

Interreg



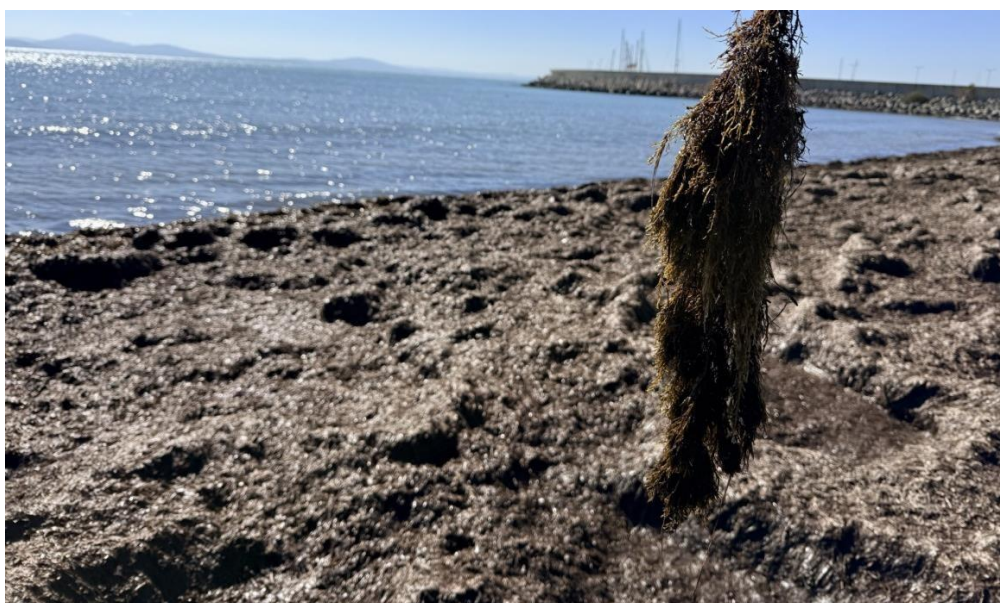
Co-funded by
the European Union

NEXT Black Sea Basin



MACROALGAE CURRENT TRENDS AND OPPORTUNITIES ANALYSIS REPORT

(АНАЛИЗ НА ТЕКУЩИТЕ ТЕНДЕНЦИИ И ВЪЗМОЖНОСТИ ПРИ
МАКРОВОДОРАСЛИТЕ)



**Research, Cleaning Methodologies, Economic
Valorization and Pilot Application for Macroalgal Blooms**

MACRO CLEAN – BSB00584



SHUMEN 2026

Interreg



Co-funded by
the European Union

NEXT Black Sea Basin



MACROALGAE CURRENT TRENDS AND OPPORTUNITIES ANALYSIS REPORT

**Research, Cleaning Methodologies, Economic
Valorization and Pilot Application for Macroalgal
Blooms**

MACRO CLEAN – BSB00584



SHUMEN 2026

Activity 1.12
Entrepreneurship Programme On
Macroalgae Related Startups

Local Project Coordinator

Elif Kahraman

Marmara Municipalities Union

E-mail: info@macroclean.org

Communication Manager

İrem Selen

Marmara Municipalities Union

Project Website: <https://www.macroclean.org/>

This document is based on the activities of the MACRO CLEAN project (Research, Cleaning Methodologies, Economic Valorization and Pilot Application for Macroalgal Blooms) with the financial support from Interreg NEXT Black Sea Basin Programme.

Corresponding Authors:

Hakan Arca

Dr. Ş. Naci Adalılar

Translated into Bulgarian by:

Nikolay Kolev, Kiril Valkanov, Marko Ivanov,

Dr. Ivan Telenchev, Milka Deleva

Publishing Date: April 2026

This report was originally prepared by Marmara Municipalities Union.



Konstantin Preslavsky University of Shumen

Universitetska 115, Shumen, Bulgaria

+359 887 160 771, +359 895 029 919

ts.ignatovaivanova@shu.bg & p.marinova@shu.bg

<https://www.shu.bg/>

The responsibility for the content of this document is that of the partners of the BSB00584 MACRO CLEAN Project, implemented under the Interreg Next Black Sea Basin Programme. It represents an informal consensus on best practices agreed upon by all partners.

SUMMARY

Prepared as part of Activity 1.12 – Macroalgae-Focused Entrepreneurship Programme under the MACRO CLEAN Project, this report provides a multi-dimensional assessment of macroalgae-based economic opportunities, emerging trends, and sectoral transformation in the Black Sea Basin. Building on semi-structured interviews with stakeholders from academia, the private sector, investors, and public institutions, the study offers a consolidated view of the current landscape of macroalgae-based products and their future potential.

Macroalgae constitute a strategic biomass used globally across a wide range of applications, including food, feed, fertilisers, bioplastics, biotechnology, and cosmetics. This rapidly expanding sector is shaped by major trends such as sustainability, carbon sequestration potential, alternative protein sources, and the circular economy. While Türkiye has strong production potential due to its biodiversity, climatic conditions, and extensive coastline, the sector remains at an early stage of development.

This research identifies the key challenges and opportunities shaping the macroalgae ecosystem in Türkiye. The interviews consistently point to limited cultivation capacity, regulatory gaps, high capital requirements, constraints in technology and infrastructure, and domestic feedstock supply bottlenecks as the most critical barriers to sector development. At the same time, growing academic interest, the diversification of R&D efforts, early commercial initiatives in fertilisers and bioplastics, and collaboration opportunities enabled by European Union funding are generating strong momentum.

In particular, macroalgae accumulations observed along the Black Sea coastline are increasingly seen both as an environmental challenge and an economic opportunity, offering significant feedstock potential for fertiliser, bioplastics, and biotechnology applications. Stakeholders emphasise that establishing a sustainable value chain will require a transition from opportunistic collection to cultivation-based production, as only cultivation can ensure reliable, traceable, and scalable feedstock volumes.

The report indicates that macroalgae-based products represent a nascent but growing entrepreneurship and investment domain in Türkiye. However, the interviews suggest that investors remain cautious due to long R&D cycles, that the lack of proof of concept (PoC) limits startups' access to finance, and that public support—particularly in regulation, incentives, and enabling infrastructure—is critical for sector scaling.

Overall, this study provides a comprehensive snapshot of Türkiye's macroalgae ecosystem, presenting the current context, structural barriers, international trends, and priority areas for future development through an integrated lens. The findings serve as a strategic reference for policy makers, researchers, entrepreneurs, and investors, supporting efforts to translate macroalgae resources into sustainable economic value across the Black Sea Basin.

ACRONYMS

APAC	Asia-Pacific
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CMIA	China Microalgae Industry Association
CO ₂	Carbon dioxide
EC	European Commission
EIA	Environmental Impact Assessment
EIF	European Investment Fund
EPS	Exopolysaccharide(s)
EU	European Union
FAO	Food and Agriculture Organization (of the United Nations)
FDA	U.S. Food and Drug Administration
GRAS	Generally Recognized as Safe
IMTA	Integrated Multi-Trophic Aquaculture
KOSGEB	Small and Medium Enterprises Development Organization of Türkiye
N	Nitrogen
NDRC	National Development and Reform Commission (China)
NGO	Non-governmental organization
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (U.S.)
P	Phosphorus
PBR	Photobioreactor
R&D	Research and Development
SDGs	Sustainable Development Goals
SME	Small and Medium-sized Enterprise(s)
TÜBİTAK	The Scientific and Technological Research Council of Türkiye
US	United States
VOC	Volatile Organic Compound(s)
WHO	World Health Organization

CONTENT

SUMMARY	5
ACRONYMS	7
INTRODUCTION	11
PART I - Global Market Size and Dynamics	13
1.1. Market Segmentation and Regional Dominance	16
1.2. Global Commercial Macroalgae Markets	21
1.2.1. Global Commercial Macroalgae Market Forecasts (2024–2034)	21
1.3. Market Volatility and Price Fluctuations	22
1.4. Technological Constraints	23
1.5. Market SWOT Analysis	23
1.5.1. Opportunities	23
1.5.2. Market Expansion	24
1.5.3. Government Support Measures	24
1.5.4. Technological Advancements	24
1.6. Macroalgae Value Chain and Key Applications	25
1.6.1. Commercial and Industrial Applications	25
1.7. Cultivation and Processing Technologies	27
1.7.1. Biotechnology and Strain Improvement	28
1.7.2. Biorefinery and Processing	28
1.8. The Role of Macroalgae in the Blue Economy	28
1.8.1. Blue Economy	29
1.8.2. Blue Carbon Potential for Addressing Climate Change	30
1.8.3. Bioremediation and Water Quality Improvement	30
1.8.4. Ecosystem Services and Restoration	30
PART II - Comparative Analysis: Global Leaders and Türkiye	32
2.1. Policy Frameworks and Support Mechanisms in Leading Countries	33
2.1.1. People’s Republic of China	34
2.1.2. Japan	34
2.1.3. Norway	35
2.1.4. United States	35
PART III - Current State of the Macroalgae Sector in Türkiye and Selected Ecosystems	37
3.1. Research and Development (R&D) Landscape	37
3.2. Policy and Legal Framework	37
3.3. Barriers to Current Production and Commercial Activity	37
3.3.1. People’s Republic of China — Macroalgae Sector	39
3.3.2. Black Sea Basin	39
3.3.3. White Sea (Russia)	43

PART IV - Opportunities, Recommendations, Investment Assessment	44
4.1. Strategic Opportunities for Türkiye and SWOT Analysis	44
4.1.1. Strengths / Opportunities	44
4.1.2. Weaknesses and Key / Constraints Structural Barriers	44
4.1.3. Investment and Entrepreneurial Potential in Türkiye	45
4.2. Contributions of Macroalgae Cultivation from a General Perspective	47
4.3. Barriers to the Procedure for Producing Fuel from Algae	49
PART V - Macroalgae Investment & Financial Outlook	52
5.1. Global Investment Trends	52
5.2. Profiles of Major International Investors	52
5.3. Potential Turkish Investors	52
PART VI - Opinions on the Potential Application Areas of Macroalgae Based Products	55
CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	70
REFERENCES	71

INTRODUCTION

Macroalgae are increasingly recognised as a strategic resource with both ecological and economic relevance at the global level. At a time when eutrophication is intensifying, the impacts of the climate crisis are becoming more visible, and biomass fluctuations in marine ecosystems are occurring more frequently, the sustainable utilisation of macroalgae has become critical from both an environmental and an economic perspective. In this context, the MACRO CLEAN Project—implemented through the joint efforts of three Black Sea Basin countries, Türkiye, Georgia, and Bulgaria—is a multi-partner initiative designed to investigate macroalgae, support clean-up actions, enable their valorisation, and develop pilot applications across the Black Sea Basin. The project establishes a comprehensive framework to ensure the sustainable and effective collection, processing and utilisation, and the conversion of macroalgae into value-added economic outputs.

This report has been prepared to provide an integrated analysis of current trends, the market dynamics, commercialisation barriers, and future opportunities in the macroalgae sector. Methodologically, the study applies a mixed-methods research design, combining a review of academic literature with in-depth, multi-stakeholder interviews. Interviewees were selected using a maximum variation sampling approach to ensure representation across the full spectrum of roles within the ecosystem. Participants included: academics directly engaged in macroalgae research; companies producing macroalgae-based products or involved in feedstock supply, biotechnology development, and import/export; supply-chain actors; investors; public institutions; municipalities; environmental management companies; and R&D laboratories. This approach ensured that all segments of the value chain were covered and enabled the generation of comparable evidence across stakeholder groups.

International literature and sectoral market research indicate that macroalgae-based products are becoming a rapidly expanding economic domain worldwide. As of 2023, the global commercial macroalgae market is estimated at USD 17–18 billion, with projections suggesting it could exceed USD 30 billion by 2030. Approximately 95% of production takes place in the Asia–Pacific region, while Europe is seeing growing demand—particularly in bioplastics, biostimulants, fertilisers, functional foods, and cosmetics. By contrast, Türkiye and the Black Sea Basin are still at an early stage of market development. However, the region combines abundant natural biomass, increasing university-led R&D activity, and emerging regional cooperation, positioning it as high-potential yet currently low in commercialisation. International reports emphasise that the acceleration of an economically viable value chain in the region will depend on strengthened R&D investment, regulatory improvements, and enhanced local governance and implementation capacity.

Within this framework, the report presents global trends, sector needs, stakeholder insights, and forward-looking perspectives on macroalgae-based products. The findings are intended to inform regional policy development and to support new entrepreneurship and investment initiatives aimed at the economic valorisation of macroalgae.

We would like to thank all experts, academics, industry representatives, and investors who contributed to this study. The knowledge, experience, and assessments shared during the interviews have provided a valuable evidence base, helping to illuminate the future trajectory of the macroalgae ecosystem in the Black Sea Basin and Türkiye.

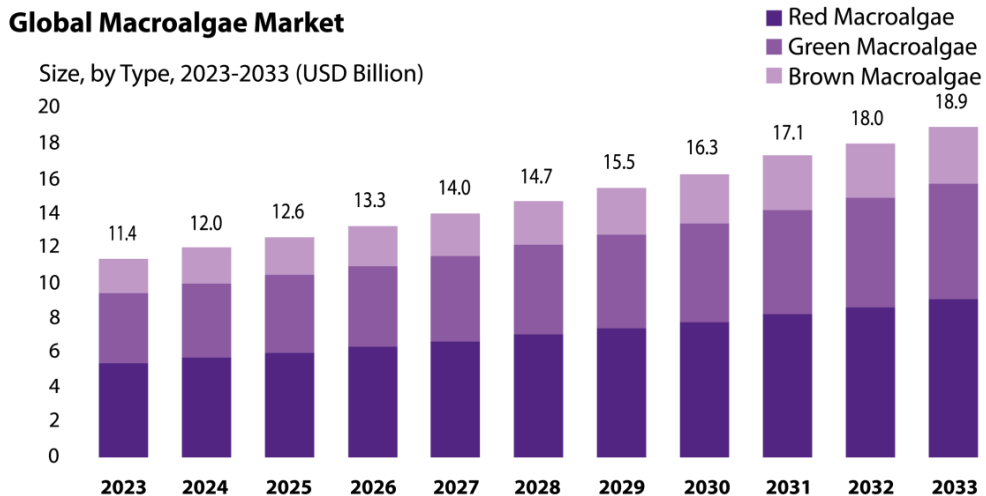
The content of this report is the sole responsibility of the authors. The views expressed do not necessarily reflect the official position of the European Union. Reproduction is permitted provided that the source is acknowledged and any modifications are clearly indicated.

PART I

Global Market Size and Dynamics

The macroalgae sector has demonstrated notable growth in recent years, securing an increasingly visible position in the global economy. As of 2024, the value of the global commercial seaweed market is reported at different levels across market studies, yet all estimates point to a substantial and expanding market. According to one report, the market value in 2024 is approximately USD 12,7 billion, and is expected to reach USD 22,82 billion by 2034, growing at a compound annual growth rate (CAGR) of 6%. Another market analysis estimates the market size at USD 17,14 billion in 2023 and USD 18,39 billion in 2024, projecting an increase to USD 34,56 billion by 2032 with a CAGR of 8,20%. The variation across these figures is likely attributable to the sector’s ongoing maturation and the fact that data collection and market-scoping methodologies are not yet fully standardised. This divergence should be interpreted as a characteristic of a new and rapidly evolving market, rather than a contradiction.

Figure 1. Global Commercial Macroalgae Market Forecasts (2023–2033)



The Market will Grow **5.2%** At the CAGR of: **5.2%** The Forecasted Market Size for 2033 in USD: **\$18.9B** ONE STOP SHOP FOR THE REPORTS

Source: Fortune Business Insights, 2024

Market growth is being driven by a set of factors that have become increasingly evident at the global level. Rising environmental awareness and growing consumer demand for sustainable products are among the primary drivers accelerating the uptake of macroalgae cultivation. Macroalgae are widely regarded as a sustainable resource due to their rapid growth rates, high nutrient content, and their role in carbon uptake through photosynthesis. In parallel, increasing interest in vegan and plant-based diets is strengthening demand for macroalgae as a nutrient-dense alternative, particularly given their richness in protein, vitamins, and minerals. Overall, the market is observed to be responding to these trends.

The use of seaweed as food dates back to the fourth century in Japan and to the sixth century in China. Today, these two countries—together with the Republic of Korea—remain the largest consumers of seaweed as a food product. Their demand underpins an industry that harvests approximately 6.000.000 tonnes of fresh (wet) seaweed per year worldwide, with an estimated value of around USD 5 billion.

Over the past fifty years, rising demand has exceeded the capacity of natural (wild) stocks to meet market needs. Research into the life cycles of these algae has, in turn, enabled the development of cultivation industries, which currently supply more than 90% of market demand.

In the United States (US), astaxanthin derived from *H. pluvialis* is permitted for limited uses. The US Food and Drug Administration (FDA) allows *Haematococcus* algae meal to be used as a colour additive in animal feeds (e.g., salmonid feed). However, a GRAS (Generally Recognized As Safe) status for the direct human consumption of *H. pluvialis* whole biomass or oleoresin is not apparent in publicly available GRAS records. Similarly, no publicly available GRAS approval or notification is available in a food context for *Porphyridium* species. That said, the literature notes that *H. pluvialis* and *Porphyridium* species—including *P. cruentum*—have been referenced as part of a group regarded as GRAS by the FDA for specific applications, such as pigment extraction (e.g., astaxanthin and phycoerythrin, respectively). Acute and sub-chronic toxicity studies in rats indicate that *H. pluvialis* biomass and astaxanthin-rich extracts are well tolerated, with reported LD₅₀ values exceeding 12 g/kg body weight and no significant adverse effects on haematology or histopathology at dietary inclusion levels of up to 20% over 90 days (e.g., LD₅₀ > 5,000 mg/kg; mild renal pigment changes are described as not toxicologically relevant). In aquatic models, *exopolysaccharide* (EPS) extracts did not cause mortality or developmental abnormalities in zebrafish embryo assays at exposure levels of up to 15% over 96 hours.

In vitro cytotoxicity assays indicate that most EPS fractions exhibit low cytotoxicity, with the exception of certain acidified preparations tested at very high concentrations. Despite their high potential and multiple benefits, the uptake of macroalgae as a food ingredient remains limited, largely due to undesirable sensory attributes—often described as “fishy” or “seaweed-like” flavours and odours. These attributes are largely associated with volatile organic compounds (VOCs), including aldehydes and ketones, produced through different metabolic pathways over the macroalgal life cycle. To enable broader adoption and improve consumer acceptance, macroalgae require interventions that enhance sensory appeal and position them as viable feedstock alternatives for food applications. Accordingly, strategies that can effectively modulate and improve the sensory profile of macroalgae are critical. Microbial fermentation has emerged as a promising approach to transform and enhance a wide range of food substrates without generating toxic residues.

China is the largest producer of edible seaweed, with approximately 5 million tonnes, a substantial share of which is kombu produced from *Laminaria japonica* cultivated over hundreds of hectares on suspended ocean longlines. The Republic of Korea cultivates around

800.000 tonnes across three different species; approximately 50% of this volume is wakame, derived from *Undaria pinnatifida* and grown in a manner similar to China's cultivation of *Laminaria*. Japan's production is about 600.000 tonnes, of which 75% is nori produced from *Porphyra* species. Nori is a high-value product, priced at approximately USD 16.000 per tonne, compared with kombu at USD 2.800 per tonne and wakame at USD 6.900 per tonne.

In 2023, red macroalgae held a dominant market position, accounting for more than 48,9% of the market. This segment benefits from broad applications across both the food industry and biotechnology-related uses. Red macroalgae are valued for their nutrient profile and are a key ingredient in a range of health and wellness products, which continues to support demand growth.

Green macroalgae, known for their versatile applications in agriculture and aquaculture, account for a significant share of the market. Their role in water treatment and as biofertilisers supports a stable market presence, while growing interest in sustainable farming practices continues to underpin demand growth for this segment.

Brown macroalgae—commonly used in the production of alginates and animal feed—also represent an important share of the macroalgae market. In addition, their application in the cosmetics industry, particularly in skin-care products due to moisturising properties, contributes to maintaining market demand. This segment is further supported by the broader increase in the use of natural ingredients across consumer goods industries (USA Market Analysis).

Alginate, agar, and carrageenan are seaweed-derived thickening and gelling agents, and these three compounds form the backbone of seaweed's industrial applications. The use of seaweeds as sources of these hydrocolloids dates back to 1658, when the gelling properties of agar—extracted with hot water from red seaweed—were first discovered in Japan. Extracts from another red seaweed, commonly referred to as Irish Moss, contain carrageenan and became popular as thickening agents during the nineteenth century. By contrast, the commercial production of alginate from brown seaweed extracts—and its sale as a thickening and gelling agent—did not take place until the 1930s. After the Second World War, industrial use of seaweed extracts expanded rapidly, although it has at times been constrained by raw material availability.

Today, approximately 1.000.000 tonnes of fresh (wet-weight) seaweed are harvested and processed to produce the three hydrocolloids referenced above. This results in around 55.000 tonnes of hydrocolloids, with a total estimated value of USD 585.000.000.

Alginate production (approximately USD 213 million) is derived entirely from wild-harvested brown seaweeds, as cultivating brown seaweeds specifically to supply industrial feedstock is considered too costly at scale.

Agar production (approximately USD 132 million) is sourced mainly from two red seaweed species. One of these has been cultivated since the 1960s–1970s, but cultivation has expanded at a much larger scale since 1990, enabling significant growth of the agar industry.

Carrageenan production (approximately USD 240 million) was initially dependent on wild seaweeds, particularly Irish moss, a small alga found in cold waters with a limited natural resource base. However, according to FAO data, the industry has expanded rapidly since the early 1970s, driven by the availability of other carrageenan-containing seaweeds that can be successfully cultivated in warm-water countries with cost-competitive production conditions. While there remains a small level of demand for Irish Moss and certain other wild species from South America, most seaweed used for carrageenan production today is sourced from aquaculture (McHugh, D. J., 2003).

In the 1960s, Norway pioneered the production of seaweed meal—made from dried and milled brown seaweed—used as an additive in animal feed. Because drying is typically carried out in oil-fired ovens, production costs are sensitive to crude oil prices. Approximately 50.000 tonnes of fresh (wet) seaweed are harvested annually to produce around 10.000 tonnes of seaweed meal, which is sold for about USD 5 million. The total value of industrial products derived from seaweeds is estimated at USD 590 million, while the overall value of all products from the seaweed industry is estimated at approximately USD 5,6 billion.

1.1. Market Segmentation and Regional Dominance

In 2023, cultivated red macroalgae held a dominant market position, accounting for more than 67,6% of the market. This segment benefits significantly from controlled cultivation practices that enable high-quality and consistent yields. Supply reliability and uniform product characteristics strengthen demand, particularly from sectors such as pharmaceuticals and nutraceuticals, where standardisation and quality consistency are critical.

Wild-harvested (naturally collected) macroalgae represent a significant segment of the market. They are valued—particularly for being perceived as organic and minimally modified—which supports demand in markets that prioritise “natural” attributes, such as organic foods and natural cosmetics. At the same time, concerns related to sustainability and environmental impacts tend to moderate growth, as market expansion must be balanced against ecological considerations.

In 2023, dried red macroalgae held a dominant market position, accounting for more than 38,9% of the market. This form is preferred due to its extended shelf life and ease of transport, making it well suited for global distribution. Its versatility across culinary and industrial applications further strengthens its market appeal.

Raw (fresh) macroalgae constitute a more niche market, preferred for their freshness and minimal processing. This form is particularly common in regional markets close to harvesting areas, where proximity supports rapid “farm-to-table” use and where coastal communities maintain established culinary traditions.

Powdered macroalgae are gaining traction due to their convenience and ease of integration into dietary supplements and smoothies. This fine, versatile format enables incorporation into everyday diets, helping to broaden the consumer base.

Liquid extracts derived from macroalgae are increasingly used in cosmetic and pharmaceutical formulations. This form is valued for its concentration of nutrients and bioactive compounds, offering functional benefits—such as anti-ageing claims—attractive to product developers seeking high-impact formulations.

In 2023, the food and beverage sector held a dominant position in the macroalgae industry, accounting for more than 44,2% of the market. Growth in this segment is driven by the rising global popularity of seaweed as a nutrient-dense and flavour-enhancing ingredient. Applications range from everyday meals to premium dining, supporting wider adoption and deeper market penetration.

In agriculture, macroalgae are primarily used as biofertilisers and soil conditioners. Their organic content can support soil fertility and plant health, which has encouraged uptake within organic and sustainable farming practices. As environmental awareness increases, demand for these applications continues to expand.

In the pharmaceutical sector, macroalgae are valued for their bioactive compounds with potential health-related properties. This segment draws on the therapeutic potential of algal compounds—often discussed in the literature in relation to antiviral and anticancer activity—making it a key area for research and product development.

The cosmetics and personal care industries use macroalgae extracts for functional properties associated with hydration and skin conditioning, and for product positioning linked to anti-ageing claims. The broader shift toward natural and sustainable beauty products further strengthens this segment, where macroalgae are increasingly incorporated into skin-care formulations.

One of the main challenges in positioning seaweed as a staple food is making seaweed-based food products accessible, attractive, and affordable for billions of people. A further difficulty is avoiding consumer confusion about whether seaweed-based foods are nutritionally comparable to the foods they regularly consume (Forster & Radulovich, 2015). As with any novel food product, broad societal and global acceptance takes time—and in many regions, seaweed remains a relatively new food ingredient. Therefore, achieving consumer adoption on a scale comparable to other primary agricultural food products will be a significant challenge. Moreover, the apparent health benefits of seaweed may not apply uniformly across all users and products, as the benefits of certain species appear to depend on digestibility (Forster & Radulovich, 2015).

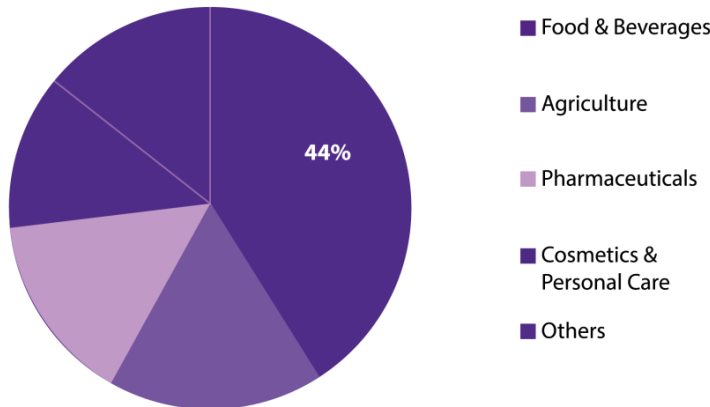
The presence of anti-nutritional factors—such as trypsin inhibitors and certain polysaccharides—appears to limit the digestibility of seaweed protein in *Palmaria palmata*. Seaweed polysaccharides used as thickening and gelling agents in processed foods may offer several health-related benefits; however, they provide little to no digestible dietary energy (Forster & Radulovich, 2015). A comparative study on nutrient utilisation from wakame (*Undaria pinnatifida*) and nori (*Neopyropia tenera*, formerly *Porphyra tenera*) found that

these seaweeds can serve as an excellent source of dietary fibre, but may also alter the digestibility of minerals and proteins in the diet (Urbano & Goñi, 2002).

Figure 2: Global Macroalgae Market (2023)

Global Macroalgae Market

Share, by Application, 2023 (%)



Source: Fortune Business Insights, 2024

Like terrestrial plants, seaweeds do not deliver the same nutritional benefits to everyone: maximum nutritional value can vary substantially depending on the species, individual dietary needs, and the characteristics of those who consume them. For this reason, alongside cultivation and product-development research, species-specific nutrition studies should also be undertaken. In this context, it is worth noting that in Japan—where seaweed species have been consumed for centuries—some individuals appear to digest seaweed more efficiently than others (Forster & Radulovich, 2015). This has been linked to the presence of specific gut bacteria, which have acquired genes enabling them to produce enzymes that break down the polysaccharide found in *Porphyra* (nori) (Forster & Radulovich, 2015). These genes are believed to have originated, plausibly, from marine microorganisms ingested together with nori (Ledford, 2010). Consequently, individuals introducing seaweed into their diets for the first time may experience digestive tolerance issues during the adaptation period.

Another nutrition-related concern relates to the high mineral content of seaweeds: excessive consumption may have adverse health effects. For example, iodine levels in certain seaweed species may lead to elevated thyroid-stimulating hormone levels, and cases of carotenoderma (yellowing of the skin) have been reported when seaweed is consumed regularly in significant amounts (Nishimura et al., 1998). Seaweeds cultivated or harvested in polluted waters may also accumulate contaminants—most notably heavy metals. Toxins can accumulate in certain seaweed species (Giusti, 2001; Sudharsan et al., 2012) and may pose toxicological risks to human health. In addition, the development of value-added, seaweed-based functional food products for human consumption has been constrained by a lack of human trials and clinical data to substantiate evidence derived from animal and cell-based studies (Brown et al., 2014; Hafting et al., 2015). Finally, regulatory restrictions on seaweed

species without a history of human consumption remain one of the main barriers to integrating seaweeds into functional foods (Hafting et al., 2015).

From a climate-change perspective, one of the key challenges associated with seaweed cultivation relates to halocarbon emissions from seaweed beds (Phang et al., 2015). Chloroform and bromoform are naturally produced by certain seaweed species (Nightingale et al., 1995; Pyle et al., 2011). Volatile halocarbons can contribute significantly to atmospheric concentrations of halogen radicals, which play a role in the catalytic destruction of ozone (Phang et al., 2015). In large-scale seaweed cultivation systems, various artificial materials are used to provide a stable substrate. A substantial share of these materials consists of combinations of synthetic polymers that are highly resistant to degradation.

If cultivation systems are not properly maintained, marine pollution may occur due to wasted or lost materials (Campbell et al., 2019). Such losses can also increase plastic loads within marine food webs (Andrady, 2011; Derraik, 2002). Another critical issue is competition for sunlight: surface-based seaweed farming can shade underlying ecosystems and affect autotrophic communities beneath the farm footprint (Campbell et al., 2019). Current seaweed cultivation technologies—often based on relatively simple structures—can typically be deployed only in sheltered areas, which constrains expansion to a limited subset of suitable sites (Duarte et al., 2017). In addition, ocean warming may reduce furoid canopies through physiological stress, intensify grazing pressure from herbivores in warmer waters, and interact with increased storm activity and declining nutrient availability, potentially reducing cultivation opportunities (Harley et al., 2012; Callaway et al., 2012). The potential consequences of expanding cultivation by introducing non-native (exotic) seaweed species must also be considered (McLaughlan et al., 2014). Seagrass meadows are recognised carbon hotspots and are therefore important for decarbonised ecosystems (Duarte et al., 2005, 2013; Fourqurean et al., 2012). They can be sensitive to human disturbance from neighbouring seaweed farm operations, which may cause mechanical damage and shading (Waycott et al., 2009). To avoid conflicts with other coastal users (e.g., navigation) and to limit environmental impacts, spatial planning prior to farm establishment is essential. In China, major challenges include competition with other uses for suitable sites and ensuring sufficient profitability (Duarte et al., 2017). Finally, increasing seaweed output is often presented as necessary to enhance the contribution of seaweed cultivation to climate-change mitigation and adaptation; however, rapid increases in production may reduce market prices and discourage farmers from continued participation (Duarte et al., 2017).

Intensive seaweed cultivation aimed at producing bioenergy or biofuels alongside carbon capture and storage has been proposed as a potential strategy. While conceptually attractive and worthy of continued research, significant implementation challenges remain. For example, such approaches may require very large ocean areas, and the feasibility of achieving the dual objectives of energy production and carbon uptake has been questioned (Melara et al., 2020). Despite decades of research, seaweed-based biofuels have not yet reached the market, and their commercial viability has not been demonstrated (Raven, 2017). Evidence also suggests that under ocean acidification, carbon uptake alone cannot be

used as a sufficient indicator of seaweed responses (Britton et al., 2019). In addition, the effectiveness of seaweed afforestation for CO₂ reduction is expected to be influenced by planetary feedback mechanisms, which adds uncertainty and raises concerns about its role in climate-change mitigation strategies (Bach et al., 2021).

A key challenge affecting women's participation in seaweed cultivation is limited access to technical skills and enabling resources. A field study on women seaweed farmers in Zanzibar found that many women did not know how to swim and lacked access to boats (Hedberg et al., 2018). As a result, women's seaweed farming is often confined to very shallow waters. While male farmers may be able to work daily, women's activities can be restricted to working during low tide—typically 3–5 days per week (Fröcklin et al., 2014). Women may therefore have a more limited role in establishing seaweed farms, particularly where farm set-up requires substantial physical labour, such as placing bamboo stakes, tying lines, and assembling the overall structure.

Many women are unable to use boats for transport. As a result, they often need to pay for transportation and become dependent on men during farm set-up and harvesting activities. Previous studies also indicate that women seaweed farmers may experience a range of health problems associated with the work (Vestling & Forsberg, 2018).

Seaweeds are increasingly recognised as a potentially important component of global food security, alongside their perceived roles in climate-change mitigation and women's empowerment. Recent studies have positioned seaweed cultivation as a possible alternative to terrestrial agriculture, citing relatively simple cultivation methods, favourable nutrient composition, and the potential to contribute to climate-change mitigation and adaptation strategies. The seaweed industry is also expected to support many farmers—particularly women—by increasing household purchasing power, strengthening social empowerment, and contributing to poverty-reduction efforts. However, despite significant advances in seaweed cultivation technologies over recent decades, major barriers remain to achieving scaled and sustainable growth. These include the need for more sustainable production technologies, diversified end-use applications, and broader social acceptance and market uptake.

When it comes to cultivation, the first step should be the careful selection of suitable species and appropriate coastal cultivation sites, in order to achieve sustainable production with maximum benefits at a viable cost. Maintaining a market price that incentivises farmers to participate in the production system is also essential. In parallel, the establishment and enforcement of the necessary regulatory and quality requirements is critical to improve the quality of seaweed species and derived products intended for human consumption. Defining recommended daily intake levels for seaweed and seaweed-based products is also important to support healthy dietary practices. Finally, developing a sustainable seaweed cultivation industry requires stronger international cooperation and coordination among countries that produce and use seaweed.

Best management practices should be developed for seaweed cultivation technologies that are economically viable, environmentally sound, and socially acceptable, and these practices should be disseminated by national and international organisations across tropical and subtropical countries. This should be done in a timely manner to help ensure that these nutrient-rich aquatic foods can contribute to both planetary health and human well-being.

1.2. Global Commercial Macroalgae Markets

The market is segmented across multiple dimensions, including species, product form, and geography.

- **Geographical Distribution:** The Asia–Pacific region is the clear market leader, accounting for 77,07% of the global commercial seaweed market in 2023 (Fortune Business Insights, 2024). China is among the primary countries driving production and sales, supported by favourable climatic conditions. North America—particularly the US—is experiencing notable growth, with an estimated CAGR of 6,5%, linked to increasing culinary use of macroalgae and rising demand for plant-based products. The European market is also showing steady growth (Fortune Business Insights, 2024).
- **Product Type:** Among macroalgae species, the red seaweed segment holds a leading market position, supported by functional attributes such as relatively high protein and vitamin content. This segment was valued at approximately USD 5,41 billion in 2024 and is projected to grow at a CAGR of 6,5%.
- **Product Form:** Macroalgae are most commonly used in flake form. This segment was valued at approximately USD 4,86 billion in 2024 and is expected to grow at a CAGR of 6,8%.

The COVID-19 pandemic initially caused a short-term slowdown in the market due to reduced demand for raw materials and falling prices. However, it is stated that the market recovered and regained momentum in the post-pandemic period, with an increase in the compound annual growth rate. With the World Health Organization (WHO) drawing attention to the health benefits of macroalgae, this situation demonstrates the strategic importance of macroalgae in the fields of health and nutrition.

1.2.1. Global Commercial Macroalgae Market Forecasts (2024–2034)

The macroalgae market is significantly influenced by growing demand for sustainable and environmentally friendly products. In recent years, increasing consumer awareness of health and environmental issues has contributed to greater use of natural ingredients in food and beverages.

According to a report prepared by the Food and Agriculture Organization (FAO), the global seaweed market was valued at approximately USD 14 billion in 2020 and is projected to grow at a compound annual growth rate of around 8,1% to reach approximately USD 21 billion by 2025. This growth is largely driven by the increasing popularity of macroalgae as a nutrient-rich food source, particularly due to their content of vitamins, minerals, and antioxidants.

