırma, karıştırma, su tüketimi, CO<sub>2</sub> tüketimi, ortamdan O<sub>2</sub> uzaklaştırılması, besin tedariki, sıcaklık ve pH'dır [5, 9].



**Şekil 1.** Algler ve sucul ortamda büyümeleri [7,8]

Alglerin yetiştirilmesi havanın durumuna veya yoğun tarım yöntemlerine bağlı değildir. Yetiştirilmelerinde, diğer enerji üretiminde kullanılan ürünler gibi ek tarımsal alanlara ihtiyaç duyulmaz; algler fotobiyoreaktörler içinde yetiştirilebilirler [2].

## 2.2. Fotobiyoreaktörler

Alglerin daha yüksek verimle gelişmelerini sağlamak için gerekli büyüme ortamları oluşturulmasında belli sistemler kullanılmaktadır [1]. Bu sistemler ya açık kültür sistemleri ya da kapalı sistemler olmakta, kapalı sistemler fotobiyoreaktör olarak adlandırılmaktadır [1, 5]. Fotobiyoreaktörler, açık sistemlere göre alglerin gelişme durumlarının ve ortam koşullarının kontrolüne daha iyi izin vermektedir. Ayrıca daha yüksek biyokütle üretimi elde edilmekte ve sistemdeki kirlilik daha kolay önenebilmektedir [1]. Fotobiyoreaktörlerde şeffaf ve sızdırmaz çeşitli plastik kaplar veya konteynerler kullanılmaktadır (Şekil 2) [2].



**Şekil 2.** Çeşitli fotobiyoreaktör örnekleri [10,11]

Fotobiyoreaktörler, alglerin biyokütle üretimi için güneş enerjisinden verimli bir şekilde yararlanmalıdır. Bu sebeple fotobiyoreaktörlerin çoğu ışıklandırmaya, güneş ışığına maruz bırakılmış, geniş yüzeylere sahiptirler [1]. Fotobiyoreaktörler güneş ışığını yakalamak, ulaştırmak, yönlendirmek ve alglerin yetiştirme alanı içine bu ışığı dağıtmakta kullanılmaktadırlar. Böylece her alge ulaşan ışık miktarını arttırmaya çalışmaktadırlar. Fotobiyoreaktörün verimliliğine de ışığı yakalamasına, ulaştırmasına, dağıtmasına ve kullanılmasına bakılarak karar verilmektedir [12]. Algleri barındıran bu kültür sistemleri güneş ışığı dışında, yapay ışıkla veya hem güneş hem yapay ışık birlikte kullanılarak aydınlatılabilirler (Şekil 3) [1].



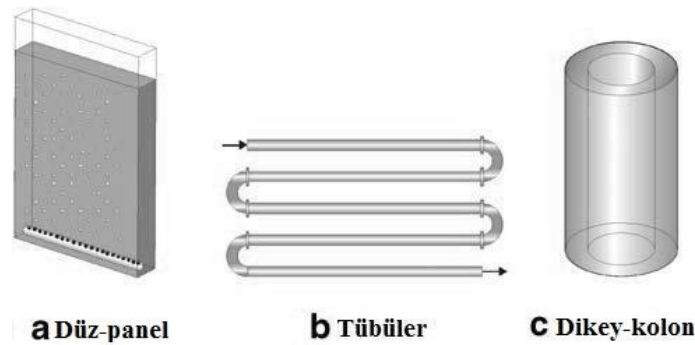
**Şekil 3.** Gün ışığı ve yapay ışık kullanan fotobiyoreaktörler [13,14]

Fotobiyoreaktörlerin geliştirilmesinde öncelikle reaktörler, alglerin verimli biyokütle yetiştirmesini üstlenmelidirler, alglerin içinde bulunduğu kültürün iyi bir şekilde çalkalanmasını sağlayacak karıştırıcı sisteme sahip olmalıdırlar [1,15]. Sonra açık hava güneş ışınımını, kapasitesinin en üst seviyesinde kullanabilmelidirler. Büyük ölçekli dış mekan fotobiyoreaktörleri, büyük hacme sahip olup, daha az yer kaplamalıdır. Ayrıca fotobiyoreaktörler şeffaf, yüksek aydınlatma yüzeylerine, yüksek biyokütle transfer oranlarına sahip olmalı ve yüksek biyokütle ürünleri vermelidirler. Her çeşit fotobiyoreaktörün tasarımı ve yapımı, sızdırmazlık tipine, ürün hedefine, coğrafi konuma ve üretimin toplam fiyatına bağlı olmalıdır [1].

Fotobiyoreaktörler biyokütle üretimlerinin verimli olarak gerçekleşmesini sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bunun için de etkili ışık kullanımı ve bunu sağlayacak yüzey-hacim oranı, yüksek yoğunluktaki kültürlerle çalışma imkanı, yüksek alansal ve hacimsel üretim, dengeli, kaliteli ve sabit bir üretim sağlama, yüksek oranda CO<sub>2</sub> transferine izin verilmesi ve en az miktarda CO<sub>2</sub> kaybı, dış alanlarda kurulduğunda en üst seviyede güneş enerjisinden yararlanma ve biriken O<sub>2</sub>'nin hızla uzaklaştırılmasını sağlama şartlarını gerçekleştirebilmelidirler [5].

