



**ALTERNATİF PROTEİN KAYNAĞI OLARAK MAKROALGLER VE  
MAKROALGAL PROTEİNLERİN EKSTRAKSİYONU: BİR DERLEME  
ÇALIŞMASI**

**Eda ŞENSU<sup>1,2\*</sup>, Aysun YÜCETEPE<sup>3</sup>, Beraat ÖZÇELİK<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Mühendisliği Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

Geliş/Received: 09.09.2024; Kabul /Accepted: 29.11.2024; Online baskı /Published online: 02.12.2024

Şensu, E., Yücepe, A., Özçelik, B. (2024). Alternatif protein kaynağı olarak makroalgler ve makroalg proteinlerinin ekstraksiyonu: Bir derleme çalışması. GIDA (2024) 49 (6) 1175-1189 doi: 10.15237/gida.GD24093

*Şensu, E., Yücepe, A., Özçelik, B. (2024). Macroalgae as alternative protein sources and extraction of macroalgal protein: A review study. GIDA (2024) 49 (6) 1175-1189 doi: 10.15237/gida.GD24093*

**ÖZ**

Nüfus artışı, ekilebilir arazi ve su kaynaklarının giderek azalması ve hayvancılığın olumsuz çevresel etkisi alternatif protein kaynaklarını bulma konusunda araştırma yapmayı gerekli kılmaktadır. Biyoaktif bileşenler açısından zengin olan makroalgler potansiyel sağlık yararları nedeni ile ilgi çekmektedir. Makroalgler, ekilebilir araziye ihtiyaç duymadan yetiştirilebilmeleri nedeni ile karasal bitkilere göre önemli bir avantaja sahiptir. Ayrıca, makroalgler diğer bitkisel ve hayvansal kaynaklı proteinlere kıyasla protein ve amino asit içeriği açısından önemli ölçüde zengindir. Ancak, makroalglerden protein ekstraksiyonu için kullanılan geleneksel yöntemler yüksek enerji ve su tüketiminin yanı sıra düşük ekstraksiyon verimi nedeniyle dezavantajlar sunmaktadır ve bu da makroalg proteinlerinin kullanılabilirliğini sınırlamaktadır. Bu noktada, makroalglerden proteinlerin ekstraksiyonu için düşük maliyetli, yeni ve sürdürülebilir teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu derleme çalışmasında, öncelikle makroalglerin özellikleri, protein kalitesi, amino asit bileşimi ve sindirilebilirliğine dayalı olarak kullanım potansiyelleri açıklanmıştır. Ayrıca, makroalglerden proteinlerin ekstraksiyonu için enzimatik, darbeli elektrik alan, ultrases, mikrodalga, yüksek basınç ve sub-kritik akışkan ekstraksiyon gibi yeni yöntemler tartışılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Makroalg, deniz yosunu, protein, ekstraksiyon, yeni teknolojiler

**MACROALGAE AS ALTERNATIVE PROTEIN SOURCES AND EXTRACTION  
OF MACROALGAL PROTEIN: A REVIEW STUDY**

**ABSTRACT**

Increased population, decrease in arable land and water supplies, and the detrimental environmental impact of husbandry have prompted research into alternate protein sources. Macroalgae, rich in bioactive chemicals, are gaining popularity due to their potential health advantages. Macroalgae have a significant advantage over terrestrial plants in that they can be cultivated without needing arable

\* Sorumlu Yazar / Corresponding author

✉: esensu@gelisim.edu.tr/sensueda34@gmail.com

☎: (+90) 545 688 2026

Eda Şensu; ORCID no: 0000-0002-6240-8381

Aysun Yücepe; ORCID no: 0000-0002-3800-4774

Beraat Özçelik; ORCID no: 0000-0002-1810-8154

land. In addition, macroalgae are significantly rich in protein and amino acid content compared to other plant and animal proteins. However, traditional methods used for protein extraction from macroalgae present disadvantages due to high energy and water consumption and low extraction efficiency, which limits the usability of macroalgal proteins. At this point, protein extraction from macroalgae requires low-cost, innovative, and sustainable technology. This review indicates the properties of macroalgae and their potential for use based on their protein quality, amino acid composition and digestibility. Also, new methods such as enzymatic, pulsed electric field, ultrasound, high pressure, and sub-critic water extraction for extracting proteins from macroalgae were discussed.

**Keywords:** Macroalgae, seaweed, protein, extraction, novel technologies

## GİRİŞ

Dünya nüfusunun 2050 yılına kadar yaklaşık 10 milyara ulaşacağı, bunun da gıda talebinde yaklaşık %70 oranında bir artışa neden olacağı tahmin edilmektedir (Dopelt vd., 2019; Nadathur vd., 2024). Gelecekte ortaya çıkması muhtemel olan gıda taleplerini karşılamak amacıyla tarım arazisi ve su temini ihtiyacında %14'lük bir artışla birlikte gıda üretiminin en yüksek kapasitesine ulaşması beklenmektedir. Hayvansal ve bitkisel kaynaklar en yaygın iki protein kaynağı olduğundan, gelecekte protein arzında ciddi bir eksiklik yaşanma potansiyeli bulunmaktadır. Bu nedenle, geleneksel bitkisel ve hayvansal gıdalar ile aynı veya daha iyi besin içeriğine sahip alternatif protein kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut protein talebinin karşılanabilmesi amacıyla makroalgler, mikroalgler, böcekler ve mikrobiyal proteinler alternatif protein kaynağı olarak düşünülmektedir (Fasolin vd., 2019; Kazir vd., 2019).

Makroalgler veya deniz yosunları makroskobik, ökaryotik ve fotosentetik deniz ürünleridir. Makroalgler insanlar tarafından yüzlerce yıldır gıda, yem, ilaç ve gübre olarak kullanılmaktadır. Antik kayıtlar, makroalglerin insan yiyeceği olarak M.Ö. 500'lerde Çin'de ve bin yıl sonra Avrupa'da toplandığını göstermektedir (Pereira, 2021a). Makroalgler renk pigmentlerine göre üç gruba ayrılmaktadır. Yeşil makroalgler yapısında klorofil a, c ve ksantofil bulundurmaktadır. Kırmızı makroalgler klorofilin yanı sıra, kırmızı rengi veren fikobilinlere ve bazı karotenoidlere sahiptirler. Kahverengi makroalgler ise klorofil ve karotenidleri içerirken, asıl kahverengi renkten sorumlu baskın pigment olarak fukoksantin içermektedirler (Pereira, 2021b). Makroalgler karbonhidratlar, proteinler, lipitler, fenolik bileşikler, pigmentler, mineraller ve vitaminler

açısından zengindir (Gomez-Zavaglia vd., 2019; Peñalver vd., 2020). Makroalgler kuru ağırlıklarının %8 ila %47'si arasında olduğu bildirilen protein içeriğine sahiptir ve en yüksek protein içeriği kırmızı ve yeşil alg türlerinde bulunmaktadır (Biris-Dorhoi vd., 2020).

Protein ekstraksiyonu, algal proteinlerden elde edilen biyoaktif peptitlerin keşfinde önemli bir süreci oluşturmaktadır. Makroalgal hücre duvarının karmaşıklığı ve sertliğinin yanı sıra polisakkaritlerin ve polifenollerin varlığından dolayı ekstraksiyon süreci zorlaşabilmektedir (Harnedy ve FitzGerald, 2013). Makroalglerden protein ekstraksiyonu için genellikle hücre duvarının parçalanması gerekmektedir. Hücre duvarının parçalanmasında ve elde edilen protein veriminin artırılmasında enzimatik yöntemler, darbeli elektrik alan işlemleri, ultrases ve sub-kritik su ekstraksiyonu gibi yeni ve çevre dostu yöntemler uygulanmaktadır (Bleakley ve Hayes, 2017; Cermeño vd., 2020; de Souza Celente vd., 2023; Gordalina vd., 2021).

Bu derleme çalışmasında makroalglerin alternatif protein kaynağı olarak kullanılabilirlikleri ile ilişkili olarak makroalglerin özellikleri, protein kalitesi, amino asit kompozisyonu ve sindirilebilirliği hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, makroalgal protein ekstraksiyonunda yeni ve çevre dostu yeşil teknolojilerin kullanılabilirliği tartışılmıştır.