Table 1: Global Commercial Macroalgae Market Forecasts (2024–2034)

Market Feature	Detail
Global Market Size (2024)	USD 12,7 billion
Global Market Size (2032)	USD 18,39 billion
Forecast Market Value (2024)	USD 22,82 billion
Forecast Market Value (2032)	USD 34,56 billion
Global CAGR (2024–2032)	6%
Global CAGR (2024–2034)	8,20%
Asia–Pacific Market Share (2023)	77,07%
Red Seaweed Segment (2024)	USD 5,41 billion
Flake Segment (2024)	USD 4,86 billion

Source: Fortune Business Insights, 2024

Macroalgae—especially varieties such as *spirulina* and *chlorella*—are well known for their health benefits. Studies indicate that these algae are protein-rich and may contain up to 70% protein on a dry-weight basis. Growing interest in plant-based diets and functional foods is further increasing demand. This trend is particularly relevant for macroalgae, as they are being incorporated into a wide range of products, including snacks, supplements, and beverages.

1.3. Market Volatility and Price Fluctuations

Price volatility is also a critical issue. The macroalgae market can be exposed to fluctuations driven by factors such as climate change, which may affect cultivation conditions and yields. For example, a report by the International Seaweed Association notes that adverse weather conditions can lead to significant declines in seaweed harvest volumes, resulting in higher prices. In 2020, the price of dried seaweed increased sharply—by up to 30%—due to supply-chain disruptions caused by the COVID-19 pandemic, once again highlighting the market’s vulnerability.

1.4. Technological Constraints

Technological constraints in cultivation and processing can limit market growth. While progress has been made, many producers still rely on traditional methods that may not be sufficiently efficient or sustainable. For example, yields in macroalgae cultivation can vary significantly—ranging from 5 to 20 tonnes per hectare—depending on the cultivation techniques applied. Inefficient practices can undermine profitability and make it difficult to scale operations to meet rising demand.

1.5. Market SWOT Analysis

1.5.1. Opportunities

a. Rising Demand for Sustainable Food Production

One of the most significant growth opportunities for the macroalgae market lies in its potential role in sustainable food production. As the global population increases and demand for nutritious food rises, macroalgae offer a viable solution. According to the United Nations, the world population is projected to reach approximately 9,7 billion by 2050, which is expected to drive a 70% increase in food demand. As macroalgae are rich in essential nutrients, they are increasingly used as a valuable ingredient across a range of food products—from snacks to dietary supplements.

b. Growing Consumer Health Awareness

Growing consumer awareness of health and wellness is increasing demand for functional foods. The health benefits of macroalgae—known for their high content of vitamins, minerals, and antioxidants—are increasingly being recognised. A report prepared by the WHO indicates that seaweed consumption can contribute to improved nutrition, particularly in regions with limited access to diverse food sources. As consumers seek healthier dietary options, the market for macroalgae-based products is expected to expand significantly.

c. Public Support Measures and Policy Initiatives

Government initiatives are also supporting the growth of the macroalgae industry. In many countries, governments encourage sustainable agricultural practices to combat climate change and environmental degradation. For example, the Green Deal prepared by the European Union (EU) (NOAA Fisheries, 2024) highlights the importance of sustainable marine resources and encourages investment in seaweed cultivation.

The EU plans to allocate up to EUR 1 billion by 2027 to promote sustainable aquaculture, and a portion of this funding is expected to benefit the macroalgae sector. Such initiatives can provide the financing and resources needed to drive the sector's growth.

d. Innovation in High-Value Applications

Innovations in macroalgae applications offer another pathway for growth. Beyond food and beverages, macroalgae are being explored across a range of sectors, including cosmetics, biofuels, and bioplastics. The global bioplastics market is projected to reach USD 44,5 billion

by 2026, and macroalgae can serve as a sustainable alternative to conventional petroleum-based plastics. This shift toward environmentally friendly materials aligns with consumers' demand for sustainable products and creates a significant opportunity for the macroalgae market.

e. Contribution to Climate Change Mitigation Potential

Macroalgae's role in climate change mitigation also offers growth expectations. Macroalgae cultivation can contribute to efforts to combat global warming by sequestering significant amounts of carbon dioxide. According to research conducted by the World Bank, seaweed cultivation can sequester up to 1,5 billion tonnes of carbon dioxide per year. This carbon sequestration potential not only strengthens macroalgae's sustainability profile, but also attracts investments from environmentally focused organisations and governments seeking to meet climate targets.

1.5.2. Market Expansion

Expanding markets in the West further increase growth opportunities. The rising popularity of plant-based diets in Europe and North America is driving higher demand for seaweed products. In the United States, the edible seaweed market is expected to grow by 10% per year, reaching approximately USD 2 billion by 2025. A major trend in the macroalgae market is the increasing popularity of plant-based diets. As consumers become more health-conscious and environmentally aware, their search for sustainable food sources is also growing. Macroalgae—especially seaweeds—are regarded as nutrient-dense ingredients that can enhance both flavour and health benefits in plant-based products. Macroalgae are rich in vitamins, minerals, and antioxidants. For example, red macroalgae such as nori contain high levels of vitamin B12, which is often lacking in vegan diets. This nutritional profile aligns with the growing demand for functional foods.

According to a study published in the International Journal of Food Science, consuming seaweed can improve gut health and strengthen the immune system. This awareness is prompting more manufacturers to incorporate macroalgae into their products.

1.5.3. Government Support Measures

Governments are actively promoting macroalgae cultivation and consumption as part of their sustainability objectives. The Green Deal highlights the importance of marine resources in achieving climate targets. The EU plans to invest EUR 1 billion in sustainable aquaculture, with a specific focus on macroalgae cultivation. This initiative aims to encourage local production, reduce dependence on imported products, and improve food security.

1.5.4. Technological Advancements

Recent technological advances are improving the efficiency of macroalgae cultivation and processing. Innovations such as automated harvesting and enhanced aquaculture techniques are making it easier to produce high-quality macroalgae at scale. For example, a partnership between the University of Southern California and the Norwegian company Ocean Farming

aims to develop sustainable farming practices that could increase yields by up to 50%. These developments not only improve the economic viability of macroalgae cultivation, but also reduce environmental impacts.

Another trend is the growing use of macroalgae in environmentally friendly packaging solutions. As plastic pollution becomes a global problem, companies are shifting towards biodegradable alternatives. Macroalgae derived materials offer a sustainable alternative to conventional plastics, appealing to environmentally conscious consumers.

The use of macroalgae in the cosmetics industry is also increasing. Many cosmetics companies are incorporating seaweed extracts into their formulations due to their moisturising and anti-ageing properties. This trend represents a profitable opportunity for macroalgae suppliers.

1.6. Macroalgae Value Chain and Key Applications

1.6.1. Commercial and Industrial Applications

Macroalgae have become a strategic resource across multiple industries—not only in the food sector—due to their nutritional value, bioactive compounds, and rapid growth rates. This has enabled macroalgae to be increasingly viewed as a versatile biorefinery platform.

a. Food and Beverage Sector

Macroalgae have long been used for direct consumption worldwide, particularly in Asian cuisines. Species such as nori (*Porphyra spp.*), wakame (*Undaria pinnatifida*), and kombu (*Laminaria japonica*) are core ingredients in products such as sushi, salads, sauces, and seasonings. Beyond traditional use, macroalgae are increasingly regarded as a rich resource for functional foods and plant-based alternatives. Macroalgae are rich in protein, dietary fibre, vitamins, minerals, and polyunsaturated fatty acids (PUFAs) that are essential for human nutrition. As vegan and vegetarian diets continue to gain popularity, macroalgae are being used more extensively to develop plant-based protein alternatives.

One of the most significant industrial uses of macroalgae in the food sector is the production of hydrocolloids (agar, alginate, and carrageenan). These compounds are used as natural additives for gelling, thickening, stabilisation, and emulsification in a wide range of foods, including ice cream, jams, and baked goods.

b. Animal Feed and Aquaculture

Macroalgae are gaining increasing importance in the animal feed sector as a sustainable alternative to conventional fishmeal and fish oil. These ingredients can provide omega-3 fatty acids that are essential for animal nutrition, thereby reducing dependence on capture fisheries. The use of seaweed meal as a feed additive—pioneered in Norway in the 1960s—illustrates early innovation in this area. In addition, studies report that incorporating certain seaweed species into animal feed at around 1% inclusion rates can reduce methane emissions from cattle. This mitigation potential also positions the sector as relevant in the context of climate-change action.

c. Biostimulants and Biofertilisers

Macroalgae extracts are used in agriculture as biofertilisers and soil conditioners, supported by their macro and micronutrient content. These inputs can improve soil physicochemical properties and promote beneficial microbial activity. Macroalgae-based biostimulants can accelerate crop growth, enhance tolerance to abiotic stresses such as drought and salinity, and improve nutrient uptake. In Türkiye, a project conducted at Mersin University examined the production of biofertiliser from local macroalgae species and its effects on lettuce, highlighting domestic potential in this field. The use of such local and natural fertilisers can offer a more cost-effective option under rising input costs while also supporting organic farming practices.

d. High-Value Applications

The highest value-added application areas for macroalgae are in industries such as pharmaceuticals and cosmetics.

- **Pharmaceuticals and Nutraceuticals:** Macroalgae contain bioactive compounds with antioxidant, anticancer, antimicrobial, and antidiabetic properties. These compounds are regarded as a natural and sustainable alternative to synthetic drugs and show potential in the treatment or management of various diseases. Certain compounds— such as carrageenan oligosaccharides—have demonstrated anticancer activity and may generate synergistic effects when combined with conventional medicines.
- **Cosmetics:** Natural, biocompatible, and renewable macroalgae-derived compounds are gaining popularity in skincare. They are used in moisturisers, anti-ageing products, skin-whitening formulations, and hair-care products (Commercial Seaweed Market Size, 2024).
- Algal materials prepared as pastes, powders, or flours are preferred in thalassotherapy centres due to their mineral content (e.g., calcium, magnesium, sodium, potassium), trace elements (e.g., iron, copper, zinc, manganese), and vitamins (Turan, 2007). Agar’s gel-forming capacity is reported to be approximately ten times higher than that of gelatin, which supports its widespread use in microbiological studies and in the pharmaceutical industry (Yilsay et al., 2001).
- Due to their high water-retention capacity, seaweed-derived components have also been used in the preparation of sulphamate-containing suspension mixtures (Güner & Aysel, 2006).
- Agar gels are also used in various products, such as perfumed underarm creams, sunscreens, and dermatological creams containing zinc oxide or penicillin.
- Studies note that alginates used in creams may provide a cooling and refreshing sensation on the skin due to rapid evaporation effects.

Table 2: Key Macroalgae Metabolites and Industrial Applications

Metabolite Class	Main Sources	Key Industrial Applications
Polysaccharides	<i>Rhodophyta</i> (red algae), <i>Phaeophyceae</i> (brown algae)	Food (thickening, gelling), pharmaceuticals (drug delivery), biotechnology, biofuels
Proteins	Various species, especially red algae	Food (plant-based protein), animal feed, nutrition
Phenolic Compounds	<i>Phaeophyceae</i> (brown algae)	Antioxidant, anticancer, antimicrobial cosmetics (antiageing)
Pigments (carotenoids, phycocyanins)	Various species	Natural food colourants, cosmetics, nutrition (dietary supplements)
Minerals and Vitamins	Various species	Food (nutrient supplementation), animal feed, biofertilisers

These diverse applications demonstrate that macroalgae are not only a primary product, but also a feedstock for an integrated biorefinery, enabling the production of multiple high-value outputs from the same biomass. This approach aligns with a circular-economy model in which the entire feedstock is utilised and supports a zero-waste objective (Adarshan et al., 2023).

1.7. Cultivation and Processing Technologies

The macroalgae sector is evolving from traditional harvesting practices toward modern aquaculture-based cultivation techniques. This transition aims to improve efficiency, reduce costs, and support environmental sustainability.

Modern Cultivation Techniques

- **3D Ocean Farming:** A technique that enables large-scale production by using the full water column of seawater, without the land area and freshwater resources required for terrestrial agriculture. Seaweeds suspended on longlines can grow to 10 metres or more before being harvested in spring. This approach can generate high yields from a relatively small footprint.

- **Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA):** This approach involves the co-cultivation of different species—such as finfish, shellfish, and macroalgae—in the same system. Macroalgae absorb excess nutrients (nitrogen and phosphorus) originating from the waste streams of other species, improving water quality and supporting overall ecosystem sustainability. This integrated model can enhance economic profitability while also delivering environmental benefits.

1.7.1 Biotechnology and Strain Improvement

Biotechnology and strain improvement are of major importance for the long-term growth of the macroalgae sector. However, unlike microalgae, technological progress in this area remains at an early stage. In microalgae, gene-editing tools such as CRISPR/Cas have been successfully used to improve industrially relevant traits, including lipid and pigment content. In contrast, the application of these tools to macroalgae has not yet been sufficiently studied, and available evidence does not provide detailed insight into how industrial traits in macroalgae can be improved through genetic engineering.

At present, the primary approach used for strain improvement in macroalgae relies on conventional selective breeding and the development of stable strains by identifying and propagating desirable traits from wild populations. This indicates a critical technological gap for the sustainable growth of macroalgae cultivation. Addressing this gap highlights the importance of investing in biotechnology and genetic research to maximise the sector's future potential.

1.7.2 Biorefinery and Processing

Developing biorefinery processes is critical to increasing the economic value of macroalgae. These processes aim to produce multiple high-value outputs under a zero-waste principle by fractionating biomass into its main components (e.g., proteins, carbohydrates, lipids), which can then be valorised through different product streams.

However, macroalgae processing involves significant challenges. Drying harvested biomass is an energy-intensive step that increases both costs and environmental impacts. In response, research is being conducted on novel extraction approaches—such as wet processing routes—that enable processing without prior drying. These innovations have the potential to reduce production costs and lower the industry's environmental footprint.

1.8. The Role of Macroalgae in the Blue Economy

The macroalgae sector offers not only economic potential, but also a range of environmental and social benefits that fall under the concept of the blue economy. These benefits position macroalgae cultivation as more than an industrial activity, and as a strategic field that can contribute to planetary health.

1.8.1. Blue Economy

Since the early 21st century, the concept of the “blue economy” has become increasingly prominent. The international community has suggested that the blue economy encompasses three economic forms:

- an economy addressing the global water crisis (McGlade et al., 2012),
- an economy of innovative development (Pauli, 2009), and
- the development of the marine economy (Behnam, 2012).

Academic research indicates that the blue economy literature is shaped around themes such as sustainable development, ecosystem services, governance, and sectoral transformation. Within this framing, blue economy models are understood to aim at shifting resources from scarcity to abundance and at challenging prevailing production and consumption patterns that generate environmental problems (Kathijotes, 2013). To support blue growth in coastal areas, the development of management tools grounded in an ecosystem services approach has been recommended (Mulazzani et al., 2016). Similarly, long-term sustainable blue growth in the maritime sector has been linked to governance models based on cooperation, inclusiveness, and trust (Soma et al., 2018). Studies focusing on the spatial dimension of blue growth also underline the strategic importance of planning and space allocation, by highlighting potential limits to growth in the maritime industry (Van den Burg et al., 2019).

In the management and governance literature, the sustainable development approach is taken as a core foundation. In this context, a conceptual framework has been developed to assess sustainable marine management (Keen et al., 2018). In addition, a blue growth management model has been proposed that emphasises the need for joint efforts among stakeholders to promote blue growth and achieve the Sustainable Development Goals (Sarker et al., 2018).

Studies examining the role of stakeholders discuss the importance of inclusive governance mechanisms for sustainable development (Howard, 2018). The convergence between the blue economy and ecosystem management is also associated in particular with the ecosystem accounting approach, drawing attention to the ecological foundations of blue growth (Häyhä & Franzese, 2014; Lillebø et al., 2017). The blue economy emphasises overarching planning and coordinated development between the marine ecosystem and the economic system of oceans and coastal zones. Taking these characteristics into account, we define the blue economy as sustainable production, services, and all related activities that both use and conserve coastal and marine resources. In doing so, there are numerous challenges that concern all sectors of the economy—from the private sector and industry to research and development, from NGOs to government policies. This complexity presents both opportunities and barriers.

On 8 June 2018, various marine industrial parks and bases in the Yangtze River Delta region signed agreements to implement regional strategic cooperation. The strategic cooperation of

marine industries in the Yangtze River Delta involves five parks and bases in Nantong, Zhoushan, Shanghai, Pudong, and Ningbo.

There are two main focuses for the establishment of these parks and bases:

- *To strengthen industrial cooperation:* to comprehensively manage industrial projects and resources in order to facilitate needs-based choices; to establish service functions to guide project implementation; and to promote the orderly transfer of the marine industry within the region and the development of industrial clustering.
- *To deepen cooperation in scientific innovation and talent development:* to encourage colleges and institutions, scientific institutes, and enterprises to establish joint R&D institutions and shared centres for technology transfer; to ensure communication and integration in attracting marine talent; to create joint mechanisms for training and developing talent; and to establish common criteria for recognising talent (State Council of China, 2014).

1.8.2. Blue Carbon Potential for Addressing Climate Change

Macroalgae are highly effective at absorbing carbon dioxide from the ocean. Based on biomass alone, they can absorb more greenhouse gases than the combined total of seagrasses, mangroves, and salt marshes, which are known for their carbon storage capacity. This implies that macroalgae farms could help address local climate-related impacts such as ocean acidification. While the term “blue carbon” traditionally applies to mangroves, seagrasses, and salt marshes, it is increasingly being expanded to include macroalgae, as macroalgae are also recognised as potentially making significant contributions to global climate goals.

1.8.3. Bioremediation and Water Quality Improvement

Macroalgae can improve water quality by taking up excess nutrients such as nitrogen and phosphorus during growth. When present in excessive amounts, these nutrients can trigger harmful algal blooms and reduce oxygen levels in marine waters. Macroalgae farms can help lower nutrient concentrations in adjacent waters and may therefore help prevent the formation of hypoxic “dead zones”.

Macroalgae can also absorb heavy metals and other coastal pollutants, acting like a biological sponge. Macroalgae cultivated for this purpose should not be consumed as commercial products, and should be used solely to improve ecosystem health. Such farms offer significant potential for bioremediation projects, particularly in coastal areas contaminated by industrial discharges.

1.8.4. Ecosystem Services and Restoration

Macroalgae play important ecological roles by providing habitat and food resources for marine life. To help restore declining kelp forests globally, an approach referred to as “restorative aquaculture” is increasingly being adopted. In this approach, macroalgae

cultivation is used to create shelter and feeding environments for commercial fish and other marine organisms.

These environmental benefits are shifting interest in the macroalgae sector beyond commodity markets. Ocean-based solutions often deliver multiple co-benefits, such as ecosystem restoration, carbon sequestration, and job creation. This layered value proposition is attracting a new class of blue-economy-focused investors who consider not only financial returns but also measurable environmental and social impact. As a result, the macroalgae sector is increasingly positioned as a long-term and sustainable investment area.

PART II

Comparative Analysis: Global Leaders and Türkiye

The macroalgae (commercial seaweed) sector has shown notable growth in recent years and has secured an increasingly important place in the global economy. As of 2024, the value of the global commercial seaweed market is reported with varying figures across different sources, yet all point to a substantial market size. According to Fortune Business Insights (2024), the market was valued at approximately USD 12,7 billion in 2024 and is expected to reach USD 22,82 billion by 2034, growing at a 6% CAGR.

Another market analysis suggests that the market size was USD 17,14 billion in 2023 and USD 18,39 billion in 2024, and forecasts that it will increase to USD 34,56 billion by 2032, with a CAGR of 8,20%. The differences between these figures reflect the fact that the sector is still not fully mature and that data-collection methodologies have not yet been fully standardised. This, in turn, is an indicator of the sector's new and dynamic nature. According to a recent World Bank report, the emerging global seaweed market has the potential to grow to USD 11,8 billion by 2030. This market value is associated not only with seaweed's capacity to absorb carbon, sustain marine biodiversity, create employment opportunities for women, and unlock value chains.

The Global Seaweed: New and Emerging Markets Report (2023) analyses commercial opportunities for seaweed market applications with high growth potential. The report provides insights for entrepreneurs, investors, and policymakers to help the seaweed sector realise its potential both now and in the future. Today, most cultivated seaweed is used either for direct human consumption or as fresh feed in aquaculture. In the future, seaweed-based products could substitute fossil fuels in sectors such as textiles and plastics, enable carbon capture, and generate income for vulnerable coastal communities. Since the current market is dominated by a few Asian countries that produce 98% of cultivated seaweed, significant growth opportunities exist across many other regions.

The report focuses on ten relatively new and emerging seaweed applications that have the largest market opportunities beyond established sectors. In the short term, the most promising emerging markets—including biostimulants, animal feed, pet food, and methane-reducing additives—are projected to reach USD 4,4 billion by 2030.

Mid-term opportunities, such as dietary supplements, alternative proteins, bioplastics, and fabrics, could reach a potential value of USD 6 billion. Long-term emerging markets for pharmaceuticals and construction materials are projected to reach USD 1,4 billion, although significant regulatory challenges and high product development costs are expected to persist.

The macroalgae market is experiencing substantial growth across regions, with Asia-Pacific (APAC) emerging as the dominant region, accounting for approximately 43% of the global market share, valued at USD 4,9 billion. This strong market presence can be linked to increasing consumer awareness of health benefits and sustainable practices, which is driving the growing use of macroalgae in food, pharmaceuticals, and biofuels.

Market expansion in North America is expected, driven by growing demand for natural food additives and increasing investment in algae-based biotechnology. The North American macroalgae market is projected to reach USD 1,8 billion by 2025, growing at a 9,3% CAGR. Europe follows closely, characterised by a strong market for macroalgae-derived bioplastics and biofertilisers.

In the Middle East and Africa, although the market remains underdeveloped, there is a notable shift towards sustainable agricultural practices, which is driving increasing interest in macroalgae applications. In Latin America, growth is being observed particularly in countries such as Brazil and Chile, where macroalgae cultivation is being integrated into local economies.

2.1. Policy Frameworks and Support Mechanisms in Leading Countries

Global leaders in the macroalgae sector treat this field as a strategic national priority. Each country's approach is shaped by its own economic, social, and environmental objectives.

Asian countries such as China, the Philippines, Indonesia, Japan, and Korea are among the leading regions where macroalgae are effectively cultivated at commercial scale worldwide. Seaweed productivity—dominated by five main genera/species groups (*Undaria*, *Pyropia*, *Gracilaria*, *Euchematoids*, *Saccharina*)—increased from 10,6 million tonnes in 2000 to 35 million tonnes in 2020. While both *Phaeophyceae* (3,1–16,4 million tonnes) and *Rhodophyta* cultivation expanded (1–18,3 million tonnes), *Chlorophyta* seaweed production declined (3,1–1,7 million tonnes). More than 95% of global macroalgae production was accounted for by *Laminaria saccharina* (35,4%), *Kappaphycus/Eucheuma* (33,5%), *Gracilaria* (10,5%), *Porphyra/Pyropia* (8,6%), and *Undaria* (7,4%). Europe's seaweed production reached 287.033 tonnes, contributing approximately 0,8% of the global total in 2019.

According to a new World Bank analysis on ten emerging seaweed markets, the seaweed sector could reach USD 11,8 billion by 2030. Despite this projection, much of the additional value in the seaweed business remains untapped. Beyond current markets, the sector holds for diversification and value addition. According to a World Bank report published in 2016, increasing seaweed farming by 14% per year would lead to 500 million tonnes (dry weight) by 2050 and a 10% increase in food supply, income generation, and quality of life. Seaweed farming remains concentrated in a limited number of countries dominated by East and Southeast Asia.

In East Asian countries, the harvesting and use of seaweeds for human food and medicine dates back at least 1500 years. Modern seaweed aquaculture in East Asia was established in Korea, Japan, and China between the 1950s and 1970s. Since then, it has expanded rapidly, and seaweed farms have gained popularity in other regions worldwide. In 2020, countries outside Asia produced less than 2% of total farmed seaweed volume. Nevertheless, the outlook for scaling seaweed production in other parts of the world remains promising. East and Southeast Asian countries continue to produce most farmed seaweed globally; China, Indonesia, the Philippines, North and South Korea, Japan, and Malaysia account for

approximately 98% of total production. In 2019, 98 countries exported macroalgae (USD 909 million) and hydrocolloids (USD 1,74 billion), earning a total of USD 2,65 billion. According to the UN Comtrade Database, exports of macroalgae and related products in 2019 generated export revenues, as shown in Table 3.

Table 3. Exports of Seaweed and Seaweed-Based Hydrocolloids, 2019

Countries	USD (million)
China	578
Indonesia	329
Republic of Korea	320
Philippines	252
Chile	209
Spain	145
France	124
United States	102
Germany	82
United Kingdom	78

Source: Birleşmiş Milletler Comtrade Veri Tabanı, 2019

2.1.1. People’s Republic of China

China is an undisputed leader in macroalgae cultivation, and its dominance in this field stems from long-term and integrated public policies. In line with its objectives of ensuring food security and protecting marine resources, Chinese leaders emphasise the importance of mobilising both terrestrial and marine resources.

- **Marine Ranching Strategy:** China has pioneered the concept of “marine ranching”, which transforms marine areas into managed underwater farms. Going beyond conventional aquaculture, this concept seeks to create ecosystems that support the restoration of marine biodiversity. In 2024, a single city—Shanwei—invested more than USD 279 million in the construction of eight such marine ranching sites.
- **Blue Carbon Policies:** China has highlighted “blue carbon” potential to support its goal of achieving carbon neutrality by 2060. The government has established various financial support mechanisms to encourage blue carbon projects, including macroalgae cultivation, and supports the participation of private capital.

2.1.2. Japan

In Japan, the use of macroalgae has a long-established history dating back to the 4th century. Japan’s policies view the sector not only as an economic activity, but also as part of cultural heritage and ecosystem health.

- **Restoration and Conservation:** Japan’s Fisheries Agency has implemented policies to restore declining seaweed beds (isoyake). Guidance documents have been published to enable fishers to plan and implement seaweed-bed restoration themselves. These

efforts are supported through a public subsidy scheme, and new technologies (e.g., unmanned aerial vehicles—drones) are used to monitor the status of seaweed beds.

2.1.3. Norway

Norway is a global leader in aquaculture (particularly salmon) and is integrating the macroalgae sector into this existing infrastructure.

- **Integrated Policy Approach:** The Norwegian Parliament explicitly supports measures within aquaculture policy to “scale up low-trophic aquaculture, including macroalgae cultivation”. This policy approach is aligned with incentive schemes—such as the new Environmental Technology Programme—which aim to reduce the environmental impacts of fish farming and to develop a circular economy strategy.

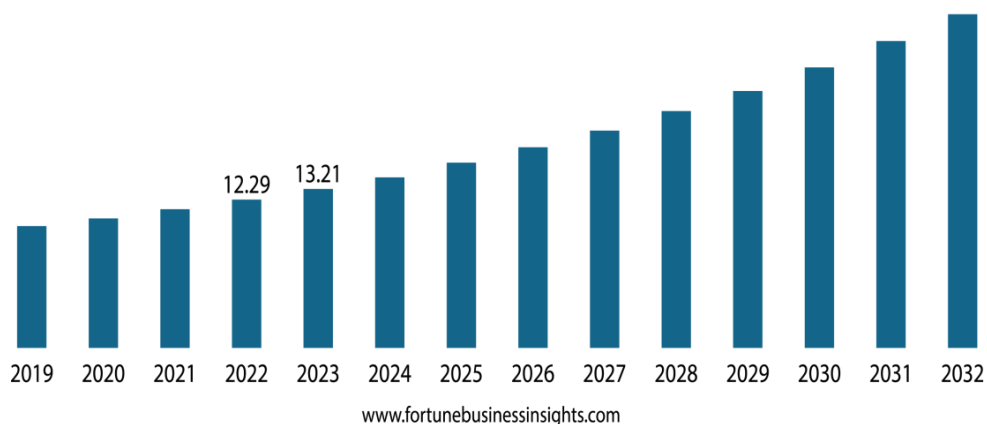
2.1.4. United States

Although the U.S. macroalgae sector is still in a developmental phase, it is among the growing aquaculture segments.

- **R&D and Infrastructure Support:** Government agencies such as the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) support the sector by conducting research on siting requirements, farm designs, and best management practices, with the aim of enabling the expansion of macroalgae cultivation in an economically and environmentally sustainable manner.

Figure 3: Asia-Pacific Commercial Seaweed Market Size, 2019–2032

Asia Pacific Commercial Seaweed Market Size, 2019-2032 (USD Billion)



Source: Fortune Business Insights, 2024

To fully realise the market potential of seaweed, the sector will need to overcome several fundamental challenges. The most significant constraint is seaweed availability, driven by

limitations in volume, supply consistency, and quality. As additional application areas for seaweed continue to develop, pricing pressures and regulatory barriers may also emerge.

Despite these challenges, the climate and environmental benefits of seaweed cultivation are expected to help accelerate the growth of emerging markets. As interest in “green” products continues to rise, many product developers have indicated that they rely on sustainability premiums to maintain profitability.

At a time when global resources are increasingly being depleted, it is particularly important to make the best possible use of resources such as seaweed resources that can both renew rapidly and potentially contribute to ecosystem regeneration.

PART III

Current State of the Macroalgae Sector in Türkiye and Selected Ecosystems

Türkiye has a favourable basis for macroalgae cultivation thanks to its long coastline, geographic position, and biodiversity potential. However, this potential has not yet translated into large-scale commercial activity.

3.1. Research and Development (R&D) Landscape

Academic research on macroalgae is being conducted in Türkiye. In particular, it is noted that regions such as Çanakkale, with geomorphological and salinity variations, may offer cultivation opportunities for many commercially valuable algal species. One example is a project carried out in the Gulf of Mersin on producing biofertiliser through fermentation from certain naturally occurring macroalgae species. This project explores the potential use of macroalgae in organic agricultural practices. At the governmental level, there also appears to be growing interest in the sector. The Ministry of Agriculture and Forestry, in cooperation with the FAO, organised a workshop on “Alternative Feeds for Carnivorous Fish in Aquaculture and Macroalgae Cultivation”. This event brought together different stakeholders—such as the feed industry, academics, and policymakers—to discuss the future of the sector.

3.2. Policy and Legal Framework

In Türkiye, permits for aquaculture are granted by taking into account factors such as environmental sensitivities and the tourism sector. The regulatory framework includes relatively high standards for environmental protection. General aquaculture regulations set out specific rules and permitting requirements for wild harvesting activities and processing facilities.

Support mechanisms are also available for R&D. The Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) provides project-based support schemes for SMEs. Under the Rural Development Investments Support Programme of the Ministry of Agriculture and Forestry, grants of up to 50% are available for machinery and equipment purchases. These support instruments could potentially encourage infrastructure investments required for macroalgae cultivation.

3.3. Barriers to Current Production and Commercial Activity

Despite growing interest in academia and policymaking, the development of the macroalgae sector in Türkiye has not yet translated into large-scale commercial production. Existing initiatives remain relatively small-scale and localised. For instance, a seaweed greenhouse in Seydikemer has been established to produce dietary supplements. Similarly, seaweed collected in Yalova has been converted into fertiliser by the municipality and used in greenhouses.

This situation indicates a “knowledge-to-action” gap in Türkiye in moving macroalgae potential towards large-scale commercialisation. Unlike global leaders, a concrete,

integrated, and long-term national strategy for the sector has not yet been fully defined in Türkiye. This highlights the need to build stronger bridges between academic research, policy objectives, and commercial implementation.

**Table 4: Comparative Overview of the Macroalgae Sector:
Türkiye vs. Global Leaders**

Criteria	China	Japan	Norway	Türkiye
Market Status	Global leader; dominant producer and consumer.	Traditional consumer; a pioneer in industrial applications.	An emerging market integrated into the broader aquaculture sector.	An emerging market; commercial-scale production has not yet started.
Cultivation Approach	Marine ranching and intensive production.	A mix of traditional and modern methods, with a restoration focus.	Integrated systems as part of low-trophic aquaculture.	Academic projects and small-scale greenhouse initiatives.
Key Drivers	Food security, “blue carbon”, national development plans.	Deep-rooted traditions, isoyake restoration, environmental protection.	Aquaculture sustainability, environmental technology.	Academic interest; seeking nature-based solutions to high input costs (e.g., fertilisers).
Policy Focus	Specific and integrated state policies, including financial support.	Public subsidies for restoration and monitoring.	Integration into aquaculture policy and technology incentives.	General aquaculture regulations; project-based R&D support schemes.

Criteria	China	Japan	Norway	Türkiye
Notable Achievements	Large-scale production; development of marine ranching sites.	Restoration of declining seaweed beds.	Integration of macroalgae into fish farming systems.	Academic research and pilot initiatives.
Key Gaps	Coastal pollution; gaps in the legal/regulatory framework.	—	—	Lack of commercial-scale production; absence of a dedicated national strategy

3.3.1. People’s Republic of China — Macroalgae Sector

As in many parts of the world, China is seeing increasing interest and intensive R&D efforts in both existing and emerging microalgae and macroalgae products—ranging from high-value specialised products (such as established foods for human consumption) to lower-value commodity applications (such as feeds and fuels). This interest is driven by national targets to reduce CO₂ emissions from fossil fuels—particularly coal-fired power plants—as well as by demand for “green” energy and products that can be produced without freshwater inputs.

At the same time, the Chinese algae industry is facing more immediate challenges, including public perceptions regarding the healthiness of algae-based foods and high production costs that constrain both domestic and international markets.

3.3.2. Black Sea Basin

The Black Sea has been heavily polluted due to human activities such as maritime operations, agriculture, and industry, which has affected the regime and characteristics of its waters (Novac et al., 2020; Shypotilova et al., 2021). These activities have also led to damage to civilian and industrial facilities, causing environmental pollution in Ukraine—particularly across the waterways of the Black Sea Basin (Shchiptsov & Goncharov, 2023).

The significance of pollutants in the Black Sea is considerable, and a substantial share of marine litter associated with maritime activities originates from the region (Novac et al., 2020). In addition, the Black Sea’s weak water exchange and insufficient vertical circulation further exacerbate the pollution problem (Novac et al., 2020). Pollution in the Black Sea has severe impacts on the ecosystem and water quality. For example, the destruction of civilian and industrial facilities as a result of armed conflict in Ukraine has contributed to

environmental pollution in the Black Sea Basin (Shchiptsov & Goncharov, 2023). Moreover, point-source emissions—such as nutrients, microplastics, *Cryptosporidium*, and triclosan—originating from 107 rivers discharging into the Black Sea are expected to increase in the future, underscoring the need for coordinated international efforts to minimise pollution (Strokal et al., 2023).

Turkish provinces along the Black Sea coast—such as Trabzon, Samsun, and Zonguldak—contribute significantly to regional pollution, primarily through agriculture and industry (Akkoyunlu, 2018). Effective monitoring and water quality control strategies, alongside the deployment of innovative technologies to reduce pollutant impacts, are necessary to protect the marine environment. Addressing pollution in the Black Sea requires a multifaceted approach, including the development of environmentally sensitive recommendations and strategies, the establishment of robust monitoring and quality control systems, and the application of innovative technologies to mitigate pollutant impacts (Shypotilova et al., 2021; Shchiptsov & Goncharov, 2023). In addition, advanced wastewater treatment can help minimise trade-offs between economic activity and pollution, and risk assessment is crucial for limiting the impacts of biological hazard issues in the region (Strokal et al., 2023; Rată & Rusu, 2020).

Macroalgae in the Black Sea—particularly green and brown species—are of significant interest due to their potential applications across a range of industries, including pharmaceuticals, cosmetics, tissue engineering, wound dressings, and drug delivery systems (Sirbu et al., 2020; Cadar et al., 2022; Roşioru, 2024). These algae are rich in bioactive compounds, such as polyphenols with antioxidant and antibacterial activity. The biochemical composition of *Ulva lactuca* and other macroalgae species, including *Gongolaria barbata*, is influenced by environmental conditions and physiological status, which in turn affects their utilisation potential (Cadar et al., 2022; Roşioru, 2024). For example, the total polyphenol content and antioxidant capacity of *Ulva lactuca* may vary depending on the extraction method and the specific conditions of the marine environment (Cadar et al., 2022). In the Black Sea, the distribution and abundance of *Ulva lactuca* and *Gongolaria barbata* (previously known as *Cystoseira barbata*) are affected by multiple factors, including coastal habitat changes and anthropogenic pressures such as tourism development. Genetic diversity studies on *Ulva lactuca* have also identified variations in the intertidal zone and have underlined the need for conservation efforts (Hayati & Rahly, 2024). The use of *Ulva lactuca* and *Gongolaria (Cystoseira) barbata* biomass for extracting bioactive substances depends on compound purity, which is closely linked to the status of the marine ecosystem (Sirbu et al., 2020; Cadar et al., 2022; Roşioru, 2024). Simplified profiles of antioxidant-active compounds can be established using semi-quantitative tests, highlighting the importance of considering sampling location and timing. Overall, the valorisation potential of species such as *Ulva lactuca* (Sirbu et al., 2020; Cadar et al., 2022) and *Gongolaria barbata* (Roşioru, 2024) is high due to their biochemical properties, making them suitable candidates for biotechnological applications.

