

Erdogan, E., et al., Hava Bazlı Proteinin Alternatif Bir Protein Kaynağı Olarak Kullanım Olanaklarının İncelenmesi. International Journal of Life Sciences and Biotechnology, 2022. 5(3): p. 643-668  
DOI: 10.38001/ijlsb.1096533

## Hava Bazlı Proteinin Alternatif Bir Protein Kaynağı Olarak Kullanım Olanaklarının İncelenmesi

Elif Erdogan<sup>1</sup> , Orhan Kaya<sup>1,2</sup> , Esra Derin<sup>1,2</sup> , Busra Cakaloglu Ebcim<sup>1,2,\*</sup> 

### ÖZET

Sürdürülebilir kaynakların araştırılması gıda endüstrisinde günden güne artan bir öneme sahip olmaktadır. Bu noktada alternatif protein kaynakları, üretimde kullanılan doğal kaynakların sınırlı olması ve hızlı nüfus artışı nedenleriyle popüler araştırma konusu olmuştur. Yapılan araştırmalara göre mevcut tüketim alışkanlıkları ve nüfus artışıyla devam edilirse; 2050 yılına gelindiğinde dünya nüfusuna yeterli protein kaynağının sağlanması için protein mahsullerinin 2005 yılına göre %110 daha fazlasına ihtiyaç duyulacaktır. Tarımsal alanların azalması ve küresel ısınma neticesinde biyoçeşitliliğin zarar gördüğü gerçeği hesaba katıldığında, gelecekte kaliteli protein ve içilebilir su kaynaklarına erişim konusunda sıkıntı çekileceği öngörülebilmektedir. Tek hücre proteini (THP); biyoprotein, mikrobiyal protein veya biyokütle olarak adlandırılan kurutulmuş hücre topluluğudur. THP; mantarlar, mayalar, algler ve bakteriler gibi birçok farklı mikroorganizmalardan elde edilebilmektedir. Hava bazlı protein (HBP) ise Hidrojen Oksitleyici Bakteriler (HOB)'in biyoreaktörlerde çoğaltılıp, saflaştırılıp kurutulması ile elde edilen bir THP'dir. Elde edilen biyokütle, proteine ek olarak lipid, karbonhidrat, vitamin ve mineral kaynağı da sağlamaktadır. Bu sebeple HBP, alternatif ve sürdürülebilir bir protein kaynağı olma potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmada; THP, HOB ve HBP hakkında yapılan araştırmalar derlenmiş ve HBP'lerin kullanım potansiyeline bir ışık tutulması hedeflenmiştir.

### MAKALE GEÇMİŞİ

Geliş

04 Nisan 2022

Kabul

22 Temmuz 2022

### ANAHTAR KELİMELELER

Tek hücre proteini, hidrojen oksitleyici bakteriler, hava bazlı protein, alternatif protein kaynakları, sürdürülebilirlik

<sup>1</sup> Pınar Entegre Et ve Un Sanayi A.Ş., 35730, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir, Türkiye

\* Corresponding Author: Büşra Çakaloğlu Ebcim [busra.cakaloglu@pinaret.com.tr](mailto:busra.cakaloglu@pinaret.com.tr)

# An Investigation of the Possibilities of Using Air-Based Protein as an Alternative Protein Source

## ABSTRACT

Day by day, the researches on sustainable sources are gaining more importance in the food industry. At this point, alternative protein sources became a popular research topic due to the limitation of natural resources used in food processing and rapid population growth. It is stated that, If the current consumption trends and population growth are maintained, 110% more protein crops will be needed compared to 2005 to provide sufficient protein for the world population in 2050. Considering the damaging results of decrease in agricultural areas and global warming to biodiversity, it is predictable that there will be difficulties to access of qualified protein and potable water in the future. The single-cell protein (SCP) refers to dried cells of microorganism and also called as bioprotein, microbial protein, or biomass. SCP can be obtained by many different microorganisms such as fungi, yeasts, algae, and bacteria. Air-based protein (ABP) is an SCP obtained by growing, purifying, and drying of Hydrogen Oxidizing Bacteria (HOB) in bio-reactors. The obtained biomass is a source of lipids, carbohydrates, vitamins and minerals in addition to protein. For this reason, ABP has a potential as an alternative and sustainable protein source. In this study, besides reviewing of researches on SCP, HOB and ABP, it was aimed to shed a light on the potential areas of the ABP usage.

## ARTICLE HISTORY

**Received**

04 April 2022

**Accepted**

22 July 2022

## KEYWORDS

Single cell protein,  
hydrogen oxidizing  
bacteria,  
Air-based protein,  
Alternative protein  
sources,  
Sustainability

## Giriş

Dünya nüfusunda meydana gelen hızlı artış ve iklim değişiklikleri nedeniyle meydana gelebileceği düşünülen tarımsal verimlilikteki düşüş küresel gıda güvenliği ile ilgili endişeleri artırmaktadır [1]. Dünya nüfusundaki bu artışın önümüzdeki yıllarda da devam edeceği ve Birleşmiş Milletler (BM)'in tahminine göre bugün 7,7 milyar olan insan nüfusunun 2050 yılına kadar 9,7 milyara ulaşacağı öngörülmektedir [2]. Tilman ve arkadaşlarının [3] tahminine göre artan nüfusa yeterli miktarda protein kaynağı sağlamak için 2050 yılında gerekecek olan tarımsal protein mahsulü 2005 yılına göre % 110 fazla olacaktır. Öte yandan tarımsal alanlar günümüzde çöl olmayan ve buzla kaplı olmayan arazinin yaklaşık %43'ünü kapsamaktadır. Tarımsal üretimin, dünya nüfusunun artmasına paralel olarak artacak olan tarımsal protein talebini karşılaması durumunda ise bu yüzde daha da yükselecek ve biyoçeşitlilik olumsuz yönde etkilenecektir [4]. Ayrıca hayvansal kaynaklı protein arzının küresel tüketim talebini karşılayabilmesi için et üretimi miktarının 2050 yılına kadar iki katına çıkması beklenmektedir. Mevcut durumda 1 kg dana eti üretimi için yaklaşık 15,5 ton su kullanılması, 1 kg tavuk eti üretimi için ise 3,9 ton su kullanılması, temiz su kaynaklarının gelecekte daha hızlı tükeneceğini göstermektedir [5]. Buna bağlı olarak,

zaten kısıtlı olan arazi kaynaklarının hayvancılık ve su ürünleri yetiştiriciliğinde kullanılan protein ağırlıklı yem üretimi için de ayrılması gerekmektedir [6, 7].

Proteinler, hücre onarımı ve yenilenmesinde, çocukların büyüme ve gelişiminde etkili olup diyetle yer alması gereken temel besin öğeleridir [8]. Özellikle içerdikleri fenilalanin, valin, treonin, triptofan, izolösin, metionin, histidin, lösin ve lizin gibi zorunlu amino asitler, insan vücudu tarafından üretilmediği için yaşam boyu besinler yoluyla alınması gerekmektedir [9-11]. Günlük beslenmeyle alınması gereken protein ihtiyacı yaş, kilo, cinsiyet ve fizyolojik durumlar (hamilelik, emzirme, spor yapma, hastalık) gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [11, 12]. Beslenmeyle alınabilecek protein kaynakları hayvansal ve bitkisel olmakla birlikte hayvansal kaynaklı proteinler zorunlu amino asitler bakımından daha zengindir [13]. Tablo 1’de çeşitli faktörlere bağlı kilogram vücut ağırlığı başına günlük alınması gereken protein miktarı (g) verilmiştir. Tablo 2’de ise yaş gruplarına göre gerekli zorunlu amino asit miktarları (mg/g protein) görülmekte olup büyüme çağında zorunlu amino asitlere gereksinimin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır [11].

**Tablo 1** Değişik faktörlere göre günlük gerekli protein miktarları [8]

**Table 1** Daily protein requirements based on different factors[8]

Gruplar	Alt grup	Protein (g/kg-gün)
Bebekler	6-12 ay	1,0
Çocuklar	1-3 yaş	0,87
	4-8 yaş	0,76
Erkekler	9-13 yaş	0,76
	14-18 yaş	0,73
	>19 yaş	0,66
Kadınlar	9-13 yaş	0,76
	14-18 yaş	0,71
	>19 yaş	0,66
Hamilelik dönemi	14-50 yaş	0,88
Emzirme dönemi	14-50 yaş	1,05

Dünya nüfusunun hızlı artışı ve iklim değişikliğinin, günümüzde zaten var olan gıda güvenliği ve yetersiz beslenme gibi olguların artmasına neden olacağı öngörülmektedir [14]. Dünyada eşit olmayan gelir dağılımı nedeniyle kaliteli proteine erişim

sağlanamaması, özellikle gelişmekte olan ülkelerde yetersiz beslenmeye neden olmaktadır [15]. Kişinin diyetinde yeterli protein kaynağı bulunmaması da kas güçsüzlüğü, büyüme geriliği ve bağışıklık sisteminin zayıflaması gibi ciddi klinik sorunlara neden olabilmektedir [16].

**Tablo 2** Çeşitli yaş gruplarına göre zorunlu amino asit gereksinimleri [11]

**Table 2** Essential amino acid requirements based on various age groups [11]

Amino asit (mg/g protein)	0-5 yaş	1-2 yaş	3-10 yaş	11-14 yaş	15-18 yaş	>18 yaş
Histidin	20	18	16	16	16	15
İzolösin	32	31	31	30	30	30
Lösin	66	63	61	60	60	59
Lizin	57	52	48	48	47	45
Metionin+Sistein*	28	26	24	23	23	22
Fenilalanin+Tirozin*	52	46	41	41	40	38
Treonin	31	27	25	25	24	23
Triptofan	8,5	7,4	6,6	6,5	6,3	6,0
Valin	43	42	40	40	40	39

\*Metionin vücutta sistein yapımında kullanıldığı için, fenilalanin ise tirozin yapımında kullanıldığı için birlikte verilmiştir.