### 2.3. Fotobiyoreaktör Çeşitleri

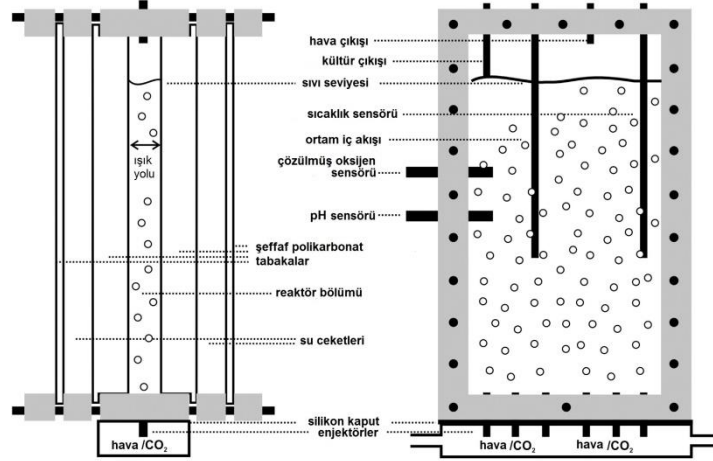
Yıllar içindeki araştırmalar sonucunda, yüksek olumlu özelliklere sahip, yaygın üretimi yapılan üç fotobiyoreaktör tasarımı ortaya çıkmıştır. Bunlar düz-panel, tübüler ve dikey-kolon sistemlerdir (Şekil 4). Bu tasarımların temel prensipleri ışık yolunu azaltmak ve böylece gerekli ışığın tüm alglere ulaşmasını sağlamak, iyi karıştırma sağlayarak ışığın dağılımını ve gaz transferini en uygun koşullarda sağlayabilmektir [5]. Adı geçen fotobiyoreaktör çeşitleri aşağıda detaylandırılmıştır.



**Şekil 4.** Düz-panel, tübüler ve dikey-kolon fotobiyoreaktörler [6]

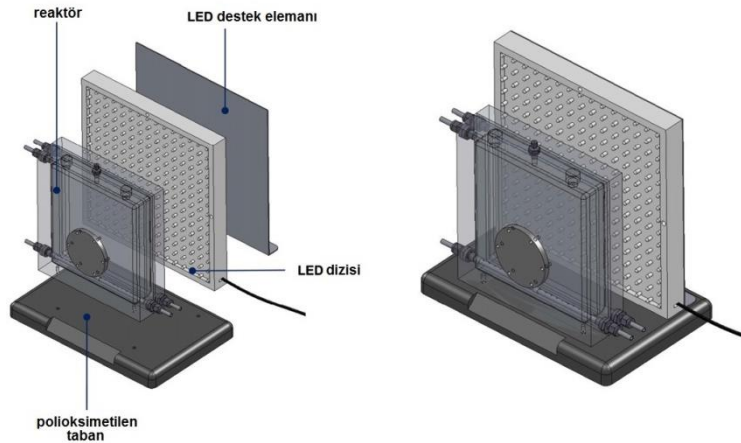
### 2.3.1. Düz-Panel Fotobiyoreaktörler

Düz-panel fotobiyoreaktörler, geniş ışıklandırma yüzey alanına sahip oldukları için fotosentetik organizmaların yetiştirilmesinde daha çok dikkati çekmektedirler. Diğer güneş panel sistemlerde olduğu gibi güneş enerjisinden en yüksek seviyede yararlanmak için şeffaf malzemelerden yapılmaktadırlar [1]. Ayrıca düz-panel fotobiyoreaktörlerin, tabanlarından ortama hava verilmesini sağlayacak şekilde dağıtıcı ünitesi olmaktadır (Şekil 5) [5].



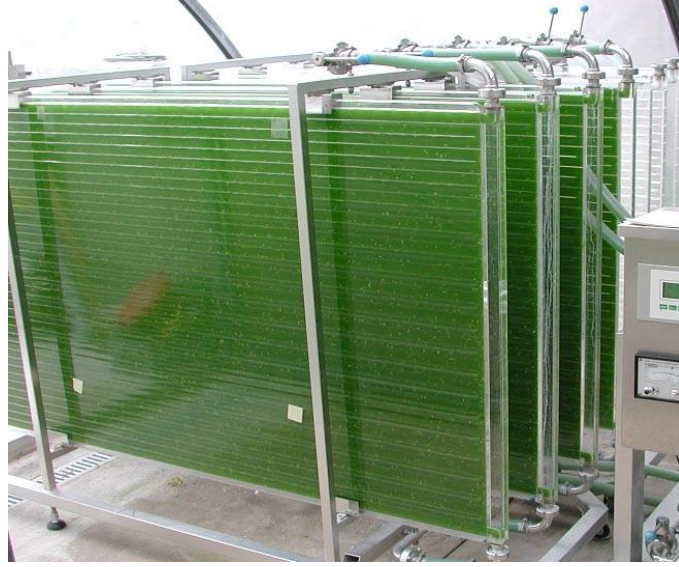
Şekil 5. Düz-panel fotobiyoreaktör kesitleri [16]

Yapay ışıklandırılmış düz-panel fotobiyoreaktörler çoğunlukla dikeydir ve ışık kaynağı reaktöre bir cepheden verilmektedir (Şekil 6). Dışarıda kullanılan düz-panel fotobiyoreaktörler ise tipik olarak belli açıda yana kaymış olmaktadır. Açılı olmaları güneş ışınımına uygun olmalarına izin vermektedir. Düz-panel fotobiyoreaktörler bağımlı olarak düşük kütle transfer oranına sahiptirler, çünkü paneller arasındaki ışık yolu olarak bilinen boşluk kısıtlıdır, bu da fotosentez yoluyla üretilen dağılmış  $O_2$ 'nin net verimliliğini azaltmaktadır. Reaktörde iyi  $O_2$  yayılma oranı için uygun algal biyokütle büyümesini başarmak gerekmektedir [15].