The current species list of macroalgae (excluding *Charales*) in Russia's southern seas includes 478 species in total: 362 species in the Black Sea, 46 species in the Sea of Azov, and 70 species in the Caspian Sea. Compared to data from 30 years ago, the species list has increased by approximately 30% (with most of the increase attributable to 96 species recorded in the Black Sea).

Warm-water Mediterranean and tropical-origin green and red macroalgae (e.g., *Ceramium*, *Polysiphonia*, *Laurencia*, *Ulva*, and *Chaetomorpha*) and brown algae (e.g., *Sargassum* and *Cystoseira*) are the main invasive taxa. Today, the highest species diversity is found along the Crimean and Turkish coasts of the Black Sea, and the species list for the Turkish coast differs markedly from all other surveyed regions of the Black Sea. Algae belonging to the warm-water complex showed the strongest increase in the Black Sea during the 1990s and 2000s; species of boreal–tropical and subtropical origin are dominant. By contrast, no similar trend was observed in the Sea of Azov or the Caspian Sea, although an expansion of habitats of brackish-water green algae has been recorded.

The Black Sea is a brackish basin that is semi-isolated from the Mediterranean, and its hydrology and phytobenthos concentrations differ from those of other seas in the same region. Toxic elements (and nuclides) are transported via airborne pollutants, rivers, oil pollution, or the direct discharge of industrial waste into the sea. Trace elements are carried by seawater currents originating from the Danube and other rivers. Ecological conditions in coastal areas are highly diverse, which causes element concentrations in algae to vary depending on multiple factors, including species, geographic location, and season.

Green macroalgae are widely used to monitor marine pollution across different geographic regions. They are common along Bulgaria's Black Sea coast, and some species (*Ulva rigida*, *Enteromorpha intestinalis*, *Cladophora vagabunda*) occur in almost all areas; therefore, they are suitable for comparative assessments of pollutant concentrations across locations. Green macroalgae species have been used as bioindicators in the Black Sea and in other marine environments of neighbouring seas. Although researchers have measured trace element concentrations in Black Sea green algae species, data on heavy and toxic metals along Bulgaria's Black Sea coastal zone remain limited and insufficient.

Macroalgae cultivation has strong potential in the shallow and sheltered coastal areas of the Black Sea, particularly along parts of the coasts of Türkiye, Romania, Bulgaria, and Georgia.

Macroalgae are cultivated by attaching them to ropes and nets placed vertically or horizontally in the sea. Fast-growing species such as *Ulva* and *Enteromorpha* can be readily farmed by taking advantage of the nutrient-rich coastal waters of the Black Sea. In areas where species such as *Cystoseira* occur naturally at high densities, controlled harvesting methods can be applied to avoid harming the ecosystem. These species are important due to their high iodine content and alginates.

Concern over trace element pollution in marine environments has been widespread for decades, particularly because human activities—including tourism—can release significant

amounts of toxic metals (Bat et al., 2009), raising public concern (Signa et al., 2020). These pollutants, originating from industrial processes, agricultural runoff, and urban wastewater discharges, disrupt the fragile balance of the Black Sea ecosystem (Bat et al., 2018) and pose significant risks to both marine biota and human health (Bat & Arici, 2018). The Black Sea receives substantial terrestrial pollution inputs primarily via rivers. In addition, pollution is generated along its coasts by maritime transport, industrial activities, and municipal sewage discharges (Bat et al., 2018). Therefore, biomonitoring studies using macroalgae such as *Ulva* and *Gongolaria* (formerly *Cystoseira* spp.) are essential for assessing the extent of heavy metal bioaccumulation (Bat et al., 2021; Nunes et al., 2023) and for understanding the associated ecological impacts in this sensitive region (Neshovska et al., 2021; Rakib et al., 2021).

Numerous studies have demonstrated the effectiveness of macroalgae as reliable bioindicators of heavy metal pollution, owing to their sessile nature and high bioaccumulation capacity (Bat et al., 2021; Rakib et al., 2021). This characteristic enables macroalgae to reflect heavy metal concentrations in their surrounding aquatic environments over extended periods, making them valuable tools for environmental monitoring (Rakib et al., 2021). In particular, brown macroalgae exhibit a high sorption capacity, allowing them to integrate and concentrate substantial amounts of surrounding pollutants, which makes them especially useful for tracking metal contamination (Aboal et al., 2022). This bioaccumulation process is driven by physiological mechanisms that facilitate the uptake and retention of metals from the water column even at low environmental concentrations (Bat et al., 2021; Nunes et al., 2023). Consequently, analysing metal concentrations in these organisms can provide an accurate representation of pollutant bioavailability and ecological impacts within marine ecosystems (Aboal et al., 2022).

The genus *Ulva*, in particular, is known for its exceptional capacity to accumulate lead, concentrating it up to a thousand times more than the surrounding environment, which highlights its usefulness as an environmental bioindicator for this metal (Filippini et al., 2020). Conversely, *Cystoseira* spp. have shown variable heavy metal bioaccumulation capacities, influenced by factors such as hydrodynamic conditions and the presence of epiphytes (Nunes et al., 2023). Inter-species variability in heavy metal accumulation across different macroalgal taxa—including *Chlorophyta* and *Phaeophyta*—further complicates direct comparisons and requires species specific analyses to accurately reflect environmental pollution (Peng et al., 2022; Nunes et al., 2023). This variability underlines the importance of selecting appropriate species for biomonitoring studies, as different macroalgae exhibit different affinities for specific metals (Bat et al., 2009).

A more detailed analysis of these findings helps to clarify the spatial distribution of pollutants and the effectiveness of each species as a bioindicator for specific heavy metals, thereby contributing to a more nuanced understanding of pollution patterns along the southern Black Sea coast. This comparative assessment underscores the need to account for species-specific considerations in biomonitoring programmes, as different macroalgae may exhibit distinct bioaccumulation affinities for different metals (Rakib et al., 2021).

It is also important to note that environmental factors such as temperature and salinity can significantly influence heavy metal bioaccumulation rates in macroalgae (Signa et al., 2020). In addition, morphophysiological traits—such as surface area and growth rates—may play a more decisive role in metal bioaccumulation than species identity alone (Rakib et al., 2021). Moreover, the combined effects of these physicochemical and biological factors require further research to better understand their interactive influence on metal uptake and retention in marine macroalgae, thereby improving their utility as robust biomonitors. Future research should focus on controlled experimental settings to isolate the effects of individual environmental variables and algal traits on metal accumulation.

3.3.3. White Sea (Russia)

The Kolvitsa Inlet of Kandalaksha Bay is an under-studied area of the White Sea. Field surveys were conducted between 15 and 21 July 2016 in the intertidal and subtidal zones (using diving equipment). In total, fifty macroalgal species were recorded: 9 *Chlorophyta*, 18 *Phaeophyceae*, and 23 *Rhodophyta*; the first records of *Choreocolax polysiphoniae* and *Coccotylus hartzii* in Kandalaksha Bay were reported (Mikhaylova et al., 2017).

The red algal zone extends from 7 m down to 17–18 m depth, where high-diversity zonation patterns and phytocoenoses were examined. The *Odonthalia dentata* community (7–8 m) includes 31 seaweed species (biomass 282.1 ± 37.6 g/m²; vegetation height 20 cm), with *Coccotylus truncatus* and *Polysiphonia stricta* as subdominants. The *C. truncatus* community (8–9 to 11–12 m) includes 35 species (157.4 ± 92.2 g/m²; height 10 cm). The *C. truncatus*–*P. rubens* community (11–12 to 14–15 m) includes 26 species (41.9 ± 1.1 g/m²; height 5–6 cm), with *Euthora cristata* as a secondary dominant; a limited number of red cortical calcareous algae occur at 15–18 m. Thirty-two epiphytic algal species were recorded; secondary holdfasts on upright fronds of *P. stricta* suggest a specific attachment adaptation, and *C. truncatus* may be a consortium-forming species in the lower photic zone, as epiphyte biomass can be comparable to benthic seaweed biomass.

PART IV

Opportunities, Recommendations, Investment Assessment

4.1. Strategic Opportunities for Türkiye and SWOT Analysis

4.1.1. Strengths / Opportunities

- **Extensive coastline and biodiversity** — The Aegean, Mediterranean, and Black Sea coasts provide a strong basis for hosting a wide range of seaweed/macroalgal species.
- **Climate and natural endowments** — Access to saline-water environments, solar irradiation, and suitable temperature regimes create favourable conditions for biological production.
- **Existing biotechnology and academic capacity** — Universities host relevant departments (biology, marine biology, biotechnology), laboratories, and ongoing research projects.
- **Rising interest and public awareness** — Awareness related to marine pollution, microplastics, and sustainability is increasing, and narratives such as “valorising seaweeds through the economy” are gaining traction.
- **Entrepreneurship ecosystem and grant schemes** — Institutions such as TÜBİTAK, Regional Development Agencies, and the Ministry of Industry and Technology show a growing tendency to support R&D and sustainable technologies

4.1.2. Weaknesses and Key / Constraints Structural Barriers

- **Limited investment and early-stage financing constraints** — There is limited visibility on whether comparable seaweed/algae-focused startup investment cases exist in Türkiye versus abroad. The initiatives observed are mostly at prototype stage or remain small-scale.
- **Production costs and lack of economies of scale** — Prototype outputs and biomass-based solutions tend to be costly; scale-up is constrained by high costs for processing, drying, and market access/logistics.
- **Technology and infrastructure gaps** — Experience remains limited in key areas such as controlled farming systems (offshore and nearshore), extraction technologies, and quality standards.
- **Regulatory and permitting uncertainty** — Regulations can be lengthy and fragmented, including marine area permits, Environmental Impact Assessment procedures, biodiversity protection rules, and authorisations for use/collection.
- **Market and demand uncertainty** — Consumer awareness, industrial demand, feedstock supply, and logistics are not yet clearly established; regardless of the target product category (food, cosmetics, agriculture, feed, biomaterials), a robust market strategy still needs to be built.

- **Skills and know-how gaps** — Limited international experience, technology transfer capabilities, familiarity with national/international standards, and quality control methodologies.

4.1.3. Investment and Entrepreneurial Potential in Türkiye

In Türkiye, investments in algae cultivation and the seaweed sector have accelerated in recent years. In the sector, a growing number of production sites and several initiatives operating in this field have recently intensified their activities, and—supported by the foreign capital they have secured—have undertaken work targeting different industries.

Table 5: Key Macroalgae Startups in Türkiye

Venture	Description
SeaWean	A Türkiye-based venture producing seaweed extracts. The company emphasizes its ambition to become “a candidate for global leadership”.
Palgae	A bio-based material with seaweed content for agricultural covers: developing an algae-based product prototype.
Kybele’s Garden	Kybele’s Garden is both a technology provider and a product supplier in the market.

In Türkiye, in the field of macroalgae / seaweed / algal biotechnology:

- **Current Opportunities:** Advantages such as natural resources, climate, scientific infrastructure, and the direction of sustainability-driven public policy.
- **Current Gaps:** Investment volume, technological capacity, scale, regulatory clarity, and proof of market demand & business model.
- **Potential First-Investor Roles:** Public institutions (e.g., TÜBİTAK, Development Agencies), private capital plus sustainability-focused angel investor networks, and industrial collaborations (cosmetics, agriculture, food industry).

Strengths

- **Geographical and Ecological Diversity:** Türkiye is in a favorable position for macroalgae cultivation with its different marine ecosystems and regions such as Çanakkale that have distinctive salinity differences (Scispace.com, 2024).
- **Advanced Aquaculture Sector:** The existing and rapidly growing aquaculture infrastructure provides a solid foundation for macroalgae cultivation to grow by being integrated (IMTA) (TÜDAV, 2020).
- **Academic and Institutional Interest:** Ongoing work on macroalgae at universities and institutions such as the Ministry of Agriculture and Forestry, and the workshops that have been organized, indicate that a knowledge base and interest base for the sector exist (Mersin University Department of Information Technologies, 2020).

- Import–export dynamics of macroalgae are also important factors. Major producers such as China, Indonesia, and South Korea supply large quantities of macroalgae to markets in North America and Europe.
- In 2020, the global seaweed export value was approximately USD 11 billion, and a significant portion of this came from Asian countries. As demand for seaweed-based products increases in Western markets, these countries are increasing their production capacities, which leads to further growth in exports.

Weaknesses

- **Lack of Commercial Production:** Despite the existence of academic and pilot projects, large-scale commercial cultivation of macroalgae has not yet started in Türkiye.
- **High Costs and Lack of Infrastructure:** High cultivation and operational costs—which are a global issue—also constitute a barrier to entry into the sector in Türkiye. The infrastructure and equipment required for large-scale marine farms are not yet widespread.
- **Lack of a Specific Legal Framework:** Although a general regulatory framework for aquaculture exists, the absence of policies specific to macroalgae cultivation and designed to incentivize it may hinder the sector’s rapid growth.

Opportunities

- **Rising Global Demand in the Market:** The rapidly increasing global demand for high-value macroalgae-based products—such as food, pharmaceuticals, and cosmetics—creates significant export potential for Türkiye (Seaweed Market Share and Statistics, 2024).
- **Blue Economy and Sustainability-Focused Investments:** The sector’s contribution to climate change mitigation (blue carbon) and environmental restoration is attracting new funds and investors who combine financial returns with environmental impact.
- **Integration into the Agricultural Sector:** Rising fertilizer prices and trends toward organic agriculture present an opportunity to build a local market for macroalgae-based biofertilizers and biostimulants (Mersin University IT Department, 2024).
- Government initiatives promoting sustainable aquaculture and marine resource management also support the macroalgae market. In 2021, the EU launched a “Blue Economy” strategy aimed at supporting the sustainable use of ocean resources and encouraging seaweed cultivation. This initiative aligns with the EU’s goal of achieving a circular economy and encourages investments in macroalgae cultivation.
- In addition, countries such as South Korea and Japan have introduced regulations that support seaweed harvesting and processing, recognizing seaweed’s potential to contribute to food security and address environmental challenges.
- Investments in research and development for innovative cultivation and processing techniques are increasing the efficiency of macroalgae production. Innovations in aquaculture—such as automated harvesting systems and advanced nutrient

management—are making macroalgae farming more sustainable and profitable. This, in turn, creates new opportunities for producers and contributes to market expansion.

Threats

- **Environmental Pollution:** Water pollution caused by industrial waste increases the cost of macroalgae cultivation and negatively affects product quality.
- **Competition from Synthetic Alternatives:** In some sectors, the preference for lab-produced synthetic ingredients instead of macroalgae-based products is a potential threat.
- **Risk of Unsustainable Harvesting:** Uncontrolled or excessive wild harvesting can lead to biodiversity loss and ecosystem degradation.
- Regulatory challenges also hinder market growth. Different countries have different regulations regarding the harvesting and processing of macroalgae, which can complicate international trade. For example, in the European Union, strict rules under the Marine Strategy Framework Directive aim to ensure the sustainable use of marine resources.
- Compliance with regulations can be costly and time-consuming for producers. The costs associated with meeting these standards can prevent small companies from entering the market, thereby limiting the sector's overall growth.
- One of the major constraining factors for the macroalgae market is the environmental challenges related to cultivation and harvesting. Despite its potential benefits, the industry faces scrutiny over its ecological impacts. For instance, excessive harvesting of wild macroalgae can lead to biodiversity loss.
- According to the Food and Agriculture Organization, approximately 20% of global seaweed production comes from wild harvest, increasing concerns related to sustainability and ecosystem health. Unsustainable practices can disrupt marine habitats and affect local fisheries, undermining the long-term viability of the macroalgae sector.
- Another key constraint is competition from synthetic alternatives. As demand for bio-based products grows, many industries are also exploring synthetic substitutes for macroalgae. For example, in the food sector, some producers prefer lab-produced ingredients that can mimic the properties of natural seaweeds and do not carry sustainability-related concerns.

The analysis presented above indicates that Türkiye needs a strategic roadmap that will bring together its strengths and global opportunities. The sector can expand through sustainable methods such as IMTA by leveraging the existing aquaculture infrastructure, and it can overcome cost challenges by focusing on high-value products.

4.2. Contributions of Macroalgae Cultivation from a General Perspective

As the human population grows, achieving the UN Sustainable Development Goals (SDGs) on time and at scale—and delivering the required transformational change—requires new,

potentially disruptive strategies. In particular, there is a need to identify new biological resources that can be sustainably cultivated with minimal requirements for arable land, water, and energy; that support the net production of healthy food for humans and animals grown on land and at sea; that support sustainable and cost-effective energy; and that provide environmentally benign, sustainable materials while creating positive effects on biodiversity and the environment.

Seaweed farming is a viable and sustainable aquaculture method that can contribute significantly to the achievement of the SDGs. It has the potential to address SDGs related to poverty eradication, food security, climate action, and sustainable consumption and production. Seaweed farming generates numerous ecosystem services that provide direct benefits for advancing a range of SDGs. Investing in environmentally friendly seaweed farming can enable access to productive resources for poor and vulnerable people, women's participation in food production and consumption, free entrepreneurship in creating decent jobs for men and women, local economic growth, and the empowerment of poor and vulnerable coastal communities.

Currently, seaweed aquaculture is mainly concentrated in Asian countries, with minimal activity elsewhere (Araújo et al., 2019; Araújo et al., 2021; Buschmann et al., 2017; Hughes et al., 2012). Cultivating seaweed in EU waters could help the EU reach its ambitious environmental targets, as set out in comprehensive policy initiatives such as the European Green Deal (COM(2019) 640 final), Carbon Neutrality (EC, 2019), Farm to Fork (COM(2020) 381 final), and the upcoming Nature Restoration Law (COM(2022) 304 final). At present, 99% of seaweed production in the EU relies on wild harvesting, whereas globally there is the opposite trend, with 99% of production coming from aquaculture (Vazquez-Calderon et al., 2022).

In view of these considerations, the European Commission (EC) is promoting seaweed cultivation in marine regions (COM(2021) 236 final). However, fundamental knowledge about the potential of this activity in European waters is still lacking. In November 2022, the EC highlighted several challenges and proposed actions to encourage the algae industry to become a resilient, sustainable, and regenerative sector capable of meeting growing EU demand (EU Algae Initiative COM(2022) 592 final). Among the key issues identified are high production costs and low production scale, hampered by a lack of scientific understanding of growth potential across EU marine regions (Araújo et al., 2019; COM(2021) final; van den Burg et al., 2016).

Seaweed cultivation capacity depends on environmental factors that regulate the growth rates of different species. To assess aquaculture potential, the environmental characteristics of EU marine regions need to be examined in detail. To date, studies on seaweed cultivation potential in EU waters are limited. An assessment of seaweed aquaculture potential was conducted along a 150 km stretch of coastline in Skagerrak on Sweden's west coast (Thomas et al., 2019).

A series of studies on the seaweed cultivation potential in the Baltic Sea was carried out using modelled environmental data to calculate potential growth rates and nutrient removal capacities (Kotta et al., 2022). A similar model-based approach was previously used to identify the potential environmental impacts of existing seaweed facilities in Dutch and UK waters (TÜDAV, 2020).

Nevertheless, comprehensive EU-wide assessments of seaweed cultivation potential are still lacking. The EU has invested heavily in monitoring and research to improve understanding of environmental conditions in marine regions and their variability. However, existing data are still insufficient to provide a comprehensive picture of marine environmental variables (including spatial and temporal variability). In addition to these monitoring efforts, the EU has made progress in developing numerical models that can provide a broad characterization of environmental variables in EU waters.

4.3. Barriers to the Procedure for Producing Fuel from Algae

Algal crude oil has been produced in various pilot-scale facilities, but whether algal fuels can be produced in sufficient quantities to meaningfully displace petroleum fuels has largely been overlooked. The constraints hindering the commercialization of algal fuels need to be understood and addressed for future commercialization.

Fuels derived from algae are expensive compared to fuels derived from petroleum, but this may change. Unfortunately, improved production economics alone is not sufficient for environmentally sustainable production or large-scale feasibility. In addition to other key resources, algal fuel production requires a low-cost source of concentrated carbon dioxide. The shortage of concentrated carbon dioxide is the greatest barrier to producing algal fuels at significant scale. Production sustainability requires developing the ability to nearly completely recycle the phosphorus and nitrogen nutrients required for algal cultivation. Developing a nitrogen biofixation capability to support algal fuel production should be an important long-term goal. At sufficiently large scale, limited freshwater availability will pose a major constraint on production, even if marine algae are used.

To achieve a net positive energy balance in algal fuel, processes are required to recover energy from the algal biomass remaining after oil extraction. The near-term outlook for widespread use of algal fuels is not encouraging, but fuels for niche applications such as aviation may be possible in the medium term. Genetic and metabolic engineering of microalgae to increase fuel yield and facilitate recovery is necessary for the commercialization of algal fuels. In the long term, algae will need to be genetically modified for improved photosynthetic efficiency.

Algae are more efficient than terrestrial plants at converting sunlight into biochemical energy (Stephenson et al., 2011). Green microalgae share the same basic photosynthetic mechanism as C3 terrestrial plants. The maximum photosynthetic efficiency of C3 plants grown under normal atmosphere is estimated to be 4.6% (Zhu et al., 2008), meaning that 4.6% of the total solar energy received can be converted into biomass energy. In practice, the annual average

efficiency typically does not exceed 2.4% (Zhu et al., 2008). By contrast, for algae growing in an outdoor, CO₂-supplemented culture, annual average photosynthetic efficiency has been observed to be >5%, and the possible maximum for wild-type species has been estimated at 8.3% (Chisti, 2012).

Potentially, algae can provide fuel in several different forms (Kröger & Müller-Langer, 2012): algal biomass for combustion—either for direct combustion or to produce algal crude oil for use in producing other transportation fuels such as diesel, gasoline, and jet fuel (kerosene) (Lestari et al., 2009); biogas via anaerobic digestion of biomass (Zamalloa et al., 2011; Markou et al., 2013); biohydrogen; bioethanol via fermentation of carbohydrates derived from algae (Matsumoto et al., 2003; Ho et al., 2013); and bioethanol produced directly via algal photosynthesis (Williams, 2009; Lü et al., 2011).

Among the different fuel forms algae can provide, algal oil for making liquid transportation fuels has been the main focus of interest, including commercialization efforts by many companies. Of the several companies attempting to commercialize liquid fuels from algae, most have focused on oils produced through photosynthesis. Others are attempting to convert carbon dioxide and water photosynthetically directly into usable fuels. For example, Algenol Biofuels is developing direct bioethanol production from carbon dioxide in genetically modified algae, and Joule Unlimited, Inc. (www.jouleunlimited.com) is pursuing a similar approach to produce other fuels. In contrast to the photosynthetic route, Solazyme, Inc. uses plant-derived sugars to grow oil-rich algae.

Many algae accumulate oil (Banerjee et al., 2002; Chisti, 2007; Griffiths & Harrison, 2009; Griffiths et al., 2012). The oil content of algal biomass usually increases substantially if a nutrient-deficient cultivation stage, or another stress-inducing stage, follows a nutrient-sufficient growth stage (Illman et al., 2000; Rodolfi et al., 2009; Mazzuca Sobczuk & Chisti, 2010; Griffiths et al., 2012; Dillschneider et al., 2013). At least in some cases, oil also accumulates in a nitrogen-sufficient environment if excess carbon is supplied (Fan et al., 2012).

Algal oil contains various components: in addition to triglycerides, it may contain terpenoid hydrocarbons (Banerjee et al., 2002), polar lipids, oxygen-containing non-triglyceride carotenoid oils, and chlorophylls. All of these compounds are rich in energy and carbon. Algal crude oil has an energy content of about 35,800 kJ·kg⁻¹, or about 80% of the average energy contained in petroleum (Chisti, 2012). Algal crude oil is a potential substitute for petroleum to produce various transportation fuels (Journal of Biotechnology, 2013).

Crude algal oil tends to be rich in long-chain polyunsaturated fatty acids (Belarbi et al., 2000; Ward & Singh, 2005; Guschina & Harwood, 2006; Harwood & Guschina, 2009; Nichols et al., 2010) and therefore may not be as suitable as some other vegetable oils for biodiesel production (Knothe, 2011; Stansell et al., 2012). Nevertheless, algal oil has been successfully converted into gasoline, diesel, and kerosene fuels that are indistinguishable from their petroleum-derived equivalents (Chisti, 2012). Liquid fuels derived from algae have shown superior performance in tests (Johnson & Wen, 2009; Haik et al., 2010; Babich et al., 2011;

Haik et al., 2011; Chen et al., 2012; Khan et al., 2012); therefore, although algal transportation fuels are not currently affordable, they are a proven technology.

In the rush to commercialize, the serious barriers to large-scale production of algal fuels have been overlooked. The obstacles to producing fuel from algae at a commercial scale are mainly due to high operational energy inputs (harvesting and drying), high capital costs (photobioreactors (PBRs) and processing facilities), and the inability to sustainably achieve low-cost biomass yields. The future of this technology depends on a biodiesel biorefinery model that subsidizes fuel costs through the sale of high-value algal co-products, and on the development—via genetic engineering—of algal strains that produce oil efficiently. However, unless these challenges are resolved, algal biofuels will not be able to compete with petroleum in the global energy market.

The initial capital investment required to establish algal farms—especially closed PBR systems—is very high compared to conventional agriculture or fossil-fuel facilities. PBRs require complex piping, pumps, sensors, and temperature/pH control units. Algal growth also depends on large inputs of nitrogen (N) and phosphorus (P), making nutrient supply a major operating cost; while wastewater nutrient recovery could help, it requires additional investment. Moreover, continuous monitoring, harvesting, extraction, and processing demand qualified personnel and high maintenance.

Complex and costly methods are used to extract oil from algal cells: Cell Disruption (Lysis)—mechanical (bead mills, sonication) or chemical (solvents) breaking of robust cell walls—followed by Transesterification, where crude algal oil is converted into engine-usable biodiesel using methanol and catalysts. The efficiency and cost of these steps directly determine the final fuel price, and using algal biomass only as fuel undermines the overall cost–benefit balance.

To offset costs, the “Biorefinery Concept” should be adopted: separating and marketing high-value compounds remaining after oil extraction (proteins, carbohydrates, pigments) for dietary supplements, cosmetics, and animal feed. This added revenue can bring biofuel costs closer to petroleum, although additional processing increases complexity and upfront investment.

PART V

Macroalgae Investment & Financial Outlook

Investments in the macroalgae sector are increasingly growing globally under the main headings of the “blue economy” and “biotechnology.” Although a dedicated investment ecosystem for this field has not yet been formed in Türkiye, the focus areas of existing funds provide potential opportunities for macroalgae projects.

5.1. Global Investment Trends

Over the past five years, venture capital investments in the macroalgae sector have maintained a stable level between USD 112–118 million during 2022–2024. These investments indicate a shift from early stage innovation toward the commercialization and scaling of market ready solutions. The geographical distribution of investments is still concentrated in North America and Europe; however, the rise in Asia is noteworthy.

5.2. Profiles of Major International Investors

Hatch Blue & Blue Revolution Fund: This Ireland-based fund is a global firm focused on areas such as sustainable aquaculture, regenerative farming, and “blue carbon” solutions. The Blue Revolution Fund’s investment strategy explicitly includes investing in projects such as “regenerative seaweed and shellfish farming.” Together with partners such as the European Investment Fund (EIF) and The Nature Conservancy, it adopts an investment approach that combines financial returns with environmental impact.

Other International Companies: Although they are not direct investors in the sector, large companies that use macroalgae-based products stand out as potential business partners. **Corbion** produces AlgaPrime™ DHA, a sustainable omega-3 source for animal feed. **BASF**, in partnership with Acadian Plant Health™, has added biostimulants derived from seaweed extracts to its agricultural products portfolio. **DSM-Firmenich** uses macroalgae derivatives such as carrageenan in food and nutraceutical products.

5.3. Potential Turkish Investors

There is no venture capital fund in Türkiye that is specifically focused on the macroalgae sector. This situation requires local ventures to align their business models with broader investment themes in order to attract investors. Below is a list of potential domestic investors that could invest in macroalgae projects.

- **Venture Capital Funds:**
 - **Boğaziçi Ventures:** As a fund focused on “deep tech” and “sustainable innovation,” it may be interested in macroalgae projects in biotechnology and agri-tech.
 - **Revo Capital:** This fund invests in technology-focused B2B and B2C ventures and may evaluate innovative macroalgae applications, particularly in aquaculture and food technologies.

- **Diffusion Capital Partners (DCP):** With a mission to invest only in deep tech and ventures that “solve complex problems,” it is a suitable candidate for macroalgae biotechnology and biorefinery projects (BaseTemplates, 2025).
- **Corporate Funds and Holding Companies:**
 - **TEB Portfolio Health and Biotechnology Variable Fund (TBE):** The fund’s strategy of investing in domestic and foreign companies in health and biotechnology suggests it could be a financing source for ventures focusing on pharmaceutical and nutraceutical applications of macroalgae (TEB Portföy, 2025).
- **Other Investors:** Funds mentioned in a KPMG report that invest in areas such as fintech and food technology (Kings Research, 2025), as well as the venture capital arms of holding companies such as Alarko Ventures (BaseTemplates, 2025), may show interest in innovative business models in the macroalgae sector.
- **Public and Development Finance:**
 - **İstanbul Venture Capital Initiative (İVCI):** Established with EIF support, this fund has contributed to the development of the venture capital ecosystem in Türkiye. Such internationally supported funds could be future financing channels for projects in the “blue economy” domain.

If an investor is considering investing in the algae/macroalgae field in Türkiye, focusing on the areas below will accelerate this process:

Table 6: Areas for Investors to Focus On

Area	Why the Potential is High / Required Elements
Cultivation / Farm Infrastructure (marine / controlled systems)	To ensure a supply of high-quality raw material; costs of controlled cultivation can be reduced; species selection; seasonality issues must be managed.
Extraction / Processing Technologies	Isolation of active compounds (polysaccharides, polyphenols, etc.), removal of contaminants, conversion into a stable product form. This stage requires investment-intensive technological expertise and facilities.
Product-to-market (go-to-market) Strategies	First products could be cosmetic ingredients, agricultural biostimulants, and food additives. Areas such as packaging/biomaterials involve high technical barriers and require consumer acceptance.
Supporting Corporate + Public Collaborations	R&D grants, university–industry collaborations, contributions from marine research institutions; regulatory support; coastal permits; infrastructure such as environmental impact permits.
Sustainability & Certification	Environmental impact, carbon footprint, impacts on biodiversity, product safety/cleanliness—these factors influence investment decisions.
Market Awareness & Familiarity	Local consumers and industry must become more familiar with sustainable algae products and biomaterial alternatives branding, education, and communication are important.

Tablo 7: Selected Blue Economy Investors (International & Turkish)

Investor	Country	Focus Area	Relevant Sectors	Description
Hatch Blue	Ireland	Sustainable Aquaculture	Regenerative aquaculture, aquaculture technologies, “blue carbon,” alternative seafood.	One of the most active firms globally in the “blue economy” domain. It explicitly supports macroalgae projects.
Blue Revolution Fund	Ireland	Early-Stage Aquaculture	Aquaculture, “blue carbon,” seaweed and shellfish farms.	A fund managed by Hatch Blue; it invests with environmental and social impact objectives.
Boğaziçi Ventures	Türkiye	Innovative Ventures	Deep tech, AI, financial technologies, agricultural technologies.	Focuses on deep tech ventures in Türkiye; it may be interested in aquaculture or biotechnology projects.
Revo Capital	Türkiye	Technology Ventures	B2B cloud, AI, cybersecurity, financial technologies.	Invests in technology-based ventures in Türkiye, Eastern Europe, and the Baltics.
Diffusion Capital Partners	Türkiye	Deep Tech	Life sciences, agricultural technologies, energy and environment.	Invests in technology-intensive startups that solve complex problems. It is a suitable profile for macroalgae biotechnology projects.
TEB Portfolio	Türkiye	Biotechnology Funds	Health and biotechnology industry.	Could be a potential financing source for projects focusing on pharmaceutical and nutraceutical applications of macroalgae.

PART VI

Opinions on the Potential Application Areas of Macroalgae-Based Products

Macroalgae, also referred to as seaweeds, are multicellular, aquatic, photosynthetic organisms. They are abundant in oceans, particularly in coastal regions, where they may attach to rocks and other hard substrates or exist as free-living forms. As one of the major photosynthetic organism groups in marine environments, macroalgae are widely used in various fields, especially in food and pharmaceutical production. Given their broad distribution, easy accessibility, and high efficiency in fixing carbon dioxide through a carbon-concentrating mechanism, they can produce substantial amounts of nutrients or metabolites.

Macroalgae can also accumulate high levels of bioactive compounds by assimilating nitrogen- and phosphorus-based substances during wastewater treatment. This review mainly addresses the distribution characteristics of macroalgae and their unique bioactive applications in food, pharmaceuticals, and environmental remediation. Their functional components and bioactive substances are useful in food production and/or drug development. Integrating macroalgae into wastewater and waste-gas treatment alongside resource recovery would provide a sustainable pathway for producing bioactive compounds.

In this context, we consulted **Dr. Merve Kaya, a Lecturer at the Technical University of Munich** who conducts R&D projects on valorizing macroalgae as a raw material for biostimulant production. She emphasized that, in Europe, algae are incorporated—directly or indirectly—into many products, especially in areas such as fish feed and fertilizers, and that extraction is one of the most critical factors for algae intended to be used in such mixtures. Dr. Kaya noted that products of this type have already been commercially launched in various countries, particularly Canada, China, Japan, and Thailand, and that when sector-appropriate extraction can be achieved during commercialization, customer potential in these sectors is high. When the Turkish market is considered, although the macroalgae sector in Türkiye is still at an early stage, interest is increasing rapidly. Awareness is growing thanks to university research efforts and small-scale ventures. It can be argued that the underlying drivers of this shift in awareness include sustainability and carbon-footprint reduction, rising interest in health and functional foods, and—linked to these—the upward trend toward circular economy practices and bioplastics.

Dr. Merve Kaya, noting that Türkiye's macroalgae sector is still at an early stage but clearly on an upward trajectory, states that interest in algae has been increasing rapidly and that awareness has been rising thanks to university research and small-scale initiatives. She adds that the key global megatrends triggering developments in this field include sustainability and the reduction of carbon footprint, the shift toward the circular economy and bioplastics, as well as growing interest in health and functional foods. According to Dr. Kaya, Türkiye's strengths in this sector lie in its rich coastal ecosystems, active research groups at universities, and a young entrepreneurship ecosystem. Emphasizing that a lack of regulatory clarity (for example, algae-based biostimulants are not yet clearly defined in the organic

fertilizer regulation) and limited investor interest constitute major weaknesses of the sector, Dr. Kaya also notes that in her current work they are focusing particularly on polysaccharide extraction from brown algae (*Laminaria*, *Sargassum*).

Dr. Merve Kaya emphasizes that alginates derived from brown algae—given their increasing use in the seed-coating industry—have relatively higher commercial potential. Regarding algae-related work in Türkiye, she underlines that the country has a solid academic knowledge base and that research projects are being conducted particularly along the Aegean and Black Sea coasts; however, the number of products commercialized at an international scale remains low. Dr. Kaya notes that although Türkiye is strong in both the quality and quantity of publications, it has not yet reached an adequate level in terms of converting this output into patents and startups. She lists key steps that could unlock progress in this field—across regulation, investment, entrepreneurship, and public policy—as providing R&D incentives for entrepreneurs, public support for pilot production facilities, and strengthening university–industry collaboration.

Dr. Merve Kaya notes that younger researchers are more open to the idea of entrepreneurship and are showing interest in algae-based biomaterials and functional food startups. She assesses that next-generation biotechnology ventures emerging from Türkiye have the potential to expand into the European market and, if the necessary enabling conditions are provided, can achieve high value-added successes. Emphasizing that macroalgae-based products in Türkiye are likely to move beyond a niche research area and evolve into a broader commercial ecosystem, Dr. Kaya states that rapid growth could be seen particularly in sustainable packaging, animal feed, and functional food products, and that public policies will also support this transformation.