## MAKROALGLER

Makroalgler suda veya nemli yerlerde yaşayan tek veya çok hücreli organizmalardır. Güneş ışığını emerek kimyasal enerjiye dönüştüren klorofile sahip olmaları aynı zamanda karbondioksiti yakalayarak oksijen üretmelerini sağlamaktadır. Bu özelliklerinden dolayı "dünyanın akciğerleri" olarak kabul edilmektedirler (Gaspar vd., 2020;

Pereira, 2021b). Bir makroalgin rengi, hücrelerinde bulunan farklı fotosentetik pigmentlerin kombinasyonu ile oluşmaktadır. Makroalglerin hepsinde klorofil bulunmasına rağmen renkleri oldukça çeşitlidir ve pigmentasyonlarına göre temelde 3 gruba ayrılmaktadırlar: Kırmızı makroalgler, yeşil makroalgler ve kahverengi makroalgler.

### Kırmızı makroalgler

Kırmızı makroalgler, tek hücreliden çok hücreliye kadar suda yaşayan fotoototrofik bitkilerin yaygın bir grubunu oluşturmaktadır. Şu ana kadar tespit edilen yaklaşık 6500 türle en çeşitli taksonomik gruba sahiptirler (Nan vd., 2017). Kırmızı makroalg tarımı açık denizde, özellikle kıyı şeridinde yapılmaktadır. Lezzetli bir gıda olarak kabul edilen ve çeşitli yemeklerde kullanılan kırmızı makroalglerin tarımı, öncelikli olarak Asya ülkelerinde yapılmaktadır (Titlyanov ve Titlyanova, 2010). Bunlar arasında, Nori olarak bilinen *Porphyra* popülerdir ve esas olarak suşi sosu, atıştırma ve çorbalarda kullanılmaktadır. *Palmaria palmata* veya *P. dulce* giderek atıştırma ve çorbalarda bir bileşen haline gelirken, *Gracilaria* ve *Kappaphycus/Eucheuma* genellikle salata ve turşu olarak tüketilmektedir. Doğrudan tüketilmenin yanı sıra, karragenanlar (*Kappaphycus/Eucheuma*) ve agarların (*Gracilaria* spp. ve *Gelidium* spp.) üretiminde kullanılmaktadır (Cai vd., 2021).

### Yeşil makroalgler

Yeşil makroalgler yüksek büyüme oranına sahiptir ve dünya çapında kıyı bölgelerinde kolaylıkla yetişebilmektedir. Karasal kaynaklarla karşılaştırıldığında yeşil makroalglerin büyümesi daha hızlıdır, tarımsal araziye/girdilere (gübre, pestisit ve su) ihtiyaç duymaz ve büyük ölçekli potansiyel üretim olanağına sahiptir (Lakshmi vd., 2020).

Yeşil alglerin en çok tüketilen türleri *Ulva lactuca* (deniz marulu), *U. intestinalis* ve *U. compressa* dahil *Ulva* spp. türleridir (Bleakley ve Hayes, 2017). Yetiştirilen yeşil makroalgler, salata ve diğer yemeklerin hazırlanmasında deniz sebzeleri olarak kullanılabilir. Deniz üzümü veya yeşil havyar olarak da bilinen *Caulerpa lentillifera* yaygın

adından da anlaşılacağı üzere lezzet bileşeni olarak kabul edilmektedir (Ferdouse vd., 2018).

Yeşil makroalglerde rapor edilen çeşitli biyoaktif ve besleyici bileşikler vardır. Bunlar; doğal pigmentler, çoklu doymamış yağ asitleri, lipitler, proteinler ve polisakkaritler olarak sıralanabilir. Sahip oldukları bu biyoaktif bileşiklerin, nutrasötik ve kozmetik endüstrilerinde kullanılacak birçok sağlık potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir (Ruslan vd., 2021).

### Kahverengi makroalgler

Kahverengi makroalgler yalnızca çok hücreli formda buldukları için algler arasında benzersizdir ve 2000'den fazla tür içeren önemli bir topluluktur. Kahverengi algler, tür ve morfolojik yapı açısından en büyük çeşitliliği sergiledikleri ılıman ve kutup altı bölgelerde gelişmektedirler (Bringloe vd., 2020).

*Macrocystis pyrifera* (dev yosun) gibi bazı türler, 20 m'ye kadar büyüüp su altı yosun ormanları oluşturarak ekosistemde önemli bir rol oynamaktadır. *Laminaria digitata* (kürek otu), *Ascophyllum nodosum* (kaya otu) ve *Fucus vesiculosus* (mesane otu) gibi kahverengi alg türleri hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, *Undaria pinnatifida* (wakame), *Hizikia fusiformis* (hijiki) ve *Laminaria japonica* (kombu) başta olmak üzere insan tüketimi için kullanılan birçok tür de mevcuttur (Bleakley ve Hayes, 2017).

Kahverengi makroalgler, çeşitli fitokimyasalları yüksek oranda içermektedir ve önemli terapötik özelliklere sahip oldukları kanıtlanmıştır. Bu nedenle, kahverengi makroalgler, fonksiyonel gıda pazarı dahil olmak üzere birçok endüstride biyoaktif ajan olarak kullanım potansiyeline sahiptir (Bringloe vd., 2020).

### MAKROALGLERİN KİMYASAL KOMPOZİSYONU

Makroalgler, esas olarak diyet lifleri gibi nişasta olmayan polisakkaritler ve potasyum, kalsiyum gibi temel mineraller açısından zengindirler (Circuncisão vd., 2018). Makroalgal proteinler, yüksek miktarda içerdikleri esansiyel amino asitler nedeniyle yüksek biyolojik değere sahiptirler. Makroalglerin lipit içeriği genellikle düşüktür,

ancak yüksek düzeyde fonksiyonel omega-3, eikosapentaenoik asit (EPA), omega-6 ve araşidonik asit yağ asitlerini içermektedirler. Ek olarak, yenilebilir makroalglerin çeşitli fitokimyasallar açısından zengin olması insan beslenmesi için değerini ortaya koymaktadır (Xie vd., 2024). Bu nedenle, makroalgler biyolojik

olarak aktif ve yenileyici özellikleri nedeniyle nutrasötik, farmasötik, kimya, gıda ve kozmetik endüstrilerinde potansiyel uygulamaları olan değerli bileşiklerin uygulanabilir ve ekonomik bir biyokütle kaynağıdır (Garcia-Vaquero vd., 2020). Makroalglerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 1'de gösterilmektedir.

Çizelge 1: Makroalglerin kimyasal kompozisyonları

	Protein (%)	Yağ (%)	Karbonhidrat (%)	Mineral (%)	Referans
Kırmızı makroalgler	5.5-42.4	0.3-7.1	18.7-78.7	7.4-53.4	(Rawiwan vd., 2022)
Yeşil makroalgler	7.0-33.0	0.2-4.1	29.8-58.1	11.0-73.0	(Salehi vd., 2019)
Kahverengi makroalgler	4.3-24.0	0.3-4.5	12.2-56.4	17.0-44.0	(Meng vd., 2022)

### MAKROALGAL PROTEİNLER

Makroalglerin protein içeriği oldukça değişkenlik göstermektedir. Kırmızı makroalglerin kuru ağırlığının %10 ile %47 arasında değişen ve diğer makroalglerle kıyasla daha yüksek protein içeriğine sahip olduğu rapor edilmiştir (Naseri vd., 2020). Yeşil makroalglerin protein içeriği kuru ağırlıklarının %9 ila %26'sı arasında değişmektedir (Pliego-Cortés vd., 2020). Kahverengi makroalglerin protein içeriği ise kırmızı veya yeşilden daha azdır ve genellikle kuru ağırlığının %3 ila %15'i arasında olduğu bildirilmiştir (Praveen vd., 2019). *Palmaria palmata* (dulce) ve *Porphyra tenera* (nori) gibi bazı kırmızı makroalglerde protein seviyeleri sırasıyla %35 ve %47 gibi yüksek değerler olabilmektedir. Yeşil makroalg olan *Ulva* sp. %7-%33 aralığında protein içerdiği ve çoğu kahverengi makroalgin ise %15 protein içeriğine sahip olduğu rapor edilmiştir (Harnedy ve FitzGerald, 2011). Ayrıca, makroalglerin bileşimi coğrafi kökenlerinden ve büyüme mevsiminden önemli ölçüde etkilenmektedir. Sıcaklık, ışık ve suyun tuzluluğundaki değişiklikler besin içeriğini ve nitrojen mevcudiyetini, bu da protein ve amino asit içeriğini etkileyebilmektedir (Pliego-Cortés vd., 2020). Makroalglerde aktif olarak fonksiyonel olan proteinler, fikobiliproteinler ve lektinler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Echave vd., 2022).