Şekil 6. Yapay ışıklı düz-panel fotobiyoreaktör [15]

Bu paneller içindeki dağılmış  $O_2$  toplanmasının birikmesi yatay tübüler fotobiyoreaktörlerle karşılaştırıldığında düşüktür. Yüksek yüzey-hacim oranı olduğu için, düz-panel fotobiyoreaktörler yüksek fotosentetik verimlilik başarmaktadırlar. Ayrıca alglerin biyokütle kültürleri ve dışarıda yetişen kültürler için çok uygundur (Şekil 7) [1]. İyi ışık yoluna sahiptirler, temizlenmeleri kolaydır, diğer fotobiyoreaktörlere kıyasla ucuzdur, az  $O_2$  ile daha fazla verim oluşturmaktadırlar [1].



**Şekil 7.** Düz-panel fotobiyoreaktörler [17]

Fakat düz-panel fotobiyoreaktörler bazı kısıtlamalara da sahiptirler. Reaktörü boyut olarak büyütme, daha fazla bölüm ve destek malzeme gerektirmektedir [1]. Reaktörlerin yüksekliği ve genişliği iki boyutlu olarak büyütme uygundur, ama pratik olarak sadece 2-3 m büyütme sınırındadırlar [15]. Fotobiyoreaktörlerin boyutça büyümesindeki kısıtlılıkların nedenleri arasında kültürün sıcaklık derecesini kontrol etmekte zorluk yaşanması sayılabilmektedir. Ayrıca bazı reaktörlerin duvarlarında alg büyümesi gözlemlenebilmektedir. Hatta sistemde oluşan hidrodinamik basınç bazı alg türlerinin büyümesini sınırlayabilmektedir [1].

### 2.3.2. Tübüler Fotobiyoreaktörler

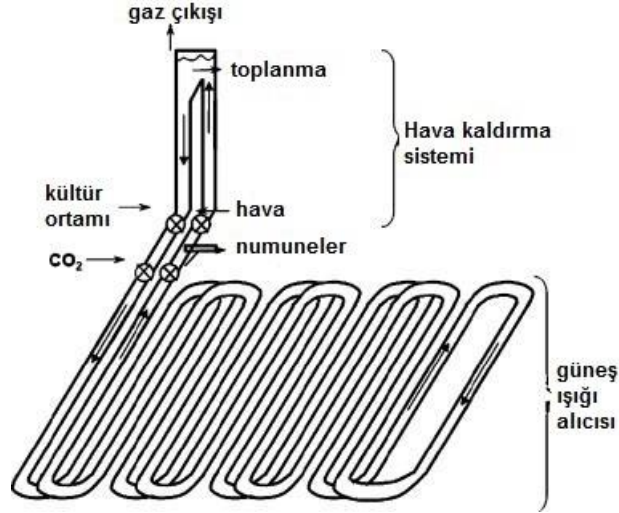
Tübüler fotobiyoreaktörler dışarıda yetişen biyokütle kültürleri için uygun reaktör türlerinden biridir. Dış ortamda kullanılan tübüler fotobiyoreaktörlerin çoğu genellikle ya camdan ya da plastik tüpten inşa edilmektedirler, yatık, yataya yakın, konik ve yatay şekillerde olabilirler (Şekil 8) [1]. Tübüler fotobiyoreaktörlerin avantajları olarak geniş ışıklandırma yüzey alanına sahiptirler. Dışarıda kültür üretimi için uygun olup, biyokütle üretkenlikleri oldukça yüksektir ve diğer sistemlere oranla ucuzdurlar [1].



**Şekil 8.** Yatık, konik ve yatay tübüler fotobiyoreaktörler [11,18,19]

Tübüler fotobiyoreaktörlerde havalandırma ve kültürlerin karıştırılması genellikle hava pompalama veya hava kaldırma sistemleri ile yapılmaktadır (Şekil 9). Bu reaktörler algerin dışarıda yetişen biyokütle kültürleri için çok uygundur çünkü geniş ışıklandırma yüzey alanına sahiptirler [1].





Şekil 9. Hava kaldırmalı tübüler fotobiyoreaktör [9]

Ama bu reaktörlerin ana kısıtlamalarından biri düşük biyokütle transferidir. Tübüler fotobiyoreaktörlerin boyutları büyütüldüğünde, düşük kütle iletimi nedeniyle reaktörün içinde çok yüksek çözölmüş  $O_2$  seviyelerine kısa zamanda erişilebilmektedir. Bu da ortamda verimin azalmasına neden olmaktadır [1]. Uzun tübüler fotobiyoreaktörlerde  $CO_2$  ve  $O_2$  transferi, tüpler boyunca yükseliş ve düşüş göstermektedir. Kültürlerin pH'ının artması, kültürlerin sık olarak karbonlaşmasına sebep olabilmektedir, bu da sonuç olarak alg üretiminin fiyatını arttırmaktadır [1].

Ayrıca her algin yeterince ışık alamaması sorunu, dış ortamdaki tübüler fotobiyoreaktörler içinde çok yaygındır, çünkü bir tübüler fotobiyoreaktörün tüp çapı arttırıldığında ışıklandırılmış yüzeyin hacme oranı azalmaktadır. Fakat bu sayede tüplerin uzunluğu mümkün olduğu kadar kısa tutulabilmektedir. Bu durumda, eğer iyi bir karıştırma sistemi yoksa gölgeleme sebebiyle, tüpün alt kısmındaki hücreler, büyümeleri için yeterli ışığı alamamaktadırlar. Her durumda, hücrelere verimli ışık dağılımı, ancak tüplerin içinde iyi bir karıştırma sistemi geliştirilmesi ile başarılabilir (Şekil 10) [1].



Şekil 10. Tübüler fotobiyoreaktörler [14]

Tübüler fotobiyoreaktörlerin çoğunda kültürün sıcaklık derecesini kontrol etmek zor olmaktadır. Reaktörler istenen kültür derecesinin devamlılığını sağlamak için termostat ile donatılmış olsalar da, bunu uygulamak çok güç ve pahalı olabilmektedir. Hücrelerin tüplerin duvarlarına yapışarak yığılması sorunu tübüler fotobiyoreaktörlerde yaygındır [1].