According to **Gülay Karagülle**, a lecturer in the Department of Biology at Bolu Abant İzzet Baysal University, the development of the algae sector at both micro and macro scales has accelerated over the past five years in proportion to the value added it creates. She states that a concrete proof of this momentum is the fact that both TÜBİTAK and the Ministry have been providing support in this area. Karagülle notes that although the climate crisis affects the sector negatively, Türkiye’s suitable climate for production is a significant advantage. However, she adds that certain disadvantages—such as the limited number of academics working in this field and the need to import many items from abroad, including various by-products and machines used in production (e.g., reactors)—slow down the pace of sectoral development. Karagülle emphasizes that species such as *Gracilaria dura* and *Sargassum acinarium* are particularly valuable for functional foods, and she believes the sector will grow in this direction. She also notes that, through the company she established within a technopark, she is engaged in production; yet she observes that outputs remain relatively weak compared to international examples due to the small number of academics in the field and the lack of multidisciplinary work. Karagülle predicts that product diversity will increase especially in the cosmetics domain and that algae will be used extensively in dietary supplements. She also foresees growth—particularly on the microalgae side—in wastewater treatment applications. Finally, stating that the biggest problem in the domains of

entrepreneurship and public policy is not legislation but investment, she believes that support mechanisms should be strengthened as a priority.

Prof. Dr. Recep Kotan, a faculty member at Atatürk University, Faculty of Agriculture, Department of Plant Protection, whose expertise includes bacteriology, insect control, and plant disease management and who therefore works primarily on microbial fertilizers and biopesticide production, states that a significant amount of seaweed enters Türkiye from abroad, and that this seaweed is used by being blended into other fertilizers applied in agriculture. According to Kotan, it is important to keep in mind that in this sector—driven by factors such as sustainability and the climate crisis—there is no large-scale overharvesting, and that cultivation remains very limited, largely restricted to the Aegean Region. He also notes that the China case should be considered an important example: in China, 261.000 tons are harvested from the wild, whereas cultivation-based production reaches nearly 14 million tons of algae capacity. Kotan adds that in their own studies they generally use *Clodielle* and *Spirulina*, and that these species are typically used to produce microbial fertilizers and biopesticides. Comparing scientific output and projects in Türkiye with the international level, Kotan argues that Türkiye has no major shortcomings in scientific research, but lags far behind in areas such as developing marketable products, obtaining patents, and integrating into industry. He further notes that, especially for pesticides, the regulatory framework can be challenging at the stage of obtaining product licenses/registrations. Prof. Dr. Recep Kotan emphasizes that the macroalgae sector is likely to develop over the next 5–10 years, as sustainability and the climate crisis remain frequently on the agenda and organic agriculture expands, and he underlines that this growth will be driven through microbial fertilizers and biopesticides.

Dr. Nevzat Ömer Saatçioğlu, a faculty member in the Department of Architecture at Istanbul Gelişim University who has carried out academic studies on both microalgae and macroalgae across a wide range of projects, notes that algae—primarily used for treatment/bioremediation in their earliest applications—have begun to be used increasingly by metropolitan municipalities for purification purposes. However, he states that the same level of development has not yet been observed in sectors such as food, construction, materials, compost, and energy production, and that the transition from ideas to implementation is delayed particularly due to the cumbersome and conservative nature of the construction sector. Regarding the global megatrends driving developments in algae-related applications, Dr. Saatçioğlu emphasizes that city-scale implementations can be highly valuable and promising in terms of water treatment, air purification, and energy generation; yet, at the building/architecture scale, implementation becomes more difficult due to criteria such as efficiency and upfront capital cost. According to Saatçioğlu, in practice, a top-down transformation of an entire city's infrastructure should be carried out step by step, enabling multi-dimensional gains to be realized locally. He argues that, as a result of such efforts, it would be possible to prevent the seas—such as the Sea of Marmara—from being used as places where sewage waste is discharged and accumulates. Stating that comprehensive planning should be translated in phases into city- and region-specific approaches, Saatçioğlu

adds that the return on such investment would be more than worthwhile. Evaluating Türkiye's strengths and weaknesses in this sector, Dr. Saatçiođlu notes that factors such as the lack of holistic, higher-level planning, the general lack of awareness of algae's potential, and an insufficient number of qualified technical personnel create disadvantages. He also states that increasing use and scaled applications abroad have attracted the interest of municipalities in Türkiye, leading to the creation of local, small-scale experimental– observational– implementation pools; and that with the right guidance, algae could have high commercial value particularly in pharmaceuticals and cosmetics. At the city scale, he adds that despite the likelihood of high initial investment and operating costs, treatment and energy production could still be economically advantageous.

Saatçiođlu states that scientific output and projects in Türkiye remain limited and largely small-scale, and that there is a need for large-scale, multidisciplinary research projects. He emphasizes that, within the scope of such work, a significant portion of the infrastructure and investment required for large treatment systems could be financed through European Union R&D and implementation funds. However, he adds that this would require plans, projects, and research activities to be designed through public-sector, university, and municipal collaborations.

According to Saatçiođlu, establishing algae production facilities—particularly in composting, energy generation, and wastewater treatment—would make it possible to produce differentiated “raw materials” tailored to different functions and use cases across multiple sectors. He argues that algae-based treatment technologies represent a high-potential solution that combines wastewater treatment, air quality improvement, and bioenergy production within the same ecosystem. This approach reduces the carbon footprint, lowers the wastewater load on seas, rivers, and groundwater resources, and enables the reuse of treated water. The algal biomass generated in this process can be converted into compost and utilized for energy production by being transformed into biogas/biofuels. Considering the social and environmental returns, he concludes that these systems should be implemented widely by municipalities and made mandatory within the relevant legislation.

Assoc. Prof. Dr. Murat Telli, a faculty member in the Department of Biology at Bolu Abant İzzet Baysal University who conducts research for the food sector and works on producing functional foods using both microalgae and macroalgae, states that the number of companies working with algae has increased significantly over the last five years. However, he notes that the majority of these companies are small businesses or startups, and argues that large companies operating in this field need to establish flexible, multidisciplinary teams—because small firms do not have the capital required to carry out such work. For this reason, he emphasizes that cooperation between startups and large firms must be established. Regarding the global megatrends driving developments in this area, he says that interest in algae increased after carbon-emission–related developments, noting that 1 gram of algae (dry weight) can capture roughly 5 grams of CO₂, and therefore algae rank first as a solution. Telli also states that newly introduced incentives implemented in Türkiye have had a positive impact on the sector. He underlines that Türkiye's climatic structure is particularly

suitable for cultivating diverse strains/species, and identifies one of the sector's key weaknesses as the low number of people working in the field. According to Assoc. Prof. Dr. Murat Telli, many by-products and machines to be used—such as reactors—are imported from abroad. While this is perceived negatively in terms of costs, he argues it should also be considered an advantage in terms of low competition. Another weakness of the sector, he adds, is that investors are not familiar with the concept of R&D-based investment. In his view, *Spirulina* and *Chlorella* stand out in the sector particularly in the food, medical, and cosmetics domains.

Comparing Türkiye's scientific output and projects with the international level, Telli notes that there are not many academics working in the field, and stresses that because studies are not conducted in a multidisciplinary manner, they remain weaker than international examples. He believes that the macroalgae sector will see greater demand over the next 5–10 years, stating that products are recognized by end consumers and that, as demand likely increases, the investment ecosystem will also develop. He further notes that carbon emission taxes will support the development of this field.

Prof. Dr. Levent Bat, who serves at the Faculty of Fisheries at Sinop University, conducts studies on the identification and ecological stoichiometry of macroalgae species distributed along the Sinop coasts, and has worked on determining heavy metal levels in dominant macroalgae found on the Sinop coastline as well as investigating the usability of these species as biomonitors. He focuses in particular on *Cystoseira* among brown algae and *Ulva* (sea lettuce) among green algae. These studies include: comparing heavy metal concentrations accumulated in algal tissues with metal concentrations in the surrounding water and sediments; assessing their suitability for use as biomonitors; and conducting fertilizer and bioplastic trials. According to Bat, carrying out projects and academic studies is important for the valorization of the macroalgae present in Türkiye. In this context, the MACRO CLEAN Project is also highly significant, because it targets different application areas of macroalgae (fertilizer and bioplastics) and will contribute to sectoral development. He notes that Türkiye is a country with strong potential, and that cooperation between the private sector and public institutions is essential to increase this existing potential. He also states that there is a societal prejudice specifically regarding edible algae: due to factors such as appearance, smell, and religious beliefs, people do not strongly prefer to consume them. Although there are ongoing efforts in this area, this prejudice constitutes a barrier to the marketing and wider adoption of edible macroalgae. Macroalgae are major carbon sinks, capturing large amounts of carbon dioxide through photosynthesis. They offer a natural solution in the fight against climate change and, in this way, play a role globally in reducing carbon emissions. Macroalgae are fast-growing and rapidly developing organisms; as a result of their rapid growth, they can contribute to eutrophication problems. Converting harvested macroalgae into products such as bioplastics, fertilizers, and biofuels is one of the innovative approaches that has recently come to the forefront. Algae are also considered natural, healthy, functional, and innovative foods. Thanks to their high vitamin, mineral, and protein content,

they are among the valuable raw materials preferred especially in the food and cosmetics sectors.

According to Prof. Dr. Levent Bat, there is currently a shift toward environmentally friendly products. With the growth of the world's population, fossil resources are being depleted rapidly. The relatively low cost of macroalgae is a key reason they are preferred as an ideal raw material for sustainable production. Türkiye being surrounded by seas on three sides enables the presence of different macroalgae species along its coastal regions. Thanks to developing technology and the increasing orientation toward eco-friendly products, private and public institutions have intensified their efforts on the potential application areas of macroalgae. Academic research, on the other hand, is largely focused on species identification, ecological characteristics, and biotechnological applications. Carbon-sink capacity, potential as an alternative food source, and usability in environmentally friendly products are among Türkiye's strengths in this sector.

The conversion of macroalgae into end products has remained at the level of academic research; it is not yet at commercial scale. For wider adoption, strong industrial investment and advanced technology are required. However, Türkiye currently lacks the necessary investments and technologies. There are no established regulatory practices. Legislation and public information/awareness efforts are among Türkiye's weaknesses in this sector, yet these can be improved through appropriate regulations and raising public awareness.

Regarding products with higher commercial potential in biotechnology, environmental applications, or the pharmaceutical and cosmetics sectors, academic studies indicate that red algae species are the primary source for agar and carrageenan production and are therefore preferred particularly as gelling agents. Brown algae are mostly used in bioplastics, biofuels, and fertilizer production, while green algae—thanks to their high protein, vitamin, and mineral content—can be considered as functional foods and as feed additives. Although scientific output and projects in the macroalgae field in Türkiye are increasing, they primarily concentrate on topics such as ecological monitoring and taxonomy. In France, New Zealand, and Asian countries, certain regulations related to macroalgae exist. In Türkiye, however, there is no defined standardization regarding macroalgae-based ingredients.

Prof. Dr. Levent Bat states that, in Türkiye, seaweed cultivation is not a statistically established sub-sector; that nearly all macroalgae production is carried out by Asian countries; and that, in terms of commercialization, Türkiye lags significantly behind countries such as Norway, France, and Spain. In order to pave the way for this field in terms of legislation, investment, entrepreneurship, and public policy, the following actions could be considered:

- A list of macroalgae species that can be utilized may be compiled (for example, the Centre d'Étude et de Valorisation des Algues (CEVA) has regulatory coverage for 25 macroalgae species).
- Seaweed cultivation zones may be designated in coastal areas.
- National funding and incentive programs (e.g., TÜBİTAK, KOSGEB) may be launched.

- Participation in EU funds may be supported.
- Credit/loan support mechanisms may be provided.
- Public–private partnership projects may be encouraged.
- Education and research capacity at universities may be strengthened.
- Consumer awareness and dissemination/outreach activities may be implemented.

Levent Bat states that his team is conducting pilot studies, and that fertilizer trials (in solid, liquid, and compost forms) will be applied to strawberry and lettuce plants grown in the greenhouse on the university campus. He notes that strawberry and lettuce were selected because they are easy to cultivate and can yield results in a short time, and he adds that preliminary bioplastic studies are also ongoing.

In his future projections, he emphasizes that the next 5–10 years will stand out in terms of pilot implementations. According to Bat, Sinop could be considered a regional production hub within the scope of the blue economy and blue growth, and if regulatory frameworks and investment supports are provided, the sector could become a significant industry within ten years.

In conclusion, macroalgae are important for the blue economy. They have high health, ecological, and economic potential. In addition to being environmentally friendly products, macroalgae are also important in terms of carbon sequestration, improving water quality, and ecosystem services. Their areas of use are broad. Therefore, standardization should be developed as a priority. Macroalgae should be explicitly addressed within legislation. Entrepreneurship should be supported through funds and incentives. By increasing pilot studies, Türkiye should be positioned as a production location for regional development.

Emre Yakup Aysan, co-founder of PETIMORE, a firm that provides consultancy—particularly on the transition of algae-based scientific research into production for the feed industry—states that algae are used in fish feeds as color and flavor enhancers, and that there are now studies aimed at using them for their nutritional value as well. He notes that the most important driver behind advancing this line of work is the climate crisis. Aysan adds that because Türkiye industrialized relatively late, its soil and water structure is cleaner than that of many countries, meaning it has not yet lost many species, and that Türkiye’s climatic conditions are highly suitable for cultivating many species. Stating that PETIMORE primarily provides consultancy services and therefore does not face a supply-related problem, Aysan emphasizes that the biggest challenge for producers is logistics: products are sourced from the Far East or Canada, which results in both a larger carbon footprint and higher costs. He underlines that the sector has growth potential in both feed and human food markets, and notes that although there are not yet many production facilities operating on a truly large-scale industrial model, the number of facilities is expected to increase over the next five years, strengthening the sector’s potential in these areas.

According to Eylül Er, co-founder of PALGAE—a company that develops algae-based plastic raw materials using microalgae, produces bioplastic granules as its core output, sells its products in powder form, and also uses macroalgae as a compatibilizing agent in this

process—the market has recorded growth in recent years. The most important factor underlying this growth, she states, is the climate crisis. Noting that there is not enough algae available at the density required to supply industry, Er emphasizes that the need to initiate cultivation-based production remains pressing. In her view, Türkiye’s strongest advantage is, in fact, its climate, which is suitable for cultivating many species. Stating that the algae are sourced from Vietnam, Er adds that their biggest challenge is carbon emissions arising from logistics. She also notes that shipments in granule form can create certification issues. Looking ahead, Er identifies new areas where she sees growth potential for macroalgae-based products, including cosmetics, natural pigmentation applications, textile dyes, and food colorants. Er further states that in the course of their work they have collaborated with Marmara University, Istanbul University, Boğaziçi University, and the University of Porto, and adds that she expects macroalgae use to increase further over the next 5–10 years, alongside a rise in algae-based bioplastics.

Faruk Tamtürk, co-founder of Biorld Kimya, who works on algae-based food formulation applications, states that they have been working in this field since 2017 and that there has been a significant increase in startups over the last three years, with particularly major progress in omega-3 and protein. He notes that products derived from fish can carry a substantial heavy-metal load, whereas macroalgae represent an important source of omega-3. According to Tamtürk, among the global megatrends driving developments in this field, carbon capture and conversion capabilities rank among the top factors. He adds that Türkiye has very favorable climatic conditions for production and is strong in terms of human capital, and therefore has the potential to become a center of attraction in this area. However, he emphasizes that this potential will be realized not through harvesting algae, but through cultivation. Summarizing the main challenge they face in the supply chain as logistics, Tamtürk says that there is no problem regarding algae in legislation and legal regulations per se, but that there is no specific regulatory framework for producing food from algae within the food production process. He stresses that the product’s core characteristics cannot be stated, and that it is launched to the market like a standard food supplement. Tamtürk adds that he sees future growth potential for macroalgae-based products in the food sector, and believes that growth will also occur particularly in vegan foods. He further underlines that, in line with developments expected over the next 5–10 years, macroalgae will be used across many sectors—from medical applications to cosmetics and food—and that as work continues with new species and corresponding regulations are put in place (as in the East Asia and the EU), macroalgae will become much more present in everyday life.

Dr. Halim Aydın, co-founder of Ufuk Tarım—an agricultural company with a laboratory that conducts accredited fertilizer analyses and produces chemical fertilizers, organic fertilizers, organomineral fertilizers, plant growth regulators, and soil conditioners—states that there is no specific regulation in Türkiye regarding algae, and that this creates a registration problem. He notes that, when registered, the product is registered as an organic fertilizer. He emphasizes that such registration does not demonstrate the bioavailability of algae and therefore prevents the true value of algae-based products from being revealed. Aydın states

that positive developments have emerged in the sector due to factors such as the climate crisis and the rise of organic agriculture. He adds that the Ministry in Türkiye generally acts in line with market demands, and therefore does not proactively research, procure, or call for the production of products with high bioavailability—a role that is typically assumed by the private sector. Noting that certain adjustments are needed in legislation and legal regulations, Aydın argues that algae and algae-derived products should not be classified in the same category as organic fertilizers. He further states that algae will see substantial demand in Türkiye’s agricultural sector over the next 5–10 years because, despite increasing productivity in agriculture, there are quality problems in agricultural products. He stresses that the sector should turn toward organic sources that can deliver these quality attributes, and that since each macroalgae species provides different characteristics, these differing attributes should be researched, registered, and then introduced to the market.

Mehmet Can Sucu, the R&D lead at Kybele’s Garden—a company that combines various macro and microalgae and processes them through fermentation technology to develop high value-added raw materials and products for the food, agriculture, and cosmetics sectors—states that, in Türkiye, the fertilizer sector is the most widely accepted area for this field. He notes that almost every fertilizer company already has a product in this space, and that the leading global megatrends driving developments are the climate crisis and sustainability. According to Sucu, the fertilizer sector already has an established market; however, in the food domain, the sector’s structure appears quite weak, particularly due to cultural reasons. Interpreting the main supply-chain challenges as the absence of local suppliers, the high cost of importing raw materials, and the high carbon emissions involved in maintaining a sustainable process, Sucu adds that the issues encountered in legislation and legal regulations primarily emerge as regulatory challenges for final-product developers— especially on the food side. Listing agriculture, food, and cosmetics as the areas where he sees future growth potential for macroalgae-based products, Sucu states that he expects the market to develop over the next 10 years, that work with new species will begin, and that more widespread applications will emerge, particularly in biotechnology. He emphasizes that regulatory arrangements are needed for product development, and that when companies can work only with regulated products, developing new products becomes difficult. He adds that regulations must be in place to work with other species, and that approval processes taking 1,5–2 years delay commercialization of the product.

Selen Şenal, co-founder of Algbio—a company that cultivates algae by working with microalgae and uses species such as *Chlorella* and *Scenedesmus* first in wastewater treatment and then to produce materials such as biofuels and bioplastics, while also providing services in wastewater treatment, carbon capture, and related R&D—states that five years ago macroalgae-based products were considered only as binders in the food sector. She notes, however, that today, even as functional foods are discussed within the food industry, macroalgae use has begun in sectors such as cosmetics, water treatment, bioplastics, and fertilizers, and that companies have started to emerge in these areas. Emphasizing that the number of people working on algae in Türkiye is not as high as in

Europe, Şenal underlines that related activities are generally carried out by startups founded by academics. She adds that carbon capture, storage, and conversion have been expanding the algae market particularly in Europe, and stresses that this is fundamentally driven by sustainability and the climate crisis. Şenal states that algae production volume in Türkiye is almost negligible; that reactor manufacturing is also limited; that the number of suppliers is low; and that raw material supply is generally tied to universities, yet universities do not provide these products for commercial use. She notes that there is no regulatory barrier regarding algae itself, but that there are regulatory gaps concerning products derived from algae. She adds that while areas such as biofuels and bioplastics remain popular, the medical value of the product has only recently begun to be understood. According to Şenal, plant-based proteins and vegan foods will be actively relevant in the future. She concludes that, over the next 5–10 years, the macroalgae sector will shift particularly toward aviation fuels and vegan proteins, and that Carbon Border Adjustment Mechanism will further drive the development of the algae sector.

Prof. Dr. Oya Işık, a faculty member at Çukurova University, Faculty of Fisheries, Department of Marine Sciences, states that the focus of her work is algal oils and alg pigmentation. She notes that research on macroalgae is increasing day by day and that there are stock-culture requests coming from many sources. She particularly emphasizes that, despite a significant volume of academic work, large-scale production is almost non-existent, and that relying solely on wild harvesting makes commercial thinking difficult. According to Işık, sustainability is the leading global megatrend driving the algae sector; however, although Türkiye should be seeing substantial investments, the number of investors remains quite low. Despite the challenges in the investment environment, she adds that Türkiye’s climate being suitable for cultivating many algae species makes the domestic market an interesting one. Highlighting strong commercial potential in the food, fish feed, dietary supplement, and fertilizer sectors, Işık also states that Türkiye is strong in terms of scientific projects and that there are very high-quality studies in this direction. Prof. Dr. Oya Işık argues that the most important development needed to unlock this field—in terms of regulation, investment, entrepreneurship, or public policy—is to expand investment opportunities. She notes that until 20 years ago there was not even demand for algae, whereas today there is strong consumer demand, and therefore she expects demand to increase further in the future. She adds that, in the coming period, there will effectively be no alternative but to turn toward algae, particularly from the perspective of carbon sinks, and that support mechanisms should be increased in line with the sector’s expected developments.

According to Mustafa Şipka, General Manager of Fon Angels, a crowdinvesting platform operating in Türkiye, the niche nature of the algae sector keeps the number of players in the field limited. Şipka notes that sustainability and net-zero carbon are among the leading global megatrends driving developments in this area; however, he states that they have not received any startup applications related to the topic. He adds that, from a regulatory perspective, they can provide funding even at the idea stage. He emphasizes that such ventures typically involve very long R&D cycles, and therefore they should split the product

lifecycle into five phases and enter the market with intermediate products, rather than waiting for the final stage to be completed. Regarding the most critical characteristics of an investable startup in this field, he underlines that if the product is developed through a PoC conducted together with reputable institutions, it can at least give investors confidence; however, he also notes that investors in Türkiye do not tend to wait through long R&D processes. Finally, he stresses that, over the next five years, the investment potential of macroalgae-based ventures is likely to increase, as rising demand will improve their chances of attracting investment.

Mehmet Gençosmanoğulları, R&D Chief at İSTAÇ A.Ş. —a waste management company that carries out cleaning operations on both land and sea along a 500 km coastline— states that there are highly advanced R&D driven projects, but that large investments are required for the collection and separation of algae. In this context, he notes that İSTAÇ has been preparing R&D projects aimed at valorising the algae it collects. Pointing to climate change as the leading global megatrend driving developments in algae, Gençosmanoğulları emphasizes that conditions are deteriorating both in terms of carbon emissions and marine pollution. He adds that, alongside positive and strong aspects such as an increase in the number and quality of scientists working in Türkiye, rising awareness, and a growing number of incentives related to the topic, the sector also faces a weak picture because organising and collecting algae is costly and, due to these costs, large companies tend to avoid investing. Stressing that İSTAÇ operates not as a producer of macroalgae-based products but as an entity that collects macroalgae, Gençosmanoğulları argues that İSTAÇ has the potential to become a key supplier of raw material in this space. However, he notes that algae are collected as mixed species, and that separation is also very costly.

Gençosmanoğulları states that they periodically prepare R&D projects to convert the collected algae into products, and that the biggest challenge they face is the difficulty of collection and transportation due to the need to cover a long coastline and the prevalence of pollution. While there are views that the food and cosmetics sectors hold significant potential among promising future industries, he says they do not believe the algae they collect can be used in these areas because of marine pollution. He also notes that, together with Yıldız Technical University, studies have been carried out on converting macroalgae into biogas and on using macroalgae as fertilizer, and adds that they support many university projects by providing material. Summarising the likely developments in the macroalgae sector over the next 5–10 years, Gençosmanoğulları states: “The sector will certainly develop. Since we are in the waste sector, we do not really know the trajectory in other sectors, but from our perspective, due to marine pollution the volume of waste is increasing. Therefore, sooner or later we have to move toward establishing facilities that will valorise this material.” He summarises the needed actions as follows:

- Authorities should guide coastal provincial municipalities toward establishing relevant facilities.

- Since municipalities do not have sufficient facilities and know-how in this area, authorities should support the conversion of algae into products so that algae can be upcycled rather than disposed of.
- Cultivation farming areas should be established.

The number of investors investing in macroalgae, as a branch of the blue economy, is not high. In this context, the core mission of the Netherlands-based Rubio Impact Venture Fund is to partner with world-changing entrepreneurs in order to deliver scalable, systemic solutions to global challenges. **Edward van der Hout, one of Rubio’s partners**, has stated that Rubio invests in early-stage, mission-driven founders who develop scalable solutions at the intersection of environmental impact and commercial returns. Given that algae can contribute to sustainable food systems and to the production of low-carbon ingredients, he notes that Rubio has previously supported algae/macroalgae ventures—most notably Arborea, which develops low-CO₂ algae cultivation technology—and that the role they assume as an investor can be summarised as hands-on support across capital, governance, impact measurement, and commercial scaling. According to van der Hout, Türkiye has a long coastline, existing aquaculture know-how in certain regions, and growing academic interest; however, macroalgae commercial value chains are still nascent compared to Northwest Europe and Asia. While promising pilot projects and academic studies have created positive momentum in the sector, the number of vertically integrated, commercial-scale seaweed players remains limited. Active experimentation is expected in food ingredients, cosmetics, and environmental remediation, yet production scale and consistent supply continue to be the main bottlenecks. Key factors shaping the development of this field include sustainability and the circular bioeconomy (low land use, low freshwater needs), nature-based carbon removal and “blue carbon” narratives, rising demand for alternative proteins and sustainable ingredient sourcing, regulatory and corporate commitments to decarbonise supply chains, and growing interest in new biomaterials (bioplastics, textiles, feed additives).

Regarding investment experience in a macroalgae-based venture, van der Hout noted that Rubio has invested in algae-related technology (Arborea) and remains open to macroalgae investments where there is clear technological differentiation, defensible intellectual property or system design, strong founding teams, and measurable impact. He emphasized that they assess such opportunities on a case-by-case basis, with a focus on product–market fit and scalable impact. According to van der Hout, the key risks include:

- Reliably scaling biology and cultivation under variable marine conditions;
- Supply-chain and seasonal variability that affects unit economics;
- Regulatory and permitting delays for marine farms;
- Product–market risk (can the resulting product compete on price and quality?)
- Environmental risks that can drive yield volatility (disease, storms, eutrophication).

In response to the question “What are the critical success factors for investable ventures in this field?” van der Hout answered: “a robust and demonstrable cultivation technology or a unique intellectual property (IP) portfolio; early market validation with paying customers;

scalable and cost effective harvesting/processing; auditable, measurable environmental impact metrics; and a clear roadmap toward predictable, year-round supply.”

In his assessment, he added: “I’m optimistic but pragmatic. I expect a pilot wave and a few scalable commercial wins—especially in high-value segments (cosmetics, nutraceuticals, specialty ingredients) and, as processing and logistics improve, in B2B inputs (feed additives, biopolymers). However, I think it will be harder to scale commoditized, low-margin products profitably unless major cost reductions materialize.”

In this context, over the next 10 years the macroalgae sector is expected to move from many small pilot projects to fewer, but larger, commercial operations. Vertical integration is likely to become more common in order to capture value and reduce costs. Improved cultivation methods (species selection, controlled environments), advanced harvesting and processing technologies, automation, and progress in bioprocessing will enable more efficient extraction of high-value compounds. Beyond food and feed, growth is likely in nutraceuticals, cosmetics, bioplastics, biofertilizers, carbon credits/offsets, and potentially use as building materials. Sector-wide, more standardized regulation of macroalgae-based products (food/feed safety, sustainable farming practices) is expected; certification programs and traceability will become widespread and may even become mandatory. As cost curves improve, investor interest may increase; more blended finance, public–private partnerships, and potentially supportive policy incentives, with carbon finance providing a new revenue stream.

Policies expected to be implemented for macroalgae include: establishing clear, consistent, and streamlined permitting processes for macroalgae cultivation, processing, and product approvals; supporting scale-up from pilot to commercial through blended-finance instruments that reduce risk for joint and private investment in cultivation and processing facilities; financing R&D, university–industry collaboration, and applied demonstration projects to accelerate commercialization. In addition, developing national and international sustainability standards, traceability systems, and quality certifications to enable market access is also among the anticipated policies.

According to **Stephanie Rakels, Business Development Lead at Aqua-Spark**, Türkiye is an interesting country. It has strong fundamentals—coastal access, local culinary familiarity with seaweed, and active marine science communities—but compared with markets such as Norway, Japan, or Indonesia, the commercial seaweed sector is still largely unknown. There are promising pilot farms, research projects, and a few small processors; however, large-scale cultivation, vertical integration into higher-value product chains, and consistent industrial processing capacity remain limited. Market awareness and industrial demand are growing, but most developments are still at the pilot or early commercial stage. In this field, sustainability and the circular bioeconomy are creating demand for low-input biomass and nature-positive solutions. In addition, seaweed’s role in coastal resilience and its potential in carbon credits (even though measurement/verification is still evolving) can enable sector growth. The use of seaweed as a feed ingredient (or feed additive) to reduce methane in ruminants and to replace limited fishmeal in aquaculture is also among the drivers of

demand. Türkiye’s coastal diversity across the Aegean, Marmara, and Mediterranean seas, its established seafood industry, and the suitability of its logistics infrastructure are seen as key advantages. The major risks for macroalgae ventures include storms, pests, diseases, and seasonality that affect yields; inability to secure consistent, high-quality biomass supply or to process at scale; uncertain or weak demand for new product categories; and price volatility for raw biomass.

Critical success factors for investable ventures include having a strong team with capabilities in aquaculture operations, processing/engineering, regulatory affairs, and commercial execution; implementing repeatable and resilient cultivation protocols and propagation methods; and deploying supply-chain solutions for drying/processing and traceability. Over the next five years, it is reasonable to describe the investment potential of macroalgae ventures as high-potential but uneven. Investment will remain attractive for companies targeting specific product segments (industrial feed additives, certain nutraceutical extracts, and large-scale feed or biopolymer precursor supply), provided they can demonstrate reliable yields and sustained cost reductions. The winners will be those who control both farming and processing, or those who secure long-term partnerships with food and animal feed companies. Regulatory clarity and proven product efficacy (e.g., consistent methane reduction in livestock, measurable feed benefits) will accelerate investment. The sector will become investable at scale once it can demonstrate reliable supply, cost competitiveness, and proven end markets. Macroalgae are likely to become one of the pillars of the blue bioeconomy, but success will depend on building robust value chains—from hatcheries through processing—and on policymakers creating enabling frameworks for farm licensing and new product approvals. To strengthen the sector, policymakers should view macroalgae as a “triple-win” industry that supports climate action, sustainable food systems, and regional economic development; however, unlocking this potential will require upfront clarity, infrastructure, and investment.

According to **Nelson Vadassery at Sea6**, Türkiye has highly favorable conditions—including a long coastline on both the Mediterranean and the Black Sea—and growing academic interest. However, the sector is still largely nascent and remains more research-led than industrial. While there are promising pilots and niche commercial products, large-scale mechanized ocean farming, integrated processing, and mature value chains have not yet been widely established. Demand for the macroalgae sector is being accelerated by multiple mega trends: the global sustainability and climate agenda (including nature-based carbon solutions), the search for alternative proteins and sustainable food sources, the circular bioeconomy and the need for renewable chemicals/bioplastics, and regenerative agriculture (soil health products and biostimulants). Environmental, social, and governance (ESG) criteria and climate-finance flows are increasingly directing capital toward ocean-based solutions. Sea6’s primary strategy has been to build vertically integrated capabilities—from farming technology through product development—rather than acting mainly as an external investor. Nevertheless, provided the ecosystem is supportive, Sea6 remains open to strategic partnerships or joint ventures in markets (including Türkiye) where local partners and policy conditions can enable

sustainable scale. The key risks when investing in macroalgae can be summarized as: scale-up risk (translating pilot results into low-cost, high-volume production), supply-chain reliability (consistent biomass quality and volumes), regulatory uncertainty (permits for ocean farms and product standards), and market adoption (price competitiveness and customer acceptance versus existing alternatives). In assessing the next five years, it is reasonable to say that the investment outlook is attractive and accelerating, with growing investor interest expected in agricultural inputs (biostimulants), alternative food/feed ingredients, and biomaterials. Over the 5–10 year horizon, we can expect broader adoption of mechanized ocean farming; wider uptake of macroalgae-based biostimulants, feed ingredients, and alternative protein inputs; and the maturation of algae-derived biomaterials and bioplastics—alongside greater collaboration between specialized startups and vertically integrated players, and increasing capital flows where regulatory and market pathways are clear. To support sector development, policymakers should prioritize regulatory clarity (permits and product standards), targeted public financing and incentives to de-risk pilot-to-commercial scale-up, and programs that strengthen industry–academia–investor collaboration. With the right policy framework, Türkiye could rapidly become a regional leader in the Mediterranean macroalgae economy.

According to **Théophile AUGUSTIN, Investment Analyst at Mirova Energy Transition / Sustainable Ocean Fund**, seaweed is renewable, fast-growing, and can valorize disruptive blooms (e.g., *Sargassum*), while investors increasingly reward circularity and low-carbon inputs. Interest in blue carbon and nature-based sequestration is boosting demand, and seaweed is creating large addressable markets as a food ingredient, an aquaculture feed component, and a methane-reducing cattle feed additive. Mirova (through its Sustainable Ocean Fund) led an investment round in Carbonwave, a company that converts *Sargassum* species into biomaterials. When investing in macroalgae ventures, the most significant risks are scale-up and processing risk. It is also observed that macroalgae startups are moving from niche to mainstream in certain areas, including sustainable agriculture (biofertilizers, soil amendments), food and nutrition (functional ingredients), and cosmetics and pharmaceutical products (bioactives). The seaweed startup ecosystem is expected to grow particularly in regions with strong marine-science capabilities and supportive policy environments. Venture capital will follow this trend especially in applications such as:

- methane-reducing animal feed,
- biodegradable packaging,
- functional food ingredients.

To enable global progress in the sector, it is essential to foster academia–industry collaboration—in other words, to promote joint research, internships, and commercialization pathways—and to support education in marine biotechnology.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The macroalgae sector is a dynamic and promising field globally, combining environmental and economic benefits. Market data clearly indicate that the sector is expected to grow significantly over the next decade. This growth is driven not only by traditional food consumption, but also by innovative applications such as reducing methane emissions in livestock, environmental restoration, and high-value biotechnology products. This shift shows that macroalgae are evolving from a primary commodity into a versatile feedstock for integrated biorefinery approaches. Global leaders (China, Japan, Norway) are supporting this opportunity through targeted policies aligned with national priorities such as food security, environmental protection, and the sustainability of aquaculture. These countries have developed legal frameworks, R&D funding, and incentive mechanisms to accelerate macroalgae cultivation and commercialization. Despite Türkiye's and the Black Sea Basin's geographic advantages, existing aquaculture infrastructure, and growing academic interest, the macroalgae sector has not yet transitioned to large-scale commercial activity. Progress remains largely limited to small pilot projects and academic studies, indicating a persistent knowledge-to-action gap in converting scientific capacity into commercial production. To close this gap and unlock the sector's full potential, the following strategic steps are required:

Develop an Integrated Macroalgae Strategy: A clear roadmap should be defined—similar to China's "sea farming" approach or Norway's "low-trophic aquaculture" strategy—to support macroalgae cultivation. This strategy should simplify regulation, ensure environmental sustainability, and build investor confidence.

Focus on High Value-Added Products: Given high production costs, early-stage positioning should prioritize higher-margin products—alongside food applications—such as biostimulants, nutraceuticals, and cosmetic ingredients, which are critical for economic sustainability.

Strengthen Technology and Innovation: R&D on genetic improvement and cost-effective biorefinery processes should play a central role in increasing yields and profitability. Public-private partnerships, pilot facilities, and technology transfer programs can accelerate progress.

Attract Strategic Investors: Ventures should position themselves not only as "seaweed farms," but also as "deep-tech" or "blue biotechnology" companies. This framing can better align with the investment theses of local venture capital funds and improve access to financing. Partnerships with international funds such as Hatch Blue can provide both capital and access to global know-how.

In conclusion, the macroalgae sector represents not only an economic opportunity, but also a strategic domain that can contribute to food security, environmental protection, and climate action. Activating this potential will only be possible through a multi-stakeholder, well-defined, and forward-looking strategy.