### Fikobiliprotein

Fikobiliproteinler, siyanobakteriler (Cyanophyta), kırmızı makroalgler ve kriptomonadlarda (Cryptophyta) bulunan fotosentezde önemli role sahip parlak renkli ve yüksek derecede floresan özelliği olan suda çözünür proteinlerdir (Echave vd., 2022). Fikobiliproteinler renk ve emilim özelliklerine göre dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar; fikoeritrin, fikosiyanın, allofikosiyanın ve fikoeritrosiyandır (Puzorjov ve McCormick, 2020). Fikobiliproteinler, gıda ve kozmetik uygulamalarında doğal renklendirici olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamaların dışında fikobiliproteinler göstermiş oldukları antioksidan, antiinflamatuvar, nöroprotektif, hipokolesterolemik, hepatoprotektif, antiviral, antitümör aktiviteleri sayesinde terapötik alanlarda da tercih edilmektedir (Ji vd., 2023).

### Lektin

Lektinler düşük moleküler ağırlığa sahip, mikropların, mayaların, tümör hücrelerinin aglütine olmalarını sağlayan karbonhidratlara yüksek spesifiklikle bağlanmaları ile bilinen glikoproteinlerdir (Thiviya vd., 2022). Makroalgal lektinler tarafından sergilenen biyoaktif özellikler arasında antibiyotik, mitojenik, sitotoksik, antinosiseptif, antiinflamatuvar, antiadezyon ve antiviral aktiviteleri yer almaktadır (Pliego-Cortés vd., 2020). Lektinler sahip oldukları antimikrobiyal, antitümör ve antiviral aktiviteleri

nedeniyle tarımsal ve tıbbi uygulamaların yanı sıra immünolojik ve histokimyasal çalışmalar açısından oldukça ilgi çekmektedirler (Agrawal vd., 2020; Ahmed vd., 2022).

### MAKROALGAL PROTEİNLERİN BESİNSEL KALİTESİ

#### Amino asit kompozisyonu

Algler genellikle Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) gerekliliklerini karşılayan esansiyel amino asit bileşimi ile geçerli bir protein kaynağı olarak kabul edilmektedir (Fao, 2018). Makroalglerden elde edilen proteinler, yüksek oranda glisin, alanin, arjinin, prolin, glutamik ve aspartik asitler olmak üzere tüm amino asitleri içermektedir (Corino vd., 2019; Cotas vd., 2020). Treonin, lizin, triptofan, kükürt amino asitleri sistein, metiyonin ve histidin, çoğu makroalg proteininde düşük seviyelerde bulunmaktadır (O' Connor vd., 2020). Makroalglerde bulunan treonin, lizin, triptofan, sistein, metiyonin ve histidin gibi esansiyel amino asitlerin (EAA) miktarı karasal bitkilerde bulunanlardan daha yüksektir (Pimentel vd., 2019). Ayrıca, makroalgal amino asit profilleri, ovalbümin (%52.4 EAA) ve baklagil bitkilerinin (%41.62 EAA) profillerine benzer özellik göstermektedir (Paiva vd., 2014). Aspartik asit ve glutamik asit, birçok makroalg türünde toplam amino asitlerin nispeten büyük bir kısmını oluşturarak, makroalglerle ilişkilendirilen ayırt edici "umami" tada büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, makroalgler bir dizi biyoaktif amino asit ve peptit (örneğin taurin, karnosin ve glutatyon) içermektedir (Machado vd., 2020).

Makroalglerin sahip olduğu amino asit profillerinin protein seviyesindeki değişime benzer olarak cins ve mevsime göre değişiklik gösterebileceği rapor edilmiştir. Konstantin vd. (2023), kahverengi makroalglerdeki EAA içeriğinin soğuk mevsimde en düşük (%33), ilkbahar ve yaz mevsiminde ise en yüksek (%52) düzeyde olduğunu bildirmiştir. Bu değişimin, besin temini ve özellikle azot bulunabilirliği gibi çevresel faktörlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir; bu faktörlerin su sıcaklığı, tuzluluk, ışık şiddeti ve dalga kuvveti gibi

etmenlerden etkilenebileceği öne sürülmektedir (Kamal vd., 2023).

#### Protein sindirilebilirliği

Protein sindirimi, kompleks protein moleküllerinin daha küçük peptit parçalarına parçalanması sürecidir. Bu süreç, sindirim için çeşitli enzimlerin ve hormonların kullanımını gerektirmektedir. Sindirim, gıdanın yemek borusu yoluyla gastrointestinal sisteme girmesiyle başlamaktadır ve midede pepsinojen enzimi hidroklorik asit ile etkileşime girerek pepsine dönüşmektedir. Pepsin enzimi proteinlerin polipeptitlere parçalanmasını sağlamaktadır. Gıda bağırsağa ilerledikçe, enterokinaz enzimi aktive olmakta ve tripsini salgılatarak serbest amino asitleri ve peptit parçalarını oluşturmaktadır. Oluşan peptit parçaları, membrana bağlı peptidazlarla etkileşime girerek dipeptitlere veya tripeptitlere parçalanmaktadır. Bu parçalanma işlemi, enterositlerin içine girerek sitozolik peptidazların aktivitesiyle serbest amino asitlerin oluşmasına yol açmaktadır. Oluşan amino asitler bazolateral membrandan kan dolaşımına geçerek vücutta biyoaktivitelerini gerçekleştirebilir hale gelmektedirler (O' Brien vd., 2022).

Makroalglerin sindirilebilirliği ile ilişkili olarak yapılan pek çok çalışmada makroalglerin yapılarında yer alan fenolik bileşiklerin ve polisakkaritlerin protein sindirilebilirliğini zorlaştırdığı öne sürülmektedir. Kahverengi makroalglerle (%78.7-%82.0) kıyasla kırmızı makroalgal proteinlerin (%83.0-%87.0) önemli ölçüde daha yüksek *in vitro* sindirilebilirliği olduğu rapor edilmiştir (Tibbetts vd., 2016). Bu sonuçlar, makroalgal proteinlerin, tahıllar (%69.0-%84.0), baklagiller (%72.0-%92.0), meyveler (%72.0-%92.0) ve sebzeler (%68.0-%80.0) dahil olmak üzere yaygın olarak tüketilen diğer bitkilerle karşılaştırıldığında benzer ya da daha yüksek *in vitro* sindirilebilirliğe sahip olduğunu göstermektedir (Tibbetts vd., 2016).

### MAKROALGAL PROTEİNLERİN EKSTRAKSİYONU

Makroalglerin kimyasal kompozisyonu türe ve mevsime göre değişkenlik gösterirken, sahip olduğu hücre duvarından ve uygulanan

ekstraksiyon yönteminden de etkilenmektedir (Magpusao vd., 2021). Makroalg hücreleri, zorlu çevre koşullarına uyum sağlayan, protein ve diğer biyoaktif bileşenlerin ekstraksiyonunu zorlaştıran, dinamik ve karmaşık karbonhidratlar bakımından zengin hücre duvarı ile çevrelenmektedir (Domozych, 2019). Bu sebeple, makroalg hücre duvarlarının yapısal çeşitliliğinin ve sertliğinin etkisi, ekstraksiyon sürecinde kritik öneme sahiptir (Gordalina vd., 2021). Ekstraksiyon, farklı türdeki biyoaktif bileşiklerin materyallerden izole edilmesinde en önemli adımdır. Makroalglerden aktif bileşenlerin ekstraksiyon verimliliği, kahverengi makroalglerdeki aljinatlar ve kırmızı makroalglerdeki karragenanlar gibi yüksek viskoziteli ve anyonik hücre duvarı polisakaritleri nedeniyle azalabilmektedir. Bu nedenle, biyoaktif

bileşiklerin ekstraksiyon verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için farklı ekstraksiyon yöntemleri kullanılmaktadır (O' Connor vd., 2020). Ek olarak, herhangi bir bitki materyalinden biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyon verimliliği, ekstraksiyon solventi, partikül boyutu, sıcaklık, zaman, pH gibi bir dizi faktörden etkilenebilmektedir (Bhadange vd., 2024). Hücre parçalama teknikleriyle uygulanan yöntemler, sert alg hücre duvarının parçalanmasına yardımcı olarak proteinlerin kullanılabilirliğini artırmaktadır. Yeni protein ekstraksiyon yöntemleri arasında enzim destekli ekstraksiyon, ultrases destekli ekstraksiyon, darbeli elektrik alan, yüksek hidrostatik basınç ve sub-kritik su ekstraksiyon yöntemleri yer almaktadır (Gordalina vd., 2021) (Çizelge 2).