Gelecek yıllarda etkileri daha çok görülecek olan iklim değişikliği ve nüfus artışı ile meydana gelecek olan protein talebindeki artış, yüksek kaliteli proteine erişimi daha da zorlaştıracaktır. Bu nedenlerden dolayı bazı araştırmacılar çalışmalarını, geleneksel gıda ve yem katkı maddelerine alternatif olacak besin kaynakları üzerine odaklamışlardır. Minimum çevresel etki ile gıda güvenliğini koruyan ve yüksek kaliteli proteinlerin üretimine olanak sağlayan tek hücre proteinleri, geleneksel hayvan ve bitki bazlı proteinlere kıyasla umut verici alternatifler olarak görülmektedir [17]. Bu makalede, tek hücre proteinlerinden biri olan hava bazlı protein üretiminin ortaya çıkışı, gelişim süreci, üretim yöntemleri, beslenmedeki yeri, kullanım alanları ve çevresel etkileri hakkında yapılan araştırmalar derlenmiş ve HBP'lerin kullanım potansiyeline ışık tutulmaya çalışılmıştır.

### **Tek Hücre Proteini (THP)**

Tek hücre proteini (THP) kurutulmuş hücre topluluğudur. Bu kavram aynı zamanda biyoprotein, mikrobiyal protein veya biyokütle olarak da ifade edilmektedir [18, 19].

Yüksek ham protein içeriği (%60-70), hayvansal proteinlere benzer amino asit profili, B grubu gibi zengin vitamin içerikleri ve düşük miktarda yağ seviyeleri sayesinde insan ve hayvanlar için alternatif bir besin potansiyeli oluşturmaktadır [18, 20]. THP'lerin amino asit profili incelendiğinde ise çoğu hayvan ve bitki kaynağında yeterli miktarda bulunmayan lizin, metiyonin gibi çeşitli amino asitler açısından zengin olduğu saptanmıştır [21]. Ayrıca THP'nin balık unu ve soya fasulyesi unu gibi protein kaynaklarının iyi bir ikamesi olduğu bildirilmiştir [22].

Protein kaynaklarını artırmanın etkili yollarını aramak, teknolojik ilerlemenin ana hedeflerinden olmuştur. Mikrobiyolojik sentez ile protein üretimi; geleneksel et üretimine göre su, toprak, enerji gibi kaynakları daha verimli kullanan, iklim ve hava şartlarına bağlı olmayan bir üretim şeklidir. Gıda güvenliği açısından ise hormonlar, pestisitler ve patojenler gibi kimyasal ve biyolojik tehlikelerin de önüne geçilebilmektedir [23].

İnsanların ve hayvanların beslenmesinde önemli bir yeri olan proteinin geleneksel üretimden daha sürdürülebilir alternatif kaynakları uzun yıllardır araştırılmaktadır [18]. Mikroorganizmalar yoğurt, peynir, kefir, ekmek, fermente sebzeler ve fermente balık ezmesi gibi birçok geleneksel gıdanın bileşenleri olarak binlerce yıldır insan beslenmesinin bir parçası olmuştur [24]. Ekmek ve içecek üretimi için kullanılan mayaların tarihi ilk çağlara kadar dayanmaktadır. Ayrıca mayalar, hayvan yemi takviyesi olarak önemi neredeyse bir asır önce anlaşılan ilk mikroorganizmalardır. 16. yüzyılda bugünkü Meksika başkentinin yerlileri, Texcoco Gölü'nün yakınlarındaki alkali sularından *Arthrospira* (yaygın olarak *Spirulina* olarak bilinir) cinsine ait siyanobakterileri toplamıştır [25]. *Spirulina* biyokütlesinin toplanması ve bisküvi şeklinde kurutularak insan tüketimi için kullanımı günümüzde hala devam etmektedir [26]. Birinci Dünya Savaşı sırasında Almanlar *Candida utilis*'i çorbalarda ve sosislerde kullanmışlardır. Savaş sırasında Alman askerlerinin diyetleriyle aldıkları proteinin yarısı mayalar ile ikame edilmiştir. İkinci Dünya Savaşı sırasında da bu ikame yöntemi yoğun olarak kullanılmıştır [27, 28]. 1960'lı yıllarda protein, yağ ve vitamin kaynağı olarak bakteriyel biyokütleyi doğrudan kullanmak için ilk adımlar atılmıştır ve daha sonra THP terimi ortaya çıkmıştır [29]. Mikroorganizmaların kuru maddesinin büyük bir çoğunluğunun proteinden meydana gelmesi, bu canlıların tek hücre olarak yüksek protein içeriğinde olmasını sağlamaktadır [30].

THP üretiminde optimum ortam koşulları sağlanırsa, bitkisel veya hayvansal protein kaynaklarına kıyasla daha hızlı bir şekilde üretim gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca gıda işletmelerinde sistemden ayrılan atık nitelikli yan ürünlerin tek hücre proteini üretimi sırasında besi ortamı olarak kullanılması ekonomik olarak fayda sağlamaktadır. İncelenen mikrobiyal gelişim ortamlarının bazıları portakal kabukları, şeker kamışı, patates, Hindistan cevizi, üzüm, mango vb. işlenmesi sırasında ortaya çıkan tarımsal yan ürünlerdir. Ayrıca alkol, kâğıt, petrol vb. sanayi atıkları da besi yeri olarak kullanılmaktadır. Bu tarımsal ve sanayi atıklarının değerlendirilmesi ile ekonomik kazanım artmakta, çevre kirliliğinin artışı engellenebilmekte ve yüksek kaliteli hayvansal ürünlere alternatif bir protein üretimi gerçekleştirilebilmektedir [31-37]. Ek olarak, THP üretim süreci kapalı sistemlerde gerçekleştiği için mevsimsel değişikliklerden etkilenmemektedir. Ayrıca hayvansal protein üretiminde görülen hayvan hastalıkları da bu üretim modelinde görülmemektedir. Böylelikle THP dört mevsim boyunca, talep edilen miktarda verimli bir şekilde üretilebilmektedir [38-40]. THP üretimi geniş arazi ve büyük su kaynakları gerektirmediğinden, THP'nin bitkisel ve hayvansal protein kaynaklarına iyi bir alternatif olacağı düşünülmektedir [41, 42]. THP üretimi sırasında hayvansal hastalıkların görülme olasılığı olmasa da üretim sırasında yüksek kontaminasyon riski mevcuttur. Fermentasyon ortamının dış ortamda bulunan mikroorganizmalarla, dış ortamın da biyoreaktör içerisindeki mikroorganizmalarla kontaminasyonunun engellenmesi için biyoreaktör içerisindeki hava giriş ve çıkışlarında steril hava filtreleri kullanılmaktadır. Bu durumun yanı sıra kontaminasyonu engellemek için yapılan uygulamalardan biri biyoreaktör boşken sterilize etmek, daha sonra kesikli veya sürekli sistemle steril edilen besiyerini mikroorganizmaların kullanması için fermentasyon kabına aktarmaktır. Diğer bir yöntem ise biyoreaktörün fermentasyon ortamı ile doldurulması ve ikisinin beraber tek seferde sterilize edilmesidir. Bir başka açıdan bakıldığında ise fermentasyon için gereken hava, inokulum ve besin maddelerini taşıyan bütün borular buhar ile sterilize edilmektedir. Ortamda bulunması istenmeyen mikroorganizmaların inaktive edilebilmesi için, biyoreaktör bağlantıları buharla muameleye uygun şekilde dizayn edilmekte ve sistem aseptik inokülasyon, örnek alma ve ürün ayrılmasına uygun olarak tasarlanmaktadır [43].

THP'nin zengin protein, vitamin ve esansiyel amino asit içeriği, bu ürünün besin değerini yükseltmektedir. Ancak içeriğinde fazla miktarda nükleik asit bulunması, bilim insanlarını geleneksel protein kaynaklarına alternatif olmaları konusunda daha fazla araştırma yapmaya sevk etmiştir. İnsan vücuduna fazla miktarda nükleik asit alınması halinde ürik asit çökmesi ve böbrek taşı oluşumu gibi bazı sağlık problemleri görülebilmektedir [44]. Katabolizmayla birlikte nükleik asitler hipoksantin ve ksantine parçalandıktan sonra bu ürünler ksantin oksidaz enziminin etkisiyle ürik aside dönüşmektedir. Ürik asit suda çok az çözünmektedir ve ürik asit kristalleri renal dolaşımında yoğunlaştığında çökme meydana gelerek böbrekte tübül tıkanması, glomerüler filtrasyon ve idrar çıkışında azalmaya neden olabilmektedir [45]. Ham THP'lerdeki bu yüksek nükleik asit oranı bazı kimyasal, enzimatik veya ısıl işlemler ile azaltılabilmektedir [27]. Bakteri kaynaklı THP'lerin yüksek nükleik asit içeriği bakterilerin RNA'larından kaynaklanmaktadır. THP'lerin RNA içeriğini ve böylece içerdiği nükleik asit miktarını azaltmak amacıyla çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Isıl işlem (60-70°C) ile aktivasyondan sonra ribonükleaz kullanılarak RNA degradasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Ancak bu işlem sonrasında degrade olan RNA bileşenleri hücrenin dışına dağılır ve %35 ile %38 arasında bir biyokütle kaybı yaşanabilmektedir. Oluşan bu kaybı azaltmak amacıyla araştırmacılar prosesi daha yüksek (72-74°C) sıcaklık aralığında uygulamış ve biyokütle kaybını %30 ile %33 düzeylerine indirmeyi başarmışlardır. Alkali hidroliz ve kimyasal ekstraksiyon metotları da benzer amaçlar doğrultusunda incelenmiştir. Yapılan bir çalışmada 65°C, 7,5-8,5 pH aralığında yapılan işlemde RNA içeriği %2'nin altına düşürülmüş olup protein içeriği %50 olarak korunabilmiştir [46].