REFERENCES

1. Aboal, J. R., Pacín, C., García-Seoane, R., Varela, Z., González, A. G., & Fernández, J. Á. (2022). Global decrease in heavy metal concentrations in brown algae in the last 90 years. *Journal of Hazardous Materials*, 445,130511. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130511>
2. Akkoyunlu, A. (2018). Land-based pollution on the Black Sea along the Turkish shoreline. *J. Mar. Sci. Res. Dev*, 8, 248. <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000248>
3. Bat, L., Gökkurt, O., Sezgin, M., Üstün, F., & Şahin, F. (2009). Evaluation of the Black Sea Land Based Sources of Pollution the Coastal Region of Turkey. *The Open Marine Biology Journal*, 3(1), 112. <https://doi.org/10.2174/1874450800903010112>
4. Bat L, Öztekin A, Şahin F, Arıcı E, Öz sandıkçı U. (2018). An overview of the Black Sea pollution in Turkey. *MedFAR.*, 1(2): 67-86.
5. Bat L, Arıcı E. (2018). Chapter 5. Heavy Metal Levels in Fish, Molluscs, and Crustacea From Turkish Seas and Potential Risk of Human Health. In: Holban AM, Grumezescu AM. (Eds.) *Handbook of Food Bioengineering, Volume 13, Food Quality: Balancing Health and Disease*. Elsevier, Academic Press, ISBN: 978-0-12-811442-1, pp. 159-196. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-811442-1.00005-5>
6. Bat L, Arıcı E, Öztekin A. (2021). Threats to Quality in the Coasts of the Black Sea: Heavy Metal Pollution of Seawater, Sediment, Macro-Algae and Seagrass. In: Shit P.K., Adhikary P.P., Sengupta D. (eds) *Spatial Modeling and Assessment of Environmental Contaminants. Environmental Challenges and Solutions*. Springer, Cham. pp. 289-325. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63422-3_18
7. Cadar, E., Negreanu-Pirjol, T., & Negreanu-Pirjol, B. S. (2022). Antioxidant and antibacterial potential of *Ulva lactuca* species from Romanian Black Sea Coast. *European Journal of Natural Sciences and Medicine*, 5(1), 27-39.
8. Chasani, A. R., Febrianti, M. W., & Rifqi, M. S. (2025). Phenetic Diversity and Relationships of Sea Lettuce (*Ulva* spp.) on the Southern Coast of Gunungkidul Yogyakarta Indonesia. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 10(1). <https://doi.org/10.12962/j25481479.v10i1.4746>
9. Hayati, R. & Rahly, F. (2024). Genetic diversity of *Ulva lactuca* from the intertidal zone in Ulee Lheue beach Aceh, Indonesia. *Jurnal Natural*. <https://doi.org/10.24815/jn.v24i1.33972>
10. Roşioru, D. (2024). Biochemical characterization and exploitation possibilities of *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze 1891 from the Black Sea coast. *Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Biological Sciences*, 13 (1), 41-52.
11. Sirbu, R., Negreanu-Pirjol, T., Mirea, M., & Negreanu-Pirjol, B. S. (2020). Bioactive compounds from three green algae species along Romanian Black Sea coast with therapeutically properties. *European Journal of Natural Sciences and Medicine*, 3(1), 87-106.
12. Filippini, M., Baldisserotto, A., Menotta, S., Fedrizzi, G., Rubini, S., Gigliotti, D., Valpiani, G., Buzzi, R., Manfredini, S., & Vertuani, S. (2020). Heavy metals and potential risks in edible seaweed on the market in Italy. *Chemosphere*, 263, 127983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127983>
13. Neshovska, H., Manev, I., & Kirov, V. (2021). Heavy metal levels in water, brown algae (*Cystoseira barbata*), and eelgrass (*Zostera marina*) from the Southern Black Sea coast of Bulgaria. *International Journal of Veterinary Sciences and Animal Husbandry*, 6(1), 15. <https://doi.org/10.22271/veterinary.2021.v6.i1a.317>
14. Nunes, N., Ferraz, S., Venuleo, M., Barros, A. I. R. N. A., & Carvalho, M. Â. A. P. de. (2023). From a heavy metal perspective, is macroalgal biomass from Madeira Archipelago and Gran Canaria Island of eastern Atlantic safe for the development of blue bioeconomy products? *Journal of Applied Phycology*, 36(2), 811. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03146-1>
15. Novac, V., Moraru, L., Gasparotti, C., & Rusu, E. (2020). Black sea marine litter pollution related to naval operations. In *E3S Web of Conferences*, 180, 04018. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018004018>

16. Peng, Z., Guo, Z., Wang, Z., Zhang, R., Wu, Q., Gao, H., Wang, Y., Shen, Z., Lek, S., & Xiao, J. (2022). Species-specific bioaccumulation and health risk assessment of heavy metal in seaweeds in tropic coasts of South China Sea. *The Science of The Total Environment*, 832, 155031. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155031>
17. Ratã, V. & Rusu, L. (2020). Ballast water pollution risk assessment in the Black Sea. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 10(4), 35-40. <https://doi.org/10.35219/MTD.2020.4.05>
18. Rakib, Md. R. J., Jolly, Y. N., Dioses-Salinas, D. C., Pizarro-Ortega, C. I., De-la-Torre, G. E., Khandaker, M. U., Alsubaie, A. S., Almalki, A. S. A., & Bradley, D. A. (2021). Macroalgae in biomonitoring of metal pollution in the Bay of Bengal coastal waters of Cox's Bazar and surrounding areas. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99750-7>
19. Shypotilova, O., Kozhanov, A., Lohinova, L., & Lohinov, O. (2021). The problem of the Black Sea pollution in Odessa region of Ukraine. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 915 (1), <https://doi.org/10.1088/1755-1315/915/1/012008>
20. Signa, G., Andolina, C., Tomasello, A., Mazzola, A., & Vizzini, S. (2020). $\delta^{15}\text{N}$ in deployed macroalgae as a tool to monitor nutrient input driven by tourism activities in Mediterranean islands. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111504. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111504>
21. Shchiptsov, O. A. & Goncharov, O.Yu. (2023). European research project on the state of pollution in the Black Sea «Black Sea SIERRA»: mission and participation of Ukrainian oceanographers. *Geofizicheskiy Zhurnal*. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293315>
22. Türker Gülen, AKIN, İlknur VESTMENT POTENTIAL OF MACROALGAE CULTURE IN ÇANAĞKALE, TURKEY | Türker | Proceedings of the International scientific and practical conference “Bulgaria of regions”, erişim tarihi Eylül 14, 2025, <https://science.uard.bg/index.php/regions/article/view/659>
23. Global Market Analysis, 2024 <https://market.us/report/macroalgae-market/>
24. Commercial Seaweed Market Share and Statistics - 2034 - Fact.MR, Accessed August 22, 2025, <https://www.factmr.com/report/4493/commercial-seaweed-market>
25. Commercial Seaweed Market Size, Share | Forecast [2032], Accessed August 22, 2025, <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/commercial-seaweed-market-100077>
26. Farmed Seaweed | Industries - WWF, Accessed September 14, 2025, <https://www.worldwildlife.org/industries/farmed-seaweed>
27. Mikyalova T, Species composition and structure of macrophytobenthos in the lower part of the photic zone of the Kolvitsa inlet (Kandalaksha Bay, White Sea), 2017
28. Macroalgae Market Size, Share | CAGR of 5.2%, Accessed September 16, 2025, <https://market.us/report/macroalgae-market/>
29. Seaweed Aquaculture - NOAA Fisheries, Accessed September 16, 2025, <https://www.fisheries.noaa.gov/national/aquaculture/seaweed-aquaculture>
30. The seaweed Industry - An overview, Accessed September 14, 2025, <https://www.fao.org/4/y3550e/y3550e02.htm>
31. Marine Algae - Department of Energy, Accessed September 14, 2025, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/03/f61/Chapter%205.pdf>
32. Understanding Macroalgae: A Comprehensive Exploration of Nutraceutical, Pharmaceutical, and Omics Dimensions - PMC - PubMed Central, Accessed September 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10780804/>
33. Recent developments in biorefining of macroalgae metabolites and ..., Accessed September 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/360212308_Recent_developments_in_biorefining_of_macroalgae_metabolites_and_their_industrial_applications_-_A_circular_economy_approach
34. Innovative Processing and Industrial Applications of Seaweed - MDPI, Accessed September, 2025, <https://www.mdpi.com/2673-9410/5/1/10>

35. AlgaPrime™ DHA Algae Omega-3 - Corbion, Accessed September 14, 2025, <https://www.corbion.com/products/algae-ingredients-products/algaprimedha>
36. Algae for Omega-3 DHA|Sustainable Aquaculture Ingredients - Corbion, Accessed September 14, 2025, <https://www.corbion.com/markets/algae-ingredients/aquaculture>
37. <https://www.corbion.com/markets/algae-ingredients/aquaculture>
38. Role of Seaweeds for Improving Soil Fertility and Crop Development to Address Global Food Insecurity - MDPI, Accessed September 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2673-7655/5/3/29>
39. BioSolutions by BASF enable healthy plants naturally, Accessed September 14, 2025, <https://agriculture.basf.com/global/en/business-areas/crop-protection-and-seeds/BioSolutions>
40. Acadian Plant Health™ | North America | Home, Accessed September 10, 2025, <https://acadianplanthealth-na.com/>
41. The ultimate, proven seaweed extract for horticulture growers - Acadian Plant Health, Accessed September, 2025, <https://acadianplanthealth-na.com/products/acadian/>
42. Denizden Tarlaya: Makroalglerden Organik Gübre Üretimi ile Tarıma Yeni Bir Soluk! (2020) - MERSİN ÜNİVERSİTESİ Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Accessed September 10, 2025, <https://bidb.mersin.edu.tr/haberler/390527/denizden-tarlaya-makroalglerden-organik-gubre-uretimi-ile-tarima-yeni-bir-soluk>
43. Denizden Tarlaya: Makroalglerden Organik Gübre Üretimi ile Tarıma Yeni Bir Soluk! - Mersin Üniversitesi -, Accessed September 11, 2025, <https://www.mersin.edu.tr/haberler/390527/denizden-tarlaya-makroalglerden-organik-gubre-uretimi-ile-tarima-yeni-bir-soluk>
44. Haberler - Denizden Tarlaya: Makroalglerden Organik Gübre Üretimi ile Tarıma Yeni Bir Soluk! (2016) - Mersin Üniversitesi, Accessed September 11, 2025, <https://finans22.mersin.edu.tr/haberler/390527/denizden-tarlaya-makroalglerden-organik-gubre-uretimi-ile-tarima-yeni-bir-soluk>
45. pmc.ncbi.nlm.nih.gov, Accessed September 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9658329/>
46. SWOT analysis of seaweeds processing using ILs. - ResearchGate, Accessed September 19, 2025, https://www.researchgate.net/figure/SWOT-analysis-of-seaweeds-processing-using-ILs_fig4_341705855
47. Macroalgae Farming Boosts Sustainable Growth in Latin America - Mexico Business News, Accessed September 19, 2025, <https://mexicobusiness.news/agribusiness/news/macroalgae-farming-boosts-sustainable-growth-latin-america>
48. New center to advance use of seaweed in the global economy - Berkeley News, Accessed September 19, 2025, <https://news.berkeley.edu/2024/10/02/new-center-to-advance-use-of-seaweed-in-the-global-economy/>
49. CRISPR-based bioengineering in microalgae for production of industrially important biomolecules - Frontiers, Accessed September 19, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2023.1267826/full>
50. A CRISPR/Cas9 system adapted for gene editing in marine algae, erişim tarihi Eylül 19, 2025, <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/ocrd/289639.pdf>
51. Tipping Points in Seaweed Genetic Engineering: Scaling Up Opportunities in the Next Decade - PMC - PubMed Central, Accessed September 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4052329/>
52. Genetic improvement of macroalgae: Status to date and needs for the future - ResearchGate, Accessed September 6, 2025, https://www.researchgate.net/publication/233990142_Genetic_improvement_of_macroalgae_Status_to_date_and_needs_for_the_future

53. A Comparison of Multiple Macroalgae Cultivation Systems and End-Use Strategies of Saccharina latissima and Gracilaria tikvahiae Based on Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment - MDPI, Accessed September 6, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/15/12072>
54. Using macroalgae to address UN Sustainable Development goals through CO2 remediation and improvement of the aquaculture environment, Accessed September 7, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/26388081.2022.2025617>
55. EU-China Blue Carbon Project, Accessed September 6, 2025, <https://ocean-climate.org/wp-content/uploads/2025/06/EU-China-Blue-Carbon-Project.pdf>
56. books.rsc.org, Accessed September 6, 2025, <https://books.rsc.org/books/edited-volume/2250/chapter/8237456/Marine-Macroalgae-Sustainable-Practices-and#:~:text=Many%20species%20of%20brown%20macroalgae,nutrient%20cycling%20in%20marine%20ecosystems.>
57. Riding the Blue Wave: The Rise of Ocean-Focused Venture Capital - Environment Next, Accessed September 6, 2025, <https://environmentnext.org/riding-the-blue-wave-the-rise-of-ocean-focused-venture-capital/>
58. Blue Revolution Fund | ISIF, Accessed September 14, 2025, <https://isif.ie/portfolio/blue-revolution-fund>
59. Blue Revolution Fund Raises \$93 Million for Aquaculture Investment - Environment Grants, Accessed September 6, 2025, <https://www.topenvironmentgrants.com/Newsitem/558201/452/Blue+Revolution+Fund+Raise+s+%2493+Million+for+Aquaculture+Investment>
60. China expands marine ranching to boost food security - Global Times, Accessed September 8, 2025, <https://www.globaltimes.cn/page/202503/1330175.shtml>
61. Marine Ranching: China's Blue Solution for Food Security, Accessed September 14, 2025, https://bcas.edpsciences.org/articles/bcas/full_html/2024/01/bcas2024016/bcas2024016.html
62. Blue carbon governance for carbon neutrality in China: Policy evaluation and perspectives - PMC - PubMed Central, Accessed September 8, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10568102/>
63. Full article: Reconceptualising seaweed cultivation in China: climate law and policy implications - Taylor & Francis Online, Accessed September 10, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17583004.2024.2349941>
64. Guidelines for Conservation and Restoration of Seaweed Beds, Accessed September 10, 2025, https://www.jfa.maff.go.jp/j/gvoko_gvozyo/g_zyoho_bako/attach/pdf/mobahozen_sozo_ishoya_ketaisaku-3.pdf
65. Norwegian lawmakers reach agreement on aquaculture policy; core rules to remain in place for now | Intrafish, Accessed September 10, 2025, <https://www.intrafish.com/salmon/norwegian-lawmakers-reach-agreement-on-aquaculture-policy-core-rules-to-remain-in-place-for-now/2-1-1829620>
66. Scispace.com, Accessed September 10, 2025, <https://scispace.com/pdf/investment-potential-of-macroalgae-culture-in-canakkale-46fwefpcfuf.pdf>
67. News; FAO İle Tarım ve Orman Bakanlığı İşbirliğiyle Balıklar İçin Alternatif Yemler ve Makro Alg Yetiştiriciliği Çalıştayı Düzenlendi., Accessed September, 2025, <https://www.tarimorman.gov.tr/BSGM/Haber/247/Fao-Ile-Tarim-Ve-Orman-Bakanligi-Isbirligiyle-Baliklar-Icin-Alternatif-Yemler-Ve-Makro-Alg-Yetistiriciligi-Calistayi-Duzenlendi>
68. Tarım Orman Bakanlığı Belgeler Arşivi, Ülkemizde su ürünleri yetiştiriciliği, mevzuatı ve alan belirleme çalışmaları 03.04.2019, Accessed September, 2025, <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Su%20Kalitesi%20H%C4%B0E%20Haber%202019/%C3%9C%20Ülkemizde%20Su%20%C3%9C%20B%20Nleri%20Yeti%C5%9Ftiricili%C4%9Fi,%20Mevzuat%C4%B1%20ve%20Alan%20Belirleme%20%C3%87al%C4%B1%C5%9Fmaları%20B1.pdf>

69. SU ÜRÜNLERİ YÖNETMELİĞİ - Trabzon İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, Accessed September 14, 2025, <https://trabzon.tarimorman.gov.tr/Belgeler/BSU/SU%20%C3%9CR%C3%9CNLER%C4%B0%20Y%C3%96NETMEL%C4%B0%C4%9E%C4%B0.doc>
70. 1501 - TÜBİTAK Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı, Accessed September 14, 2025, <https://tubitak.gov.tr/tr/destekler/sanayi/ulusal-destek-programlari/1501-tubitak-sanayi-ar-ge-projeleri-destekleme-programi>
71. Tarım ve Orman Bakanlığı Hibelerine Nasıl Başvurulur? (2024 Yılı KKYDP % 50 Hibeli Desteklemeler) - YouTube, Accessed September 14, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=hljQ8MuE-kw>
72. Tarımda 41 Makine ve Ekipmana % 50 Hibe Desteği - Ulusal Hububat Konseyi, Accessed September 10, 2025, <https://www.uhk.org.tr/tr/tarimda-41-makine-ve-ekipmana-50-hibe-destegi/>
73. Seydikemer Türkiye'nin İlk Ve Tek Yosun Serasi Demirler'de - YouTube, Accessed September 10, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=UO36_LhVm3A
74. Sahilden Toplanan Yosunlar Gübreye Dönüştürülüyor - YouTube, Accessed September 14, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=IfcnFB4-pjA>
75. China's 'Seaweed Capital' Xiapu county begins annual harvest_ News_ Fujian Provincial People's Government, Accessed September 11, 2025, http://fujian.gov.cn/english/news/202504/t20250422_6903589.htm
76. Marine Aquaculture in Turkey: advancements and management - TÜDAV, Accessed September 14, 2025, https://tudav.org/wp-content/uploads/2020/12/Marine_Aquaculture_in_Turkey_2020_low.pdf
77. Algae Startups Investment Trends - Net Zero Insights, Accessed September 11, 2025, <https://netzeroinsights.com/resources/algae-startups-investment-trends/>
78. Hatch Blue Accessed September 14, 2025, <https://www.hatch.blue/>
79. EIF supports Blue Revolution Fund in boosting sustainable aquaculture investments backed by the InvestEU programme, Accessed September 10, 2025, <https://www.eif.org/investEU/news/2024/eif-supports-blue-revolution-fund-in-boosting-sustainable-aquaculture-investments-backed-by-the-investeu-programme.htm>
80. Top 10 Companies Influencing the Algae Protein Market in 2025 - Kings Research, Accessed September 10, 2025, <https://www.kingsresearch.com/blog/top-10-algae-protein-companies-2025>
81. Plant-based cream cheese | DSM-Firmenich, Accessed September 4, 2025, <https://www.dsm-firmenich.com/en/businesses/taste-texture-health/news-events/downloads/event-downloads/plant-based-cream-cheese.html>
82. Top 9 VC Investors in Turkey in 2025 - BaseTemplates, Accessed September 4, 2025, <https://www.basetemplates.com/investors/top-9-vc-investors-in-turkey>
83. Boğaziçi Ventures - Girişim Sermayesi Yatırım Şirketi, Accessed September 4, 2025, <https://bogaziciventures.com/>
84. Home - Revo, Accessed September 14, 2025, <https://revo.vc/>
85. Diffusion Capital Partners - Home, Accessed September 14, 2025, <https://dcp.vc/>
86. TBE - TEB Portföy Sağlık ve Biyoteknoloji Değişken Fon, Accessed September 19, 2025, <https://www.tebportfoy.com.tr/yatirim-fonlari/teb-portfoy-saglik-ve-biyoteknoloji-degisken-fon>
87. Türkiye Startup Yatırımları 2025 1. Çeyrek - KPMG International, Accessed August 19, 2025, <https://kpmg.com/tr/tr/home/insights/2025/05/turkiye-startup-yatirimlari-2025-birinci-ceyrek.html>
88. Istanbul Venture Capital Initiative (iVCI) - European Investment Fund, Accessed August 29, 2025, https://www.eif.org/what_we_do/resources/IVCI/index.htm

Поради високите производствени разходи в ранните етапи е важно секторът да се ориентира към продукти с по-висока печалба, като:

- биостимуланти и биоторове;
- нутрицевтици и функционални храни;
- козметични и фармацевтични съставки.

Тези сегменти са ключови за икономическата устойчивост на индустрията.

3. Укрепване на технологиите и иновациите

Изследванията и разработките трябва да бъдат насочени към:

- генетично подобряване на видовете;
- рентабилни процеси на биорафиниране;
- автоматизация и оптимизация на отглеждането;
- подобрени методи за събиране и преработка.

Публично-частните партньорства, пилотните съоръжения и програмите за трансфер на технологии могат значително да ускорят напредъка.

4. Привличане на стратегически инвеститори

Предприятията трябва да се позиционират не само като „ферми за водорасли“, а като:

- **deep-tech компании,**
- **сини биотехнологични предприятия,**
- **иновативни производители на биоматериали.**

Това позициониране е по-привлекателно за фондове за рисков капитал и улеснява достъпа до финансиране. Партньорства с международни фондове като Hatch Blue могат да осигурят капитал, експертиза и глобални мрежи.

Заклучение

Секторът на макроводораслите представлява не само икономическа възможност, но и стратегическа област, която може да допринесе за:

- продоволствената сигурност,
- опазването на околната среда,
- действията за борба с климатичните промени.

Разгръщането на този потенциал изисква многостранна, добре дефинирана и далновидна стратегия, която да обедини научните среди, индустрията, инвеститорите и държавните институции.

ЗАКЛЮЧЕНИЯ И ПРЕПОРЪКИ

Секторът на макроводораслите е динамична и обещаваща област в световен мащаб, която съчетава значими екологични и икономически ползи. Пазарните данни ясно показват, че през следващото десетилетие се очаква секторът да отбележи значителен растеж. Този растеж се дължи не само на традиционното потребление на водорасли като храна, но и на иновативни приложения – намаляване на метановите емисии в животновъдството, възстановяване на околната среда, производство на висококачествени биотехнологични продукти. Тази трансформация показва, че макроводораслите се превръщат от първична суровина в многофункционален ресурс за интегрирани биорафинерийни подходи.

Световните лидери като Китай, Япония и Норвегия подкрепят този потенциал чрез целенасочени политики, съобразени с националните им приоритети – продоволствена сигурност, опазване на околната среда и устойчивост на аквакултурите. Тези страни са разработили правни рамки, финансиране за научноизследователска и развойна дейност и стимули, които ускоряват отглеждането и търговското използване на макроводораслите.

Въпреки географските предимства на Турция и Черноморския регион, съществуващата инфраструктура за аквакултури и нарастващия академичен интерес, секторът на макроводораслите все още не е преминал към мащабна търговска дейност. Напредъкът остава ограничен до малки пилотни проекти и академични изследвания, което показва, че съществува разрыв между научния потенциал и реалното му приложение в индустрията.

За да се преодолее тази разлика и да се разкрие пълният потенциал на сектора, са необходими следните стратегически стъпки:

1. Разработване на интегрирана национална стратегия за макроводорасли

Необходимо е създаването на ясна пътна карта – подобна на китайския модел за „морско земеделие“ или норвежката стратегия за „нискотрофична аквакултура“. Тази стратегия трябва да:

- опрости регулаторните процедури;
- гарантира екологична устойчивост;
- създаде доверие у инвеститорите;
- дефинира приоритетни зони за отглеждане и преработка.

2. Фокус върху продукти с висока добавена стойност

За да се постигне глобален напредък в сектора, според Огустин е от съществено значение да се насърчава сътрудничеството между академичните среди и индустрията – чрез съвместни научни изследвания, стажове и пътища за комерсиализация – както и да се подкрепя образованието в областта на морската биотехнология.



биоматериалите и биопластмасите, получени от водорасли. Очаква се и по-голямо сътрудничество между специализирани стартиращи компании и вертикално интегрирани участници, както и увеличаване на капиталовите потоци там, където регулаторните и пазарните пътища са ясни.

За да подкрепят развитието на сектора, политиците трябва да дадат приоритет на регулаторната яснота (разрешителни и стандарти за продукти), целевото публично финансиране и стимулите за намаляване на риска при преминаването от пилотен към търговски мащаб, както и на програми, които укрепват сътрудничеството между индустрията, академичните среди и инвеститорите. При подходяща политическа рамка Турция може бързо да се превърне в регионален лидер в икономиката на макроводораслите в Средиземноморието.

Според Теофил Огустин, инвестиционен анализатор в Mirova Energy Transition / Sustainable Ocean Fund, водораслите представляват възобновяем и бързо растящ ресурс, който може да превърне разрушителни цъфтежи (като *Sargassum*) в ценна суровина. Инвеститорите все повече ценят кръговата икономика и нисковъглеродните материали, а интересът към „синия въглерод“ и природно базираното секвестриране на въглерод допълнително стимулира търсенето. Морските водорасли вече създават големи пазари – като хранителни съставки, компоненти на фуражи за аквакултури и добавки към фуражи за добитък, които намаляват метановите емисии.

Mirova, чрез своя Sustainable Ocean Fund, е инвестирала в Carbonwave – компания, която превръща *Sargassum* в биоматериали. Според Огустин най-значимите рискове при инвестиции в предприятия за макроводорасли са рискът от мащабиране и рискът от преработка.

Наблюдава се, че стартиращите компании в областта на макроводораслите постепенно преминават от нишови към по-широко разпространени приложения, включително:

- устойчиво земеделие (биоторове, подобрители на почвата);
- храни и хранене (функционални съставки);
- козметични и фармацевтични продукти (биоактивни вещества).

Очаква се екосистемата от стартиращи компании в областта на морските водорасли да се разраства особено в региони със силни научни общности в морските науки и благоприятна политическа среда. Рисковият капитал ще следва тази тенденция, особено в приложения като:

- фуражи за животни, намаляващи метана;
- биоразградими опаковки;
- функционални хранителни съставки.

Според **Нелсън Вадасери от Sea6**, Турция разполага с изключително благоприятни условия за развитие на сектора на макроводораслите, включително дълга брегова линия както на Средиземно, така и на Черно море, както и нарастващ академичен интерес. Въпреки това секторът все още е в начален стадий и остава по-скоро ориентиран към научни изследвания, отколкото към промишлено производство. Макар да съществуват обещаващи пилотни проекти и нишови търговски продукти, механизираното океанско земеделие в голям мащаб, интегрираната преработка и зрелите вериги за създаване на стойност все още не са широко разпространени.

Търсенето в сектора на макроводораслите се ускорява от няколко глобални мегатенденции: програмите за устойчивост и климат (включително природно базирани решения за въглеродни емисии), търсенето на алтернативни протеини и устойчиви източници на храна, кръговата биоикономика и нуждата от възобновяеми химикали и биопластмаси, както и регенеративното земеделие (продукти за здравето на почвата и биостимуланти). Критериите за околна среда, социална отговорност и управление (ESG), както и климатичното финансиране, насочват все повече капитал към решения, базирани на океана.

Основната стратегия на Sea6 е да изгражда вертикално интегрирани способности – от технологии за отглеждане до разработване на продукти – вместо да действа основно като външен инвеститор. Въпреки това, при наличие на подкрепяща екосистема, компанията остава отворена за стратегически партньорства или съвместни предприятия на пазари като Турция, където местните партньори и политическите условия могат да позволят устойчиво мащабиране.

Ключовите рискове при инвестиране в макроводорасли включват:

- риск от мащабиране (превърщане на пилотни резултати в нискоразходно производство с голям обем);
- надеждност на веригата за доставки (постоянно качество и обем на биомасата);
- регулаторна несигурност (разрешителни за океански ферми и стандарти за продукти);
- приемане от пазара (ценова конкурентоспособност и готовност на клиентите да преминат към нови продукти).

При оценка на следващите пет години инвестиционните перспективи могат да се определят като привлекателни и ускоряващи се. Очаква се нарастващ интерес от страна на инвеститорите към селскостопански суровини (биостимуланти), алтернативни съставки за храни и фуражи, както и биоматериали. В перспектива от 5 до 10 години вероятно ще се наблюдава по-широко приемане на механизираното океанско земеделие, по-широко използване на биостимуланти на базата на макроводорасли, фуражни съставки и алтернативни протеинови суровини, както и узряване на

рибно брашно в аквакултурите – също е сред факторите, които увеличават търсенето.

Разнообразието на крайбрежието на Турция по Егейско, Мраморно и Средиземно море, утвърдената индустрия за морски дарове и подходящата логистична инфраструктура се считат за ключови предимства. Основните рискове за предприятията, занимаващи се с макроводорасли, включват бури, вредители, болести и сезонност, които влияят върху добивите; трудности при осигуряване на постоянна доставка на висококачествена биомаса; ограничен капацитет за преработка в голям мащаб; несигурно или слабо търсене на нови категории продукти; и ценова нестабилност на суровата биомаса.

Критичните фактори за успех на инвестиционните проекти включват:

- силен екип с умения в аквакултурите, инженерството, регулациите и търговската реализация;
- внедряване на повторяеми и устойчиви протоколи за отглеждане и методи за размножаване;
- решения за веригата на доставки, включително сушене, преработка и проследяемост.

През следващите пет години инвестиционният потенциал на предприятията за макроводорасли може да се определи като висок, но неравномерен. Инвестициите ще останат привлекателни за компании, насочени към конкретни продуктови сегменти – промишлени фуражни добавки, определени нутрицевтични екстракти, доставки на фуражи или прекурсори на биополимери в големи количества – при условие че могат да демонстрират надеждни добиви и устойчиво намаляване на разходите. Най-успешни ще бъдат предприятията, които контролират както отглеждането, така и преработката, или тези, които си осигуряват дългосрочни партньорства с компании за храни и фуражи.

Ясната регулаторна рамка и доказаната ефикасност на продуктите (например последователно намаляване на метана при добитъка или измерими ползи за фуражите) ще ускорят инвестициите. Секторът ще стане привлекателен за инвестиции в голям мащаб, когато докаже надеждност на доставките, конкурентоспособност на разходите и стабилни крайни пазари.

Макроводораслите вероятно ще се превърнат в един от стълбовете на синята биоикономика, но успехът ще зависи от изграждането на стабилни вериги на стойност – от развъдниците до преработката – и от създаването на благоприятни условия за лицензиране на фермите и одобряване на нови продукти. За да се укрепи секторът, политиките трябва да разглеждат макроводораслите като индустрия с „тройна полза“ – подкрепа за действията за климата, устойчивите хранителни системи и регионалното икономическо развитие. За реализирането на този потенциал обаче са необходими предварителна яснота, инфраструктура и инвестиции.

Освен в областта на храните и фуражите, вероятно ще се наблюдава растеж в нутрицевтиците, козметиката, биопластмасите, биоторовете, въглеродните кредити и потенциалното използване на водорасли като строителни материали. Очаква се по-стандартизирано регулиране на продуктите на базата на макроводорасли, включително стандарти за безопасност, устойчиви практики и системи за проследяемост.

С подобряването на разходните криви интересът на инвеститорите вероятно ще се увеличи, като се очаква повече смесено финансиране, публично-частни партньорства и стимули, свързани с въглеродните емисии.

Очакваните политики включват:

- установяване на ясни и рационализирани процеси за издаване на разрешения за отглеждане, преработка и одобрение на продукти;
- подкрепа за преминаване от пилотен към търговски мащаб чрез инструменти за смесено финансиране;
- финансиране на научноизследователска и развойна дейност, сътрудничество между университети и индустрия и демонстрационни проекти;
- разработване на национални и международни стандарти за устойчивост, проследяемост и качество, които да улеснят достъпа до пазара.

Според **Стефани Ракелс, ръководител „Бизнес развитие“ в Aqua-Spark**, Турция е интересна страна с добри предпоставки за развитие на сектора на морските водорасли. Тя разполага със солидни основи – достъп до морско крайбрежие, традиции в използването на морски водорасли в местната кухня и активни научни общности в областта на морските науки. Въпреки това, в сравнение с пазари като Норвегия, Япония или Индонезия, търговският сектор на морските водорасли в Турция остава до голяма степен неразвит.

Съществуват обещаващи пилотни ферми, изследователски проекти и няколко малки преработвателни предприятия, но мащабното отглеждане, вертикалната интеграция в продукти с по-висока добавена стойност и постоянният промишлен преработвателен капацитет все още са ограничени. Пазарното съзнание и индустриалното търсене нарастват, но повечето инициативи остават в пилотен или ранен търговски етап.

В тази област устойчивостта и кръговата биоикономика създават търсене на биомаса с ниски вложени ресурси и решения, които имат положителен ефект върху природата. Освен това ролята на водораслите за устойчивостта на крайбрежните райони и потенциалът им за въглеродни кредити (въпреки че методите за измерване и проверка все още се развиват) могат да стимулират растежа на сектора. Използването на водорасли като съставка или добавка в храните за животни – за намаляване на метановите емисии при преживни животни и за заместване на ограниченото количество

Ключовите фактори, които определят развитието на сектора, включват устойчивостта и кръговата биоикономика (ниска нужда от земя и прясна вода), естественото отстраняване на въглерод („син въглерод“), нарастващото търсене на алтернативни протеини и устойчиви съставки, корпоративните ангажменти за декарбонизация и интересът към нови биоматериали (биопластмаси, текстил, фуражни добавки).

По отношение на инвестиционния опит ван дер Хоут отбелязва, че Rubio е инвестирал в технологии, свързани с водорасли (Arborea), и остава отворен към инвестиции в макроводорасли, когато има ясна технологична диференциация, защитима интелектуална собственост, силни основатели и измеримо въздействие. Основните рискове включват:

- надеждно мащабиране на биологията и отглеждането при променливи морски условия;
- сезонни колебания и предизвикателства във веригата на доставки;
- забавяния в регулаторните процедури и разрешителните за морски ферми;
- риск, свързан с продукта и пазара (конкурентоспособност по цена и качество);
- екологични рискове, водещи до колебания в добива (болести, бури, еутрофикация).

На въпроса за критичните фактори за успех ван дер Хоут посочва: стабилна и доказана технология за отглеждане или уникален портфейл от интелектуална собственост; ранна пазарна валидация с платежоспособни клиенти; мащабируемо и рентабилно събиране и преработка; измерими показатели за въздействие; и ясна пътна карта към предвидимо целогодишно снабдяване.

Той добавя:

„Аз съм оптимист, но и прагматик. Очаквам пилотна вълна и няколко мащабируеми търговски успеха – особено в сегментите с висока стойност (козметика, нутрицевтици, специални съставки) и, с подобряването на преработката и логистиката, в B2B суровините (добавки за фуражи, биополимери). Въпреки това ще бъде по-трудно да се мащабират продукти с ниска маржа, освен ако не се постигнат значителни намаления на разходите.“

Очаква се през следващите 10 години секторът на макроводораслите да премине от множество малки пилотни проекти към по-малко на брой, но по-големи търговски операции. Вертикалната интеграция вероятно ще се разпространи, за да се реализира добавена стойност и да се намалят разходите. Подобрени методи за отглеждане (подбор на видове, контролирана среда), усъвършенствани технологии за събиране и преработка, автоматизация и напредък в биопреработката ще позволят по-ефективно извличане на високоценни съединения.

„Секторът със сигурност ще се развива. Тъй като ние работим в сектора на отпадъците, не знаем каква е траекторията в другите сектори, но от наша гледна точка, поради морското замърсяване, обемът на отпадъците се увеличава. Следователно, рано или късно ще трябва да се насочим към създаването на съоръжения, които ще преработват този материал.“

Той обобщава необходимите действия, както следва:

- Властите трябва да насочват крайбрежните общини към създаването на подходящи съоръжения.
- Тъй като общините не разполагат с достатъчно съоръжения и ноу-хау, властите трябва да подкрепят превръщането на водораслите в продукти, така че те да бъдат рециклирани, а не изхвърляни.
- Следва да се създадат зони за отглеждане.

Броят на инвеститорите, които инвестират в макроводорасли като част от синята икономика, остава малък. В този контекст основната мисия на базирания в Нидерландия Rubio Impact Venture Fund е да си партнира с предприемачи, които променят света, за да предоставя мащабируеми, системни решения на глобалните предизвикателства. **Едуард ван дер Хоут, един от партньорите на Rubio**, заявява, че фондът инвестира в основатели на ранен етап, мотивирани от мисията си, които разработват мащабируеми решения на пресечната точка между въздействието върху околната среда и търговската възвръщаемост.

Той отбелязва, че водораслите могат да допринесат за устойчиви хранителни системи и за производството на нисковъглеродни съставки, и посочва, че Rubio вече е подкрепил предприятия, свързани с водорасли – най-вече Arborea, която разработва технология за отглеждане на водорасли с ниски емисии на CO₂. Ролята на фонда включва практическа подкрепа в областта на капитала, управлението, измерването на въздействието и търговското мащабиране.