Çizelge 2: Farklı makroalgere uygulanan protein ekstraksiyon yöntemleri ve protein verimleri

Ekstraksiyon yöntemi	Makroalg	Proses koşulları	Protein verimi (%)	Referans
Enzim destekli ekstraksiyon	<i>Palmaria palmata</i>	Alkalaz enzimi (Enzim/substrat %0.2 ve %0.4 g/g)	80.0	(Naseri vd., 2020)
	<i>Macrocystis pyrifera</i>	Selülaz (Enzim/substrat 1/10 h/a)	74.6	(Vásquez vd., 2019)
	<i>Chondracanthus chamissoi</i>	Selülaz (Enzim/substrat 1/10 h/a)	36.1	(Vásquez vd., 2019)
	<i>Palmaria palmata</i>	Shearzyme ve selülaz (Enzim/substrat 48.0×10 <sup>3</sup> birim/100 g)	7.84	(Harnedy ve FitzGerald, 2013)
Ultrases destekli ekstraksiyon	<i>Porphyra yezoensis</i>	15 ve 20 kHz	50.0	(Qu evd., 2013)
	<i>Ulva sp.</i>	-	70.0	(Kazir vd., 2019)
	<i>Gracilaria sp.</i>	-	86.0	(Kazir vd., 2019)
	<i>Gracilaria pusillum</i>	Ultrases genlik düzeyi (60, 90, 120 µm); Ultrases uygulama süresi (1, 2, 4, 6, 8 ve 10 dk)	77.0- 93.0	(Mittal vd., 2017)
Sub-kritik su ekstraksiyonu	<i>Hypnea musciformis</i>	210 °C, 10 dk	80.0	(Pangestuti vd, 2019)
Darbeli elektrik alan	<i>Ulva sp.</i>	Darbe; 0-75, voltaj; 12 -26 kV, alan şiddeti; 1.56-7.26 kV/cm	5.4	(Polikovskiy vd., 2019)
	<i>Ulva ohio</i>	Darbe; 1 Hz, voltaj; 1 kV, akım; 160 A.	14.9	(Prabhu vd., 2019)
	<i>Ulva lactula</i>	Darbe süresi; 0.05 ms, voltaj; 4 kV; alan şiddeti; 7.5 kV/cm	15.1	(Postma vd., 2018)
Yüksek hidrostatik basınç	<i>Fucus vesiculosus</i>	600 MPa, 4 dk	23.7	(O'Connor vd., 2022)
	<i>Alaria esculenta</i>	600 MPa, 4 dk	15.0	(O'Connor vd., 2022)
	<i>P. palmata</i>	600 MPa, 4 dk	14.9	(O'Connor vd., 2022)
	<i>Chondrus crispus</i>	600 MPa, 4 dk	16.1	(O'Connor vd., 2022)

### Enzim destekli ekstraksiyon

Enzim destekli ekstraksiyon (EDE), hücre duvarı yapısını bozmak ve gömülü proteinleri/peptitleri serbest bırakmak için enzimin hidrolitik etkisini içermektedir (Bleakley ve Hayes, 2017). EDE yöntemlerinin protein verimini artırdığı kadar biyoaktif bileşenleri ve metabolitleri de koruduğu bildirilmektedir (Harnedy ve FitzGerald, 2013). EDE'de, spesifik polimer bağların parçalanması yoluyla hücre duvarını bozan ve yaygın olarak polisakkarit bileşenlerini parçalayan selülozlar, ksilanazlar ve alkalazlar gibi polisakkaridaz enzimleri kullanılmaktadır (Pliego-Cortés vd., 2020; Vásquez vd., 2019). Yüksek ekstraksiyon verimi elde edebilmek için uygun hidrolitik enzimin veya optimal enzim karışımının seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca ekstraksiyon sırasında uygulanan zaman-sıcaklık aralığı, optimum sıcaklık, pH ve hidroliz sırasında uygulanan çalkalama şiddeti dahil olmak üzere enzimlerin aktivitesini ve ekstraksiyon verimini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır (Bashir vd., 2020). Enzim destekli ekstraksiyon, organik solvent kullanımını azaltarak gıda sınıfı bir yaklaşım sunmaktadır. EDE ile ekstrakte edilen biyoaktif bileşenlerin antiviral, antioksidan ve antikanser gibi çeşitli biyolojik aktivitelerde üstün özellik gösterdiği bildirilmiştir. Ancak, enzim preparatlarının pahalı olması, uzun ekstraksiyon süreleri ve enzimin çalışma koşullarının ayarlanması (sıcaklık, pH) yöntemin dezavantajlarından biridir (Kadam vd., 2015).

Naseri vd. (2020), *Palmaria palmata*'dan protein ekstraksiyonunda alkalaz enzimi kullanarak %80 oranında ekstraksiyon verimi elde etmiştir. Vásquez vd. (2019), bir karbohidraz enzim olan selülozın, kahverengi makroalg *Macrocystis pyrifera* ve kırmızı makroalg *Chondracanthus chamissoi*'den protein ekstraksiyon verimini enzimatik olmayan ekstraksiyon yöntemine kıyasla sırasıyla 4.7 ve 1.5 kat arttığını rapor etmiştir. Harnedy ve FitzGerald (2013), *Palmaria palmata*'dan ticari glukanaaz kokteyllerini (Shearzyme ve selüloz) kullanarak yüksek verim ile protein ekstrakte etmiştir.

### Ultrases destekli ekstraksiyon

Ultrases destekli ekstraksiyon (UDE), süspansiyon içindeki moleküllerin hücre duvarı

bütünlüğünün bozulması ve parçalanması için yüksek frekanslı ses dalgaları kullanımını içeren bir ekstraksiyon yöntemidir. Ultrases destekli ekstraksiyonda çözücü boyunca ilerleyen ve kavitasyon kabarcıkları üreten 20 kHz ila 100 kHz aralığındaki ses dalgaları kullanılmaktadır. Karmaşık örnek matrisinin yüzeyinde kavitasyon kabarcıkları patladığında, bir şok dalgası örnek hücre duvarında hasara neden olmaktadır ve yüksek değerli biyoaktif bileşiklerin hücresel membranlar boyunca çözeltiye kütle transferini artırmaktadır (Christou vd., 2021). UDE tekniği, ekstraksiyon işlemi sırasındaki sıcaklık nispeten düşük olduğundan ve ekstrakte edilen bileşiklerin stabilitesini etkilemediğinden, soğuk ekstraksiyon tekniği olarak kabul edilmektedir. UDE, toksik kimyasal solventlerin kullanımını azaltma veya ortadan kaldırma potansiyeli gibi çeşitli avantajlara sahiptir ve daha ekonomik bir süreç sunmaktadır. Ayrıca, UDE kullanılarak, ekstraksiyon işlemleri yüksek tekrarlanabilirlik ile birkaç dakika içinde tamamlanabilmekte ve nihai ürüne daha yüksek bir saflık kazandırılmaktadır (Pan-Utai vd., 2022; Vásquez-Rodríguez vd., 2020). Bununla birlikte, protein ekstraksiyon yöntemi olarak ultrases, çok az miktarda protein geri kazanımı ile sınırlı parçalama verimliliği göstermektedir ve bu nedenle sıklıkla diğer ekstraksiyon teknikleriyle birlikte kullanılmaktadır. Ancak, sıvı ekstraksiyon yöntemine kıyasla yüksek maliyet ve kontrolsüz ultrasonikasyon diğer hücresel bileşenlerin bozulmasına yol açabilme olasılığı, ultrason teknolojisinin kullanım alanını sınırlamaktadır (Samarathunga vd., 2022).

Literatürde, makroalglerden protein ekstraksiyonu için UDE'nin kullanıldığı pek çok çalışma mevcuttur. Örneğin, *Porphyra yezoensis*'te 15 ve 20 kHz'lik ultrases uygulanması sonucunda ekstraksiyon veriminde %50 artış olduğu ve ekstraksiyon süresinde %18 azalma olduğu rapor edilmiştir (Qu vd., 2013). Başka bir çalışmada, UDE ile *Ulva* sp. ve *Gracilaria* sp. makroalglerinden protein ekstraksiyon veriminin sırasıyla %70.0 ve %86.0 olduğu bildirilmiştir (Kazir vd., 2019). Benzer şekilde, Mittal vd. (2017), UDE kullanarak kırmızı makroalglerden fikoeritrin ve fikosiyanın gibi spesifik proteinleri ekstrakte etmiş ve *Gracilaria pusillum*'dan elde

edilen en yüksek fikoeritrin ve fikosiyanın verimini sırasıyla %77.0 ve %93.0 olarak bulmuştur. Ayrıca, Yücepe vd. (2024) enzim desteği ile birlikte uyguladıkları ultrasonikasyon destekli ekstraksiyon ile *Halopteris scoparia* makroalginden %94.5 verimle protein elde etmiştir.