Bu işlemlerin sonucunda, işlenmiş mikrobiyal biyokütle ağırlıklı olarak ölü hücrelerden oluşmaktadır [44]. Tablo 3'te mikroorganizma gruplarının bazı ortalama besin değerleri kuru ağırlık (%) cinsinden verilmiştir [27].

THP birçok farklı mikroorganizma ile elde edilebilmektedir. Önemli THP kaynağı olan bakterilerin jenerasyon süreleri oldukça kısadır. Bu mikroorganizmalar geniş bir substrat kullanım alanına sahip olmakla birlikte cinslerine bağlı olarak 20 ile 120 dakika içerisinde sayılarını iki katına çıkarabilmektedirler. Nişasta, şeker gibi organik atıkları ve hatta etanol, metanol ve nitrojen gibi petrokimyasal atıkları dahi substrat olarak

kullanabilen THP kaynağı bakteriler mevcuttur [47] ve bu bakterilerden elde edilen THP'nin amino asit profili balık proteini ile benzerlik göstermektedir [48].

**Tablo 3** THP üretiminde kullanılan mikroorganizmaların ortalama bazı besin öğeleri

**Table 3** Some approximate amount of nutrients of microorganisms used in SCP production

	Küfler	Algler	Mayalar	Bakteriler
Protein (%)	30-45	40-60	45-50	50-80
Yağ (%)	2-8	7-20	2-6	1-3
Kül (%)	9-14	8-10	5-10	3-7
Nükleik asit (%)	7-10	3-8	6-12	8-12

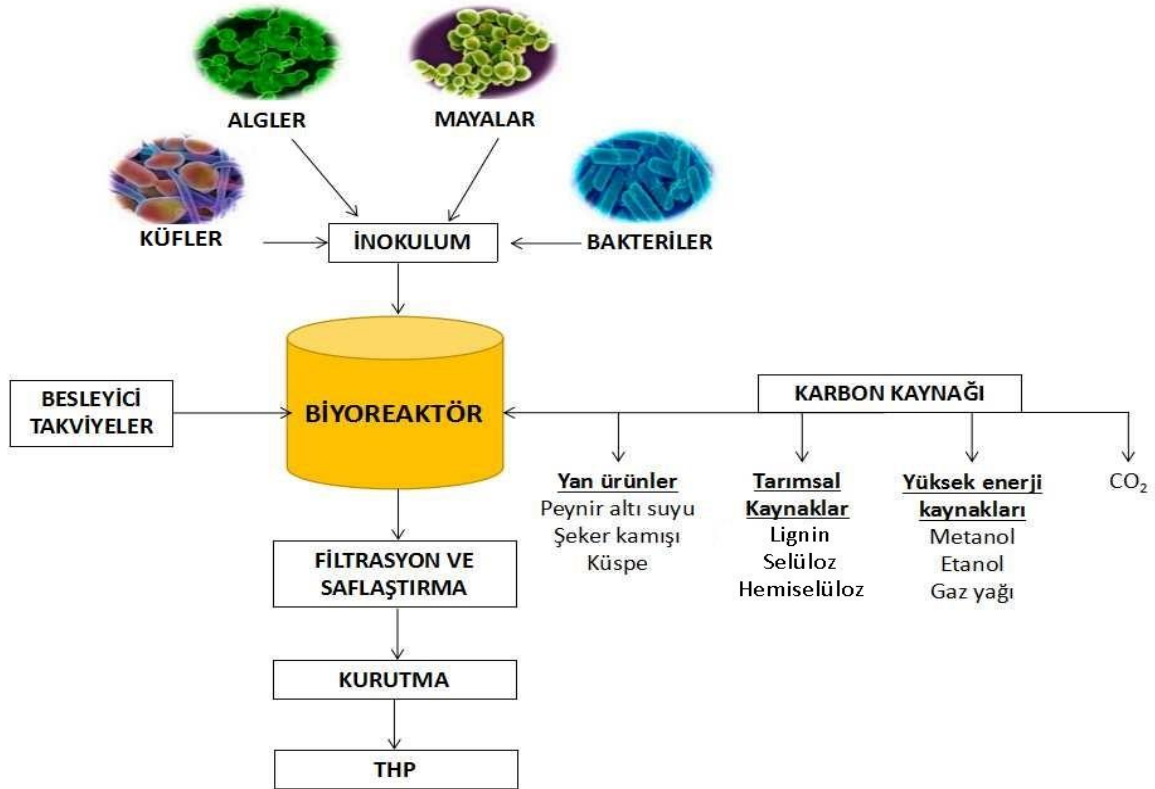
Önemli bir THP kaynağı da küflerdir. Küflerden elde edilen THP mikoprotein olarak isimlendirilmektedir ve %30-50 oranında protein içermektedir. Mikoproteinler sofralarda tüketilmek üzere 'Genel Olarak Güvenli' (GRAS) gıda sınıfında kabul edilmesinin yanı sıra amino asit profili de Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) standartlarını karşılamaktadır [27]. Son yıllarda özellikle vegan diyet için oldukça dikkat çeken, sürdürülebilir protein kaynaklarına önemli bir alternatif sunan mikoproteinler, her ne kadar *Agaricus bisporus*, *Auricularia fuscusuccinea*, *Neurospora intermedia* ve *Pleurotus albidus* türleri kullanılarak üretilse de *Fusarium venenatum* adlı küf türü, mikoprotein üretiminde en çok bilinen ve gıdalarda ticari olarak kullanılan türdür [49-53].

Bazı mikroalg türlerinden elde edilen THP'ler de hayvan ve insan tüketimi için üretilebilmekte ve genellikle %70 oranına kadar protein içerebilmektedir. Protein içeriğinin yanı sıra, omega-3 yağ asiti içermesi nedeniyle yağ kaynağı olarak sağlıklı bir profil oluşturmaktadır. Bununla birlikte, alglerde, %3 ile %8 arasında değişen nispeten düşük miktarda nükleik asit içeriği bulunmaktadır [54]. Texcoco Gölü yakınlarındaki Meksikalı insanlar tarafından hasat edilen ve insan diyetinde kullanılması için kurutulan bir alg cinsi olan *Spirulina* uzun yıllardır tüketilmektedir. Dünyanın farklı yerlerinde *Chlorella* ve *Senedesmus* gibi diğer alg cinslerinin biyokütlesi de yem kaynağı olarak kullanılmıştır. Alglerin yüksek protein içeriği, hızlı büyüme hızı ve basit yetiştiriciliği dünya çapında yem bileşeni olarak kabul görmelerinde kolaylık sağlamıştır [55]. Dünyada tüm mikroalg türlerinin yıllık üretiminin 10 bin ton olduğu tahmin edilmektedir. Yıllık alg biyokütlesinin %75'ten fazlası toz, tablet, kapsül veya pastil



üretiminde kullanılmaktadır [56]. Ayrıca yeşil algler iyi bir antioksidan kaynağı olarak da değerlendirilmektedir. Nutrasötikler ile birlikte *Spirulina maxima* adlı alg türü içeren bir diyet ile birlikte progenitör hücreler korunabilmektedir. Ek olarak yağlı karaciğer sendromunu önleme yeteneğine de sahiptirler. Alglerin yukarıda bahsedilen avantajları bulunmasına rağmen kuru maddesinde bulunan selülozik hücre duvarları insanlar tarafından sindirilememektedir. Ayrıca bileşimde yüksek düzeyde ağır metaller bulunabilmektedir [57].

THP üretiminin başlangıç aşamasında, çalışılacak olan mikroorganizmaya uygun karbon kaynağını içeren besi ortamı hazırlanmaktadır. Daha sonra biyoreaktörde üreme için optimum koşullar sağlanarak istenilen mikroorganizmanın üretimi gerçekleştirilir ve işlem sonunda biyokütle ayrılarak hasat edilir. Fermantasyondan sonra biyokütle; yıkama, hücre parçalanması, protein ekstraksiyonu ve saflaştırma gibi işlemlere tabi tutulmaktadır [27, 47, 58]. THP üretimi temel olarak Şekil 1’de gösterilmiştir [18].



Şekil 1 THP üretim şeması

Fig 1 SCP production chart

Ototrof mikroorganizmalar karbon ve besin döngüsü için oldukça önemlidir. Bu mikroorganizmalar inorganik karbondioksiti (CO<sub>2</sub>) atmosferden alıp biyolojik ve

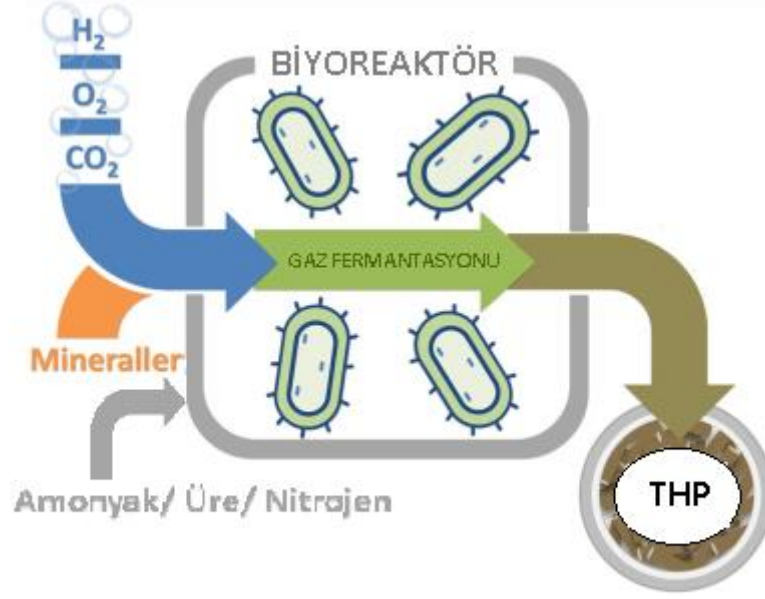
kimyasal reaksiyonlarda kullanarak organik biyokütle besinleri olan azot (N) ve fosfora (P) geri dönüştürmekte ve daha yüksek yaşam formları için yiyecek üretilmesini sağlamaktadırlar [59]. Algler ve ototrof bakteriler THP formunda hem hayvan yemi olarak hem de insan gıdası olarak alternatif bir protein kaynağı olmaktadır [60, 61]. Proteinin yanı sıra, bu mikroorganizmalar bünyelerinde dikkate değer bir miktarda prebiyotik materyal de biriktirebilmektedir [17].