Според ван дер Хоут Турция има дълга брегова линия, съществуващо ноу-хау в аквакултурите и нарастващ академичен интерес. Въпреки това веригите за търговска стойност на макроводораслите все още са в ранна фаза в сравнение със Северозападна Европа и Азия. Макар че обещаващи пилотни проекти и академични изследвания създават положителна динамика, броят на вертикално интегрираните участници в търговски мащаб остава ограничен. Очакват се активни експерименти в областта на хранителните съставки, козметиката и възстановяването на околната среда, но производственият мащаб и постоянните доставки продължават да бъдат основни пречки.

инвеститорите. Въпреки това той подчертава, че инвеститорите в Турция не са склонни да чакат дълги процеси на научноизследователска и развойна дейност.

Шипка заключава, че през следващите пет години инвестиционният потенциал на предприятията, базирани на макроводорасли, вероятно ще се увеличи, тъй като нарастващото търсене ще подобри шансовете им да привлекат финансиране.

Мехмет Генчосманоглу, ръководител на отдела за научноизследователска и развойна дейност в İSTAÇ A.Ş. – компания за управление на отпадъци, която извършва почистване както на сушата, така и в морето по протежение на 500 км брегова линия – посочва, че съществуват много напреднали проекти, базирани на научноизследователска и развойна дейност, но че за събирането и разделянето на водораслите са необходими значителни инвестиции. В този контекст той отбелязва, че İSTAÇ подготвя научноизследователски и развойни проекти, насочени към оползотворяване на събраните водорасли.

Генчосманоглу определя климатичните промени като водеща глобална мегатенденция, която стимулира развитието в областта на водораслите, и подчертава, че условията се влошават както по отношение на въглеродните емисии, така и по отношение на морското замърсяване. Той добавя, че въпреки положителните фактори – като увеличаване на броя и качеството на учените, повишаване на осведомеността и нарастващ брой стимули – секторът е изправен и пред сериозни предизвикателства. Организирането и събирането на водорасли е скъпо, което възпира големите компании от инвестиции.

Той подчертава, че İSTAÇ не е производител на продукти на базата на макроводорасли, а организация, която ги събира, и поради това има потенциал да се превърне в ключов доставчик на суровини. Генчосманоглу отбелязва обаче, че водораслите се събират като смесени видове и че разделянето им е изключително скъпо.

Той посочва, че периодично се подготвят научноизследователски и развойни проекти за превръщане на събраните водорасли в продукти, но най-голямото предизвикателство остава трудността при събирането и транспортирането им, тъй като трябва да се обхване дълга брегова линия и да се работи в условия на широко разпространено замърсяване. Макар че секторите на храните и козметиката се разглеждат като обещаващи, Генчосманоглу подчертава, че водораслите, които İSTAÇ събира, не могат да бъдат използвани в тези области поради морското замърсяване.

Той отбелязва, че съвместно с Техническия университет Йълдъз са проведени проучвания за превръщането на макроводораслите в биогаз и за използването им като тор, и добавя, че İSTAÇ подкрепя множество университетски проекти чрез предоставяне на материали.

Обобщавайки вероятните развития в сектора на макроводораслите през следващите 5–10 години, Генчосманоглу заявява:

Ишик подчертава, че въпреки значителния обем академична работа, мащабното производство практически липсва и че разчитането единствено на диво събиране затруднява развитието на търговски ориентирани модели.

Според нея устойчивостта е водещата глобална мегатенденция, която движи сектора на водораслите. Въпреки това, макар Турция да би трябвало да привлича значителни инвестиции, броят на инвеститорите остава нисък. Ишик добавя, че въпреки предизвикателствата в инвестиционната среда, климатът на Турция – подходящ за отглеждане на множество видове водорасли – прави вътрешния пазар особено интересен.

Тя подчертава силния търговски потенциал в секторите на храните, фуражите за риба, хранителните добавки и торовете, както и факта, че Турция е силна по отношение на научните проекти и разполага с много висококачествени изследвания в тази област. Според проф. д-р Ишик най-важното развитие, необходимо за отключването на потенциала на сектора – независимо дали става дума за регулации, инвестиции, предприемачество или публична политика – е разширяването на инвестиционните възможности.

Тя отбелязва, че допреди 20 години почти не е съществувало търсене на водорасли, докато днес потребителското търсене е силно и се очаква да нараства още повече. Ишик подчертава, че в следващия период на практика няма да има алтернатива, освен да се обърнем към водораслите, особено поради ролята им като въглеродни поглъщатели. Тя заключава, че механизмите за подкрепа трябва да бъдат засилени в съответствие с очакваното развитие на сектора.

Според Мустафа Шипка, генерален директор на Fon Angels – платформа за краудинвестиране, оперираща в Турция – нишовият характер на сектора на водораслите ограничава броя на участниците в тази област. Шипка отбелязва, че устойчивостта и нулевите въглеродни емисии са сред водещите глобални мегатенденции, които стимулират развитието в сектора, но посочва, че до момента не са получавали заявки от стартиращи компании, работещи по теми, свързани с водораслите.

Той добавя, че от регулаторна гледна точка платформата може да предоставя финансиране дори на етап идея. Шипка подчертава, че подобни начинания обикновено включват много дълги цикли на научноизследователска и развойна дейност, поради което стартиращите компании трябва да разделят жизнения цикъл на продукта на няколко фази и да навлизат на пазара с междинни продукти, вместо да чакат завършването на крайния етап.

По отношение на ключовите характеристики на стартиращ бизнес, подходящ за инвестиции в тази област, Шипка отбелязва, че ако продуктът е разработен чрез PoC, проведено съвместно с реномирани институции, това може да вдъхне увереност на

Айдън прогнозира, че през следващите 5–10 години търсенето на водорасли в селскостопанския сектор на Турция ще нарасне значително. Въпреки увеличаващата се производителност в земеделието, качеството на селскостопанските продукти остава проблем, което налага ориентирание към органични източници, способни да осигурят по-високо качество.

Той подчертава, че тъй като всеки вид макроводорасли има различни характеристики, тези качества трябва да бъдат подробно проучени, регистрирани и след това въведени на пазара, за да се използва пълноценно потенциалът им в селското стопанство.

Мехмет Кан Суку, ръководител на отдела за научноизследователска и развойна дейност в Kybele's Garden – компания, която комбинира различни макро- и микроводорасли и ги преработва чрез ферментационна технология, за да разработва суровини и продукти с висока добавена стойност за секторите на храните, селското стопанство и козметиката – посочва, че в Турция секторът на торовете е най-широко приетата област за приложение на водораслите. Той отбелязва, че почти всяка компания за торове вече предлага продукт в тази категория и че водещите глобални мегатенденции, стимулиращи развитието, са климатичната криза и устойчивостта.

Според Суку секторът на торовете вече разполага с утвърден пазар, но в областта на храните структурата на сектора остава слаба, особено поради културни фактори. Той определя основните предизвикателства във веригата на доставки като липса на местни доставчици, високи разходи за внос на суровини и значителни въглеродни емисии, свързани с поддържането на устойчив производствен процес. Суку добавя, че проблемите в законодателството и правните разпоредби се проявяват най-вече като регулаторни затруднения за разработчиците на крайни продукти, особено в хранителния сектор.

Той изброява селското стопанство, храните и козметиката като области с висок потенциал за бъдещ растеж на продукти на базата на макроводорасли. Суку очаква пазарът да се развие значително през следващите 10 години, да започне работа с нови видове и да се появят по-широко разпространени приложения, особено в биотехнологията. Той подчертава, че са необходими регулаторни мерки за разработването на продукти и че когато компаниите могат да работят само с вече регулирани продукти, разработването на нови решения става трудно. Суку добавя, че трябва да бъдат въведени регулации, позволяващи работа с различни видове водорасли, и че процесите на одобрение, които отнемат 1,5–2 години, забавят комерсиализацията на продуктите.

Проф. д-р Оя Ишик, член на Факултета по рибарство на Университета Чукурова, Катедра по морски науки, посочва, че фокусът на нейната работа са маслата от водорасли и пигментацията на водораслите. Тя отбелязва, че изследванията върху макроводораслите се увеличават с всеки изминал ден и че има множество заявки за отглеждане на култури от различни източници.

Според Тамтюрк сред глобалните мегатенденции, които стимулират развитието в тази област, способността на водораслите да улавят и преобразуват въглерод е един от най-важните фактори. Той подчертава, че Турция разполага с много благоприятни климатични условия за производство и със силен човешки капитал, което ѝ дава потенциал да се превърне в привлекателен център в сектора. Тамтюрк уточнява, че този потенциал може да бъде реализиран единствено чрез отглеждане на водорасли, а не чрез събиране от природата.

Обобщавайки основното предизвикателство в логистичната верига, той посочва, че макар да няма проблеми в законодателството относно самите водорасли, липсва специфична регулаторна рамка за производството на храни от водорасли в рамките на хранителната индустрия. Това означава, че основните характеристики на продукта не могат да бъдат посочени ясно и продуктите се пускат на пазара като стандартни хранителни добавки.

Тамтюрк отбелязва, че вижда значителен потенциал за бъдещ растеж на продуктите на базата на макроводорасли в хранителния сектор и очаква най-силен растеж при веганските храни. Той подчертава, че през следващите 5–10 години макроводораслите ще намерят приложение в множество сектори – от медицински продукти до козметика и храни. С продължаването на работата върху нови видове и въвеждането на съответните регулации, подобни на тези в Източна Азия и ЕС, макроводораслите ще станат много по-разпространени в ежедневието.

Д-р Халим Айдън, съосновател на Ufuk Tarım – селскостопанска компания с лаборатория, която извършва акредитирани анализи на торове и произвежда химически, органични и органоминерални торове, регулатори на растежа на растенията и почвени подобрители – посочва, че в Турция няма специфична регулация относно водораслите, което създава затруднения при регистрацията на продукти. Той отбелязва, че при регистрация продуктите се вписват като органични торове, но тази класификация не доказва биодостъпността на водораслите и не позволява да се разкрие реалната стойност на продуктите, базирани на тях.

Айдън подчертава, че в сектора се наблюдават положителни промени, обусловени от фактори като климатичната криза и възхода на биологичното земеделие. Той добавя, че министерството в Турция обикновено реагира според пазарните изисквания и поради това не проучва, не закупува и не насърчава производството на продукти с висока биодостъпност – роля, която остава основно в сферата на частния сектор.

Според него са необходими промени в законодателството и регулаторната рамка, като водораслите и продуктите, произведени от тях, не бива да се класифицират в същата категория като органичните торове.

Той посочва, че PETIMORE основно предоставя консултантски услуги и поради това не се сблъсква с проблеми, свързани с доставките. За производителите обаче най-голямото предизвикателство е логистиката: продуктите се доставят от Далечния изток или Канада, което води до по-високи разходи и по-голям въглероден отпечатък.

Айсан подчертава, че секторът има значителен потенциал за растеж както на пазара на фуражи, така и на пазара на храни за човешка консумация. Той отбелязва, че макар в момента да няма много производствени съоръжения, работещи по истински мащабен индустриален модел, се очаква броят им да се увеличи през следващите пет години. Това би укрепило потенциала на сектора и би ускорило развитието му в тези области.

Според Еюл Ер, съосновател на PALGAE – компания, която разработва пластмасови суровини на базата на микроводорасли, произвежда биопластмасови гранули като основен продукт, предлага част от продуктите си под формата на прах и използва макроводорасли като съвместим агент в този процес – пазарът е отбелязал значителен растеж през последните години. Тя посочва, че климатичната криза е основният фактор, който стои зад този подем.

Ер отбелязва, че в момента няма достатъчно водорасли с необходимата плътност, за да се осигури стабилно снабдяване на индустрията, поради което започването на производство чрез контролирано отглеждане е наложително. Според нея най-силното предимство на Турция е именно климатът, който е подходящ за отглеждането на множество видове водорасли.

Тя посочва, че в момента водораслите се доставят от Виетнам, като най-голямото предизвикателство са въглеродните емисии, произтичащи от логистиката. Ер добавя, че доставките под формата на гранули могат да създадат проблеми със сертифицирането, което допълнително усложнява процеса.

Гледайки към бъдещето, Ер идентифицира нови области с висок потенциал за растеж на продукти на базата на макроводорасли, включително козметика, естествени пигменти, текстилни бои и оцветители за храни. Тя подчертава, че в хода на работата си PALGAE е сътрудничила с университетите „Мармара“, „Истанбул“, „Богазичи“ и Университета в Порто. Ер очаква употребата на макроводорасли да се увеличи значително през следващите 5–10 години, паралелно с разширяването на пазара на биопластмаси на базата на водорасли.

Фарук Тамтюрк, съосновател на Biorld Kimya, която работи върху формулирането на хранителни продукти на базата на водорасли, посочва, че компанията е активна в тази област от 2017 г. и че през последните три години се наблюдава значително увеличение на стартиращите компании, като особено голям напредък е постигнат в областта на омега-3 и протеините. Той отбелязва, че продуктите, получени от риба, могат да съдържат значителни количества тежки метали, докато макроводораслите представляват важен и по-чист източник на омега-3.

- подкрепа за участие в европейски фондове;
- предоставяне на кредитни и заемни механизми;
- насърчаване на проекти за публично-частно партньорство;
- укрепване на капацитета за образование и научни изследвания в университетите;
- провеждане на дейности за повишаване на потребителската осведоменост и популяризиране.

Бат посочва, че неговият екип провежда пилотни проучвания и че предстоят експерименти с торове (в твърда, течна и компостна форма) върху ягоди и марули, отглеждани в оранжерията на университетския кампус. Той отбелязва, че тези култури са избрани, защото са лесни за отглеждане и дават резултати за кратко време, и добавя, че се провеждат и предварителни проучвания върху биопластмаси.

В прогнозите си за бъдещето Бат подчертава, че следващите 5–10 години ще бъдат ключови за пилотните реализации. Според него Синоп може да се превърне в регионален производствен център в рамките на синята икономика и синия растеж. Ако бъдат осигурени регулаторни рамки и инвестиционна подкрепа, секторът може да се развие в значима индустрия в рамките на десет години.

В заключение, макроводораслите са от съществено значение за синята икономика. Те притежават висок здравен, екологичен и икономически потенциал. Освен че са екологично чисти продукти, макроводораслите играят важна роля в секвестрирането на въглерод, подобряването на качеството на водата и предоставянето на екосистемни услуги. Областите им на приложение са широки, поради което разработването на стандартизация трябва да бъде приоритет. Макроводораслите следва да бъдат изрично включени в законодателството, а предприемачеството в сектора трябва да бъде подкрепено чрез фондове и стимули. Чрез разширяване на пилотните проучвания Турция може да се позиционира като производствен център с регионално значение.

Емре Якуп Айсан, съосновател на PETIMORE – компания, която предоставя консултантски услуги, свързани с прехода от научни изследвания върху водорасли към производство за фуражната промишленост – посочва, че водораслите се използват във фуражите за риби като оцветители и подсилватели на вкуса, а в момента се провеждат проучвания, насочени към използването им и заради хранителната им стойност. Той отбелязва, че климатичната криза е най-важният фактор, който стимулира напредъка в тази област.

Айсан подчертава, че тъй като Турция се индустриализира сравнително късно, почвената и водната ѝ среда са по-чисти в сравнение с много други страни. Това означава, че голяма част от видовото разнообразие все още е запазено, а климатичните условия са изключително подходящи за отглеждането на множество видове водорасли.

Турция, заобиколена от три морета, разполага с разнообразие от видове макроводорасли по крайбрежието си.

Благодарение на развиващите се технологии и нарастващата ориентация към екологично чисти продукти, частните и публичните институции засилват усилията си в изследването на потенциалните приложения на макроводораслите. Академичните изследвания са фокусирани главно върху идентифицирането на видовете, екологичните характеристики и биотехнологичните приложения. Капацитетът за поглъщане на въглерод, потенциалът като алтернативен източник на храна и приложимостта им в екологично чисти продукти са сред силните страни на Турция в този сектор.

Превръщането на макроводораслите в крайни продукти все още е на ниво академични изследвания и не е достигнало търговски мащаб. За по-широкото внедряване са необходими значителни индустриални инвестиции и съвременни технологии. В момента Турция не разполага с необходимите инвестиции и технологична инфраструктура. Липсват установени регулаторни практики. Законодателството и обществената осведоменост са сред слабите страни на страната, но тези недостатъци могат да бъдат преодолени чрез подходящи регулации и повишаване на информираността.

По отношение на продуктите с по-висок търговски потенциал академичните проучвания показват, че червените водорасли са основен източник за производството на агар и карагенан и поради това се предпочитат като желиращи агенти. Кафявите водорасли се използват предимно за производство на биопластмаси, биогорива и торове, докато зелените водорасли – благодарение на високото си съдържание на протеини, витамини и минерали – се разглеждат като функционални храни и фуражни добавки. Въпреки че научните резултати и проекти в областта на макроводораслите в Турция се увеличават, те са концентрирани главно върху екологичен мониторинг и таксономия. В страни като Франция, Нова Зеландия и редица азиатски държави съществуват регулации, свързани с макроводораслите, докато в Турция липсва стандартизацията относно продуктите на тяхна основа.

Проф. д-р Левент Бат подчертава, че в Турция отглеждането на морски водорасли не е статистически установен подсектор; че почти цялото производство на макроводорасли в света се осъществява в азиатските страни; и че Турция изостава значително от държави като Норвегия, Франция и Испания по отношение на комерсиализацията. За да се създадат условия за развитие на сектора в областите на законодателството, инвестициите, предприемачеството и публичната политика, могат да бъдат предприети следните стъпки:

- съставяне на списък с видовете макроводорасли, които могат да бъдат използвани (например CEVA поддържа регулаторен списък от 25 вида);
- определяне на зони за отглеждане на морски водорасли в крайбрежните райони;
- стартиране на национални програми за финансиране и стимулиране (TÜBİTAK, KOSGEB);

Той смята, че секторът на макроводораслите ще отбележи значително нарастване на търсенето през следващите 5–10 години, тъй като продуктите вече са разпознаваеми от крайните потребители, а с увеличаването на търсенето ще се развие и инвестиционната екосистема. Освен това той отбелязва, че данъците върху въглеродните емисии ще подкрепят развитието на сектора.

Проф. д-р Левент Бат, преподавател във Факултета по рибарство на Университета в Синоп, провежда изследвания върху идентифицирането и екологичната стехиометрия на видовете макроводорасли, разпространени по крайбрежието на Синоп. Той е работил и по определянето на нивата на тежки метали в доминиращите макроводорасли в региона, както и върху оценката на тяхната използваемост като биомонитори. В изследванията си Бат се фокусира върху представители на кафявите водорасли от рода *Cystoseira* и върху зелените водорасли от рода *Ulva* (морска маруля). Проучванията включват сравняване на концентрациите на тежки метали, натрупани в тъканите на водораслите, с концентрациите на метали във водата и седиментите; оценка на тяхната пригодност като биомонитори; както и експерименти с торове и биопластмаси. Според Бат реализирането на проекти и академични изследвания е ключово за оползотворяването на макроводораслите, разпространени в Турция. В този контекст проектът MACRO CLEAN е от особено значение, тъй като е насочен към различни области на приложение на макроводораслите (торове и биопластмаси) и ще допринесе за развитието на сектора. Той подчертава, че Турция разполага с голям потенциал и че сътрудничеството между частния сектор и публичните институции е от съществено значение за неговото разгръщане.

Бат отбелязва, че съществува обществено предубеждение спрямо ядливите водорасли: поради външен вид, мирис и религиозни вярвания хората не ги предпочитат като храна. Въпреки постоянните усилия в тази област, това предубеждение остава пречка за маркетинга и по-широкото приемане на ядливите макроводорасли.

Макроводораслите са важни поглъщатели на въглерод, тъй като улавят значителни количества въглероден диоксид чрез фотосинтеза. Те предлагат естествено решение в борбата срещу климатичните промени и допринасят за намаляването на глобалните въглеродни емисии. Поради бързия си растеж макроводораслите могат да участват и в процесите, свързани с еутрофикацията. Превръщането на събраните макроводорасли в продукти като биопластмаси, торове и биогорива е иновативен подход, който през последните години излиза на преден план. Водораслите се считат за естествени, здравословни, функционални и иновативни храни. Благодарение на високото си съдържание на витамини, минерали и протеини те са ценна суровина, предпочитана особено в хранителната и козметичната индустрия.

Според проф. д-р Левент Бат в момента се наблюдава глобален преход към екологично чисти продукти. С нарастването на световното население изкопаемите ресурси се изчерпват бързо. Сравнително ниската цена на макроводораслите е основна причина те да се разглеждат като идеална суровина за устойчиво производство.

Той твърди, че технологиите за пречистване на базата на водорасли представляват решение с голям потенциал, което съчетава пречистването на отпадъчни води, подобряването на качеството на въздуха и производството на биоенергия в рамките на една екосистема. Този подход намалява въглеродния отпечатък, понижава натоварването на моретата, реките и подземните водни ресурси с отпадъчни води и позволява повторното използване на пречистената вода. Биомасата от водорасли, генерирана в този процес, може да бъде превърната в компост или използвана за производство на енергия чрез преобразуване в биогаз и биогорива. Като се имат предвид социалните и екологичните ползи, той заключава, че тези системи трябва да бъдат широко внедрени от общините и да бъдат подкрепени чрез съответното законодателство.

Доц. д-р Мурат Тели, преподавател в катедрата по биология в университета „Болу Абант Изет Байсал“, който провежда изследвания в областта на хранителната промишленост и работи върху производството на функционални храни с използване на микроводорасли и макроводорасли, заявява, че броят на компаниите, работещи с водорасли, е нараснал значително през последните пет години. Той отбелязва, че повечето от тези компании са малки предприятия или стартиращи фирми, и подчертава, че големите компании трябва да създадат гъвкави, мултидисциплинарни екипи, тъй като малките фирми не разполагат с необходимия капитал за подобни дейности. Поради това той смята, че е необходимо по-тясно сътрудничество между стартиращите компании и големите фирми.

По отношение на глобалните мегатенденции, стимулиращи развитието на сектора, Тели посочва, че интересът към водораслите се е увеличил след развитието, свързано с въглеродните емисии, като отбелязва, че 1 грам водорасли (сухо тегло) може да улови приблизително 5 грама CO₂, което ги поставя сред водещите решения в тази област. Той добавя, че нововъведените стимули в Турция са оказали положително влияние върху сектора. Тели подчертава, че климатичните условия в Турция са особено подходящи за отглеждане на различни видове водорасли, но като основна слабост посочва малкия брой специалисти, работещи в тази област. Според него много от страничните продукти и машините, използвани в производството – например реактори – се внасят от чужбина. Макар това да увеличава разходите, той смята, че ниската конкуренция може да се разглежда и като предимство. Друга слабост според него е, че инвеститорите не са достатъчно запознати с концепцията за инвестиции, базирани на научноизследователска и развойна дейност. Тели отбелязва, че спиролина и хлорела се открояват в сектора, особено в областите на храните, медицината и козметиката.

Сравнявайки научните постижения и проекти в Турция с международното ниво, Тели подчертава, че в страната работят малко академични специалисти и че липсата на мултидисциплинарни изследвания отслабва позициите на Турция спрямо международните примери.

Въпреки това той посочва, че подобно развитие все още не се наблюдава в сектори като хранително-вкусовата промишленост, строителството, материалите, компостирането и производството на енергия, като преходът от идеи към реализация се забавя най-вече поради тромавата и консервативна структура на строителния сектор.

По отношение на глобалните мегатенденции, стимулиращи развитието на приложенията, свързани с водораслите, д-р Саатчюглу подчертава, че градските приложения могат да бъдат изключително ценни и обещаващи в областите на пречистването на водата, пречистването на въздуха и производството на енергия. На ниво сгради и архитектура обаче приложението става по-трудно поради критерии като ефективност и високи първоначални капиталови разходи. Според него трансформацията на градската инфраструктура трябва да се осъществява постепенно, което би позволило реализирането на многоизмерни ползи на местно ниво. Той твърди, че подобни усилия биха могли да предотвратят използването на морета като Мраморно море като места за изхвърляне и натрупване на отпадъчни води. Саатчюглу подчертава, че цялостното планиране трябва постепенно да се превърне в подходи, специфични за всеки град и регион, и добавя, че възвръщаемостта на подобни инвестиции би била напълно оправдана.

Оценявайки силните и слабите страни на Турция в този сектор, д-р Саатчюглу отбелязва, че липсата на цялостно планиране на по-високо ниво, ниската осведоменост за потенциала на водораслите и недостатъчният брой квалифициран технически персонал представляват значителни предизвикателства. Той посочва, че нарастващото използване и мащабните приложения в чужбина са привлекли интереса на турските общини, което е довело до създаването на местни малки експериментални, наблюдателни и приложни басейни. Според него, при правилно насочване водораслите могат да имат висока търговска стойност, особено във фармацевтиката и козметиката. На градско ниво той добавя, че въпреки високите начални инвестиции и оперативни разходи, пречистването и производството на енергия чрез водорасли могат да бъдат икономически изгодни.

Саатчюглу отбелязва, че научните резултати и проекти в Турция остават ограничени и малки по мащаб, и че е необходима реализация на големи, мултидисциплинарни изследователски проекти. Той подчертава, че значителна част от инфраструктурата и инвестициите, необходими за големи пречиствателни системи, могат да бъдат финансирани чрез фондове за научноизследователска и развойна дейност и внедряване на Европейския съюз. Това обаче изисква изготвяне на планове, проекти и изследователски дейности чрез сътрудничество между публичния сектор, университетите и общините.

Според Саатчюглу създаването на съоръжения за производство на водорасли – особено в областите на компостирането, производството на енергия и пречистването на отпадъчни води – би позволило производството на диференцирани суровини, пригодени за различни функции и приложения в множество сектори.

Карагуле подчертава, че видове като *Gracilaria dura* и *Sargassum acinarium* са особено ценни за функционалните храни и смята, че секторът ще се развива в тази посока. Тя отбелязва, че чрез компанията, която е създадена в технопарк, се занимава с производство, но наблюдава, че то остава относително ограничено в сравнение с международните примери поради малкия брой академични специалисти и липсата на мултидисциплинарна работа. Карагуле прогнозира, че разнообразието на продуктите ще се увеличи, особено в областта на козметиката, и че водораслите ще се използват широко в хранителните добавки. Тя очаква също растеж в приложенията за пречистване на отпадъчни води, особено в областта на микроводораслите. Накрая тя подчертава, че най-големият проблем в областта на предприемачеството и публичната политика не е законодателството, а липсата на инвестиции, и смята, че механизмите за подкрепа трябва да бъдат укрепени като приоритет.

Проф. д-р Реджеп Котан, преподавател във Факултета по земеделие на Ататюркския университет, Катедра по растителна защита, чиято експертиза включва бактериология, контрол на насекоми и управление на растителни болести, и който поради това работи основно в областта на производството на микробни торове и биоpestициди, посочва, че значително количество морски водорасли се внася в Турция от чужбина и че тези водорасли се използват чрез смесване с други торове, прилагани в селското стопанство. Според Котан е важно да се има предвид, че в този сектор, движен от фактори като устойчивост и климатична криза, няма мащабно прекомерно събиране на диви ресурси, а отглеждането остава силно ограничено и е концентрирано предимно в Егейския регион. Той отбелязва, че Китай е показателен пример: там от дивата природа се събират около 261 000 тона водорасли, докато производството чрез отглеждане достига почти 14 милиона тона. Котан добавя, че в собствените си изследвания те обикновено използват *Clodielle* и *Spirulina*, като тези видове се прилагат основно за производство на микробни торове и биоpestициди. Сравнявайки научните резултати и проекти в Турция с международното ниво, той твърди, че страната не изостава значително в научните изследвания, но има сериозни пропуски в разработването на пазарно ориентирани продукти, получаването на патенти и интегрирането на научните резултати в индустрията. Той подчертава също, че регулаторната рамка, особено за пестицидите, може да бъде предизвикателна на етапа на лицензиране и регистрация на продукти. Проф. д-р Котан смята, че секторът на макроводораслите вероятно ще се развие значително през следващите 5–10 години, тъй като устойчивостта и климатичната криза остават ключови теми, а биологичното земеделие се разширява. Той подчертава, че този растеж ще бъде стимулиран основно от микробните торове и биоpestицидите.

Д-р Невзат Омер Саатчъоглу, преподавател в катедрата по архитектура в Истанбулския университет Gelişim, който е провеждал академични изследвания както върху микроводорасли, така и върху макроводорасли в рамките на широк спектър от проекти, отбелязва, че водораслите – използвани първоначално предимно за третиране и биоремедиация – започват да се прилагат все по-често от големите общини за пречиствателни цели.

Според д-р Кая силните страни на Турция в този сектор са богатите крайбрежни екосистеми, активните изследователски групи в университетите и младата предприемаческа екосистема. Тя подчертава, че липсата на регулаторна яснота (например биостимулаторите на базата на водорасли все още не са ясно дефинирани в регламента за органичните торове) и ограниченият интерес от страна на инвеститорите са сред основните слабости на сектора. В настоящата си работа екипът ѝ се фокусира върху екстракцията на полизахариди от кафяви водорасли (*Laminaria, Sargassum*).

Д-р Кая отбелязва, че алгинатите, извлечени от кафяви водорасли, имат висок търговски потенциал поради нарастващото им приложение в производството на покрития за семена. Тя подчертава, че Турция разполага със солидна академична база от знания и че изследователски проекти се провеждат активно по крайбрежието на Егейско и Черно море. Въпреки това броят на продукти, които достигат международните пазари, остава нисък. Макар Турция да е силна както по отношение на качеството, така и по отношение на количеството научни публикации, страната все още не е постигнала достатъчен напредък в превръщането на тези резултати в патенти и стартиращи предприятия. Сред ключовите стъпки за отключване на напредък в сектора тя посочва предоставянето на стимули за научноизследователска и развойна дейност за предприемачи, публична подкрепа за пилотни производствени съоръжения и укрепване на сътрудничеството между университетите и индустрията.

Д-р Кая отбелязва, че по-младите изследователи са по-отворени към предприемачество и проявяват интерес към стартиращи компании, занимаващи се с биоматериали на базата на водорасли и функционални храни. Тя смята, че новото поколение биотехнологични предприятия, възникващи в Турция, има потенциал да се разшири на европейския пазар и при подходящи условия да постигне успехи с висока добавена стойност. Според нея продуктите на базата на макроводорасли в Турция вероятно ще излязат извън рамките на нишовата изследователска дейност и ще се превърнат в по-широка търговска екосистема. Бърз растеж може да се очаква особено в областта на устойчивите опаковки, фуражите за животни и функционалните хранителни продукти, като публичните политики също ще подкрепят тази трансформация.

Според **Гюлай Карагюле, преподавател в катедрата по биология в университета „Болу Абант Изет Байсал“**, развитието на сектора на водораслите – както в микро-, така и в макромасщаб – се е ускорило през последните пет години пропорционално на добавената стойност, която създава. Тя посочва, че конкретно доказателство за този напредък е фактът, че както TÜBİTAK, така и министерството предоставят подкрепа в тази област. Карагюле отбелязва, че макар климатичната криза да оказва негативно влияние върху сектора, благоприятният климат в Турция представлява значително предимство. Тя добавя, че някои недостатъци – като ограничения брой академични специалисти и необходимостта от внос на множество продукти и машини, използвани в производството (например реактори) – забавят темпа на развитие на сектора.

ЧАСТ VI

Мнения за потенциалните области на приложение на продукти на базата на макроводорасли

Макроводораслите, наричани още морски водорасли, са многоклетъчни водни и фотосинтетични организми. Те са широко разпространени в океаните, особено в крайбрежните райони, където се прикрепят към скали и други твърди субстрати или съществуват като свободно живеещи форми. Като една от основните групи фотосинтетични организми в морската среда, макроводораслите намират широко приложение в различни области, особено в производството на храни и фармацевтични продукти. Благодарение на широкото им разпространение, лесния достъп и високата им ефективност при фиксирането на въглероден диоксид чрез механизъм за концентриране на въглерод, те могат да произвеждат значителни количества хранителни вещества и метаболити.

Макроводораслите могат да натрупват високи нива на биоактивни съединения чрез усвояване на азотни и фосфорни вещества по време на пречистването на отпадъчни води. Настоящият преглед разглежда разпространението на макроводораслите и техните уникални биоактивни приложения в хранителната, фармацевтичната и екологичната сфера. Функционалните им компоненти и биоактивни вещества са ценни за производството на храни и разработването на лекарства. Интегрирането на макроводораслите в процесите за пречистване на отпадъчни води и газове, съчетано с възстановяване на ресурси, би осигурило устойчив подход за производство на биоактивни съединения.

В този контекст се консултирахме с **д-р Мерве Кая, лектор в Техническия университет в Мюнхен**, която ръководи научноизследователски и развойни проекти за използване на макроводорасли като суровина за производство на биостимуланти. Тя подчертава, че в Европа водораслите се включват – пряко или непряко – в множество продукти, особено в рибни фуражи и торове, и че екстракцията е един от ключовите етапи при подготовката на водораслите за такива приложения. Д-р Кая отбелязва, че продукти от този тип вече се предлагат на пазара в различни страни, включително Канада, Китай, Япония и Тайланд, и че ако по време на комерсиализацията бъде постигнато извличане, подходящо за нуждите на сектора, потенциалът за развитие на клиентска база е висок.

По отношение на турския пазар д-р Кая посочва, че въпреки ранния етап на развитие на сектора на макроводораслите в Турция, интересът към него нараства бързо. Осведомеността се увеличава благодарение на университетските изследвания и малките предприятия. Основните движещи сили зад тази промяна включват стремежа към устойчивост и намаляване на въглеродния отпечатък, нарастващия интерес към здравето и функционалните храни, както и възходящата тенденция към кръгова икономика и биопластмаси.

Инвеститор	Страна	Фокус	Сектори	Описание
Boğaziçi Ventures	Турция	Иновативни предприятия	Дълбоки технологии, изкуствен интелект, финтех и агротехнологии.	Фокусира се върху дълбокотехнологични предприятия в Турция и може да прояви интерес към проекти в областта на аквакултурите или биотехнологиите.
Revo Capital	Турция	Технологични предприятия	B2B облачни услуги, изкуствен интелект, киберсигурност, финансови технологии.	Инвестира в технологични предприятия в Турция, Източна Европа и Балтийските държави.
Diffusion Capital Partners	Турция	Дълбоки технологии (Deep Tech)	Науки за живота, селскостопански технологии, енергетика и околна среда.	Инвестира в технологично интензивни стартиращи компании, които решават сложни проблеми - профил подходящ за биотехнологични проекти, свързани с макроводорасли.
Портьолио на ТЕВ	Турция	Биотехнологични фондове	Здравеопазване и биотехнологична индустрия.	Потенциален източник на финансиране за проекти, фокусирани върху фармацевтични и нутрицевтични приложения на макроводораслите

Област	Защо потенциалът е висок и какво е необходимо
Стратегии за пазарна реализация	Първите продукти могат да бъдат козметични съставки, селскостопански биостимуланти и хранителни добавки. Области като опаковки и биоматериали са свързани с високи технически бариери и изискват приемане от страна на потребителите.
Подкрепа на корпоративни и публични сътрудничества	Необходими са субсидии за научноизследователска и развойна дейност, сътрудничество между университети и индустрията, участие на морски изследователски институции, регулаторна подкрепа и разрешителни за крайбрежни дейности, включително екологични оценки.
Устойчивост и сертифициране	Фактори като въздействие върху околната среда, въглероден отпечатък, влияние върху биоразнообразието и безопасност на продуктите оказват пряко влияние върху инвестиционните решения.
Пазарна осведоменост	Местните потребители и индустрията трябва да бъдат по-добре информирани за устойчивите продукти от водорасли и биоматериалните алтернативи. Брандирането, образованието и комуникацията играят ключова роля.

Таблица 7: Избрани инвеститори в синята икономика (международни и турски)

Инвеститор	Страна	Фокус	Сектори	Описание
Hatch Blue	Ирландия	Устойчиви аквакултури	Регенеративна аквакултура, технологии за отглеждане, „син въглерод“, алтернативни морски продукти..	Една от най-активните компании в света в областта на „синята икономика“, която изрично подкрепя проекти, свързани с макроводорасли.
Фонд „Синя революция“	Ирландия	Аквакултури в ранен етап на развитие	Аквакултури, „син въглерод“, ферми за отглеждане на водорасли и миди.	Фонд, управляван от Hatch Blue, който инвестира с цел постигане на екологични и социални въздействия.