### Sub-kritik su ekstraksiyonu

Sub-kritik su ekstraksiyon (SKSE) tekniği, suyun kısa bir süre (5-10 dakika) kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklarda (100-374 °C) yüksek basınç altında (10-60 bar) sıvı halde tutulmasını gerektirmektedir (Cheng vd., 2021). Bu koşullar altında su benzersiz özellikler göstermektedir; viskozitesi ve yoğunluğu azalırken, çözünürlük ve kütle aktarım hızı artmaktadır. Ayrıca, dielektrik sabiti azalmakta ve hidrojen bağ yapısı zayıflamaktadır. Bu durum, apolar bileşenlerin çözünmesini kolaylaştırmaktadır (Zainan vd., 2022). SKSE’de, çözücü olarak organik çözücü yerine su kullanıldığı için çevre dostu bir ekstraksiyon yöntemi olarak kabul edilmektedir (Bhadange vd., 2024). Atmosfer koşullarındaki çalışmayla karşılaştırıldığında, sub-kritik su ekstraksiyonu ekstraksiyon ve depolimerizasyon için daha hızlı ve daha verimli bir yöntemdir. Sub-kritik ekstraksiyon kimyasal çözücülere ihtiyaç duymadan, kısa sürede, yüksek kalitede ekstrakt elde edilmesini sağlayan bir yeşil teknoloji olmasına rağmen, büyük ölçekte uygulamalarının sınırlı olması ve ısı bozulmaya neden olabilme olasılığından dolayı makroalg protein ekstraksiyonunda kullanımı sınırlıdır (Di Domenico Ziero vd., 2020).

Literatürde makroalglerden protein ekstraksiyonu için SKSE yönteminin kullanıldığı çalışmalar sınırlıdır. Proteinler termal bozunmaya karşı hassas olduğundan SKSE için 130-160 °C’lik bir sıcaklık önerilmektedir (Ho vd., 2007). Pangestuti vd. (2019) kırmızı bir makroalg olan *Hypnea musciformis*’den SKSE yöntemi ile protein ekstrakte etmiş ve yaklaşık 210 °C’lik sıcaklıkta uygulanan işlemin %80.0 oranında protein eldesi sağladığını rapor etmiştir. Literatür incelendiğinde, SKSE uygulanan makroalgler için yapılan çalışmalarda çoğunlukla ekstrakte edilen

bileşiklerin biyoaktif özelliklerine odaklanıldığı görülmektedir (Plaza vd., 2010).

### Darbeli elektrik alan

Darbeli elektrik alan (DEA) uygulaması, hücreden biyoaktif bileşenlerin ekstraksiyonunu kolaylaştıran ve solvent kullanımını azaltan çevre dostu bir teknolojidir (Cermeño vd., 2020; Pliego-Cortés vd., 2020). DEA, mikro ve milisaniyeler arasında değişen sürelerle bir elektrik alanından yüksek voltajlı (kV) elektrik akımları üreterek bir hücre duvarının veya hücre zarının degradasyonunu sağlamaktadır. DEA, dışarıdan gelen elektrik darbelerinin yoğunluğuna, genliğine, süresine, sayısına ve tekrarlanma sıklığına bağlı olarak hücre zarında geri dönüşlü ya da geri dönüşsüz elektroporasyon meydana getirmektedir. Ancak iletkenlik ve elektrot boşluğu, bu teknolojinin ölçeklendirilmesini sınırlayabilecek faktörlerdendir (Okolie vd., 2019). Doğal ürünlerin ekstraksiyonu için genellikle 0.7 ila 3 kV/cm elektrik alan kuvveti, 1 ila 20 kJ/kg spesifik enerji, birkaç yüz darbe ve toplam süre 1 saniyeden kısa olan işlemler kullanılmaktadır (Grosso vd., 2015). DEA, hücre içi içeriklerin (biyoaktif bileşenlerin) salınımını desteklemek için hızlı ve yeşil bir teknoloji olmasına rağmen iletkenlik ve elektrot boşluğu, bu teknolojinin ölçeklendirmesini sınırlayabilecek faktörlerdir (Corrales vd., 2008; Joannes vd., 2015).

DEA, özellikle yeşil makroalglerden protein ekstraksiyonunu geliştirmek için yaygın olarak uygulanmıştır. Polikovskiy vd. (2019), DEA ile birleştirilmiş osmotik şok ve ardından hidrolik pres işlemi kullanarak, *Ulva* sp.’den protein ekstraksiyonunu gerçekleştirmiş ve elde edilen protein miktarının %2.2’den %5.4’e yükseldiğini rapor etmiştir. Başka bir çalışmada da, *Ulva ohnoii*’den protein ekstraksiyonu için DEA uygulanmıştır ve DEA uygulandıktan sonra elde edilen protein verimi %3.2’den %14.9’a çıkarılmıştır (Prabhu vd., 2019). Robin vd. (2018), *Ulva* sp.’den protein ekstraksiyonu için mekanik presleme ile birleştirilmiş DEA kullanmıştır ve osmotik şok kullanılarak elde edilen bir ekstrakt ile karşılaştırıldığında protein veriminde (ekstrede ~%20.0 protein) yedi kat artış meydana geldiğini



rapor etmiştir. Ancak, Postma vd. (2018), *U. lactuca*'dan DEA (2 darbe, 3 kV) kullanarak yalnızca %15.1 protein verimi elde ederken, osmotik şok kullanılarak %20.0 protein elde etmiştir. Ayrıca, bu çalışmada 3 ve 5 kV/cm elektrik alanı kuvvetlerinde ve kısa atım süresinde (0.05 ms), 7.5 kV/cm elektrik kuvveti alanına ve daha uzun atım süresine (0.5 ve 5 ms) kıyasla daha yüksek protein verimi sağlandığı rapor edilmiştir. Sonuç olarak, DEA potansiyel olarak, makroalglerden protein ekstraksiyonuna yardımcı olmaktadır, ancak optimize edilmiş hücre degradasyonunu kolaylaştırmak ve ekstraksiyon verimini artırmak için farklı operasyonel parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle DEA biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyon verimini artırmak için bir ön işlem olarak kullanılmaktadır (de Souza Celente vd., 2023; Prabhu vd., 2019).

### Yüksek hidrostatik basınç

Yüksek hidrostatik basınç (YHB), biyolojik dokuların degradasyonuna neden olan sıvı basınçlandırmasının (1000 bar'a kadar) bir sonucu olarak ekstraksiyon verimliliğini artırmaktadır (Silva vd., 2020). YHB işlemi sırasında ekstraksiyon verimini etkileyen faktörler arasında sıvı/çözücü sisteminin seçimi ile birlikte çalışma basıncı, sıcaklık ve süre sayılabilmektedir (Xi, 2017). YHB, nispeten kısa işlem süresi, ılımlı çalışma sıcaklığı ve yüksek geri kazanım verimleri nedeniyle etkili bir çevre dostu ekstraksiyon teknolojisi olarak kabul edilmektedir (Echave vd., 2021). Ancak, pahalı bir yöntem olmasından dolayı makroalglerden protein ekstraksiyonunda kullanımı sınırlıdır (Postma vd., 2018).

Literatürde YHB destekli ekstraksiyonun, proteinlerde basınca bağlı konformasyonel değişim/denatürasyon meydana getirmesi nedeniyle sınırlı olduğu görülmektedir. Örneğin, O' Connor vd. (2020), YHB ön işlemi (600 MPa, 4 dk) kullanılarak *Fucus vesiculosus* (%23.7), *Alaria esculenta* (%15.0), *P. palmata* (%14.9) ve *Chondrus crispus*'tan (%16.1) protein ekstraksiyonu gerçekleştirmiştir ve YHB'nin geleneksel yöntemlere (otoklav veya osmotik şok+sonikasyon+dondurma+çözdürme+tuzlam a) kıyasla ekstrakte edilen protein miktarını

artırmadığını rapor etmiştir. Protein ekstraksiyonunda geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında, YHB'nin ekstraksiyon veriminin daha düşük olması, hücre duvarı degradasyonunu artırması için daha fazla basamak içermesine atfedilebilmektedir (Cermeño vd., 2020).

YHB'nin diğer ekstraksiyon teknikleriyle, özellikle de YHB destekli enzimatik ekstraksiyon ile kombinasyonu da araştırılmıştır. *P. palmata*'dan protein ekstraksiyonunu için tek başına YHB uygulaması (20 dakika boyunca 400 MPa) ekstraksiyon verimini artırmazken, selüloz ve hemiselüloz ile YHB destekli ekstraksiyon önemli ölçüde verim artışı sağlamıştır (Suwal vd., 2019).