### **Hidrojen Oksitleyici Bakteriler (HOB)**

İnsanoğlu neredeyse bin yıldır diyetinde geleneksel fermente gıdalar ile (yoğurt, peynir, turşu, vb.) bakterilerden faydalanmaktadır [62]. 1960'lı yıllarda bakteri biyokütlesinin protein, yağ ve vitamin kaynağı olarak kullanımı keşfedilmiştir [63]. Son yıllarda, artan protein ihtiyacı ve sürdürülebilirlik konuları gıda endüstrisinin THP üretimine olan ilgisinin ve araştırmalarının artmasını sağlamıştır. THP üretiminde ototrof hidrojen oksitleyen bakteriler (HOB), özellikleri ve kullanım potansiyeli ile araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Ototrof HOB'ler, metabolik özellikleri sayesinde hidrojen (elektron vericisi) ve oksijeni (elektron alıcısı) kullanarak karbondioksiti hücre materyaline bağlayıp, nitrojeni yüksek, kaliteli bir proteine dönüştürebilmektedir [64].

Ototrof HOB'ler tarafından üretilen THP; insan beslenmesi için önem teşkil eden ve besinlerle alınması gereken tüm esansiyel amino asitleri içeren, yüksek kaliteli, besin değeri hayvansal proteinlere benzer bir amino asit profiline sahip bir proteindir. Ototrof HOB'lerin karbon kaynağı olarak karbonhidrat yerine atmosferde bulunan substratları kullanabilmesi ve yapısındaki proteinin özellikleri sebebiyle 1966 yılında ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından uzun süreli uzay görevlerinde kullanılması planlanan kapalı karbon döngüsünün temeli olarak araştırılmıştır [23, 62].

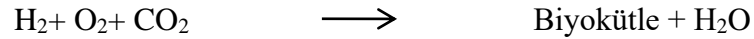
THP'nin en sürdürülebilir örneklerinin üretimini mümkün kılan ototrof HOB'ler Şekil 2'de şematik olarak gösterildiği gibi CO<sub>2</sub>'i hücresele bünyelerine sabitleyebilmektedir [62].



Şekil 2 HOB'lerin THP üretimi

Fig 2 SCP production by HOB's

Bazı hücrelerdeki H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> ile beslenen anaerobik metabolizma, karbon kaynağının %70-80'ini asetat gibi indirgenmiş bileşiklere dönüştürmekte ve yalnızca %20 oranında THP sentezleyebilmektedir. Protein üretimi açısından incelendiğinde bu üretilen asetat, tekrar karbon kaynağı olarak kullanılmıyor ise pek verimli bir durum sergilenmemektedir. H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> arasındaki reaksiyondan salınan enerji sayesinde aerobik H<sub>2</sub> temelli ototrofi, herhangi önemli bir yan ürün üretmeden hücre üreterek biyokütleyi, dolayısıyla da elde edilen THP miktarını artırır. H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gazlarının optimal koşullardaki karışımı "Knallgas" olarak bilinmekte ve aerobik H<sub>2</sub> ototrofları, Knallgas bakterileri veya HOB'ler olarak tanımlanmıştır. Genel olarak aerobik H<sub>2</sub> oksidasyonu ile CO<sub>2</sub> bağlanma reaksiyonu aşağıdaki şekilde gösterilmektedir [62, 65]



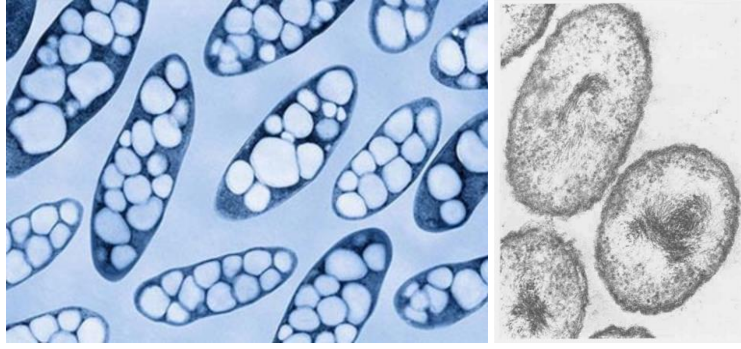
HOB'ler Antarktika buzul altı gölleri, ılıman topraklar ve sıcak hidrotermal menfezler gibi pek çok farklı alanda tespit edilebildiği için kolayca izole edilebilmektedirler. *Rhodococcus opacus* ve *Xantobacter autotrophicus*, endüstriyel kullanım potansiyeli nedeniyle araştırılan bazı bakteri türleridir. *R. opacus* beslenme ögesi ve biyoyakıt gibi ürünlere lipid kaynağı sağladığı için dikkat çeken bir HOB'dir. *X. autotrophicus* ise

gıda boyası olarak kullanılan bir karotenoid olan zeaksantin üretebilmektedir. Bu örnekler arasında kullanım potansiyeli sayesinde uluslararası projelere konu olan ve kısmen endüstride kullanımı onaylanmış ve araştırmalara en çok konu olan HOB *Cupriavidus necator* türüdür [62]. Bazı çalışmalar *C. necator* türünü THP üretimi kapsamında öne çıkartırken, bazı araştırmalar bu bakteri türünün petrol bazlı plastiklere alternatif olabilecek, biyolojik olarak parçalanabilen biyoplastik veya polihidroksialkonoat üretebilme kapasitesine odaklanmıştır [66].

### **Hava Bazlı Protein (HBP)**

Biyoreaktörlerde yenilebilir mikrobiyal biyokütle üretimi, tatlı su tüketicisi, sera gazı yayıcısı ve ötrofikasyona (eutrophication) sebep olan tarımsal üretime önemli bir alternatiftir. Hava bazlı protein (HBP) ise HOB'lerin biyoreaktörlerde çoğaltılıp, saflaştırılıp kurutulması ile elde edilen bir THP'dir. Elde edilen biyokütle, proteine ek olarak lipid, karbonhidrat, vitamin ve mineral kaynağı da sağlamaktadır. Bu proses için Gram-negatif ve Gram-pozitif HOB'ler kullanılmaktadır. HOB'lerin ototrof olarak üretilmesi için gazların ( $H_2$  ve  $O_2$ ) üretim ortamına sabit hızda verilmesi gerekmektedir. Bu gazlar rüzgâr ve güneş enerjisi kullanılarak su elektrolizi sayesinde elde edilebilmektedir. Suyun elektrolizi, geliştirme ortamından ayrı olarak veya içerisinde kültür bulunan biyoreaktör içinde biyo-elektrokimyasal sistemler (BES) ile gerçekleştirilebilmektedir. BES'de gazların kütle transferi daha etkin olduğu için biyokütle verimi daha yüksek olmasına rağmen, bu sistemlerde su elektrolizi sırasında bakteri gelişimini inhibe edebilecek  $H_2O_2$  veya hidroksil radikaller gibi reaktif oksijen türleri oluşabilmektedir [62, 67-69].

Dikkat çeken bazı çalışmalarda Gram-negatif, *Betaproteobacteria* sınıfına ait, mezofilik, spor oluşturmeyen, fakültatif ve kemolitotrofik bir toprak bakterisi olan *Cupriavidus necator* kullanılmıştır (Şekil 3) [68, 69]. Bovell tarafından 1957 yılında izole edilen bu bakteriye ilk olarak *Hydrogenomonas eutropha* adı verilmiş ancak taksonomik sinonimler sebebiyle yıllar içerisinde *Alcaligenes eutropha*, *Ralstonia eutropha*, *Wautersia eutropha* ve son olarak *Cupriavidus necator* olarak kabul görmüştür [70, 71].



**Şekil 3** *Cupriavidus necator*

**Fig 3** *Cupriavidus necator*

*C. necator* ilk olarak *Hydrogenomonas eutropha* adı ile 1960'lı yıllarda Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi tarafından Kaliforniya Ames Araştırma Merkezi tarafından yayınlanan raporda, ortamdaki üre ve CO<sub>2</sub>'i kullanacak ve astronotlar için gıda üretebilecek “Kapalı Sistem Karbon Döngüsü (Closed Loop Carbon Cycle)” prototipinin temelini oluşturmuş ve araştırmacıların dikkatini çekmiştir. NASA'nın “Kapalı Sistem Karbon Döngüsü” projesi; o yıllarda biyoreaktörler ve biyoreaktörlerin çalışma prensipleri uzay programı için verimli ve uygulanabilir olmaması, *C. necator*'un insan gıdası olarak tüketiminin *in vivo* çalışmalar ile yeterince desteklenmemesi ve *C. necator* kullanılarak üretilen ilk THP'nin nükleik asit içeriğinin insan tüketimi için gereğinden fazla olması gibi endişeler sebebiyle rafa kaldırmış ve hayata geçirilememiştir [70-72]. NASA'nın bu araştırmalarından yaklaşık 50 yıl sonra, birkaç bilim insanı dünyanın da kıt kaynaklı bir uzay aracı olduğunu düşünerek bu projeyi hayata geçirmiş ve Kaliforniya'da Kiverdi-Air Protein adlı start-up firmasını kurmuşlardır [73].