- **Revo Capital:** Този фонд инвестира в технологично ориентирани B2B и B2C предприятия и може да оценява иновативни приложения на макроводорасли, особено в аквакултурите и хранителните технологии.
- **Diffusion Capital Partners (DCP):** С мисията да инвестира в дълбоки технологии и предприятия, които „решават сложни проблеми“, той е подходящ кандидат за проекти в областта на биотехнологиите и биорафинерията на макроводорасли (BaseTemplates, 2025).
- **Корпоративни фондове и холдингови компании:**
 - **TEB Portfolio Health and Biotechnology Variable Fund (TBE):** Стратегията на фонда да инвестира в местни и чуждестранни компании в областта на здравеопазването и биотехнологиите предполага, че той може да бъде източник на финансиране за предприятия, фокусирани върху фармацевтични и нутрицевтични приложения на макроводорасли (TEB Portföy, 2025).
- **Други инвеститори:** Фондовете, споменати в доклад на KPMG, които инвестират в области като финтех и хранителни технологии (Kings Research, 2025), както и подразделенията за рисков капитал на холдингови компании като Alarko Ventures (BaseTemplates, 2025), могат да проявят интерес към иновативни бизнес модели в сектора на макроводораслите.
- **Публично и развойно финансиране:**
 - Инициатива за рисков капитал в Истанбул (iVCi): Създаден с подкрепата на ЕИФ, този фонд е допринесъл за развитието на екосистемата на рисковия капитал в Турция. Такива фондове, подкрепяни на международно ниво, биха могли да бъдат бъдещи канали за финансиране на проекти в областта на „синята икономика“.

Ако потенциален инвеститор обмисля участие в сектора на водораслите/макроводораслите в Турция, фокусирането върху следните области ще ускори този процес:

Таблица 6: Области, на които инвеститорите трябва да се фокусират

Област	Защо потенциалът е висок и какво е необходимо
Отглеждане/ферми Инфраструктура (морски и контролирани системи)	За да се гарантира доставката на висококачествена суровина, е необходимо да се оптимизират разходите за контролирано отглеждане, да се изберат подходящи видове и да се управляват сезонните колебания
Технологии за екстракция и преработка	Основните процеси включват изолиране на активни съединения (полизахариди, полифеноли и др.), отстраняване на замърсители и превръщане на суровината в стабилна продуктова форма. Този етап изисква значителни инвестиции в технологична експертиза и оборудване.

ЧАСТ V

Инвестиции в макроводорасли и финансови перспективи

Инвестициите в сектора на макроводораслите нарастват в световен мащаб като част т. нар. „синя икономика“ и „биотехнология“. Въпреки че в Турция все още не е създадена специална инвестиционна екосистема за тази област, приоритетните области на съществуващите фондове предоставят потенциални възможности за проекти, свързани с макроводораслите.

5.1. Глобални инвестиционни тенденции

През последните пет години инвестициите на рисков капитал в сектора на макроводораслите са запазили стабилно ниво между 112 и 118 милиона щатски долара през периода 2022–2024 г. Тези инвестиции показват преход от иновации в ранен етап към комерсиализация и мащабиране пазарно готови решения. Географското разпределение на инвестициите все още е концентрирано в Северна Америка и Европа, но е забележим ръстът в Азия.

5.2. Профили на големи международни инвеститори

Hatch Blue & Blue Revolution Fund: Този фонд, базиран в Ирландия, е глобална компания, фокусирана върху области като устойчиви аквакултури, регенеративно земеделие и решения за „син въглерод“. Инвестиционната стратегия на Blue Revolution Fund изрично включва инвестиции в проекти като „регенеративно отглеждане на водорасли и миди“. Заедно с партньори като Европейския инвестиционен фонд (EIF) и The Nature Conservancy, фондът възприема инвестиционен подход, който съчетава финансова възвръщаемост с въздействие върху околната среда.

Други международни компании: Въпреки че не са преки инвеститори в сектора, големите компании, които използват продукти на базата на макроводорасли, се открояват като потенциални бизнес партньори. Corbion произвежда AlgaPrime™ DHA, устойчив източник на омега-3 за животински фуражи. BASF, в партньорство с Acadian Plant Health™, е добавила биостимуланти, получени чрез екстракти от морски водорасли, към портфолиото си от селскостопански продукти. DSM-Firmenich използва производни на макроводорасли като карагенан в хранителни и нутрицевтични продукти.

5.3. Потенциални турски инвеститори

В Турция няма рисков капиталов фонд, който да е специално насочен към сектора на макроводораслите. Тази ситуация изисква от местните предприятия да съобразят своите бизнес модели с по-широки инвестиционни теми, за да привлекат инвеститори. По-долу е даден списък на потенциални местни инвеститори, които биха могли да инвестират в проекти, свързани с макроводорасли.

- **Фондове за рисков капитал:**
 - **Voğaziçi Ventures:** Фондът е фокусиран върху „дълбоки технологии“ и „устойчиви иновации“, той може да прояви интерес към проекти за макроводорасли в областта на биотехнологиите и агротехнологиите.

Потенциално водораслите могат да дадат гориво в няколко форми (Kröger & Müller-Langer, 2012): водораслова биомаса за изгаряне – директно или за сурова нефт за дизел, бензин, авиационно керосено (Lestari et al., 2009); биогаз чрез анаеробно разграждане (Zamalloa et al., 2011; Markou et al., 2013); биоводород; биоетанол чрез ферментация на въглехидрати (Matsumoto et al., 2003; Ho et al., 2013); директен биоетанол чрез фотосинтеза (Williams, 2009; Lü et al., 2011).

Алговото масло за течно транспортно гориво е основният фокус, включително усилия на компании като Algenol Biofuels (директен биоетанол от CO₂) и Joule Unlimited. Solazyme използва растителни захари за богати на масло водорасли.

Много водорасли натрупват мазнини (Banerjee et al., 2002), особено след стрес фаза с дефицит на хранителни вещества (Illman et al., 2000). Водорасловото масло съдържа триглицериди, терпеноиди, липиди, каротеноиди – енергиен капацитет 35 800 kJ/kg или 80% от петрола (Chisti, 2012).

То е богато на ненаситени мастни киселини и подходящо за производството на бензин, дизел, керосено с превъзходни тестове (Johnson & Wen, 2009). Пречки: високи енергийни входове, капиталови разходи за PBR, хранителни вещества, сложна екстракция.

Бъдещето зависи от създаването на концепция от типа “биорафинерия” за производството на протеини, въглехидрати, пигменти за добавки, козметика, храна – за компенсиране на разходите и конкуренция с петрола.

пространствената и времева изменчивост). Освен тези усилия за мониторинг, ЕС е постигнал напредък в разработването на числени модели, които могат да предоставят широка характеристика на екологичните променливи в европейските води.

4.3. Пречки пред процедурата за производството на гориво от водорасли

Суровият "нефт" от водорасли е произведен в различни пилотни мащабни съоръжения, но въпросът дали водорасловите горива могат да се произвеждат в достатъчни количества, за да изместят смислено петролните горива, е бил в голяма степен пренебрегнат. Ограниченията за производство на горива от водорасли трябва да бъдат разбрани и адресирани за бъдеща комерсиализация.

Горивата от водорасли са скъпи спрямо петролните горива, но това може да се промени. За съжаление, подобрена икономика на производството сама по себе си не стига за екологично устойчиво производство или мащабна осъществимост. Освен други ключови ресурси, производството на алгови горива изисква източник на концентриран въглероден диоксид.

Недостигът на концентриран въглероден диоксид е най-голямата пречка за производство на алгови горива в значителен мащаб. Устойчивостта на производството изисква разработване на способност за почти пълно рециклиране на фосфорните и азотните хранителни вещества, необходими за отглеждането на водорасли.

При достатъчно голям мащаб ограничената наличност на сладка вода би представлявало сериозно ограничение за производството, дори при използване на морски водорасли. За постигане на нетно положителен енергиен баланс са необходими процеси за възстановяване на енергия от останалата растителна биомаса след извличането на маслото.

Краткосрочните перспективи за широко разпространено използване на алгови горива не са окуражаващи, но за нишови приложения като авиационно гориво може да е възможно в средносрочен план. Генетичното и метаболитно инженерство на микроводораслите за увеличаване на добива на гориво и улесняване на възстановяването е задължително за комерсиализацията.

Дългосрочно водораслите ще трябва да бъдат генетично модифицирани за подобрена фотосинтетична ефективност. Водораслите са по-ефективни от висшите растения при преобразуването на слънчева светлина в биохимична енергия (Stephenson et al., 2011).

Зелените микроводорасли споделят същия основен фотосинтетичен механизъм като С3 растенията. Максималната фотосинтетична ефективност на С3 растенията под нормална атмосфера се оценява на 4,6% (Zhu et al., 2008), което означава, че 4,6% от слънчевата енергия се превръща в биомасова енергия.

На практика годишната средна ефективност рядко надвишава 2,4% (Zhu et al., 2008). Напротив, за водорасли в открита CO₂-обогатена култура годишната средна ефективност надхвърля 5%, а максимумът за диви видове достига 8,3% (Chisti, 2012).

Инвестициите в екологично чисто отглеждане на водорасли могат да осигурят достъп до продуктивни ресурси за бедни и уязвими хора, участие на жените в производството и потреблението на храна, свободно предприемачество за създаване на достойни работни места за мъже и жени, локален икономически растеж и овластяване на бедните и уязвими крайбрежни общности.

В момента аквакултурите с водорасли са предимно концентрирани в азиатски страни, с минимална активност другаде (Araújo et al., 2019; Araújo et al., 2021; Buschmann et al., 2017; Hughes et al., 2012). Отглеждането на водорасли в европейски води може да помогне на ЕС да достигне амбициозните си екологични цели, както са посочени в комплексни политики като Европейската зелена сделка (COM(2019) 640 final), въглеродна неутралност (ЕС, 2019), От масата до масата (COM(2020) 381 final) и предстоящия Закон за възстановяване на природата (COM(2022) 304 final). В момента 99% от производството на водорасли в ЕС разчита на добив на диви популации, докато глобално тенденцията е обратна – 99% идва от аквакултури (Vazquez-Calderon et al., 2022).

В светлината на тези съображения Европейската комисия (ЕК) насърчава отглеждането на водорасли в морските райони (COM(2021) 236 final). Въпреки това фундаменталните знания за потенциала на тази дейност в европейските води все още липсват. През ноември 2022 г. ЕК подчерта няколко предизвикателства и предложи действия, за да насърчи алговия сектор да стане устойчив, устойчив и регенеративен, способен да задоволи нарастващото търсене в ЕС (EU Algae Initiative COM(2022) 592 final). Сред ключовите проблеми са високите производствени разходи и ниското производство в мащаб, породени от липса на научни познания за потенциала за растеж в морските райони на ЕС (Araújo et al., 2019; COM(2021) final; van den Burg et al., 2016).

Капацитетът за отглеждане на водорасли зависи от екологични фактори, регулиращи темповете на растеж на различните видове. За да се оцени потенциалът на аквакултурите, е необходимо детайлно изследване на екологичните характеристики на морските райони на ЕС. До настоящия момент проучванията за потенциала на отглеждане на водорасли в европейските води са ограничени. Оценка на потенциала за аквакултури с водорасли беше извършена по 150 км крайбрежие в Скагерак на западното крайбрежие на Швеция (Thomas et al., 2019).

Серия от проучвания за потенциала на отглеждане на водорасли в Балтийско море бяха извършени с използване на моделирани екологични данни, за да се изчислят потенциалните темпове на растеж и капацитети за премахване на хранителни вещества (Kotta et al., 2022). Подобен подход, базиран на модели, преди това беше използван, за да се идентифицират потенциалните екологични въздействия от съществуващи съоръжения за водорасли в холандски и британски води (TÜDAV, 2020).

Въпреки това все още липсват комплексни оценки на ЕС мащаб за потенциала на отглеждане на водорасли. ЕС е инвестирал значително в мониторинг и изследвания, за да подобри разбирането на екологичните условия в морските райони и тяхната изменчивост. Въпреки това съществуващите данни все още са недостатъчни, за да предоставят цялостна картина на морските екологични променливи (включително

- Едно от основните ограничаващи фактори за пазара на макроводораслите са екологичните предизвикателства, свързани с отглеждането и добиването. Въпреки потенциалните ползи, индустрията е подложена на критика заради екологичните си въздействия. Например прекомерният добив на диви макроводорасли може да доведе до загуба на биологичното разнообразие.
- Според Организацията по храните и земеделието около 20% от глобалното производство на водорасли идва от добив на диви популации, което увеличава притесненията относно устойчивостта и здравето на екосистемите. Неустойчивите практики могат да нарушат морските местообитания и да повлияят на местните риболовни дейности, подкопавайки дългосрочната жизнеспособност на сектора на макроводораслите.
- Друг ключов ограничаващ фактор е конкуренцията от синтетични алтернативи. С нарастващото търсене на биологични продукти много индустрии също изследват синтетични заместители на макроводораслите. Например в хранителния сектор някои производители предпочитат лабораторно произведени съставки, които могат да имитират свойствата на естествените водорасли, без да носят притеснения за устойчивост.
- Анализът по-горе показва, че Турция се нуждае от стратегическа карта, която да съчетае силните си страни с глобалните възможности. Секторът може да се разрасне чрез устойчиви методи като ИМТА, като използва съществуващата инфраструктура на аквакултурите, и да преодолее разходните предизвикателства, фокусирайки се върху продукти с високо качество.

4.2. Принос на отглеждането на макроводорасли

С нарастващото човешко население постигането на Целите за устойчивото развитие (ЦСД) на ООН навреме и в мащаб, и осигуряването на необходимите трансформационни промени изисква нови стратегии. Особено е необходимо да се идентифицират нови биологични ресурси, които могат да се отглеждат устойчиво с минимални изисквания за земеделска земя, вода и енергия; които подпомагат нетното производство на здравословна храна за хора и животни, отглеждана на суша и в морето; които подкрепят устойчива и рентабилна енергия; и които осигуряват екологично безвредни, устойчиви материали, като същевременно създават положителни ефекти върху биологичното разнообразие и околната среда.

Отглеждането на морски водорасли е устойчив метод на аквакултури, който може значително да допринесе за постигането на ЦСД. То има потенциал да адресира цели, свързани с изкореняване на бедността, хранителна сигурност, действия срещу климатичните промени, както и устойчиво потребление и производство. Отглеждането на водорасли генерира множество екосистемни услуги, които предоставят директни ползи за напредъка на редица ЦСД.

- **Интеграция в селскостопанския сектор:** Нарастващите цени на торовете и тенденциите към органично земеделие създават възможност за локален пазар на биоторове и биостимулатори на базата на макроводорасли (Mersin University IT Department, 2024).
- Държавните инициативи за насърчаване на устойчивите аквакултури и управление на морските ресурси също подкрепят пазара на макроводораслите. През 2021 г. ЕС стартира стратегия „Синя икономика“, насочена към подкрепа на устойчивото използване на океанските ресурси и насърчаване на отглеждането на водорасли. Тази инициатива съответства на целта на ЕС за постигане на кръгова икономика и стимулира инвестициите в макроводораслите.
- Освен това страни като Южна Корея и Япония са въвели регулации, подкрепящи добива и преработката на водорасли, признавайки потенциала им за хранителна сигурност и справяне с екологични предизвикателства.
- Инвестициите в научни изследвания и разработки за иновативни техники на отглеждане и преработка повишават ефективността на производството на макроводорасли. Иновации в аквакултурите – като автоматизирани системи за прибиране и напреднало управление на хранителните вещества – правят отглеждането на макроводорасли по-устойчиво и доходно. Това създава нови възможности за производителите и допринася за разрастването на пазара.

Заплахи

- **Замърсяване на околната среда:** Водното замърсяване от промишлени отпадъци увеличава разходите за отглеждане на макроводорасли и негативно влияе на качеството на продуктите.
- **Конкуренция от синтетични алтернативи:** В някои сектори предпочитането на лабораторно произведени синтетични съставки пред продукти на базата на макроводорасли представлява потенциална заплаха.
- **Риск от неустойчиво добиване:** Неконтролираното или прекомерно добиване на диви водорасли може да доведе до загуба на биологичното разнообразие и деградация на екосистемите.
- Регулаторните предизвикателства също попречват на растежа на пазара. Различните страни имат различни регулации относно добива и преработката на макроводорасли, което може да усложни международната търговия. Например в Европейския съюз строги правила по Директива „Рамкова стратегия за морето“ целят да гарантират устойчивото използване на морските ресурси.
- Съответствието с тези регулации може да е разходно и времеемко за производителите. Разходите, свързани с изпълнението на тези стандарти, могат да попречат на малките компании да навлязат на пазара и по този начин да ограничат общото развитие на сектора.

региони като Чанаккале, които имат характерни разлики в солеността (Scispace.com, 2024).

- **Напреднал сектор на аквакултурите:** Съществуващата и бързо развиваща се инфраструктура на аквакултурите осигурява солидна основа за интегрирано отглеждане на макроводорасли (IMTA) (TÜDAV, 2020).
- **Академичен и институционален интерес:** Текущите дейности свързани с макроводорасли в университети и институции като Министерството на земеделието и горското стопанство, както и организирани семинари, показват съществуваща база от знания и интерес към сектора (Mersin University Department of Information Technologies, 2020).
- Импортно-износните динамики на макроводораслите също са важни фактори. Големи производители като Китай, Индонезия и Южна Корея доставят големи количества макроводорасли на пазарите в Северна Америка и Европа.
- През 2020 г. глобалната стойност на износа на морски водорасли беше около 11 милиарда щатски долара, като значителна част от това идва от азиатски страни. С нарастващото търсене на продукти на базата на водорасли на западните пазари тези страни увеличават производствените си мощности, което води до допълнителен растеж на износа.

Слаби страни

- **Липса на комерсиално производство:** Въпреки академичните и пилотни проекти, мащабното комерсиално отглеждане на макроводорасли все още не е започнало в Турция.
- **Високи разходи и липса на инфраструктура:** Високите разходи за отглеждане и експлоатация са глобален проблем и представляват бариера за навлизане на сектора в Турция. Инфраструктурата и оборудването, необходими за мащабни морски ферми, все още не са разпространени.
- **Липса на специфична правна рамка:** Въпреки общата регулация на аквакултурите, отсъствието на политики, специфични за отглеждането на макроводорасли и предназначени да го стимулират, може да попречи на бързия растеж на сектора.

Възможности

- **Нарастащо глобално търсене на пазара:** Бързо нарастващото глобално търсене на продукти на базата на макроводорасли – като храни, лекарства и козметика – създава значителен потенциал за износ за Турция (Seaweed Market Share and Statistics, 2024).
- **Синият икономически растеж и инвестиции, фокусирани върху устойчивост:** Приносът на сектора към смекчаване на климатичните промени (син въглерод) и възстановяване на околната среда привлича нови средства и инвеститори, които съчетават финансови доходи с екологично въздействие.

- Неясноти в пазара и търсенето — Осъзнаването сред потребителите, индустриалното търсене, доставките на суровини и логистиката все още не са ясно установени; независимо от целевата категория продукти (храна, козметика, земеделие, фураж, биоматериали), все още трябва да се изгради солидна пазарна стратегия.
- Умения и липса на знания — Ограничен международен опит, възможности за трансфер на технологии, запознаване със национални/международни стандарти и методи за контрол на качеството.

4.1.3. Инвестиционен и предприемачески потенциал в Турция

В Турция инвестициите в отглеждането на водорасли и сектора на морските водорасли са набрали скорост през последните години. В този сектор нараства броят на производствените обекти и на инициативите, работещи в тази област, които наскоро са засилили дейността си и подкрепени от привлеченото чуждестранно финансиране са започнали дейности, насочени към различни индустрии.

Таблица 5: Ключови стартиращи предприятия за макроводорасли в Турция

Риск	Описание
SeaWean	Базирано в Турция предприятие, произвеждащо екстракти от морски водорасли. Компанията подчертава амбицията си да се превърне в „кандидат за глобално лидерство“.
Palgae	Биоматериал със съдържание на морски водорасли за селскостопански покрития: разработване на прототип на продукт на базата на водорасли.
Градината на Кибела	Градината на Кибела е едновременно доставчик на технологии и доставчик на продукти на пазара.

В Турция, в областта на макроводораслите / морските водорасли / биотехнологиите с водорасли:

- **Текущи възможности:** Предимства като природни ресурси, климат, научна инфраструктура и посока на публичните политики, насочени към устойчивост.
- **Текущи пропуски:** Обем на инвестициите, технологичен капацитет, мащаб, регулаторна яснота и доказателства за пазарен интерес и бизнес модел.
- **Възможни роли за първи инвеститори:** Държавни институции (напр. TÜBİTAK), частни капитали от инвеститори, фокусирани върху устойчивост, и индустриални партньорства (козметика, селско стопанство, хранителна промишленост).

Силни страни

- **Географско и екологично разнообразие:** Турция е в изгодна позиция за отглеждане на макроводорасли благодарение на различните морски екосистеми и

ЧАСТ IV

Възможности, препоръки и оценка

4.1. Стратегически възможности за Турция и SWOT анализ

4.1.1. Силни страни / Възможности

- Обширно крайбрежие и биологично разнообразие — Крайбрежията на Егейско, Средиземно и Черно море осигуряват солидна основа за обитаване на широк спектър от водорасли/макроводорасли.
- Климат и природни условия — Достъпът до соленоводна среда, слънчевото облъчване и подходящите температурни режими създават благоприятни условия за биологично производство.
- Съществуващ биотехнологичен и академичен потенциал — Университетите разполагат със съответни катедри (биология, морска биология, биотехнологии), лаборатории и действащи изследователски проекти.
- Повишаващ се интерес и обществено осъзнаване — Разбирането за морското замърсяване, микропластмасите и устойчивостта нараства, а наративи като „преработка на водораслите в икономически план“ стават все по-популярни.
- Екосистема за предприемачество и грантови схеми — Институции като TÜBİTAK, Регионалните агенции за развитие и Министерството на индустрията и технологиите проявяват нарастващ интерес към подкрепа за изследвания, развитие и устойчиви технологии.

4.1.2. Слабости и ключови ограничения. Структурни бариери

- Ограничени инвестиции и проблеми с първоначалното финансиране — Има ограничена видимост относно наличието на сравними инвестиционни случаи за стартъпи, фокусирани върху водорасли, в Турция спрямо чужбина. Наблюдаваните инициативи са предимно на етап на прототип или остават малки по мащаб.
- Производствени разходи и липса на ефект от мащаба — Изходите от прототипи и биомасови решения обикновено са скъпи; мащабирането е ограничено от високите разходи за преработка, сушене и достъп до пазара/логистика.
- Технологични и инфраструктурни пропуски — Опитът остава ограничен в ключови области като контролирани системи за отглеждане (офшорни и крайбрежни), технологии за екстракция и стандарти за качество.
- Регулаторна и разрешителна несигурност — Регулациите могат да са дълги и фрагментирани, включително разрешителни за морски площи, процедури за оценка на въздействието върху околната среда, правила за защита на биологичното разнообразие и авторизации за използване/събиране.

Тази вариабилност подчертава важноста на избора на подходящи видове за биомониторинг, тъй като различните макроводорасли проявяват различна афинитет към конкретни метали (Bat et al., 2009).

По-подробният анализ на тези констатации помага да се изясни пространственото разпределение на замърсителите и ефективността на всеки вид като биоиндикатор за конкретни тежки метали, като по този начин допринася за по-нюансирано разбиране на моделите на замърсяване по южното крайбрежие на Черно море. Тази сравнителна оценка подчертава необходимостта да се отчитат специфичните за всеки вид съображения в програмите за биомониторинг, тъй като различните макроводорасли могат да проявяват различен афинитет към биоаккумуляция на различни метали (Rakib et al., 2021).

Важно е също да се отбележи, че фактори на околната среда като температура и соленост могат да повлияят значително на степента на биоаккумуляция на тежки метали в макроводораслите (Signa et al., 2020). Освен това морфофизиологичните характеристики като повърхност и темпове на растеж, могат да играят по-решаваща роля в биоаккумуляцията на метали отколкото само идентичността на вида (Rakib et al., 2021). Освен това комбинираните ефекти на тези физикохимични и биологични фактори изискват по-нататъшни изследвания, за да се разбере по-добре тяхното взаимодействие върху усвояването и задържането на метали в морските макроводорасли, като по този начин се подобри тяхната полезност като надеждни биоиндикатори. Бъдещите изследвания трябва да се фокусират върху контролирани експериментални условия, за да се изолират ефектите на отделните променливи на околната среда и характеристики на водораслите върху натрупването на метали.

3.3.3. Бяло море (Русия)

Заливът Колвица в залива Кандалакша е недостатъчно проучена област на Бяло море. Теренните проучвания бяха проведени между 15 и 21 юли 2016 г. в междуприливната и подприливната зона (с помощта на водолазно оборудване). Общо бяха регистрирани петдесет вида макроводорасли: 9 *Chlorophyta*, 18 *Phaeophyceae* и 23 *Rhodophyta*; бяха докладвани първите регистрации на *Choreocolax polysiphoniae* и *Coccotylus hartzii* в залива Кандалакша (Mikhaylova et al., 2017).

Зоната на червените водорасли се простира от 7 м до 17–18 м дълбочина, където бяха изследвани моделите на зонирание с голямо разнообразие и фитоценозите. Общността *Odonthalia dentata* (7–8 м) включва 31 вида водорасли (биомаса $282,1 \pm 37,6$ г/м²; височина на растителността 20 см), като *Coccotylus truncatus* и *Polysiphonia stricta* са субдоминантни. Общността *C. truncatus* (8–9 до 11–12 м) включва 35 вида ($157,4 \pm 92,2$ г/м²; височина 10 см). Общността *C. truncatus*–*P. rubens* (11–12 до 14–15 м) включва 26 вида ($41,9 \pm 1,1$ г/м²; височина 5–6 см), с *Euthora cristata* като вторично доминиращ вид; ограничен брой червени кортикални варовикови водорасли се срещат на 15–18 м. Записани са 32 вида епифитни водорасли; вторичните прикрепвания към изправените листа на *P. stricta* предполагат специфична адаптация за закрепване, а *C. truncatus* може да е вид, образуващ консорциум в долната фотосинтетична зона, тъй като биомасата на епифитите може да бъде сравнима с биомасата на бентосните водорасли.

Загрижеността относно замърсяването с микроелементи в морската среда е широко разпространена от десетилетия, особено поради факта, че човешките дейности включително туризмът, могат да отделят значителни количества токсични метали (Bat et al., 2009), което предизвиква загриженост сред обществото (Signa et al., 2020). Тези замърсители произхождащи от промишлени процеси, селскостопански отпадъчни води и градски отпадъчни води нарушават крехкото равновесие на екосистемата на Черно море (Bat et al., 2018) и представляват значителен риск както за морската биота, така и за човешкото здраве (Bat & Arici, 2018). Черно море получава значителни количества замърсяване от сушата, предимно чрез реките. Освен това замърсяването се генерира по крайбрежието от морския транспорт, промишлените дейности и изтичането на общински отпадъчни води (Bat et al., 2018). Следователно проучванията за биомониторинг с използване на макроводорасли като *Ulva* и *Gongolaria* (по-рано *Cystoseira* spp.) са от съществено значение за оценка на степента на биоакумулация на тежки метали (Bat et al., 2021; Nunes et al., 2023) и за разбиране на свързаните с това екологични въздействия в този чувствителен регион (Neshovska et al., 2021; Rakib et al., 2021).

Многобройни проучвания са доказали ефективността на макроводораслите като надеждни биоиндикатори на замърсяване с тежки метали, благодарение на тяхната неподвижна природа и висока способност за биоакумулация (Bat et al., 2021; Rakib et al., 2021). Тази характеристика позволява на макроводораслите да отразяват концентрациите на тежки метали в околната водна среда за продължителни периоди, което ги прави ценни инструменти за мониторинг на околната среда (Rakib et al., 2021). По-специално, кафявите макроводорасли проявяват висока сорбционна способност, което им позволява да интегрират и концентрират значителни количества от околните замърсители, което ги прави особено полезни за проследяване на замърсяването с метали (Aboal et al., 2022). Този процес на биоакумулация се задвижва от физиологични механизми, които улесняват усвояването и задържането на метали от водния стълб дори при ниски концентрации в околната среда (Bat et al., 2021; Nunes et al., 2023). Следователно, анализирането на концентрациите на метали в тези организми може да предостави точна представа за биодостъпността на замърсителите и екологичното им въздействие в морските екосистеми (Aboal et al., 2022).

Родът *Ulva* в частност, е известен с изключителната си способност да акумулира олово като го концентрира до хиляда пъти повече от околната среда, което подчертава неговата полезност като биоиндикатор за този метал (Filippini et al., 2020). От друга страна, *Cystoseira* spp. са показали променлива способност за биоакумулация на тежки метали, повлияна от фактори като хидродинамични условия и наличието на епифити (Nunes et al., 2023). Междувидовата вариабилност в натрупването на тежки метали в различни таксони на макроводораслите, включително *Chlorophyta* и *Phaeophyta*, допълнително усложнява преките сравнения и изисква специфични за всеки вид анализи, за да се отрази точно замърсяването на околната среда (Peng et al., 2022; Nunes et al., 2023).

Топловодните средиземноморски и тропически зелени и червени макроводорасли (например *Ceramium*, *Polysiphonia*, *Laurencia*, *Ulva* и *Chaetomorpha*) и кафяви водорасли (например *Sargassum* и *Cystoseira*) са основните инвазивни таксони. Днес най-голямото видово разнообразие се наблюдава по крайбрежието на Крим и Турция на Черно море, като списъкът с видове за турското крайбрежие се различава значително от всички други проучени региони на Черно море. Водораслите, принадлежащи към топоводния комплекс, отбелязаха най-силно увеличение в Черно море през 90-те и 2000-те години; доминират видове от бореално-тропически и субтропически произход. За разлика от това, подобна тенденция не е наблюдавана в Азовско море или Каспийско море, въпреки че е регистрирано разширяване на местообитанията на зелените водорасли в соленоводни басейни.

Черно море е полу-изолирано от Средиземноморския соленоводен басейн, чиято хидрология и концентрации на фитобентос се различават от тези на другите морета в същия регион. Токсичните елементи се пренасят чрез замърсители във въздуха, реки, нефтено замърсяване или директно изхвърляне на промишлени отпадъци в морето. Микроелементите се пренасят от морските течения, произхождащи от Дунав и други реки. Екологичните условия в крайбрежните райони са много разнообразни, което води до вариране на концентрациите на елементи в водораслите в зависимост от множество фактори, включително вид, географско местоположение и сезон.

Зелените макроводорасли се използват широко за мониторинг на морското замърсяване в различни географски региони. Те са разпространени по българското Черноморие, а някои видове (*Ulva rigida*, *Enteromorpha intestinalis*, *Cladophora vagabunda*) се срещат почти във всички райони, поради което са подходящи за сравнителна оценка на концентрациите на замърсители в различни места. Видовете зелени макроводорасли са използвани като биоиндикатори в Черно море и в други морски среди на съседните морета. Въпреки, че изследователите са измерили концентрациите на микроелементи в зелените водорасли в Черно море, данните за тежките и токсични метали по крайбрежната зона на България остават ограничени и недостатъчни.

Отглеждането на макроводорасли има голям потенциал в плитките и защитени крайбрежни райони на Черно море, особено по части от бреговете на Турция, Румъния, България и Грузия.

Макроводораслите се отглеждат, като се прикрепят към въжета и мрежи поставени вертикално или хоризонтално в морето. Бързорастящите видове като *Ulva* и *Enteromorpha* могат лесно да се отглеждат, като се възползва от богатите на хранителни вещества крайбрежни води на Черно море. В райони където видове като *Cystoseira* се срещат естествено в големи количества, могат да се прилагат контролирани методи на събиране за да се избегне увреждане на екосистемата. Тези видове са важни поради високото си съдържание на йод и алгинати.

Решаването на проблема със замърсяването в Черно море изисква многостранен подход включващ разработване на екологично съобразени препоръки и стратегии за мониторинг и контрол на качеството и прилагане на иновативни технологии за намаляване на въздействието на замърсителите (Shypotilova et al., 2021; Shchiptsov & Goncharov, 2023). Освен това, усъвършенстваното пречистване на отпадъчните води може да спомогне за минимизиране на компромисите между икономическата дейност и замърсяването, а оценката на риска е от решаващо значение за ограничаване на въздействието на биологичните опасности в региона (Strokal et al., 2023; Rată & Rusu, 2020).

Макроводораслите в Черно море – особено зелените и кафявите видове – представляват значителен интерес поради потенциалните им приложения в редица индустрии, включително фармацевтичната, козметичната, тъканното инженерство, превръзките за рани и системите за доставка на лекарства (Sirbu et al., 2020; Cadar et al., 2022; Roşioru, 2024). Тези водорасли са богати на биоактивни съединения, като полифеноли с антиоксидантно и антибактериално действие. Биохимичният състав на *Ulva lactuca* и други видове макроводорасли, включително *Gongolaria barbata*, се влияе от условията на околната среда и физиологичното състояние, което от своя страна влияе на потенциала им за използване (Cadar et al., 2022; Roşioru, 2024). Например, общото съдържание на полифеноли и антиоксидантният капацитет на *Ulva lactuca* могат да варират в зависимост от метода на екстракция и специфичните условия на морската среда (Cadar et al., 2022). В Черно море разпространението и изобилието на *Ulva lactuca* и *Gongolaria barbata* (понастоящем известна като *Cystoseira barbata*) се влияят от множество фактори, включително промени в крайбрежните местообитания и антропогенни натиск като развитието на туризма. Проучвания на генетичното разнообразие на *Ulva lactuca* също са установили вариации в приливно-отливната зона и са подчертали необходимостта от усилия за опазване (Hayati & Rahly, 2024). Използването на биомаса от *Ulva lactuca* и *Gongolaria (Cystoseira) barbata* за извличане на биоактивни вещества зависи от чистотата на съединенията, която е тясно свързана със състоянието на морската екосистема (Sirbu et al., 2020; Cadar et al., 2022; Roşioru, 2024). Опростени профили на антиоксидантните съединения могат да бъдат установени чрез полуколичествени тестове, което подчертава важността на отчитането на мястото и времето на пробовземане. Като цяло, потенциалът за оползотворяване на видове като *Ulva lactuca* (Sirbu et al., 2020; Cadar et al., 2022) и *Gongolaria barbata* (Roşioru, 2024) е висок поради техните биохимични свойства, което ги прави подходящи кандидати за биотехнологични приложения.

Настоящият списък на видовете макроводорасли (с изключение на Charales) в южните морета на Русия включва общо 478 вида: 362 вида в Черно море, 46 вида в Азовско море и 70 вида в Каспийско море. В сравнение с данните от преди 30 години, списъкът на видовете се е увеличил с приблизително 30 % (като по-голямата част от увеличението се дължи на 96 вида, регистрирани в Черно море).

3.3.1. Китайска народна република — сектор на макроводораслите

Както в много части на света, в Китай се наблюдава нарастващ интерес и интензивни усилия в областта на научноизследователската и развойна дейност както по отношение на съществуващите, така и на нововъзникващите продукти от микроводорасли и макроводорасли — от висококачествени специализирани продукти (като утвърдени храни за човешка консумация) до по-нискокачествени стоки (като фуражи и горива). Този интерес се дължи на националните цели за намаляване на емисиите на CO₂ от изкопаеми горива — особено от въглищни електроцентрали — както и на търсенето на „зелена“ енергия и продукти, които могат да се произведат без използване на прясна вода.

В същото време китайската индустрия за производство на водорасли се сблъсква с по-неотложни предизвикателства, сред които общественото възприятие за здравословността на храните на базата на водорасли и високите производствени разходи, които ограничават както вътрешния, така и международния пазар.

3.3.2. Черноморски басейн

Черно море е силно замърсено в резултат на човешки дейности като морски операции, селско стопанство и промишленост, което е повлияло на режима и характеристиките на водите му (Novac et al., 2020; Shyptilova et al., 2021). Тези дейности са довели и до увреждане на граждански и промишлени съоръжения, причинявайки замърсяване на околната среда в Украйна, особено по водните пътища на Черноморския басейн (Shchiptsov & Goncharov, 2023).

Значението на замърсителите в Черно море е значително, като съществена част от морските отпадъци, свързани с морските дейности, произхождат от региона (Novac et al., 2020). Освен това слабият воден обмен и недостатъчната вертикална циркулация в Черно море допълнително утежняват проблема със замърсяването (Novac et al., 2020). Замърсяването в Черно море има сериозно въздействие върху екосистемата и качеството на водата. Например, унищожаването на граждански и промишлени съоръжения в резултат на въоръжения конфликт в Украйна допринесе за замърсяването на околната среда в басейна на Черно море (Shchiptsov & Goncharov, 2023). Освен това се очаква в бъдеще да се увеличат емисиите от точкови източници, като хранителни вещества, микропластмаси, Cryptosporidium и триклозан, произхождащи от 107 реки, вливащи се в Черно море, което подчертава необходимостта от координирани международни усилия за минимизиране на замърсяването (Strokal et al., 2023).