### 2.3.3. Dikey-Kolon Fotobiyoreaktörler

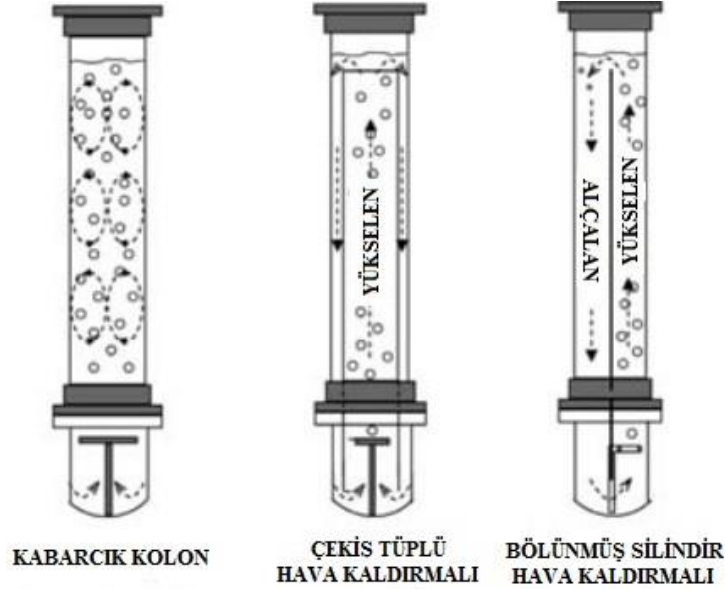
Dikey-kolon fotobiyoreaktörler silindirik yapıda olup çeşitli çalışma ilkesine sahip tasarımlarda ve ölçeklerde test edilmektedirler. Bunlar yoğun, düşük fiyatlı ve işletmesi kolaydır. Bu reaktörler geniş

ölçekte kullanıma uygundur [1]. Dikey kolon fotobiyoreaktörler havalandırma şekillerine göre kabarcık-kolon, karıştırmalı tank olarak iki çeşide ayrılmaktadırlar (Şekil 11).



**Şekil 11.** Dikey-kolon fotobiyoreaktörler [20,21]

Kabarcık-kolon fotobiyoreaktörlerin çapı 0,19 m ye kadarsa, son biyokütle yoğunlaşması ve büyüme oranı tübüler fotobiyoreaktördekilerle benzerlik göstermektedir. Kabarcık-kolon fotobiyoreaktörlerde hava aşağıdan verildiğinde kolonun içinde akış girdaplar halinde oluşmaktadır. Bunu önlemek için, kabarcık-kolonlar ya çekiş tüpleriyle donatılmakta ya da bölünmüş silindirler olarak yapılmaktadırlar. Çekiş tüplü fotobiyoreaktörlerde, ortaya çekme amaçlı bir tüp yerleştirilmekte ve karışma çekiş tübünün duvarlarında yükselen ve alçalan bölgeler arasında oluşmaktadır [1]. Bölünmüş fotobiyoreaktör çeşitlerinde ise silindirin bir yarısında yükselen bölge, diğer yarısında ise alçalan bölge olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 12).



**Şekil 12.** Kabarcık-kolon ve hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler [22]

Dikey-kolon fotobiyoreaktörler iyi karıştırma koşullarında yüksek biyokütle transferi ve düşük kesme kuvveti, düşük enerji tüketimi gibi avantajlara sahiptirler. Ölçeklendirme konusunda yüksek potansiyelleri vardır. Kolay temizlenebilir. Alginin ışık alımının engellenmesini ve ışıktan dolayı oksitleşmeyi azaltmaktadırlar. Bu reaktörlerin kısıtlamaları ise, dar ışıklandırma yüzey alanına sahip olmaları, inşa edilmeleri için nitelikli malzeme gereksinimi ve yeterli karıştırma olmadığında alg kültürlerinin üstüne yüksek kesme kuvveti binmesidir. Reaktörlerin boyutları büyütüldüğünde, ışıklandırma yüzey alanı azalmaktadır [1].

## 2.4. Fotobiyoreaktörlerde Alg Üretimini Etkileyen Değişkenler

Uygun fotobiyoreaktör seçiminde yukarıda anlatılan farklı türler ortak değişkenler ışığında incelenmelidir. Bu noktada öne çıkan değişkenler ışıklandırma, biyokütle transferi ve boyutta yapılabilecek ölçeklendirmedir. Fotobiyoreaktör çeşitlerinin özelliklerini daha iyi gözler önüne sermek için, bu değişkenler ana hatlarıyla aşağıdaki Tablo 1'de özetlenmiştir [15]. Bu tablodan yararlanarak hangi fotobiyoreaktör çeşidinin daha verimli olacağı hakkında eğitimli bir tahmin yapılabilmektedir.