*C. necator*'un en önemli özelliği CO<sub>2</sub>'i karbon kaynağı olarak kullanarak gelişmesine ek olarak toprakta bulunan süksinat, fumarat ve malat gibi birçok organik bileşiği de substrat olarak kullanabilmesidir. Bu mikroorganizmanın CO<sub>2</sub> bağlama kapasitesi Calvin döngüsünün bir parçası olarak Rubisco enzimi sayesinde oluşmaktadır. Biyokütle oluşturmak için hücrelerin ihtiyacı olan enerji H<sub>2</sub> gazının hidrojenaz enzimi ile oksidasyonu sayesinde elde edilirken, nitrojen ise amonyak, üre ve hatta N<sub>2</sub> gazından sağlanabilmektedir [62, 74].

Belirli kısıtlayıcı koşullar altında *C. necator* polihidroksialkanoat (PHA) üretmekte ve bu bileşik, hücrelerin %90'ını kapsamaktadır [62]. PHA'lar, çok sayıda bakteri tarafından hücre içi karbon ve enerji depolama bileşikleri olarak sentezlenen, hücre

sitoplazmasında granüller halinde biriken hidroksialkanoatların poliestерleridir [75]. Yapılan çalışmalara göre *C. necator*'un salgıladığı bu PHA memeliler tarafından sindirilememekte ve dolayısıyla da elde edilen THP'nin besin değeri düşmektedir [76]. Ancak kontrollü ve optimal şartlar sağlandığında hücreler tarafından sentezlenen PHA minimum seviyeye indirilerek kuru madde olarak %75 oranında protein içeren biyokütle elde edilebilmektedir [62]. *C. necator* gibi HOB'lerin de aerobik H<sub>2</sub> oksidasyonu ile yakıt ve farklı kimyasalların biyoteknolojik olarak üretiminde kullanımı popüler araştırma konusu olmuştur [69].

Tüm bu olumlu yanlarına rağmen son yapılan araştırmalara göre gram-negatif bakteriler, tipik olarak lipopolisakkarit ekzotoksinler içermektedir ve bakteriyel lipopolisakkaritlerin de diyabet, karaciğer hasarı, nörolojik bozukluklar ve kronik bağırsak enfeksiyonu gibi hastalıklarla bağlantılı olduğu belirtilmiştir bildirilmiştir. Dolayısıyla lipopolisakkarit içermeyen gram-pozitif bakterilerin gıda üretimine daha uygun olduğu ileri sürülmüştür [69].

#### **Hava bazlı proteinlerin elde edilmesi ve besin içeriği**

HOB'ler hidrojen oksidasyonu ile ortaya çıkan enerjiyi kullanarak CO<sub>2</sub> gazından substrat olarak faydalanıp çoğalmaktadır ve belirli bir konsantrasyona ulaştığında mikroorganizma-besiyeri karışımı filtreden geçirilerek veya santrifüj edilerek besiyerinden arındırılmaktadır. Ayrıştırılan peletin kurutulması ile hava bazlı protein elde edilmektedir. Biyoreaktörlerde, inkübasyon koşulları kontrol altında tutularak çoğaltılan bakteriler üretim ortamından ayrılıp kurutulduktan sonra tatsız ve kokusuz bir ürün ortaya çıkmaktadır. Bu ürünün tercih edilirliliğini ve kalite özelliklerini iyileştirmek için tekstür kazandırmak ve form vermek gibi ileri işlemlere ihtiyaç olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır [17, 27, 62, 77, 78].

Günümüzde sürdürülebilirlik kapsamında THP üretiminde kapalı sistemler dikkat çekmektedir. Bu kapalı sistemler, sürdürülebilirliği artırmak ve gıda üretiminin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla atmosferdeki havadan direkt olarak karbon bağlamakta ve proses için gerekli olan hidrojen ve oksijen gazını suyun yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrolizi sayesinde ortaya çıkarıp kullanmaktadır. Üretimde kullanılan mineral karışımları ise biyoreaktörlere dışarıdan ek olarak verilmektedir [62, 78].

Hibrit biyolojik inorganik sistemler katma değerli ürünler elde etmek için çeşitli mikroorganizmalar ve elektrik enerjisi ile oluşturulmaktadır. Bu sistemler

sürdürülebilir, verimli, çok yönlü ve ekonomik kimyasal sentez platformlarıdır. Temel olarak, biyouyumlu elektrotlar ile elektrik enerjisini direkt veya dolaylı olarak biyolojik olarak kullanılabilir enerjiye dönüştürmektedir. Buna ek olarak, bazı spesifik bakteriler kullanılarak CO<sub>2</sub>, çok karbonlu organik bileşenlere sabitlenebilmektedir. Ototrofik mikroorganizmaların metabolizmalarını H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> kullanarak devam ettirebilmeleri sayesinde ortamdaki CO<sub>2</sub> kullanımını artar ve böylece pahalı hammadde ihtiyacı azaltılabilmektedir. Liu ve arkadaşları [65] prosesdeki CO<sub>2</sub>'i bağlama verimliliğini karşılaştırmak için hibrit biyolojik inorganik sistem kullanarak atmosferdeki CO<sub>2</sub>'i ve saf CO<sub>2</sub> gazını kullanmışlardır. Hibrit biyolojik inorganik sistem kullanılarak yapılan işlemlerde %50 olan CO<sub>2</sub>'i bağlama verimliliğinin, saf CO<sub>2</sub> kullanıldığında %20'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sistemlerde HOB için toksik etki oluşturan reaktif oksijen türleri (ROT) oluşabileceği bilinmektedir. ROT oluşmasının engellenmesi amacıyla Nangle ve arkadaşları [79], ROT üretimi yerine H<sub>2</sub> üretimi için seçici katalizörlerin geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu amaçla kobalt-fosfor (Co-P) alaşımı katot olarak kullanılmış, sonuç olarak alkali koşullarda bu alaşımın hidrojen üretimini desteklediği, nötral koşullarda ise hidrojen üretimini minimum ROT üretimi ile artırdığı gözlemlenmiştir.

THP'lerin besleyici değeri ve kullanılabilirliği ürün bileşimine bağlıdır. Besin içeriği, vitaminler, nitrojen içeriği, karbonhidratlar, yağlar, hücre duvarı içeriği, nükleik asitler, protein konsantrasyonu ve amino asit profili gibi parametrelerin THP'lerin gıdalarda kullanılmasından önce tespit edilmesi gerekmektedir. Örneğin azot kaynağı kısıtlı ortamda üretilen *H.eutropha*, insan vücudunun stres ortamında yağ biriktirmesine benzer şekilde β-hidroksibütirik asit salgılamaktadır ve memelilerin bu yapıdaki ürünleri sindiremediği bilinmektedir [77]. Ayrıca belirli bir mikroorganizma türünün THP üretiminde kabul edilebilirliği; büyüme hızına, kullanılan substrata, meydana gelebilecek kontaminasyonlara ve mikroorganizma ile ilişkili toksinlere bağlıdır [60].

*Hydrogenomonas eutropha* kullanılarak elde edilen hava bazlı protein ürününün 100 gram kuru madde temelindeki içeriği, Tablo 4'te gösterilmiş olup protein miktarının 74 gram olduğu dikkat çekmektedir [71, 80]. Tablo 5'te HBP ile bazı protein kaynaklarının 100 gram kuru madde temelinde içerdiği zorunlu ve zorunlu olmayan amino asit miktarları verilmiştir [81, 82].

**Tablo 4** HBP'nin bazı besin öğeleri

**Table 4** Some nutrients of ABP

Besin İçeriği	100 g kuru madde HBP
Protein (g)	74
Yağ (g)	9
Kül (g)	2
Nükleik asit (g)	8
Ca (mg)	66
Mg (mg)	98
Na (mg)	280
K (mg)	590

HBP'nin tüm zorunlu amino asitleri içermesinin yanı sıra metiyonin ve triptofan içeriğinin bezelye proteinine, lizin içeriğinin ise glütene göre daha fazla olduğu görülmektedir. Zorunlu olmayan amino asit profiline bakıldığında ise çeşitlilik göstermekle birlikte genel olarak diğer protein kaynaklarına göre düşük değerlerin olduğu görülmektedir. Beş yıl sonra yapılan bir çalışmada [83] *Hydrogenomonus eutrophu*'nun aminoasit kompozisyonunun Tablo 5'te verilen değerlerden %50 fazla olduğu gözlenmiştir. Bu farkın, daha önceki çalışmada, proteinin tamamlanmamış hidrolizinden veya daha büyük olasılıkla, kalıntı substrattan bakteriyel proteinin, protein olmayan nitrojen (üre) ile seyreltilmesinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Bu durumla birlikte çeşitli çalışmalarda, HBP'nin hayvansal proteine benzer bir protein profilinin olduğu, soyadan elde edilen proteinle karşılaştırıldığında 2 kat daha fazla amino asit içerdiği ve amino asit bileşiminin kazein proteinine benzer olduğu belirtilmektedir. *H. eutropha*'dan elde edilen HBP'nin içeriğinde kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum gibi minerallerin bulunduğu da tespit edilmiştir [71, 80].

Beslenme açısından incelendiğinde, araştırmacılar hava bazlı proteinin, mevcut bir gıda maddesinden daha zararlı olmadığını belirtmektedirler. Hâlihazırda hayvan beslenmesi için kullanılan hava bazlı proteinin insan beslenmesi için yeni bir gıda olarak tanımlanması ve GRAS listesine girmesi için otoritelerin çalışmaları devam etmektedir [84]. Yapılan araştırmalarda hava bazlı proteinin farelerde, domuzlarda, köpeklerde, maymunlarda ve şempanzelerde herhangi bir akut toksisite oluşturmadığı belirtilmiş,



farelerle yapılan deneylerde hava bazlı proteinin sindirilebilirliğinin %93 olduğu tespit edilmiştir [85]. İnsanlar ile yapılan deneylerde ise 25-30g ham haldeki hava bazlı proteini tüketen kişilerde 24 saat içinde karın ağrısı, ishal, baş ağrısı ve halsizlik görülmüştür. Araştırmacılar bir insanın herhangi bir belirti göstermeden 1 günde maksimum tüketebileceği işlem görmemiş hava bazlı protein miktarının 6 gram olduğunu belirtmişlerdir [72]. Bu durumun yanı sıra sadece hava bazlı protein içeren bir diyet uygulamasında tüketilen nükleik asit içeriğinin normal diyete göre yaklaşık 25 kat daha fazla olacağı saptanmıştır. Nükleik asidin metabolizmaya dahil olması, kandaki ürik asit seviyesinin yükselmesine ve idrar yolunda kristalleşme riskine neden olmaktadır [72]. Diyetle alınan nükleik asit miktarının günde 3-4 g'dan fazla olmaması gerektiği belirtilmektedir. Bu durum, fermentasyon sonucu elde edilen hava bazlı proteinin içeriğindeki yüksek nükleik asit miktarının kimyasal, enzimatik veya ısı uygulamaları ile azaltılmasını zorunlu hale getirmektedir [46].