### SONUÇ VE GELECEK TRENDLER

Makroalgler, protein, vitamin ve mineraller açısından zengin olmaları nedeniyle alternatif ve sürdürülebilir bir gıda kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle protein içeriği bakımından, hayvansal ve bitkisel kaynaklarla karşılaştırıldığında, kırmızı makroalgler %10 ile %47 arasında yüksek protein oranları sunmaktadır. Makroalglerin protein içeriği; toplandıkları mevsim, yetiştikleri coğrafi bölge ve iklim koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu bağlamda, kırmızı bir makroalg türü olan *Porphyra tenera* (nori), kuru ağırlık bazında %47'ye ulaşan protein içeriği ile en yüksek protein oranına sahip makroalglerden biri olarak kabul edilmektedir. Protein sindirilebilirliği açısından da kırmızı makroalglerin daha yüksek sindirilebilirlik sunduğu, özellikle *Hypnea* türlerinin %88.7-88.9 oranında sindirilebilirliğe sahip olduğu bilinmektedir. Makroalgal proteinlerin sindirilebilirliği bitkisel proteinlere benzerlik gösterse de, bu proteinlerin *in vivo* biyoyararlanımı hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Makroalgal proteinlerin farmasötik, nutrasötik, kozmetik veya gıda-yem uygulamalarında kullanılabilmesi için uygun ekstraksiyon işlemlerinin kullanılarak yüksek verimde elde edilmeleri gerekmektedir. Bununla birlikte, makroalglerin polisakkarit açısından zengin hücre duvarları, protein ekstraksiyonunu zorlaştıran başlıca etkenlerden biridir. Hücre duvarı parçalama tekniklerinin kullanılması,

makroalgal proteinlerin başarılı bir şekilde ekstrakte edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel hücre parçalama tekniklerinin yüksek enerji ve çözücü gereksinimleri ile zaman alıcı olmaları, yeni ekstraksiyon tekniklerine olan ihtiyacı artırmıştır. DEA, YHB, SKSE, UDE ve EDE gibi çeşitli yöntemler makroalgal protein ekstraksiyonunda kullanılmaktadır. Yapılan incelemelerde, enzim destekli ve ultrases destekli makroalgal protein ekstraksiyonunda elde edilen verimin, diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, ekstraksiyon yöntemlerinde kullanılan parametrelerin optimizasyonu, verimi etkileyen diğer bir önemli faktör olarak öne çıkmaktadır.

Bu derleme çalışmasında, makroalgal proteinlerin gıda kaynağı olarak kullanım potansiyeli tartışılmıştır. Ayrıca, farklı protein ekstraksiyon yöntemlerinin karşılaştırılması yoluyla yüksek verimle elde edilebilirliklerine dair önemli veriler sunulmuştur. Ancak, makroalgal proteinlerin ticari protein pazarına girebilmesi için yasal düzenlemeler ve tüketici kabulü konularının ele alınması gerekmektedir. Ek olarak, makroalgal protein ekstraksiyon çalışmaları çoğunlukla laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmaların endüstriyel ölçekte üretim sağlamak amacıyla ölçek büyütme çalışmalarına odaklanması önem arz etmektedir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

#### YAZARLARIN KATKISI

Tüm yazarlar makalenin hazırlanması, yazımı ve yayınlanmasına katkıda bulunmuşlardır.

#### KAYNAKÇA

Agrawal, S. B., Gupta, N., Bhagyawant, S. S., Gaikwad, S. M. (2020). Anticancer Activity of Lectins from Bauhinia purpurea and Wisteria floribunda on Breast Cancer MCF-7 Cell Lines. *Protein and Peptide Letters*, 27(9), 870–877. <https://doi.org/10.2174/0929866527666200408143614>

Ahmed, M. N., Jahan, R., Nissapatorn, V., Wilairatana, P., Rahmatullah, M. (2022). Plant lectins as prospective antiviral biomolecules in the search for COVID-19 eradication strategies. *Biomedecine & Pharmacotherapie*, 146(112507), 112507. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112507>

Bashir, N., Sood, M., Bandral, J. D. (2020). Enzyme immobilization and its applications in food processing: A review. *Int. J. Chem. Stud*, 8(2), 254–261. <https://www.academia.edu/download/83065850/8-1-503-295.pdf>

Bhadange, Y. A., Carpenter, J., Saharan, V. K. (2024). A comprehensive review on advanced extraction techniques for retrieving bioactive components from natural sources. *ACS Omega*, 9(29), 31274–31297. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02718>

Biris-Dorhoi, E.-S., Michiu, D., Pop, C. R., Rotar, A. M., Tofana, M., Pop, O. L., Socaci, S. A., Farcas, A. C. (2020). Macroalgae-A sustainable source of chemical compounds with biological activities. *Nutrients*, 12(10), 3085. <https://doi.org/10.3390/nu12103085>

Bleakley, S., Hayes, M. (2017). Algal Proteins: Extraction, Application, and Challenges Concerning Production. *Foods (Basel, Switzerland)*, 6(5). <https://doi.org/10.3390/foods6050033>

Bringloe, T. T., Starko, S., Wade, R. M., Vieira, C., Kawai, H., De Clerck, O., Cock, J. M., Coelho, S. M., Destombe, C., Valero, M., Neiva, J., Pearson, G. A., Faugeton, S., Serrão, E. A., Verbruggen, H. (2020). Phylogeny and evolution of the brown algae. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 39(4), 281–321. <https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1787679>

Cai, J., Lovatelli, A., Aguilar-Manjarrez, J., Cornish, L., Dabbadie, L., Desrochers, A., Diffey, S., Garrido Gamarro, E., Geehan, J., Hurtado, A., Lucente, D., Mair, G., Miao, W., Potin, P., Przybyla, C., Reantas, M., Roubach, R., Tauati, M., Yuan, X. (2021). *Seaweeds and microalgae: An overview for unlocking their potential in global aquaculture development* (Food and Agriculture Organization, Ed.). Food & Agriculture Organization of the UN. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>

- Cermeño, M., Kleekayai, T., Amigo-Benavent, M., Harnedy-Rothwell, P., FitzGerald, R. J. (2020). Current knowledge on the extraction, purification, identification, and validation of bioactive peptides from seaweed. *Electrophoresis*, *41*(20), 1694–1717. <https://doi.org/10.1002/elps.202000153>
- Cheng, Y., Xue, F., Yu, S., Du, S., Yang, Y. (2021). Subcritical Water Extraction of Natural Products. *Molecules*, *26*(13). <https://doi.org/10.3390/molecules26134004>
- Christou, A., Stavrou, I. J., Kapnissi-Christodoulou, C. P. (2021). Continuous and pulsed ultrasound-assisted extraction of carob's antioxidants: Processing parameters optimization and identification of polyphenolic composition. *Ultrasonics Sonochemistry*, *76*(105630), 105630. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105630>
- Circuncisão, A. R., Catarino, M. D., Cardoso, S. M., Silva, A. M. S. (2018). Minerals from Macroalgae Origin: Health Benefits and Risks for Consumers. *Marine Drugs*, *16*(11). <https://doi.org/10.3390/md16110400>
- Corino, C., Modina, S. C., Di Giancamillo, A., Chiapparini, S., Rossi, R. (2019). Seaweeds in pig nutrition. *Animals: An Open Access Journal from MDPI*, *9*(12), 1126. <https://doi.org/10.3390/ani9121126>
- Corrales, M., Toepfl, S., Butz, P., Knorr, D., Tauscher, B. (2008). Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: A comparison. *Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, *9*(1), 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.06.002>
- Cotas, J., Leandro, A., Pacheco, D., Gonçalves, A. M. M., Pereira, L. (2020). A comprehensive review of the nutraceutical and therapeutic applications of red seaweeds (Rhodophyta). *Life (Basel, Switzerland)*, *10*(3), 19. <https://doi.org/10.3390/life10030019>
- de Souza Celente, G., Sui, Y., Acharya, P. (2023). Seaweed as an alternative protein source: Prospective protein extraction technologies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, *86*(103374), 103374. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103374>
- Di Domenico Ziero, H., Buller, L. S., Mudhoo, A., Ampese, L. C., Mussatto, S. I., Carneiro, T. F. (2020). An overview of subcritical and supercritical water treatment of different biomasses for protein and amino acids production and recovery. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(5), 104406. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104406>
- Domozych, D. (2019). Algal Cell Walls. In *eLS* (pp. 1–11). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0000315.pub4>
- Dopelt, K., Radon, P., Davidovitch, N. (2019). Environmental Effects of the Livestock Industry: The Relationship between Knowledge, Attitudes, and Behavior among Students in Israel. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph16081359>
- Echave, J., Fraga-Corral, M., Garcia-Perez, P., Popović-Djordjević, J., H Avdović, E., Radulović, M., Xiao, J., A Prieto, M., Simal-Gandara, J. (2021). Seaweed Protein Hydrolysates and Bioactive Peptides: Extraction, Purification, and Applications. *Marine Drugs*, *19*(9). <https://doi.org/10.3390/md19090500>
- Echave, J., Otero, P., Garcia-Oliveira, P., Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Lorenzo, J. M., Simal-Gandara, J., Prieto, M. A. (2022). Seaweed-derived proteins and peptides: Promising marine bioactives. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, *11*(1), 176. <https://doi.org/10.3390/antiox11010176>
- Fao, F. (2018). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2018-Meeting the sustainable development goals*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fasolin, L. H., Pereira, R. N., Pinheiro, A. C., Martins, J. T., Andrade, C. C. P., Ramos, O. L., Vicente, A. A. (2019). Emergent food proteins - Towards sustainability, health and innovation.