**Tablo 1.** Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenler

Fotobiyoreaktör Çeşitleri	Işıklandırma	Biyokütle transferi	Ölçeklendirme
Düz-panel	Geniş yüzey-hacim oranı  Dışarıda uygulama için yana çarpık, açılı tasarım olasılığı	Işığın giderek içeri doğru azalmasını kontrolde zorlanma  Algin bozulması olasılığı	Kullanım aşamasında esneklik  İki boyutlu büyütme uygunluk
Tübüler	Geniş ışıklandırma yüzey alanı  Dışarıda uygulama için konik geometri tasarımları	Tüpler boyunca yüksek gaz gradyanlarının ortaya çıkması	Ek borularla ilave bölümler, kollar
Dikey-kolon	Düşük yüzey-hacim oranı	İyi karıştırma sağlaması  Alg kültürlerinin üstünde düşük kesme kuvveti	Boyutun büyütülmesiyle ışıklandırma alanının azalması  Özel malzeme gereksinimi

## 3. BİYOADAPTİF CEPHELİ BİNA

Fotobiyoreaktörler bina cephelerine uygulandığında, cepheler yeni bir işlev kazanmakta ve enerji üretimi için kullanılacak alanlara dönüşmektedir. Bina cephelerinde fotobiyoreaktörlerin uygulanmasıyla ilgili ilk örnek Almanya, Hamburg'ta yapılmıştır. Dünyanın ilk biyoadaptif cephe örneğine sahip olan bina, Avusturyalı mimarlar Splitterwerk ve Graz tarafından tasarlanmıştır. Arup mühendislik firması ile beraber, Smart Material House yarışması için bu binayı tasarlayıp, birincilik ödülünü kazanmışlardır. Yapı 2013 yılında Uluslararası Bina Sergisi kapsamında, Hamburg'ta inşa edilmiştir (Şekil 13) [2].

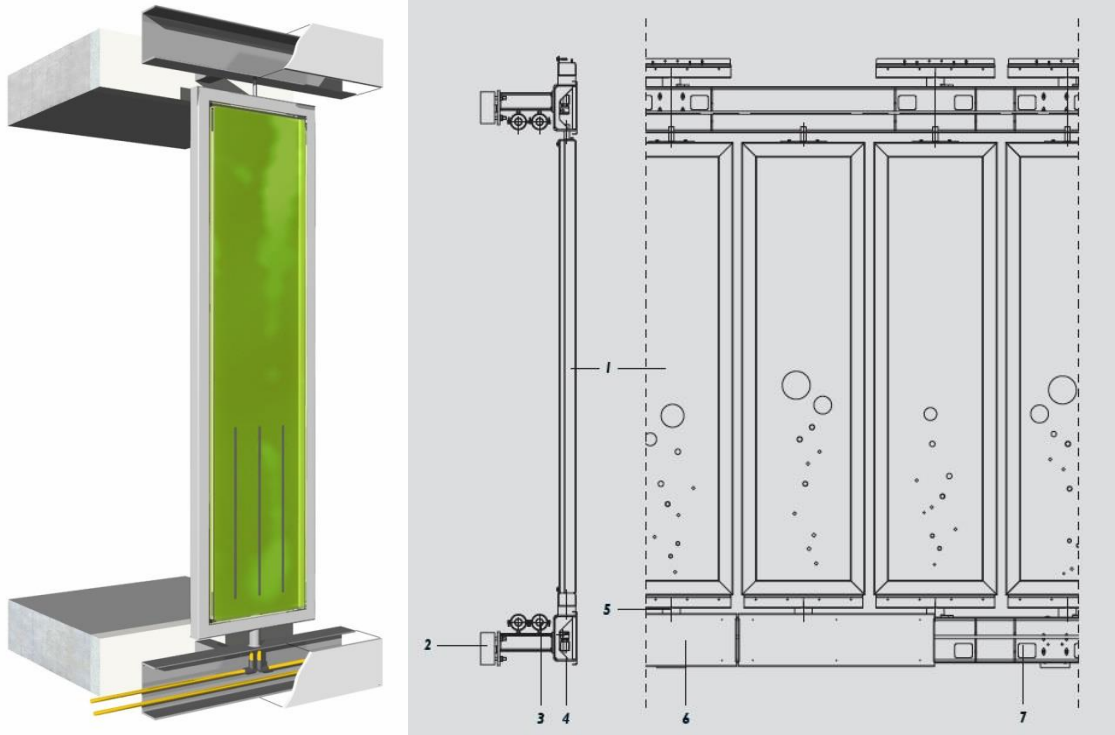
Konut yapısı, ikinci bir deri özelliğindeki fotobiyoreaktör cephe ile kaplanmıştır. Bu şekilde iç ve dış ortam arasında bir tampon bölge oluşmuştur. Sistem binaya hem güneş ısı enerjisi hem de biyokütle enerjisi sağlamaktadır ve binanın enerji ihtiyacına katkı sağlamıştır [2].

Yarışma tasarım sürecinde çeşitli denemelerde farklı fotobiyoreaktör uygulamaları araştırılmıştır. Bu noktada, düz-panel fotobiyoreaktördeki biyokütle güneş ışığını %10 verimlilik ile dönüştürmüştür. Düz-panel fotobiyoreaktörler tübüler fotobiyoreaktörlerden sadece daha verimli olmakla kalmamış, ayrıca daha az bakım ve onarım gerektirmişlerdir [2].



Şekil 13. Hamburg'ta biyoadaptif cephe bina [23]

Net yüzey alanı  $200 \text{ m}^2$  olan cephe sisteminin 129 fotobiyoreaktör elemanından oluşan pilot proje, 2013 ilkbaharında, 4 katlı bir konutta hayata geçirilmiştir. Sistem için güneybatı ve güneydoğu cephelerine ikincil bir strüktür monte edilmiştir. Her bir düz-panel 2,5 m yüksekliğinde, 0,7 m genişliğindedir (Şekil 14). Besin desteğini kontrol eden, alg toplayan bina enerji yönetim sistemi, iç ve dış çevrim sistemini ve bir ara yüz yardımıyla bina servis sistemini denetlemektedir. Bu ara yüz yardımıyla alglerin içeriği ve ortamın sıcaklık derecesi izlenmektedir. Sabit üretim oranında sıcaklık  $40^\circ\text{C}$ 'nin altında olmalıdır. Güneş etkisiyle ortaya çıkan ısı dağıtılmazsa sistem aşırı ısınabilmektedir. Aşırı ısı, ısı değiştiriciler ile sistemden dışarı atılmaktadır. Atılan ısı ya direk sıcak su eldesi için kullanılmaktadır ya da jeotermal kuyularla zeminde depolanmaktadır [2].