Hava bazlı proteinin ham halinin tüketicilerin tercih etmeyeceği bir tat ve görüntüye sahip olduğu, tüketilmesi için mutlaka şekil verme, kalıplama gibi işlemlerin uygulanması ve kıvam ve tekstürün iyileştirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Tatmin edici bir karbonhidrat/protein oranı için ürün geliştirme kapsamında çeşitli lif ve karbonhidrat içeriklerinin eklenmesi de önerilmektedir [85].

Finlandiya'da bulunan bir firma olan Solar Foods, Solein olarak isimlendirdikleri HBP ürününün tadı ve görünüşünün buğday ununa benzer olduğunu belirtmişlerdir. Solar Foods firmasının ürettiği HBP'nin de tüm esansiyel amino asitlerini içerdiği belirtilmiştir. Üretilen HBP ile ilgili yapılan araştırmalara göre soya proteine kıyasla, bir yetişkinin günlük amino asit gereksinimlerinin karşılamak için daha küçük bir Solein porsiyonunun yeterli olduğu ileri sürülmüştür. Ürün %65-75 oranında protein içerirken, sırasıyla %10-20, %4-10 ve %4-10 oranlarında karbonhidrat, yağ ve mineraller içermektedir [85].

### **Çevresel etkileri**

Tarım endüstrisi günümüzde çöl veya buzul olmayan toprakların yaklaşık %43'ünü kullanmaktadır. Artan protein ihtiyacını karşılamak için kullanılan tarım alanlarının Dünya üzerindeki oranı daha da artacak ve biyoçeşitlilik üzerinde negatif bir etki yaratacaktır. Dünya'da iklim krizine sebep olan sera gazları %36-70 su buharı, %9-26 CO<sub>2</sub>, %4-9 metan ve %3-7 ozondur [62]. Paris İklim Anlaşması'nın iklim krizi

etkilerini azaltma hedefine ulaşmak için yılda 4-5 Gigaton CO<sub>2</sub> depolanması gerekmektedir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPPC) göre toplam antropojenik sera etkisine 2007-2016 yılları arasında sebep olan gaz emisyonlarının %23'ü tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımından dolayı ortaya çıkmıştır. Biyoreaktörlerde üretilen protein kaynaklarına geçiş ile gıda üretiminin çevre üzerinde oluşturduğu baskının azalacağı öne sürülmektedir [78].

**Tablo 5** HBP ve bazı protein kaynaklarının amino asit profili

**Table 5** Amino acid composition of ABP and some protein sources

Amino asit	HBP	Bezelye	Pirinç	Soya	Glüten	Peynir altı suyu	Yumurta
Zorunlu amino asitler							
Histidin	0.95	2.4	2.2	2.5	1.9	1.8	2.3
Treonin	2.15	4.0	4.0	3.9	2.4	7.4	4.6
Valin	3.03	3.9	5.5	3.9	3.6	5.1	6.4
Metiyonin	1.14	0.9	2.1	1.2	1.3	1.5	3.4
Izolösin	2.17	3.4	3.7	3.7	3.1	5.7	5.7
Fenilalani	2.20	4.6	4.9	4.9	5.7	2.7	5.8
Triptofan	0.78	0.4	1.3	1.3	1.2	1.4	1.2
Lösin	4.04	7.3	8.0	7.5	6.7	9.8	8.5
Lisin	2.65	8.4	3.9	6.6	1.2	9.5	6.9
Zorunlu olmayan amino asitler							
Aspartik asit	4.32	11.7	10.1	12.1	2.5	11.0	10.2
Serin	1.80	5.7	5.7	5.2	5.2	5.7	7.0
Glutamik asit	7.67	19.9	20.0	19.7	38.4	18.6	13.3
Glisin	2.76	4.0	4.5	4.3	3.3	1.8	3.5
Arginin	3.41	9.8	8.1	7.4	2.6	2.3	5.4
Alanin	4.47	5.4	6.0	4.4	2.2	5.3	5.8
Tirozin	1.79	3.7	4.7	3.1	3.0	2.6	3.9
Prolin	2.06	4.0	4.5	6.4	14.7	6.6	3.9
Sistin	0.08	0.6	0.9	2.2	1.1	1.4	2.2

Atmosferde biriken sera gazlarından biri olan CO<sub>2</sub>'in bağlanarak kullanılması için enerji gerekmektedir. Konvansiyonel gıda tedarikinin temelinde ışığı, enerji kaynağı olarak kullanan bitkiler bulunmaktadır. HOB'ler, karbon enerji kaynağı olarak maliyeti yüksek bitki bazlı karbon kaynakları (şekerler veya karbonhidratlar) yerine karbondioksit gazını

kullanılmaktadır. THP üretiminde kullanılan enerji ise yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrolize edilen sudan ortaya çıkan hidrojen gazından elde edilebilmektedir. Böylece üreticiler karbon nötr bir ürün elde edebilmektedir [62].

Sillman ve ark. [86] yapmış oldukları çalışmada, havadaki CO<sub>2</sub> gazını tutan mikrobiyal protein üretimi ve soya fasulyesi üretimi işlemleri sırasında kullanılan suyu ve alan miktarlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda, mikrobiyal protein üretimi sırasındaki arazi kullanımı ve su tüketiminin, soya fasulyesi üretiminin arazi kullanımı ve su tüketiminden daha düşük olduğu saptanmıştır. Güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi kullanılarak üretilen mikrobiyal proteinde kullanılan su miktarı 0.82 L/kg protein iken, soya fasulyesi üretiminde kullanılan su miktarının 2.67-6.67 L/kg protein arasında olduğu tespit edilmiştir. Alan kullanım miktarları ise güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi kullanılarak üretilen mikrobiyal proteinde sırasıyla 0.04-0.26 m<sup>2</sup>/kg protein olduğu tespit edilirken, soya fasulyesi üretiminde kullanılan alan miktarının 6.40-15.86 m<sup>2</sup>/kg protein olduğu belirlenmiştir. Bir HBP üreticisi olan Solar Foods şirketi de Solein olarak isimlendirdikleri ürünlerinin çevreye olan etkilerinin hayvansal ve bitkisel bazlı protein kaynaklarına göre daha düşük olduğunu belirtmektedirler. Solein üretiminde bitkisel protein üretiminden 100 kat, sığır eti üretiminden 700 kata kadar daha az su kullanıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca Solein üretimi için arazi kullanımının, bitkisel üretime göre 20 kat, sığır eti üretimine göre 200 kat daha verimli olduğu saptanmıştır. Sera gazı emisyonları açısından ise bitkisel üretimden beş kat, sığır eti üretiminden 200 kat daha az çevreyi kirlettiği belirtilmiştir. Ek olarak Solein'in bitkisel protein üretimden 10 kat daha az, sığır eti üretiminden ise 1000 kata kadar daha az ötrofi emisyonuna (azot oksitleri, nitrat, amonyum, fosfor ve azot gazları) neden olduğu bildirilmiştir [4, 84].

### **Hava bazlı proteinin ticarileştirilmesi ve endüstrideki yeri**

Son 10 yıl içerisinde H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> karışımlarının HOB'ler için substrat kaynağı olarak kullanıldığı ve HOB'lardan gıda ve yem bileşenleri üretiminin gerçekleştirildiği şirketlerin sayısında artış meydana gelmiştir. 2011 yılında kurulan Kaliforniya merkezli bir şirket, THP ürünleri olan AirProtein™ ve CO<sub>2</sub> Aquafeed'in yanı sıra yağlar ve biyoplastikler üzerine de çalışmaktadır [73]. HBP'nin sürdürülebilir gıda üretiminin yeni evrim basamaklarından biri olacağını düşünen firma, ürünlerinin gelecek yıllarda süpermarketlerde olmasını hedeflemektedir. Kaliforniya merkezli diğer bir firma ise

THP'yi su ürünleri üretiminde kullanılan yemlerde kullanılması üzerine geliştirmişlerdir. Firmanın ilk yem denemeleri, balık büyüme oranı dikkate alındığında soya ve alg içeren kontrol diyetlerine kıyasla THP'nin daha üstün olduğunu göstermiştir [87]. Finlandiya'da 2017 yılında kurulan bir şirket ise insan tüketimine uygunluk için AB Gıda Lisansı onayı bekleyen Solein'i üretmişlerdir. Ticari ölçekte üretime geçmeye 2023'te başlamayı planlayan şirket Mars görevlerinde NASA'nın gıda tedarikçisi olmayı ve 2026 yılında yıllık gelirlerinin 80 milyon dolar olmasını hedeflemektedir [88]. Belçika'da kurulan bir firma da maliyeti düşük substratlardan birkaç THP geliştirmiştir. Firma, Hollanda'da bulunan Su Araştırma Enstitüsü KWR ile işbirliği yaparak "Power to Protein" projesi kapsamında THP üretmek için hidrojen oksitleyici bakteriler kullanmıştır [89]. 2018 yılında İngiltere'nin Nottingham şehrinde hem gaz fermantasyonu hem de sentetik biyoloji konusunda geçmişi olan bir ekip tarafından kurulan bir diğer firma da HOB'ları kullanarak ürettiği THP'ye Proton™ adını vermiştir. Firma önemli bir sürdürülebilirlik örneği olarak 2019 yılında bir enerji üretim şirketi ile ortaklık kurarak baca gazından elde edilen CO<sub>2</sub> ile THP üretimi projesine başlamıştır [90]. Mevcut üreticiler, kuruluş yılları ve HBP ürünleri Tablo 6'da özetlenmiştir.