- Food Research International*, 125(108586), 108586. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108586>
- Ferdouse, F., Løvstad Holdt, S., Smith, R., Murúa, P., Yang, L. (2018). *The global status of seaweed production, trade and utilization. Globefish Research Programme Volume 124*. <https://policycommons.net/artifacts/2242866/the-global-status-of-seaweed-production-trade-and-utilization/3000967/>
- Garcia-Vaquero, M., Ummat, V., Tiwari, B., Rajauria, G. (2020). Exploring Ultrasound, Microwave and Ultrasound–Microwave Assisted Extraction Technologies to Increase the Extraction of Bioactive Compounds and Antioxidants from Brown Macroalgae. *Marine Drugs*, 18(3), 172. <https://doi.org/10.3390/md18030172>
- Gaspar, R., Fonseca, R., Pereira, L. (2020). Illustrated Guide to the Macroalgae of Buarcos Bay, Figueira da Foz, Portugal. *MARE UC, DCV, FCT*.
- Gomez-Zavaglia, A., Prieto Lage, M. A., Jimenez-Lopez, C., Mejuto, J. C., Simal-Gandara, J. (2019). The Potential of Seaweeds as a Source of Functional Ingredients of Prebiotic and Antioxidant Value. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/antiox8090406>
- Gordalina, M., Pinheiro, H. M., Mateus, M., da Fonseca, M. M. R., Cesário, M. T. (2021). Macroalgae as protein sources—A review on protein bioactivity, extraction, purification and characterization. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 11(17), 7969. <https://doi.org/10.3390/app11177969>
- Grosso, C., Valentão, P., Ferreres, F., Andrade, P. B. (2015). Alternative and efficient extraction methods for marine-derived compounds. *Marine Drugs*, 13(5), 3182–3230. <https://doi.org/10.3390/md13053182>
- Harnedy, P. A., FitzGerald, R. J. (2011). Bioactive proteins, peptides, and amino acids from macroalgae(1). *Journal of Phycology*, 47(2), 218–232. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2011.00969.x>
- Harnedy, P. A., FitzGerald, R. J. (2013). Extraction of protein from the macroalga *Palmaria palmata*. *LWT - Food Science and Technology*, 51(1), 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.023>
- Ho, C. H. L., Cacace, J. E., Mazza, G. (2007). Extraction of lignans, proteins and carbohydrates from flaxseed meal with pressurized low polarity water. *LWT - Food Science and Technology*, 40(9), 1637–1647. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.12.003>
- Ji, L., Qiu, S., Wang, Z., Zhao, C., Tang, B., Gao, Z., Fan, J. (2023). Phycobiliproteins from algae: Current updates in sustainable production and applications in food and health. *Food Research International*, 167, 112737. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112737>
- Joannes, C., Sipaut, C. S., Dayou, J., Mansa, R. F. (2015). The potential of using pulsed electric field (PEF) technology as the cell disruption method to extract lipid from microalgae for biodiesel production. *International Journal of Renewable Energy Research*, 5(2), 598–621. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijrer/issue/16071/167979>
- Kadam, S., Álvarez, C., Tiwari, B., O'Donnell, C. (2015). Extraction of biomolecules from seaweeds. *Seaweed Sustainability*, 243–269. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418697-2.00009-X>
- Kamal, M., Abdel-Raouf, N., Alwutayd, K., AbdElgawad, H., Abdelhameed, M. S., Hammouda, O., Elsayed, K. N. M. (2023). Seasonal changes in the biochemical composition of dominant macroalgal species along the Egyptian Red Sea shore. *Biology*, 12(3), 411. <https://doi.org/10.3390/biology12030411>
- Kazir, M., Abuhassira, Y., Robin, A., Nahor, O., Luo, J., Israel, A., Golberg, A., Livney, Y. D. (2019). Extraction of proteins from two marine macroalgae, *Ulva* sp. and *Gracilaria* sp., for food application, and evaluating digestibility, amino acid composition and antioxidant properties of the protein concentrates. *Food Hydrocolloids*, 87, 194–203.
- Konstantin, B., Anastasia, P., Nikolay, I., Daria, P. (2023). Seasonal variations in the chemical composition of Arctic brown macroalgae. *Algal*

- Research*, 72(103112), 103112. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103112>
- Lakshmi, D. S., Sankaranarayanan, S., Gajaria, T. K., Li, G., Kujawski, W., Kujawa, J., Navia, R. (2020). A Short Review on the Valorization of Green Seaweeds and Ulvan: FEEDSTOCK for Chemicals and Biomaterials. *Biomolecules*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/biom10070991>
- Machado, M., Machado, S., Pimentel, F. B., Freitas, V., Alves, R. C., Oliveira, M. B. P. P. (2020). Amino acid profile and protein quality assessment of macroalgae produced in an integrated multi-trophic aquaculture system. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(10), 1382. <https://doi.org/10.3390/foods9101382>
- Magpusao, J., Oey, I., Kebede, B. (2021). *Opportunities and challenges of algal protein extraction and production*.
- Meng, W., Mu, T., Sun, H., Garcia-Vaquero, M. (2022). Evaluation of the chemical composition and nutritional potential of brown macroalgae commercialised in China. *Algal Research*, 64, 102683. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102683>
- Mittal, R., Tavanandi, H. A., Mantri, V. A., Raghavarao, K. S. M. S. (2017). Ultrasound assisted methods for enhanced extraction of phycobiliproteins from marine macro-algae, *Gelidium pusillum* (Rhodophyta). *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.02.030>
- Nadathur, S., Wanasundara, J. P. D., Scanlin, L. (2024). Feeding the globe nutritious food in 2050: Obligations and ethical choices. In S. Nadathur, J. P. D. Wanasundara, & L. Scanlin (Eds.), *Sustainable Protein Sources* (pp. 649–668). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91652-3.00032-0>
- Nan, F., Feng, J., Lv, J., Liu, Q., Fang, K., Gong, C., Xie, S. (2017). Origin and evolutionary history of freshwater Rhodophyta: further insights based on phylogenomic evidence. *Scientific Reports*, 7(1), 2934. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03235-5>
- Naseri, A., Marinho, G. S., Holdt, S. L., Bartela, J. M., Jacobsen, C. (2020). Enzyme-assisted extraction and characterization of protein from red seaweed *Palmaria palmata*. *Algal Research*, 47, 101849. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101849>
- O' Brien, R., Hayes, M., Sheldrake, G., Tiwari, B., Walsh, P. (2022). Macroalgal Proteins: A Review. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/foods11040571>
- O' Connor, J., Meaney, S., Williams, G. A., Hayes, M. (2020). Extraction of protein from four different seaweeds using three different physical pre-treatment strategies. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(8), 2005. <https://doi.org/10.3390/molecules25082005>
- O'Connor, J., Garcia-Vaquero, M., Meaney, S., Tiwari, B. K. (2022). Bioactive Peptides from Algae: Traditional and Novel Generation Strategies, Structure-Function Relationships, and Bioinformatics as Predictive Tools for Bioactivity. *Marine Drugs*, 20(5). <https://doi.org/10.3390/md20050317>
- Okolie, C. L., Akanbi, T. O., Mason, B., Udenigwe, C. C., Aryee, A. N. A. (2019). Influence of conventional and recent extraction technologies on physicochemical properties of bioactive macromolecules from natural sources: A review. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 116, 827–839. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.018>
- Paiva, L., Lima, E., Patarra, R. F., Neto, A. I., Baptista, J. (2014). Edible Azorean macroalgae as source of rich nutrients with impact on human health. *Food Chemistry*, 164, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.119>
- Pangestuti, R., Getachew, A. T., Siahaan, E. A., Chun, B.-S. (2019). Characterization of functional materials derived from tropical red seaweed *Hypnea musciformis* produced by subcritical water extraction systems. *Journal of Applied Phycology*, 31(4), 2517–2528. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-1754-9>
- Pan-Utai, W., Pantoa, T., Roytrakul, S., Praiboon, J., Kosawatpat, P., Tamtin, M., Thongdang, B. (2022). Ultrasonic-assisted extraction and antioxidant potential of valuable protein from