Şekil 14. Binanın cephesindeki düz-panel fotobiyoreaktörün yapısı, kesiti ve görünüşü [23,24]

Cephedeki her metrekare için, günde 15 gr alg biyokütlesi üretileceği tahmin edilmektedir. Üretilen biyokütle, düzenli aralıklarla biyogaz üretim makinesinin yakınına toplanmakta ve depolanmaktadır (Şekil 15). Bu binanın fotobiyoreaktör cephelerinin her yıl 30 kWh/m<sup>2</sup> biyokütle ve 150 kWh/m<sup>2</sup> ısı enerjisi üreteceği tahmin edilmektedir. Bütün cepheler her yıl binanın CO<sub>2</sub> salınımını 6 ton azaltacak ve 2,5 ton CO<sub>2</sub> biyokütle tarafından emilecektir. Bu binada bir yıl boyunca yapılan ölçümler sonucunda, fotobiyoreaktör sisteminde ışığın biyokütleye dönüşüm verimliliği %10, ısıya dönüşüm verimliliği ise %38'dir [2, 25].



Şekil 15. Makine dairesi [25]

#### 4. BİNA CEPHELERİNDE FOTOBİYOREAKTÖRLER

Yukarıdaki örnek binada da görüldüğü gibi CO<sub>2</sub>, fotobiyoreaktörler yardımıyla biyokütle üretiminin ham maddesidir. Günümüzde çeşitli şekillerde çevreye karbon salımının gitgide arttığını düşündüğümüzde, özellikle kalkınmakta ve gelişmekte olan ülkelerin CO<sub>2</sub> salımları daha da artmaktadır. Ama Kyoto Protokolü'nün önerdiği, yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması, sürdürülebilirliğin desteklenmesi gibi önlemler ile ülkeler, CO<sub>2</sub> salımlarını azaltmaya ve sıfır karbon çözümler geliştirmeye zorlayacaktır. Bunun için de çeşitli yöntemler önerilecek ve bu önerilerde kullanılan elemanlardan biri de yapılar olacaktır.

Yapılarda CO<sub>2</sub> salımını azaltmakta kullanılabilecek en önemli stratejilerden biri, içinde güneş enerjisinin de bulunduğu yenilenebilir enerji teknolojilerinden yararlanmaktır. Türkiye'de yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saattir. Yapılarda güneş enerjisinden yararlanmakta yaygın kullanılan başlıca teknolojiler fotovoltaik, sıcak su eldesi, ısı pompaları ve pasif sistemlerdir. Fotovoltaik panellerden güneş enerjisinin elektriğe çevrimi %12-15 verimlidir ve Türkiye ortalamasına göre günde 3,6 kWh/m<sup>2</sup> elektrik üretilebilmektedir, ancak bu sistemlerin soğutma sorunu bulunmaktadır. Güneşle sıcak su elde sistemleri ise %60-65 verimliliğe sahiptirler ve günde elde edilebilecek enerji miktarı ise 308,0 cal/cm<sup>2</sup>'dir [26]. Fotobiyoreaktörler de güneş enerjisinden yararlanan ve bu çalışmada önerildiği üzere yapılara eklenebilen sistemlerdir.

Fotobiyoreaktörlerin verimi günümüzde diğer güneş sistemleri ile karşılaştırıldığında, daha düşük olsa da geliştirilmekte olan bir teknolojidir ve bu reaktörler alglerden elektrik, biyogaz, ısı ve hidrojen gibi çeşitli enerji kaynakları üretiminde kullanılabilir. 1 ton algin büyüebilmesi için 1,8 ton CO<sub>2</sub>'e ihtiyaç duyduğu bilindiğinde [27], güneş enerjisi açısından son derece zengin olan ülkemizde fotobiyoreaktörler yardımıyla cephelerden enerji üretiminde yapılacak çalışmalar ve öneriler cephelerden enerji sağlamaya geçişte ışık tutacaktır ve fotobiyoreaktörler cephe elemanı olarak yapılardaki CO<sub>2</sub> salımlarını azaltmakta anahtar bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır.

Fotobiyoreaktör cephelerin özellikleri: güneş ışığının biyokütle ve ısıya dönüştürmesi, yerel depolama ve güneş ısı enerjisi olarak kullanımı, sürdürülebilir enerji tasarımı, sıfır CO<sub>2</sub>'e yaklaşması, güneş ışınımı yoğunluğunun artmasıyla şeffaflık ve camdaki toplam enerji iletiminin azalması nedeniyle dinamik ve adaptif gölgeleme etkisi, oluşan hava kabarcıkları ve alglerin renklerinin çeşitlenmesiyle yaratılan, yaşayan ve dinamik kullanıcı deneyimi, ayrıca yüksek ısı ve akustik yalıtım ve giydirme cephe sistemleri gibi uygulanabilir olmasıdır [25].

Fotobiyoreaktör cepheler, dinamik bir sistemdir. Alg biyokütlesini ve güneş ısını kullanarak, cephelerden yenilenebilir enerjinin üretiminde kullanılmaktadır. Bu sistemin binalara entegrasyonu hem yeni hem var olan binalar için ve endüstriyel, ticari, konut ve kamusal binalar için uygundur [25]. Farklı yapı türleri için şu şekilde değerlendirilebilir:

Fotobiyoreaktörlerin endüstriyel bölgelerdeki yapılara uygulanabilmesi, hem çevreye yaptığı CO<sub>2</sub> salımını yine kendilerinin kullanmalarını, hem de bundan elektrik, ısı ve biyokütle enerjisi üretmelerini sağlayacaktır. Üstelik sanayi tesislerindeki yapılar olduğundan daha sürdürülebilir bir yapı özelliği kazanacaktır. Endüstriyel yapılarından büyük hangarların, depoların ve sanayi tesislerinin 5-6 m yüksekliğe sahip kör cepheleri artık kör olmaktan çıkıp, yeni bir işlev kazanmış olacaktır. Bu cepheler güneş ışığından yoksun bir yerde ise, istenilen biyokütle üretimini sağlamak için fotobiyoreaktörlerin açılı şekilde cephelere uygulanması gerekecektir.