**Tablo 6** HBP Üretimi Gerçekleştiren Firmalar

**Table 6** ABP Producing Firms

Firma adı	Ülke	Kuruluş Yılı	Ürün
Avecom	Belçika	1995	ProMic, ValProMic, Eximium, Chlorella
Unibio	Danimarka	2001	Uniprotein®
Kiverdi	ABD	2011	Air Protein™
Calysta	Birleşik Krallık	2016	Feedkind
Novonutrients	ABD	2017	Novomeal
Solar Foods	Finlandiya	2017	Solein
Deep Branch	Birleşik Krallık	2018	Proton™

## Sonuç

Yapılan araştırmalarda bugüne kadar gıda üretimini sürdürülebilir hale getirebilmek için çok sayıda çözüm önerisi sunulmuştur. Daha düşük çevresel etkiye sahip gıda ve yem kaynakları olarak yenilebilir mikrobiyal biyokütle örneklerinden biri olan HBP,

geleneksel gıda üretim yöntemlerine bir alternatif olarak görülmektedir. Artan dünya nüfusu ve protein kaynaklarının giderek azalması tüketici ve üreticilerin daha sürdürülebilir olan protein kaynaklarına yönelimi nedeniyle THP ve HBP araştırmaları daha da önem kazanmıştır. Mikroorganizmaların metabolik çeşitliliği sayesinde THP üretimi birçok farklı substrat ile gerçekleştirilebilmektedir. THP üretiminde genel olarak; heterotrof bakteriler kullanılmaktadır. Bu bakteriler doğası gereği CO<sub>2</sub> salınımı yapmakta ve substrat olarak karbonhidrat, yağ, metan veya etanolü kullanmaktadırlar. Ancak, ototrof bakterilerin CO<sub>2</sub> tutma yetenekleri bu canlıları sürdürülebilir THP ve HBP üretimi için en uygun adaylardan biri olarak öne çıkartmaktadır. Endüstride HBP ile bağlantılı son 10 yıllık ivme göz önünde bulundurulduğunda, gelecek yıllarda THP ve HBP ile ilgili daha çok araştırma yapılarak literatürün zenginleştirileceği ve dolayısıyla gıda işletmelerinin sürdürülebilir protein üretimi konusunda aydınlatılacağı düşünülmektedir.

Tarım ve sanayi atıklarının THP üretimi sırasında besi ortamı olarak kullanılması ekonomik faydanın yanı sıra çevre kirliliğinin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Üretimde kapalı sistemlerin kullanılması mevsimsel değişikliklerden bağımsız olarak üretimi sürekli hale getirebilmektedir. Hayvansal ve bitkisel protein üretiminde karşılaşılan sağlık ve hijyen riskleri THP üretimiyle ortadan kalmakta, bu duruma karşılık mikrobiyal bir üretim söz konusu olduğu için kontaminasyon riski ortaya çıkmaktadır. THP üretimi için optimum koşullar sağlandığında bitkisel veya hayvansal kaynaklı protein üretimine göre daha hızlı bir şekilde üretim gerçekleştirilebilmektedir. Geleneksel üretimde kullanılan geniş arazi ve su kaynaklarının gerekliliği THP üretiminde ortadan kalkmaktadır. Bir THP olan HBP'nin üretimi, atmosferdeki CO<sub>2</sub>'i sisteme bağlayıp kapalı bir karbon döngüsüne kazandırarak bakteri hücreleri üretimine dayanmaktadır. Üretim aşamalarında sürdürülebilir enerji kaynakları kullanıldığı takdirde HBP üretimi karbon negatif bir üretimdir.

Proteinler için alternatif üretim yöntemleriyle ilgili çalışmalar, artan nüfus, mevcut üretim koşulları ve çevreye olan etkileri göz önüne alındığında dengeli ve yeterli beslenmenin sürdürülebilirliği için önem kazanmaktadır. Mevcut durumda hayvan yemlerinde kullanılan ve insan beslenmesinde kullanımı için çalışmaların devam ettiği HBP'nin kalorisi düşük olup protein içeriği ve sindirilebilirliği yüksektir. Bu durumun doğal bir getirisi olarak sadece HBP içerikli bir diyetin nükleik asit miktarı insan sağlığı

açısından risk teşkil etmektedir. Bu durumun iyileştirilmesi ve HBP'nin duyuşsal olarak geliştirilmesi için ilave işleme yöntemleri gerekmektedir. Araştırmacıların insan tüketimine uygun HBP üretimi ile ilgili araştırmalarını üretim sonrası işleme koşulları üzerine de yoğunlaştırması gerektirdiği düşünölmektedir.

## Kaynaklar

1. Godfray, H., et al., Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 2010. 327(5967): p. 812-818.
2. Birleşmiş Milletler, Department of Economic and Social Affairs, World Population Highlights. 2019.
3. Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. and Befort, B., Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011. 108 (50): p. 20260-20264.
4. Poore, J. and Nemecek, T., Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 2018. 360(6392): p. 987-992.
5. Gruener, O., The water footprint: water in the supply chain. *The Environmentalist*, 2010. (93): p. 12.
6. Boland, M., Rae, A. and Vereijken, J., The future supply of animal derived protein for human consumption. *Trends in Food Science & Technology*, 2013. 29(1), 62-73.
7. Henchion, M., et al., Future protein supply and demand: strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. *Foods*, 2017. 6(7): p. 53.
8. Bohrer, B., Nutrient density and nutritional value of meat products and non-meat foods high in protein. *Trends in Food Science & Technology*, 2017. 65: p. 103-112.
9. Reeds, P., Dispensable and indispensable amino acids for humans. *The Journal of Nutrition*, 2000. 130(7): p. 1835-1840.
10. Elango, R., Ball, R. and Pencharz, P., Amino acid requirements in humans: with a special emphasis on the metabolic availability of amino acids. *Amino acids*, 2009. 37(1): p. 19-27.
11. Henley, E., Taylor, J. and Obukosia, S., The importance of dietary protein in human health: Combating protein deficiency in sub-Saharan Africa through transgenic biofortified sorghum. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2010. 60: p. 21-52.
12. Moughan, P. J., Dietary protein for human health. *British Journal of Nutrition*, 2012. 108(S2): p. 1-2.
13. Neacsu, M., McBey, D. and Johnstone, A. M., Meat reduction and plant-based food: replacement of meat, nutritional, health and social aspects, in *Sustainable Protein Sources*, Nadathur S. R., Scanlin L. and Wanasundara, J. P. D., Editors. 2017, Elsevier, London, United Kingdom. p. 359-375.
14. Porter, J. R., et al., Food Security and Food Production Systems, in *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*, Field C. B., Barros V. R., Dokken D. J., Mach K. J. and Mastrandrea M. D. Editors. 2014, Cambridge University Press, New York. p. 485-533.
15. Semba, R., The rise and fall of protein malnutrition in global health. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 2016. 69(2): p. 79-88.
16. Wu, G., et al., Arginine deficiency in preterm infants: biochemical mechanisms and nutritional implications. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2004. 15(8): p. 442-451.

17. Matassa, S., et al., Autotrophic nitrogen assimilation and carbon capture for microbial protein production by a novel enrichment of hydrogen-oxidizing bacteria. *Water Research*, 2016. 101: p. 137-146.
18. Sharif, M., et al., Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. *Aquaculture*, 2021. 531: p. 735885.
19. Saeed, M., et al., Single cell protein: a novel value added food product. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 2016. 26: p. 211-217.
20. Çalışkaner, Ş., et al., Etil alkol vasatında üretilen tek hücre proteini (Erpin) üzerinde biyolojik bir araştırma. *Türk Tarım ve Ormancılık Dergisi*, 1998. 22(3): p. 299-304.
21. Gao, Y., Li, D. and Liu, Y., Production of single cell protein from soy molasses using *Candida tropicalis*. *Annals of Microbiology*, 2012. 62(3): p. 1165-1172.
22. Goldberg, I., *Single Cell Protein*. 2013, Berlin, Germany: Springer Science & Business Media.
23. Volova, T. and Barashkov, V., Characteristics of proteins synthesized by hydrogen-oxidizing microorganisms. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2010. 46: p. 574-579.
24. Campbell-Platt, G., *Fermented Foods-a world perspective*. *Food Research International*, 1994. 27(3): p. 253-257.
25. Ciferri, O., *Spirulina, the edible microorganism*. *Microbiological Reviews*, 1983. 47(4): p. 551-578.
26. Abdulqader, G., Barsanti, L. and Tredici, M., Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kossorom (Chad) and its household usage among the Kanembu. *Journal of Applied Phycology*, 2000. 12(3): p. 493-498.
27. Nasser, A. T., et al., Single cell protein: production and process. *American Journal of Food Technology*, 2011. 6(2): p. 103-116.
28. Srividya, Y., et al., Rapid and concurrent detection of *Listeria* species by Multiplex PCR. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 2013. 4(1): p. 106-116.
29. Matelbs, R. and Tannenbaum, S., Single-cell protein. *Economic Botany*, 1968. 22(1): p. 42-50.
30. Patel, S. and Cook, P., The DNA-protein cross: a method for detecting specific DNA-protein complexes in crude mixtures. *The EMBO journal*, 1983. 2(1): p. 137-142.
31. Steinkraus, K., *Microbial biomass protein grown on edible substrates: the indigenous fermented foods*, in *Microbial Biomass Proteins*, Moo-Young, M. and Gregory K. F., Editors. 1986, Elsevier Applied Science, Essex, England. p. 33-45.
32. Bekatorou, A., Psarianos, C. and Koutinas, A. A., Production of food grade yeasts. *Food Technology and Biotechnology*, 2006. 44(3): p. 407-415.
33. Overland, M., Potential of microbial ingredients as protein sources for farmed animals and fish. *International Symposium on European Protein Position*, 2021.
34. Upadhyaya, S., et al., Microbial protein: a valuable component for future food security, in *Microbes and Environmental Management*, Singh J.S. and Singh D. P., Editors. 2016, Studium Press, New Delhi, India. p. 259-279.
35. Reihani, S. F. S. and Khosravi-Darani, K., Mycoprotein production from date waste using *Fusarium venenatum* in a submerged culture. *Applied Food Biotechnology*, 2018. 5(4): p. 243352.
36. Souza Filho, P. F., et al., Vegan-mycoprotein concentrate from pea-processing industry byproduct using edible filamentous fungi. *Fungal Biology and Biotechnology*, 2018. 5(1): p. 1-10.
37. Hashempour-Baltork, F., et al., Safety assays and nutritional values of mycoprotein product by *Fusarium venenatum* IR372C from date waste as substrate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020. 100(12): p. 4433-4441.
38. Israelidis, C., Nutrition-Single cell protein, twenty years later. *Proceedings from First Biointernational Conference*, 2003.