- Ulva rigida macroalgae. *Life (Basel, Switzerland)*, 13(1), 86. <https://doi.org/10.3390/life13010086>
- Peñalver, R., Lorenzo, J. M., Ros, G., Amarowicz, R., Pateiro, M., Nieto, G. (2020). Seaweeds as a functional ingredient for a healthy diet. *Marine Drugs*, 18(6), 301. <https://doi.org/10.3390/md18060301>
- Pereira, L. (2021a). *Edible seaweeds of the world*. CRC Press.
- Pereira, L. (2021b). Macroalgae. *Encyclopedia*, 1(1), 177–188. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1010017>
- Pimentel, F. B., Alves, R. C., Harnedy, P. A., FitzGerald, R. J., Oliveira, M. B. P. P. (2019). Macroalgal-derived protein hydrolysates and bioactive peptides: Enzymatic release and potential health enhancing properties. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 106–124. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.006>
- Plaza, M., Amigo-Benavent, M., del Castillo, M. D., Ibáñez, E., Herrero, M. (2010). Facts about the formation of new antioxidants in natural samples after subcritical water extraction. *Food Research International*, 43(10), 2341–2348. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.07.036>
- Pliego-Cortés, H., Wijesekara, I., Lang, M., Bourougnon, N., Bedoux, G. (2020). Chapter Nine - Current knowledge and challenges in extraction, characterization and bioactivity of seaweed protein and seaweed-derived proteins. In N. Bourougnon (Ed.), *Advances in Botanical Research* (Vol. 95, pp. 289–326). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2019.11.008>
- Polikovskiy, M., Fernand, F., Sack, M., Frey, W., Müller, G., Golberg, A. (2019). In silico food allergenic risk evaluation of proteins extracted from macroalgae Ulva sp. with pulsed electric fields. *Food Chemistry*, 276, 735–744. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.134>
- Postma, P. R., Cerezo-Chinarro, O., Akkerman, R. J., Olivieri, G., Wijffels, R. H., Brandenburg, W. A., Eppink, M. H. M. (2018). Biorefinery of the macroalgae Ulva lactuca: extraction of proteins and carbohydrates by mild disintegration. *Journal of Applied Phycology*, 30(2), 1281–1293. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1319-8>
- Prabhu, M. S., Levkov, K., Livney, Y. D., Israel, A., Golberg, A. (2019). High-voltage pulsed electric field preprocessing enhances extraction of starch, proteins, and ash from marine macroalgae Ulva obnoi. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(20), 17453–17463. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04669>
- Praveen, M. A., Parvathy, K. R. K., Balasubramanian, P., Jayabalan, R. (2019). An overview of extraction and purification techniques of seaweed dietary fibers for immunomodulation on gut microbiota. *Trends in Food Science & Technology*, 92, 46–64. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.011>
- Puzorjov, A., McCormick, A. J. (2020). Phycobiliproteins from extreme environments and their potential applications. *Journal of Experimental Botany*, 71(13), 3827–3842. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa139>
- Qu, W., Ma, H., Wang, T., Zheng, H. (2013). Alternating two-frequency countercurrent ultrasonic-assisted extraction of protein and polysaccharide from Porphyra yezoensis. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering/Nongye Gongcheng Xuebao*, 29(1), 285–292.
- Rawiwan, P., Peng, Y., Paramayuda, I. G. P. B., Quek, S. Y. (2022). Red seaweed: A promising alternative protein source for global food sustainability. *Trends in Food Science & Technology*, 123, 37–56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.003>
- Robin, A., Kazir, M., Sack, M., Israel, A., Frey, W., Mueller, G., Livney, Y. D., Golberg, A. (2018). Functional protein concentrates extracted from the Green marine macroalga Ulva sp., by high voltage pulsed electric fields and mechanical press. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 13696–13705. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01089>
- Ruslan, F. S., Susanti, D., Mohammad Noor, N., Aminudin, N. I. (2021). Bioactive Compounds, Cosmeceutical And Nutraceutical Applications of Green Seaweed Species (Chlorophyta).

- SQUALEN Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology*, 16(1), 41–55. <https://doi.org/10.15578/squalen.514>
- Salehi, B., Sharifi-Rad, J., Seca, A. M. L., Pinto, D. C. G. A., Michalak, I., Trincone, A., Mishra, A. P., Nigam, M., Zam, W., Martins, N. (2019). Current Trends on Seaweeds: Looking at Chemical Composition, Phytopharmacology, and Cosmetic Applications. *Molecules*, 24(22). <https://doi.org/10.3390/molecules24224182>
- Samarathunga, J., Wijesekara, I., Jayasinghe, M. (2022). Seaweed proteins as a novel protein alternative: Types, extractions, and functional food applications. *Food Reviews International*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2023564>
- Silva, A., Silva, S. A., Lourenço-Lopes, C., Jimenez-Lopez, C., Carpena, M., Gullón, P., Fraga-Corral, M., Domingues, V. F., Barroso, M. F., Simal-Gandara, J., Prieto, M. A. (2020). Antibacterial use of macroalgae compounds against foodborne pathogens. *Antibiotics (Basel, Switzerland)*, 9(10), 712. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9100712>
- Suwal, S., Perreault, V., Marciniak, A., Tamigneaux, É., Deslandes, É., Bazinet, L., Jacques, H., Beaulieu, L., Doyen, A. (2019). Effects of high hydrostatic pressure and polysaccharidases on the extraction of antioxidant compounds from red macroalgae, *Palmaria palmata* and *Solieria chordalis*. *Journal of Food Engineering*, 252, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.014>
- Thiviya, P., Gamage, A., Gama-Arachchige, N. S., Merah, O., Madhujith, T. (2022). Seaweeds as a source of functional proteins. *Phycology*, 2(2), 216–243. <https://doi.org/10.3390/phycolgy2020012>
- Tibbetts, S. M., Milley, J. E., Lall, S. P. (2016). Nutritional quality of some wild and cultivated seaweeds: Nutrient composition, total phenolic content and in vitro digestibility. *Journal of Applied Phycology*, 28(6), 3575–3585. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0863-y>
- Titlyanov, E. A., Titlyanova, T. V. (2010). Seaweed cultivation: Methods and problems. *Russian Journal of Marine Biology*, 36(4), 227–242. <https://doi.org/10.1134/S1063074010040012>
- Vásquez, V., Martínez, R., Bernal, C. (2019). Enzyme-assisted extraction of proteins from the seaweeds *Macrocystis pyrifera* and *Chondracanthus chamissoi*: characterization of the extracts and their bioactive potential. *Journal of Applied Phycology*, 31(3), 1999–2010. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1712-y>
- Vázquez-Rodríguez, B., Gutiérrez-Urbe, J. A., Antunes-Ricardo, M., Santos-Zea, L., Cruz-Suárez, L. E. (2020). Ultrasound-assisted extraction of phlorotannins and polysaccharides from *Silvetia compressa* (Phaeophyceae). *Journal of Applied Phycology*, 32(2), 1441–1453. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-02013-2>
- Xi, J. (2017). Ultrahigh pressure extraction of bioactive compounds from plants-A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1097–1106. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.874327>
- Xie, C., Lee, Z. J., Ye, S., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., Suleria, H. A. R. (2024). A review on seaweeds and seaweed-derived polysaccharides: Nutrition, chemistry, bioactivities, and applications. *Food Reviews International*, 40(5), 1312–1347. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2212055>
- Yüceetepe, A., Aydar, E. F., Dogu-Baykut, E., Dinç, H., Onat, İ. A., Demircan, E., Şensu, E., Okudan, E. Ş., Özçelik, B. (2024). Optimization of protein extraction from *Halopteris scoparia* macroalgae by ultrasonic-assisted enzymatic extraction (UAEE): Bioactive, chemical, and technological properties. *ACS Food Science & Technology*, 4(6), 1375–1387. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00032>
- Zainan, N. H., Sapardi, M. A. M., Ho, B. C. H., Siajam, S. I., Kamal, S. M. M., Danquah, M. K., Harun, R. (2022). Kinetic and thermodynamic characterization of amino acids generation via subcritical water reaction of microalgae *Nannochloropsis* sp. biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(6), 2001–2014. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00538-7>