Şehir merkezindeki konut cephelerine fotobiyoreaktör monte edilmek istendiğinde, bunun için ikinci kat ve üstü ya da en üst katlarda kullanımı güneş ışığından verimli şekilde faydalanmak için uygun olacaktır. Ayrıca konutların kat yüksekliği 2-2,5 m arasında değişmektedir, oysa sanayi yapılarında bu yükseklik ve dolayısıyla cephe alanı daha fazla olacağından konutlardan elde edilen enerji sanayi yapılarına göre daha az olacaktır.

Kamusal binaların cephelerinde fotobiyoreaktörlerin kullanımı ise, bu binalarda giydirme cephe tercih edildiğinde daha mümkün olacaktır. Çünkü giydirme cepheler hem yapıyı kullanan şirket ya da kurum açısından prestij elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

## SONUÇ

Bu çalışmada bina cephelerinde fotobiyoreaktörlerin nasıl uygulanabileceğinin araştırılmıştır. Öncelikle fotobiyoreaktör ve onun içinde yetişen alg kavramının ne olduğu, fotobiyoreaktörlerin özellikleri ve çeşitleri incelenmiştir. Bu sayede reaktör çeşitlerinin verimleri, avantajları ve kısıtlamaları değerlendirilmiştir. Fotobiyoreaktörlerde alg üretimini etkileyen değişkenlere göre fotobiyoreaktör çeşitlerinin olumlu ve olumsuz özellikleri verilmiştir.

Ana değişkenler olarak ışıklandırma, biyokütle transferi ve ölçeklendirme göz önüne alınmıştır. Güneş ışığından daha fazla yararlanabilmek için, düz-panel ve tübüler sistemler kullanılmıştır. Tübüler sistemlerde kütle transferi düşük gerçekleşmektedir. Reaktörlerin boyutları büyütülmek istendiğinde düz-panel ve tübüler fotobiyoreaktörlerde zorluklarla karşılaşmıştır. Dikey-kolon fotobiyoreaktörler ise ölçeklendirilebilirlik açısından kullanışlı olmuştur ama yüzeylerinde düşük ışıklandırma alanına sahip oldukları için dış ortamda kullanımları sınırlı kalmıştır [1].

Biyoenerjinin yapılardan sağlanmasına, bina cephelerinde fotobiyoreaktörlerin kullanımına dair bir örnek incelenmiştir. Bu örnek bina, CO<sub>2</sub> salımını en düşük noktaya getirebilmek için, cepheler ve özellikle diğer sistemler arasındaki sinerjiye ulaşmak için tasarlanmıştır. Burada bu çeşitli sistemler arasında bina teknolojisi, enerji, ısı dağılımı ve su sirkülasyonu bulunmaktadır. Denemeler sonucunda çeşitli fotobiyoreaktör çeşitlerinden yola çıkılarak, uygulanması, onarımı, bakımı ve verimliliği açısından düz-panel fotobiyoreaktörlerin en verimli olacağı ortaya konmuştur [25].

Bu çalışmada, cephelere fotobiyoreaktör eklenmesi ile hem cephe elemanlarının sürdürülebilirliği, hem de biyokütle enerjisinin etkinliği artırılması önerilmektedir. Yıllar geçtikçe fotobiyoreaktörlerin cephelerde kullanımı, teknolojik gelişmeler sayesinde artmaya devam edeceği öngörülmektedir. Bu