39. Vermeulen, S. J., Campbell, B. M. and Ingram, J. S., Climate change and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012. 37: p. 195-222.
40. Pikaar, I., et al., Microbes and the next nitrogen revolution. *Environmental Science and Technology*, 2017. 51(13): p. 7297-7303.
41. Mekonnen, M. and Hoekstra, A., Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological*, 2014. 46: p. 214-223.
42. Demirel, R. and Demirel, D., Tek hücre proteinlerinin insan ve hayvan beslemede kullanımı. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2018. 8(3): p. 327-336.
43. Turhan İ., *Endüstriyel Mikrobiyolojiye Giriş*. 2015, Ankara, Turkey: Palme Yayıncılık-In Turkish
44. Edozien, J., et al., Effects of high levels of yeast feeding on uric acid metabolism of young men. *Nature*, 1970. 228(5267): p. 180-187.
45. Öztürk, N. and Arıkan, F., Tümör Lizis Sendromunda Hemşirelik Yaklaşımı, *Ordu Üniversitesi Hemşirelik Çalışmaları Dergisi*, 2021. 4(1): p. 113-122.
46. Ritala, A., et al., Single cell protein state of the art, industrial landscape and patents 2001-2006. *Frontiers in Microbiology*, 2017. 8: p. 2009.
47. Adedayo, M. R., et al., Single cell protein: as nutritional enhancer. *Advances in Applied Science Research*, 2011. 2(5): p. 396-409.
48. Yousufi, M. K., To determine protein content of single cell protein produced by using various combinations of fruit wastes and two standard food fungi. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 2012. 3: p. 533-536.
49. Trinci, A. P. J., Quorn mycoprotein. *Mycologist*, 1991. 5(3): p. 106-109.
50. Kim, K., et al., Bioproduction of mushroom mycelium of *Agaricus bisporus* by commercial submerged fermentation for the production of meat analogue. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011. 91(9): p. 1561-1568.
51. Stoffel, F., et al., Production of edible mycoprotein using agroindustrial wastes: Influence on nutritional, chemical and biological properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019. 58: p. 102227.
52. Hellwig, C., et al., Fungi burger from stael bread? A case study on perceptions of a novel protein-rich food product made from an edible fungus. *Foods*, 2020. 9(8): p. 1112.
53. Stoffel, F., et al., Use of *pleurotus albidus* mycoprotein flour to produce cookies: Evaluation of nutritional enrichment and biological activity. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2021. 68: p. 102642.
54. Sousa, I., et al., Microalgae in novel food products, in *Food Chemistry Research Developments*, Papadopoulos K. N., Editor. 2008, Nova Science Publishers, USA. p. 75-112.
55. Raja, R., et al., A perspective on the biotechnological potential of microalgae. *Critical Reviews in Microbiology*, 2008. 34(2): p. 77-88.
56. Becker, E., Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 2007. 25: p. 207-210.
57. Mahasneh, I. A., Production of single cell protein from five strains of the microalga *Chlorella* spp. (Chlorophyta). *Cytobios*, 1997. 90: p. 153-161.
58. Faust, U., Production of microbial biomass, in *Fundamentals of Biotechnology*, Prave P., Faust U., Sittig W. and Sukatsch D., Editors. 1987, VCH Publishers, Germany. P. 601-622.
59. Elser, J. J., et al., Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000. 408: p. 578-580.
60. Anupama, R. P., Value-added food: single cell protein. *Biotechnology Advances*, 2000. 18: p. 459-479.
61. Walsh, B. J., et al., New feed sources key to ambitious climate targets. *Carbon Balance and Management*, 2015. 10: p. 1-8.
62. Pander, B., et al., Hydrogen oxidising bacteria for production of single-cell protein and other food and feed ingredients. *Engineering Biology*, 2020. 4(2): p. 21-24.



63. Synder, H. E., Microbial sources of protein. *Advances in Food Research*, 1970. 18: p. 85-140.
64. Parkin, A. and Sargent, F., The hows and whys of aerobic H<sub>2</sub> metabolism. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2012. 16(1-2): 26-34.
65. Takors, R., et al., Using gas mixtures of CO, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> as microbial substrates: the do's and don'ts of successful technology transfer from laboratory to production scale. *Microbial Biotechnology*, 2018. 11(4): p. 606-625.
66. Hafuka, A., et al., Effects of feeding regimens on polyhydroxybutyrate production from food waste by *Cupriavidus necator*. *Bioresource Technology*, 2011. 102(3): p. 3551-3553.
67. Liu, C., et al., Water splitting-biosynthetic system with CO<sub>2</sub> reduction efficiencies exceeding photosynthesis. *Science*, 2016. 352(6290): p. 1210-1213.
68. Little, G., et al., Complete Genome Sequence of *Cupriavidus necator* H16 (DSM 428). *Microbiology Resource Announcements*, 2019. 8(37).
69. Nyssöla, A., et al., Production of endotoxin-free microbial biomass for food applications by gas fermentation of Gram-positive H<sub>2</sub>-oxidizing bacteria. *ACS Food Science & Technology*, 2021. 1(3): p. 470-479.
70. Raberg, M., et al., *Ralstonia eutropha* H16 in progress: applications beside PHAs and establishment as production platform by advanced genetic tools. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017. 38(4): p. 494-510.
71. Chee, J., et al., The potential application of *Cupriavidus necator* as polyhydroxyalkanoates producer and single cell protein: A review on scientific cultural and religious perspectives. *Applied Food Biotechnology*, 2018. 6(1): p. 19-34.
72. Calloway, D. and Margen, S., Investigation of the Nutritional Properties of *Hydrogenomonas eutropha* Final Report to National Aeronautics and Space Administration. NASA, 1968.
73. Air Protein, <https://www.airprotein.com>, Erişim tarihi: [24.05.2021].
74. Matassa, S., et al., Can direct conversion of used nitrogen to new feed and protein help feed the world? *Environmental Science & Technology*, 2015. 49: p. 5247-5254.
75. Lee, S. Y., Bacterial polyhydroxyalkanoates. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996. 49(1): p. 1-14.
76. Waslien, C. I. and Calloway, D. H., Nutritional Value of Lipids in *Hydrogenomonas eutropha* as measured in the rat. *Applied Microbiology*, 1969. 18(2): p. 152-155.
77. Lu, Y. and Yu, J., Comparison analysis on the energy efficiencies and biomass yields in microbial CO<sub>2</sub> fixation. *Process Biochemistry*, 2017. 62: p. 151-160.
78. Ruuskanen, V., et al., Neo-Carbon food concept: a pilot-scale hybrid biological-inorganic system with direct air capture of carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production*, 2021. 278: p. 1-11.
79. Nangle, S. N., et al., Biological-inorganic hybrid systems as a generalized platform for chemical production. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2017. 41: p. 107-113.
80. Drake, G. L., et al., Study of life support systems for space missions exceeding one year in duration, in *The Closed Life-Support System*, Klein H., Editor. 1966, NASA, USA. p. 1-74
81. Foster, J. F. and Litchfield, J. H., A continuous culture apparatus for the microbial utilization of hydrogen produced by electrolysis of water in closed-cycle space systems. *Biotechnology and Bioengineering*, 1964. 6(4): p. 441-456.
82. Claessens, M., et al., Glucagon and insulin responses after ingestion of different amounts of intact and hydrolysed proteins. *British journal of nutrition*, 2008. 100(1): p. 61-69.
83. Calloway, D. H. and Kumar, A. M., Protein Quality of the Bacterium *Hydrogenomonas eutropha*. *Applied Microbiology*, 1969. 17(1): p. 176-178.
84. Ercili-Cura, D., Hakamies, A., Sinisalo, L., Vainikka, P., Pitkanen, J. Food out of thin air. *Food Science and Technology*, 2020, 34(2), 44-48.
85. Waslien, C. and Oswald, W., Unusual sources of proteins for man. *Food Science and Nutrition*, 1975. 6(1): p. 77-151.

86. Sillman, J., et al., Bacterial protein for food and feed generated via renewable energy and direct air capture of CO<sub>2</sub>: Can it reduce land and water use? *Global Food Security*, 2019. 22: p. 25-32.
87. Novonutrients. <https://www.novonutrients.com>, Erişim tarihi: [15.04.2021].
88. Solar Foods. 2021. <https://solarfoods.fi>, Erişim tarihi: [26.05.2021].
89. Avecom. 2021. <https://avecom.be/feed-and-food>, Erişim tarihi: [22.06.2021].
90. Deep Branch. 2021. <https://deepbranch.com>, Erişim tarihi: [22.06.2021].