gelişmeler arasında cephe teknolojilerinin yapısal ilerlemeleri ve sürdürülebilir enerji üzerine çalışmaların geliştirilmesi sayılabilmektedir. Fotobiyoreaktörlerin araştırılan özellikleri, daha pratik ve farklı malzeme kullanımlarıyla, farklı birleşim şekilleriyle geliştirilecek ve enerji verimliliği daha yüksek fotobiyoreaktörler farklı yapı türlerinde denenerek yaygınlığı ve tercih edilirliliği arttırılacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] UGWU, C.U., AAYAGI, H., UCHIYAMA, H., “Photobioreactors for mass cultivation of algae”, *Biosource Technology*, 99, 4021- 4028, 2007.
- [2] WURM, J., “The bio-responsive facade” *Detail Green*, 2013(1), 62-65, 2013.
- [3] WIKIPEDIA, *Su yosunları*, (b.t.). 23 Aralık 2014, [http://tr.wikipedia.org/wiki/Su\\_yosunlar%C4%B1](http://tr.wikipedia.org/wiki/Su_yosunlar%C4%B1)
- [4] *Alg*, (b.t.). 23 Aralık 2014, Türk Dil Kurumu, BSTS/Su Ürünleri Terimleri Sözlüğü, [http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com\\_bilimsanat&arama=kelime&guid=TDK.GTS.5499d0cf\\_eb0a84.85303587](http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_bilimsanat&arama=kelime&guid=TDK.GTS.5499d0cf_eb0a84.85303587)
- [5] CONK DALAY, M., İMAMOĞLU, E., ÖNCEL, S. “Mikroalgal Biyokütle Üretimi İçin Düşük Maliyetli Fotobiyoreaktör Tasarımı”, TÜBİTAK MAG, Proje No: 104M354, 2008.
- [6] ŞAHİN, Y., AKYURT, İ., “Planktonlar ve Fotobiyoreaktörler”, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 1 (2), 83-92. 2010.
- [7] *Doğal yaşam ortamı deniz olan bir alg türünün diğer canlılarla olan ortak özellikleri nelerdir?* (b.t.). 25 Aralık 2014, <http://www.mynet.com/haber/foto-analiz/8-dogal-yasam-ortami-deniz-olan-bir-alg-turunun-diger-canlilarla-olan-ortak-ozellikleri-nelerdir-600174-9>
- [8] *Algler Nedir? Görevleri Nelerdir?* (b.t.). 25 Aralık 2014, <http://www.bilgiustam.com/algler-nedir-gorevleri-nelerdir/>
- [9] KUNJAPUR, A.M., ELDRIDGE, R.B., “Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 3516-3526, 2010.
- [10] *Alg üretim sistemleri*, (10 Haziran 2013). 25 Aralık 2014. <http://denizyosunspirulina.blogspot.com.tr/2013/06/alg-uretim-sistemleri.html>
- [11] *Çukurova Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Su Ürünleri Temel Bilimleri Bölümü*, (b.t.). 25 Aralık 2014, <http://suurunleri.cu.edu.tr/tr/detay.aspx?pageId=1500>
- [12] ZIJFFERS, J.W.F., JANSSEN, M., Tramper, J., WIJFFELS, R.H., “Design Process of an Area-Efficient Photobioreactor”, *Mar Biotechnol*, 10, 404-415, 2008.
- [13] *Algal Greenhouse Up and Running*, (b.t.). 25 aralık 2014, <http://iowaepscor.org/news/2013/algae-openhouse-2013>
- [14] *Spirulina Yetiştiriciliği*, (18 Eylül 2013). 25 Aralık 2014, <http://denizyosunspirulina.blogspot.com.tr/2013/09/spirulina-yetistiriciligi.html>
- [15] TAMBURIC, B., ZEMICHAEL, F.W., CRUDGE, P., MAITLAND, G.C., HELLGARDT, K., “Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 6578–6591, 2011.
- [16] BAHADAR, A., KHAN, M.B., “Progress in energy from microalgae: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 128-148, 2013.
- [17] WIKIPEDIA, (b.t.). 25 Aralık 2014, [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photobioreactor\\_PBR\\_500\\_P\\_IGV\\_Biotech.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photobioreactor_PBR_500_P_IGV_Biotech.jpg)
- [18] *GICON and Anhalt University of Applied Sciences receive Hugo Junkers Award for the “Christmas Tree Reactor” for cultivation of microalgae*, (9 Aralık 2013). 25 Aralık 2014, <http://www.gicon.de/az/aktuelles/nachrichtenliste-aktuell/newsdetails/archive/2013/december/09/article/gicon-and-anhalt-university-of-applied-sciences-receive-hugo-junkers-award-for-the-christmas-tree-r.html>
- [19] *Mikroalgen als Energielieferanten?* (2 Nisan 2011). 25 Aralık 2014, <http://bio-pro.de/magazin/thema/06273/index.html?lang=de&artikelid=/artikel/06956/index.html>
- [20] *National Institute of Ocean Technology*, (b.t.). Activities during 2011-2012, 25 Aralık 2014, <http://www.niot.res.in/index.php/node/index/177/>
- [21] *Biomate India*, (b.t.). Fermentor Bioreactor, 25 Aralık 2014, <http://www.fermentor.co.in/fermentor-bioreactor.html>
- [22] FERNANDEZ SEVILLA, J. M., CERON GARCIA, M. C., SANCHEZ MIRON, A., EL HASSAN BELARBI, GARCIA CAMACHO, F., MOLINA GRIMA, E., “Pilot-Plant-Scale Outdoor Mixotrophic



- Cultures of *Phaeodactylum tricornutum* Using Glycerol in Vertical Bubble Column and Airlift Photobioreactors: Studies in Fed-Batch Mode”, *Biotechnology Progress*, 20(3), 728-736, 2008.
- [23] *Research and practice: The bio-responsive façade*, (b.t.). 25 Aralık 2014, <http://detail-online.com/inspiration/research-and-practice-the-bio-responsive-facade-106313.html>
- [24] *SolarLeaf, the bioreactor façade by ARUP*, (21 Ekim 2013). 25 Aralık 2014, <http://www.metalocus.es/content/en/blog/solarleaf-bioreactor-fa%C3%A7ade-arup>
- [25] ARUP, Solarleaf Bioreactor Façade Broşürü, 2013.
- [26] *Elektrik İşleri Etüt İdaresi Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Türkiye’de Güneş Enerjisi* (b.t.). 09 Ocak 2015, <http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/gunes/tgunes.html>
- [27] ULUSOY, Y., “Enerji ve Algler (Mikro-Makro Algler)”, (b.t.). 09 Ocak 2015, <http://yahyau.home.uludag.edu.tr/documents/algler.pdf>

## ÖZGEÇMİŞ

### İlknur KÜKDAMAR

1988 yılı Eskişehir doğumludur. 2012 yılında İzmir Ekonomi Üniversitesi Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümünden mezun olmuştur. 2013 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Bölümü Yapı Bilgisi Anabilim Dalı’nda yüksek lisansa başlamıştır ve halen devam etmektedir. Biyoadaptif Cephe Elemanları konusunda çalışmalar yapmaktadır.

### Ayça TOKUÇ

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık bölümünden 2001 yılında mezun olmuştur. Dokuz Eylül Üniversitesinden 2005 yılında yüksek mimar, 2013 yılında doktor unvanını almıştır. 2001-2013 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmış, 2013 yılından itibaren aynı bölümde yardımcı doçent olarak çalışmalarına devam etmektedir. Binalarda enerji etkinlik, ısı enerji depolama, ısı konfor, mimaride sürdürülebilirlik ve karbon konularında çalışmaktadır.