Турските провинции по крайбрежието на Черно море – като Трабзон, Самсун и Зонгулдак – допринасят значително за регионалното замърсяване, предимно чрез селското стопанство и промишлеността (Akkoynlu, 2018). За да се защити морската среда, са необходими ефективни стратегии за мониторинг и контрол на качеството на водата, както и внедряване на иновативни технологии за намаляване на въздействието на замърсителите.

Критерии	Китай	Япония	Норвегия	Турция
Ключови фактори	Продоволствена сигурност, „син въглерод“, национални планове за развитие.	Дълбоко вкоренени традиции, опазване на околната среда.	Устойчивост на аквакултурата, екологични технологии.	Академичен интерес; търсене на решения, основани на природата, за високите разходи за производствени ресурси (напр. торове).
Политически фокус	Конкретни и интегрирани държавни политики, включително финансова подкрепа.	Държавни субсидии за възстановяване и мониторинг.	Интегриране в политиката за аквакултури и технологични стимули.	Общи правила за аквакултурите; схеми за подкрепа на научноизследователска и развойна дейност на базата на проекти.
Значими постижения	Мащабно производство; разработване на морски ферми.	Възстановяване на намаляващите водораслови легла.	Интегриране на макроводорасли в системите за отглеждане на риба.	Академични изследвания и пилотни инициативи.
Основни пропуски	Замърсяване на крайбрежието; пропуски в правната/регулаторната рамка.	—	—	Липса на производство в търговски мащаб; липса на специална национална стратегия.

3.3. Пречки пред настоящото производство и търговска дейност

Въпреки нарастващия интерес в академичните среди и политическите среди, развитието на сектора на макроводораслите в Турция все още не се е превърнало в мащабно търговско производство. Съществуващите инициативи остават относително малки по мащаб и са локални. Например, в Сейдикемер е създадена оранжерия за водорасли за производство на хранителни добавки. По същия начин, водораслите, събрани в Ялова, са превърнати в тор от общината и се използват в оранжерии.

Тази ситуация показва наличието на празнина между „знанието и действието“ в Турция по отношение на превръщането на потенциала на макроводораслите в мащабна търговска дейност. За разлика от световните лидери, в Турция все още не е изготвена конкретна интегрирана и дългосрочна национална стратегия за сектора. Това подчертава необходимостта от изграждане на по-силни връзки между академичните изследвания, политическите цели и търговското приложение.

**Таблица 4: Сравнителен преглед на сектора на макроводораслите:
Турция срещу световните лидери**

Критерии	Китай	Япония	Норвегия	Турция
Състояние на пазара	Световен лидер; доминиращ производител и потребител.	Традиционен потребител; пионер в индустриалните приложения.	Развиващ се пазар, интегриран в по-широк сектор на аквакултурите.	Нововъзникващ пазар; производството в търговски мащаб все още не е започнало.
Подход към отглеждането	Морско отглеждане и интензивно производство.	Комбинация от традиционни и съвременни методи, с акцент върху възстановяването.	Интегрирани системи като част от ниско трофичните аквакултури.	Академични проекти и малки инициативи за оранжерии.

ЧАСТ III

Настоящо състояние на сектора на макроводораслите в Турция и избрани екосистеми

Турция разполага с благоприятни условия за отглеждането на макроводорасли благодарение на дългото си крайбрежие, географското си положение и потенциала си за биоразнообразие. Въпреки това, този потенциал все още не е превърнат в мащабна търговска дейност.

3.1. Изследвания и развитие (ИР)

В Турция се провеждат научни изследвания върху макроводораслите. По-специално се отбелязва, че региони като Чанаккале, с геоморфоложки и солеви вариации могат да предлагат възможности за отглеждане на много икономически ценни видове водорасли. Един пример е проект, реализиран в залива Мерсин, за производство на биоторове чрез ферментация от определени естествено срещани се видове макроводорасли. Този проект проучва потенциалното използване на макроводораслите в органичните селскостопански практики. На правителствено ниво също се наблюдава нарастващ интерес към сектора. Министерството на земеделието и горите, в сътрудничество с ФАО, организира семинар на тема „Алтернативни фуражи за месоядни риби в аквакултурите и отглеждането на макроводорасли“. Това събитие събра различни заинтересовани страни — като фуражната промишленост, академични среди и политици — за да обсъдят бъдещето на сектора.

3.2. Политика и правна рамка

В Турция разрешителните за аквакултури се издават като се вземат предвид фактори като екологичната чувствителност и туристическият сектор. Нормативната рамка включва относително високи стандарти за опазване на околната среда. Общите правила за аквакултурите определят конкретни правила и изисквания за издаване на разрешителни за дейности по събиране на диви организми и преработвателни съоръжения.

Налични са и механизми за подкрепа на научноизследователската и развойна дейност. Съветът за научни и технологични изследвания на Турция (TÜBİTAK) предоставя схеми за подкрепа на МСП на базата на проекти. В рамките на Програмата за подкрепа на инвестициите в развитието на селските райони на Министерството на земеделието и горите се предоставят безвъзмездни средства в размер до 50 % за закупуване на машини и оборудване. Тези инструменти за подкрепа биха могли да насърчат инвестициите в инфраструктурата, необходима за отглеждането на макроводорасли.

Въпреки тези предизвикателства, се очаква ползите за климата и околната среда от отглеждането на водорасли да спомогнат за ускоряване на растежа на нововъзникващите пазари. Тъй като интересът към „зелените“ продукти продължава да нараства, много разработчици на продукти са посочили, че разчитат на премии за устойчивост за да поддържат рентабилността си.

В момент в който глобалните ресурси все повече се изчерпват, е особено важно да се използват по най-добрия възможен начин ресурси като морските водорасли, които могат да се възстановяват бързо и потенциално да допринесат за регенерацията на екосистемите.

2.1.4. Съединени Американски щати

Въпреки, че секторът на макроводораслите в САЩ все още е в етап на развитие, той е сред растящите сегменти на аквакултурите.

Подкрепа за научноизследователска и развойна дейност и инфраструктура: Правителствени агенции като Националната океанска и атмосферна администрация (NOAA) подкрепят сектора, като провеждат изследвания относно изискванията за местоположение, проектиране на ферми и най-добри практики за управление, с цел да се даде възможност за разширяване на отглеждането на макроводорасли по икономически и екологично устойчив начин.

Фигура 3: Размер на търговския пазар на морски водорасли в Азиатско-тихоокеанския регион, 2019–2032 г.



Източник: Fortune Business Insights, 2024 г.

За да реализира напълно пазарния потенциал на водораслите, секторът ще трябва да преодолее няколко фундаментални предизвикателства. Най-значителното ограничение е наличността на водорасли - по отношение на обема, постоянството на доставките и качеството. С развитието на допълнителни области на приложение на водораслите могат да възникнат и ценови натиск и регулаторни бариери.

2.1.1. Китайска народна република

Китай е безспорен лидер в отглеждането на макроводорасли, а доминиращата му позиция в тази област се дължи на дългосрочни и интегрирани публични политики. В съответствие с целите си за осигуряване на продоволствена сигурност и защита на морските ресурси, китайските лидери подчертават важността на мобилизирането както на сухоземните, така и на морските ресурси.

- **Стратегия за морско животновъдство:** Китай е пионер в концепцията за „морско животновъдство“, която превръща морските райони в управлявани подводни ферми. Отивайки отвъд конвенционалните аквакултури, тази концепция се стреми да създаде екосистеми, които подкрепят възстановяването на морското биоразнообразие. През 2024 г. един-единствен град – Шанвей – инвестира повече от 279 милиона долара в изграждането на осем такива морски животновъдни обекта.
- **Политики за „син въглерод“:** Китай подчерта потенциала на „синия въглерод“ за подкрепа на целта си за постигане на въглеродна неутралност до 2060 г. Правителството създаде различни механизми за финансова подкрепа, за да насърчи проектите за „син въглерод“, включително отглеждането на макроводорасли, и подкрепя участието на частния капитал.

2.1.2. Япония

В Япония използването на макроводорасли има дълга история, която датира от 4-ти век. Политиката на Япония разглежда този сектор не само като икономическа дейност, но и като част от културното наследство и здравето на екосистемата.

- **Възстановяване и опазване:** Японската агенция по рибарство е въвела политики за възстановяване на намаляващите водораслови легла (isoyake). Публикувани са насоки, които позволяват на рибарите сами да планират и реализират възстановяването на водорасловите легла. Тези усилия за възстановяване на водорасловите легла се подкрепят чрез схема за публични субсидии, а за наблюдение на състоянието на водорасловите легла се използват нови технологии (например безпилотни летателни апарати – дронове).

2.1.3. Норвегия

Норвегия е световен лидер в аквакултурите (особено в отглеждането на сьомга) и интегрира сектора на макроводораслите в съществуващата си инфраструктура.

- **Интегриран политически подход:** Норвежкият парламент изрично подкрепя мерките в рамките на политиката за аквакултури за „разширяване на ниско трофичните аквакултури, включително отглеждането на макроводорасли“. Този политически подход е съгласуван с програми за стимулиране, като например новата програма за екологични технологии, които имат за цел да намалят въздействието на рибовъдството върху околната среда и да разработят стратегия за кръгова икономика.

Според нов анализ на Световната банка за десет нововъзникващи пазара на водорасли, секторът на водораслите може да достигне 11,8 милиарда долара до 2030 г. Въпреки тази прогноза, голяма част от добавената стойност в бизнеса с водорасли остава неизползвана. Извън настоящите пазари, секторът има потенциал за диверсификация и добавяне на стойност. Според доклад на Световната банка, публикуван през 2016 г., увеличаването на отглеждането на морски водорасли с 14 % годишно би довело до 500 милиона тона (сухо тегло) до 2050 г. и до 10 % увеличение на предлагането на храни, генерирането на доходи и качеството на живот. Отглеждането на морски водорасли остава концентрирано в ограничен брой страни, доминирани от Източна и Югоизточна Азия.

В източноазиатските страни събирането и използването на водорасли за храна и лекарства датира от поне 1500 години. Съвременното аквакултурно отглеждане на водорасли в Източна Азия е установено в Корея, Япония и Китай между 50-те и 70-те години на миналия век. Оттогава то се разраства бързо и фермите за водорасли придобиват популярност и в други региони по света. През 2020 г. страните извън Азия са произвели по-малко от 2 % от общия обем на отглежданите водорасли. Въпреки това перспективите за разширяване на производството на водорасли в други части на света остават обещаващи. Страните от Източна и Югоизточна Азия продължават да произвеждат най-голямата част от отглежданите водорасли в световен мащаб; Китай, Индонезия, Филипините, Северна и Южна Корея, Япония и Малайзия представляват приблизително 98 % от общото производство. През 2019 г. 98 страни изнасят макроводорасли (909 млн. щатски долара) и хидроколоиди (1,74 млрд. щатски долара), като печелят общо 2,65 млрд. щатски долара. Според базата данни Comtrade на ООН износьт на макроводорасли и свързани с тях продукти през 2019 г. генерира приходи от износ, както е показано в таблица 3.

Таблица 3. Износ на водорасли и хидроколоиди на базата на водорасли, 2019 г.

Страни	USD (милиона)
Китай	57
Индонезия	329
Република Корея	320
Филипини	252
Чили	209
Испания	145
Франция	124
Съединени щати	102
Германия	82
Обединено кралство	78

Източник: Birleşmiş Milletler Comtrade Veri Tabanı, 2019

Прогнозира се, че дългосрочните нововъзникващи пазари за фармацевтични продукти и строителни материали ще достигнат 1,4 милиарда щатски долара, въпреки че се очаква да продължат значителните регулаторни предизвикателства и високите разходи за разработване на продуктите.

Пазарът на макроводорасли отбелязва значителен растеж във всички региони, като Азиатско-тихоокеанският регион (APAC) се очертава като доминиращ, с приблизително 43% от глобалния пазарен дял, оценен на 4,9 милиарда щатски долара. Това силно присъствие на пазара може да се свърже с нарастващото осъзнаване от страна на потребителите за ползите за здравето и устойчивите практики, което води до все по-широкото използване на макроводорасли в храните, фармацевтични продукти и биогорива.

Очаква се разширяване на пазара в Северна Америка, благодарение на нарастващото търсене на естествени добавки за храни и увеличаващите се инвестиции в биотехнологии на базата на водорасли. Прогнозира се, че пазарът на макроводорасли в Северна Америка ще достигне 1,8 милиарда долара до 2025 г., като ще нараства с 9,3% CAGR. Европа следва отблизо, като се характеризира със силен пазар на биопластмаси и биоторове, произведени от макроводорасли.

В Близкия Изток и Африка, въпреки, че пазарът остава слабо развит, се наблюдава забележима промяна към устойчиви селскостопански практики, което води до нарастващ интерес към приложенията на макроводораслите. В Латинска Америка растеж се наблюдава особено в страни като Бразилия и Чили, където отглеждането на макроводорасли се интегрира в местните икономики.

2.1. Политически рамки и механизми за подкрепа в водещите страни

Световните лидери в сектора на макроводораслите разглеждат тази област като стратегически и национален приоритет. Подходът на всяка страна се определя от нейните икономически, социални и екологични цели.

Азиатски страни като Китай, Филипините, Индонезия, Япония и Корея са сред водещите региони, където макроводораслите се отглеждат ефективно в търговски мащаб в световен план. Производителността на водораслите, доминирана от пет основни рода/вида (*Undaria*, *Pyropia*, *Gracilaria*, *Eucheumatoids*, *Saccharina*), се е увеличила от 10,6 милиона тона през 2000 г. до 35 милиона тона през 2020 г. Докато отглеждането на *Phaeophyceae* (3,1–16,4 милиона тона) и *Rhodophyta* се разшири (1–18,3 милиона тона), производството на *Chlorophyta* морски водорасли намаля (3,1–1,7 милиона тона). Повече от 95 % от световното производство на макроводорасли се пада на *Laminaria saccharina* (35,4 %), *Carpathococcus/Eucheuma* (33,5 %), *Gracilaria* (10,5 %), *Porphyra/Pyropia* (8,6 %) и *Undaria* (7,4 %). Производството на водорасли в Европа достигна 287 033 тона, което представлява приблизително 0,8 % от общото световно производство през 2019 г.

ЧАСТ II

Сравнителен анализ: световни лидери и Турция

Секторът на макроводораслите (търговски водорасли) отбеляза значителен растеж през последните години и заема все по-важно място в световната икономика. Към 2024 г. стойността на световния пазар на търговски водорасли се посочва с различни цифри в различните източници, но всички те сочат значителният размер на пазара. Според Fortune Business Insights (2024) пазарът е оценен на приблизително 12,7 млрд. щатски долара през 2024 г. и се очаква да достигне 22,82 млрд. щатски долара до 2034 г., като расте с 6 % CAGR.

Друг пазарен анализ показва, че размерът на пазара е бил 17,14 млрд. щатски долара през 2023 г. и 18,39 млрд. щатски долара през 2024 г., като се прогнозира, че той ще се увеличи до 34,56 млрд. щатски долара до 2032 г., с CAGR от 8,20 %. Разликите между тези цифри отразяват факта, че секторът все още не е напълно зрял и, че методологиите за събиране на данни все още не са напълно стандартизирани. Това от своя страна е показател за новия и динамичен характер на сектора. Според неотдавнашен доклад на Световната банка, нововъзникващият световен пазар на морски водорасли има потенциал да се увеличи до 11,8 млрд. щатски долара до 2030 г. Тази пазарна стойност е свързана не само с капацитета на морските водорасли да абсорбират въглерод но и да поддържат морското биоразнообразие както и да отключват вериги на стойност.

Докладът „Глобални водорасли: нови и нововъзникващи пазари“ (2023 г.) анализира търговските възможности за приложения на пазара на водорасли с висок потенциал за растеж. Докладът предоставя информация за предприемачи, инвеститори и политици, за да помогне на сектора на водораслите да реализира потенциала си както сега, така и в бъдеще. Днес по-голямата част от отглежданите морски водорасли се използват или за директна консумация от човека, или като прясна храна в аквакултурите. В бъдеще продуктите на базата на морски водорасли биха могли да заменят изкопаемите горива в сектори като текстилната и полимерната промишленост, да позволят улавянето на въглерода и да генерират доходи за уязвимите крайбрежни общности. Тъй като настоящият пазар се доминира от няколко азиатски страни, които произвеждат 98 % от отглежданите морски водорасли, съществуват значителни възможности за растеж в много други региони.

Докладът се фокусира върху десет относително нови и нововъзникващи приложения на морски водорасли, които имат най-големи пазарни възможности извън утвърдените сектори. В краткосрочен план се очаква най-обещаващите нововъзникващи пазари, включително биостимуланти, фуражи за животни, храни за домашни любимци и добавки за намаляване на метана, да достигнат 4,4 милиарда долара до 2030 г.

Средносрочните възможности, като хранителни добавки, алтернативни протеини, биопластмаси и тъкани, могат да достигнат потенциална стойност от 6 милиарда щатски долара.

Макар, че терминът „син въглерод“ традиционно се отнася за мангровите гори, морските водорасли и солените блата, той все по-често се разширява включвайки и макроводораслите, тъй като те също се признават за потенциално значим принос към глобалните климатични цели.

1.8.3. Биоремедиация и подобряване на качеството на водата

Макроводораслите могат да подобрят качеството на водата, като поглъщат излишните хранителни вещества като азот и фосфор по време на растежа си. Когато са налични в прекомерни количества, тези хранителни вещества могат да предизвикат вредни цъфтежи на водорасли и да намалят нивата на кислород в морските води. Фермите за макроводорасли могат да спомогнат за намаляване на концентрациите на хранителни вещества в съседните води и по този начин да помогнат за предотвратяване на образуването на хипоксични „мъртви зони“.

Макроводораслите могат също да абсорбират тежки метали и други крайбрежни замърсители, действайки като биологична гъба. Макроводораслите, отглеждани за тази цел, не трябва да се консумират като търговски продукти, а трябва да се използват единствено за подобряване на здравето на екосистемата. Такива ферми предлагат значителен потенциал за проекти за биоремедиация, особено в крайбрежни райони, замърсени от промишлени отпадъци.

1.8.4. Екосистемни услуги и възстановяване

Макроводораслите играят важна екологична роля, като осигуряват местообитание и хранителни ресурси за морския живот. За да се подпомогне възстановяването на намаляващите глобално гори от водорасли, все по-често се прилага подход, наречен „възстановителна аквакултура“. При този подход отглеждането на макроводорасли се използва за създаване на подслон и среда за хранене на търговски риби и други морски организми.

Тези ползи за околната среда пренасочват интереса към сектора на макроводораслите отвъд стоките пазари. Решенията, основани на океана, често носят множество съпътстващи ползи, като възстановяване на екосистемите, абсорбция на въглерод и създаване на работни места. Тези многопластови стойностни предложения привличат нова категория инвеститори фокусирани върху синята икономика, които вземат предвид не само финансовата възвръщаемост, но и измеримото въздействие върху околната среда и обществото. В резултат на това секторът на макроводораслите все повече се позиционира като област за дългосрочни и устойчиви инвестиции.

Проучванията които разглеждат ролята на заинтересованите страни, обсъждат значението на механизмите за приобщаващо управление на устойчивото развитие (Howard, 2018). Сближаването между синята икономика и управлението на екосистемите се свързва и по-специално с подхода на екосистемното счетоводство, като се обръща внимание на екологичните основи на синия растеж (Häyhä & Franzese, 2014; Lillebø et al., 2017). Синята икономика набляга на всеобхватното планиране и координираното развитие между морската екосистема и икономическата система на океаните и крайбрежните зони. Като имаме предвид тези характеристики, ние дефинираме синята икономика като устойчиво производство, услуги и всички свързани с тях дейности, които използват и съхраняват крайбрежните и морските ресурси. При това съществуват многобройни предизвикателства, които засягат всички сектори на икономиката — от частния сектор и промишлеността до научноизследователската и развойна дейност, от неправителствените организации до правителствените политики. Тази сложност представлява както възможности, така и пречки.

На 8 юни 2018 г. различни морски индустриални паркове и бази в региона на делтата на река Яндзъ подписаха споразумения за осъществяване на регионално стратегическо сътрудничество. Стратегическото сътрудничество на морските индустрии в делтата на река Яндзъ включва пет парка и бази в Нантонг, Жоушан, Шанхай, Пудун и Нинбо.

Създаването на тези паркове и бази има два основни фокуса:

- *Засилване на индустриалното сътрудничество:* цялостно управление на индустриалните проекти и ресурси с цел улесняване на избора въз основа на нуждите; създаване на сервизни функции за насочване на изпълнението на проектите; насърчаване на плавното прехвърляне на морската промишленост в рамките на региона и развитието на индустриални клъстери.
- *Задълбочаване на сътрудничеството в областта на научните иновации и развитието на таланти:* насърчаване на колежи и институции, научни институти и предприятия да създават съвместни институции за научноизследователска и развойна дейност и общи центрове за трансфер на технологии; осигуряване на комуникация и интеграция при привличането на таланти в областта на морските науки; създаване на съвместни механизми за обучение и развитие на таланти; и установяване на общи критерии за признаване на таланти (Държавен съвет на Китай, 2014 г.).

1.8.2. Потенциалът на синия въглерод за справяне с климатичните промени

Макроводораслите са изключително ефективни в абсорбирането на въглероден диоксид от океана. Само въз основа на биомасата си, те могат да абсорбират повече парникови газове, отколкото морските треви, мангровите дървета и бракичните блата, които са известни със способността си да съхраняват въглерод. Това означава, че фермите за макроводорасли биха могли да помогнат за справянето с местните климатични въздействия, като например окисляването на океаните.

В отговор на това се провеждат изследвания върху нови подходи за екстракция, като например мокри методи на обработка, които позволяват обработка без предварително сушене. Тези иновации имат потенциал да намалят производствените разходи и да понижат въздействието на индустрията върху околната среда.

1.8. Ролята на макроводораслите в синята икономика

Секторът на макроводораслите предлага не само икономически потенциал, но и редица екологични и социални ползи, които попадат в концепцията за синята икономика. Тези ползи позиционират отглеждането на макроводорасли като нещо повече от индустриална дейност, а като стратегическа област, която може да допринесе за здравето на планетата.

1.8.1. Синя икономика

От началото на 21 век концепцията за „синята икономика“ става все по-популярна. Международната общност предлага синята икономика да обхваща три икономически форми:

- икономика, която се занимава с глобалната криза на водата (McGlade et al., 2012),
- икономика на иновативно развитие (Pauli, 2009) и
- развитие на морската икономика (Behnam, 2012).

Научни изследвания показват, че литературата за синята икономика се фокусира върху теми като устойчиво развитие, екосистемни услуги, управление и секторна трансформация. В този контекст моделите на синята икономика се разглеждат като насочени към преминаване от недостиг към изобилие на ресурси и към промяна на преобладаващите модели на производство и потребление, които създават екологични проблеми (Kathijotes, 2013). За да се подкрепи синият растеж в крайбрежните райони, се препоръчва разработването на инструменти за управление, основани на подход, съобразен с екосистемните услуги (Mulazzani et al., 2016). По същия начин дългосрочният устойчив син растеж в морския сектор е свързан с модели на управление, основани на сътрудничество, приобщаване и доверие (Soma et al., 2018). Проучванията, фокусирани върху пространственото измерение на синия растеж, също подчертават стратегическото значение на планирането и разпределението на пространството, като изтъкват потенциалните ограничения за растежа в морската индустрия (Van den Burg et al., 2019).

В литературата по управление и управление на устойчивото развитие подходът към устойчивото развитие се приема като основа. В този контекст е разработена концептуална рамка за оценка на устойчивото управление на морските ресурси (Keen et al., 2018). Освен това е предложен модел за управление на синия растеж, който подчертава необходимостта от съвместни усилия на заинтересованите страни за насърчаване на синия растеж и постигане на целите за устойчиво развитие (Sarker et al., 2018).

сладководни ресурси, каквито са необходими за сухоземното земеделие. Водораслите, окачени на дълги въдици, могат да достигнат дължина от 10 метра или повече, преди да бъдат събрани през пролетта. Този подход може да доведе до високи добиви от сравнително малка площ.

- **Интегрирана мултитрофична аквакултура (ИМТА):** Този подход включва съвместното отглеждане на различни видове – като риба, миди и макроводорасли – в една и съща система. Макроводораслите абсорбират излишните хранителни вещества (азот и фосфор), произхождащи от отпадъчните потоци на други видове, подобрявайки качеството на водата и подпомагайки цялостната устойчивост на екосистемата. Този интегриран модел може да повиши икономическата рентабилност, като същевременно донесе ползи за околната среда.

1.7.1. Биотехнология и подобряване на сортовете

Биотехнологията и подобряването на щамовете са от голямо значение за дългосрочното развитие на сектора на макроводораслите. Въпреки това, за разлика от микроводораслите, технологичният напредък в тази област все още е в ранен етап. При микроводораслите инструменти за генетично редактиране като CRISPR/Cas9 са били успешно използвани за подобряване на промишлено значими характеристики, включително съдържанието на липиди и пигменти. В контраст с това, приложението на тези инструменти при макроводораслите все още не е достатъчно проучено, а наличните данни не предоставят подробна информация за това как промишлените характеристики на макроводораслите могат да бъдат подобрени чрез генно инженерство.

Понастоящем основният подход, използван за подобряване на щамовете на макроводораслите, се основава на конвенционално селекционно развъждане и разработване на стабилни сортове чрез идентифициране и разпространение на желани характеристики от диви популации. Това показва наличието на критична технологична празнина за устойчивото развитие на отглеждането на макроводорасли. Преодоляването на тази празнина подчертава важноста на инвестициите в биотехнологии и генетични изследвания за максимизиране на бъдещия потенциал на сектора.

1.7.2. Биорафинерия и преработка

Разработването на биорафиниращи процеси е от решаващо значение за повишаване на икономическата стойност на макроводораслите. Тези процеси имат за цел да произвеждат множество висококачествени продукти на принципа на нулевите отпадъци чрез фракциониране на биомасата на основните ѝ компоненти (например протеини, въглеhidрати, липиди), които след това могат да бъдат оползотворени чрез различни продуктови потоци.

Обработката на макроводорасли обаче е свързана със значителни предизвикателства. Сушенето на събраната биомаса е енергоемък процес, който увеличава както разходите, така и въздействието върху околната среда.

Таблица 2: Основни метаболити на макроводораслите и промишлени приложения

Клас метаболити	Основни източници	Основни промишлени приложения
Полизахариди	<i>Rhodophyta</i> (червени водорасли), <i>Phaeophyceae</i> (кафяви водорасли)	Храни (сгъстяване, желиране), фармацевтични продукти (доставяне на лекарства), биотехнологии, биогорива
Протеини	Различни видове, особено червени водорасли	Храни (растителни протеини), фуражи, хранене
Фенолни съединения	<i>Phaeophyceae</i> (кафяви водорасли)	Антиоксидант, противораков, антимикробен козметика (против стареене)
Пигменти (каротеноиди, фикоцианини)	Различни видове	Натурални оцветители за храни, козметика, хранене (хранителни добавки)
Минерали и витамини	Различни видове	Храни (хранителни добавки), фуражи, биотор

Тези разнообразни приложения показват, че макроводораслите не са само първичен продукт, но и суровина за интегрирана биорафинерия, позволяваща производството на множество висококачествени продукти от една и съща биомаса. Този подход е в съответствие с модела на кръговата икономика, при който се използва цялата суровина и се подкрепя целта за нулеви отпадъци (Adarshan et al., 2023).

1.7. Технологии за отглеждане и преработка

Секторът на макроводораслите се развива от традиционните практики на събиране към съвременни техники за отглеждане, базирани на аквакултури. Тази трансформация има за цел да подобри ефективността, да намали разходите и да подкрепи екологичната устойчивост.

Съвременни техники за отглеждане

- **3D океанско земеделие:** Техника, която позволява мащабно производство чрез използване на цялата водната колона на морската вода, без да са необходими земя и

Биостимулантите на базата на макроводорасли могат да ускорят растежа на културите, да повишат толерантността към абиотичен стрес, като суша и соленост, и да подобрят усвояването на хранителни вещества. Турски проект проведен в университета в Мерсин, проучи производството на биоторове от местни видове макроводорасли и тяхното въздействие върху марулята, като подчерта потенциала на страната в тази област. Използването на такива местни и естествени торове може да предложи по-рентабилна опция при нарастващите разходи за суровини, като същевременно подкрепя практиките на биологичното земеделие.

г. Приложения с висока добавена стойност

Приложенията с най-висока добавена стойност за макроводораслите са в индустрии като фармацевтичната и козметичната.

- **Фармацевтични продукти и нутрицевтици:** Макроводораслите съдържат биоактивни съединения с антиоксидантни, противоракови, антимикробни и антидиабетни свойства. Тези съединения се считат за естествена и устойчива алтернатива на синтетичните лекарства и показват потенциал в лечението или управлението на различни заболявания. Някои съединения, като карагенаните, са показали противоракова активност и могат да генерират синергични ефекти, когато се комбинират с конвенционални лекарства.
- **Козметика:** Натуралните, биосъвместими и възобновяеми съединения, извлечени от макроводорасли, набират популярност в грижата за кожата. Те се използват в овлажняващи кремове, продукти против стареене, формули за избелване на кожата и продукти за грижа за косата (Размер на търговския пазар на морски водорасли, 2024 г.).
- Материалите от водорасли, приготвени под формата на паста, прахове или брашна, се предпочитат в центровете за таласотерапия поради съдържанието им на минерали (калций, магнезий, натрий, калий), микроелементи (желязо, мед, цинк, манган) и витамини (Turan, 2007). Според данни, способността на агарът да образува гел е приблизително десет пъти по-висока от тази на желатина, което подкрепя широкото му използване в микробиологичните изследвания и фармацевтичната промишленост (Yilsay et al., 2001).
- Благодарение на високата си способност за задържане на вода, компонентите, извлечени от морски водорасли, се използват и при приготвянето на суспензионни смеси, съдържащи сулфамат (Güner & Aysel, 2006).
- Агар-гелове се използват и в различни продукти, като парфюмирани кремове за подмишниците, слънцезащитни кремове и дерматологични кремове, съдържащи цинков оксид или пеницилин.
- Проучванията показват, че алгинатите, използвани в кремовете, могат да осигурят охлаждащо и освежаващо усещане на кожата благодарение на ефекта на бързото изпаряване.

1.6. Верига на стойността на макроводораслите и основни приложения

1.6.1. Търговски и промишлени приложения на макроводораслите

Макроводораслите са се превърнали в стратегически ресурс в много индустрии – не само в хранителния сектор – благодарение на тяхната хранителна стойност, биоактивни съединения и бързи темпове на растеж. Това е позволило на макроводораслите да бъдат все по-често разглеждани като универсална платформа за биорафиниране.

а. Сектор на храните и напитките

Макроводораслите отдавна се използват за директна консумация по целия свят, особено в азиатската кухня. Видове като нори (*Porphyra* spp.), вакаме (*Undaria pinnatifida*) и комбу (*Laminaria japonica*) са основни съставки в продукти като суши, салати, сосове и подправки. Освен традиционното си приложение, макроводораслите все повече се разглеждат като богат източник на функционални храни и растителни алтернативи. Макроводораслите са богати на протеини, диетични фибри, витамини, минерали и полиненаситени мастни киселини (PUFA), които са от съществено значение за човешкото хранене. С нарастващата популярност на веганските и вегетарианските диети, макроводораслите се използват все по-широко за разработване на растителни алтернативи на протеините.

Едно от най-значимите промишлени приложения на макроводораслите в хранителния сектор е производството на хидроколоиди (агар, алгинат и карагенан). Тези съединения се използват като естествени добавки зажелиране, съгъстяване, стабилизиране и емулгиране в широк спектър от храни, включително сладолед, конфитюри и печива.

б. Фуражи за животни и аквакултури

Макроводораслите придобиват все по-голямо значение в сектора на фуражите за животни като устойчива алтернатива на конвенционалната рибна храна и рибеното нефт. Тези съставки могат да осигурят омега-3 мастни киселини, които са от съществено значение за храненето на животните, като по този начин се намалява зависимостта от риболова. Използването на брашно от морски водорасли като фуражна добавка, започната в Норвегия през 60-те години на миналия век, е пример за ранна иновация в тази област. Освен това проучвания сочат, че включването на определени видове морски водорасли във фуража за животни в съотношение около 1 % може да намали емисиите на метан от едрия рогат добитък. Този потенциал за смекчаване на въздействието върху климата също позиционира сектора като важен в контекста на действията за борба с изменението на климата.

в. Биостимуланти и биоторове

Екстрактите от макроводорасли се използват в селското стопанство като биоторове и почвени подобрители, благодарение на съдържанието си на макро- и микроелементи. Тези добавки могат да подобрят физикохимичните свойства на почвата и да стимулират полезна микробна активност.

С увеличаването на здравната и екологичната осведоменост на потребителите, нараства и търсенето на устойчиви източници на храна. Макроводораслите, особено морските водорасли, се считат за съставки с висока хранителна стойност, които могат да подобрят както вкуса, така и ползите за здравето на растителните продукти. Макроводораслите са богати на витамини, минерали и антиоксиданти. Например, червените макроводорасли като нори съдържат високи нива на витамин В12, който често липсва в веганските диети. Този хранителен профил е в съответствие с нарастващото търсене на функционални храни.

Според проучване, публикувано в International Journal of Food Science, консумацията на водорасли може да подобри здравето на червата и да укрепи имунната система. Тази осведоменост подтиква все повече производители да включват макроводорасли в своите продукти.

1.5.3. Мерки за подкрепа от страна на правителството

Правителствата активно насърчават отглеждането и консумацията на макроводорасли като част от целите си за устойчивост. Зеленият пакт подчертава значението на морските ресурси за постигането на климатичните цели. ЕС планира да инвестира 1 милиард евро в устойчиво аквакултури, с конкретен акцент върху отглеждането на макроводорасли. Тази инициатива има за цел да насърчи местното производство, да намали зависимостта от вносни продукти и да подобри продоволствената сигурност.

1.5.4. Технологични постижения

Последните технологични постижения подобряват ефективността на отглеждането и преработката на макроводорасли. Иновации като автоматизирано събиране на реколтата и усъвършенствани техники за аквакултури улесняват производството на висококачествени макроводорасли в големи количества. Например, партньорството между Университета на Южна Калифорния и норвежката компания Ocean Farming има за цел да разработи устойчиви практики за отглеждане, които биха могли да увеличат добивите с до 50 %. Тези разработки не само подобряват икономическата жизнеспособност на отглеждането на макроводорасли, но и намаляват въздействието върху околната среда.

Друга тенденция е нарастващото използване на макроводорасли в екологични опаковъчни решения. Тъй като замърсяването с пластмаса се превръща в глобален проблем, компаниите преминават към биоразградими алтернативи. Материалите, получени от макроводорасли, предлагат устойчива алтернатива на конвенционалните пластмаси, което ги прави привлекателни за потребителите, загрижени за околната среда.

Използването на макроводорасли в козметичната промишленост също се увеличава. Много козметични компании включват екстракти от морски водорасли в своите формулировки поради техните овлажняващи и антиейджинг свойства. Тази тенденция представлява печеливша възможност за доставчиците на макроводорасли.

в. Мерки за публична подкрепа и политически инициативи

Правителствените инициативи също подкрепят растежа на индустрията за макроводорасли. В много страни правителствата насърчават устойчиви селскостопански практики за борба с климатичните промени и влошаването на околната среда. Например, Зеленият пакт, изготвен от Европейския съюз (ЕС) (NOAA Fisheries, 2024), подчертава значението на устойчивите морски ресурси и насърчава инвестициите в отглеждането на водорасли.

ЕС планира да отдели до 1 милиард евро до 2027 г. за насърчаване на устойчивото аквакултури, като се очаква част от тези средства да бъдат насочени към сектора на макроводораслите. Такива инициативи могат да осигурят финансирането и ресурсите, необходими за стимулиране на растежа на сектора.

г. Иновации в приложения с висока добавена стойност

Иновациите в приложенията на макроводораслите предлагат още една възможност за растеж. Освен в хранително-вкусовата промишленост, макроводораслите се проучват в редица сектори, включително козметиката, биогоривата и биопластмасите. Прогнозира се, че до 2026 г. световният пазар на биопластмаси ще достигне 44,5 млрд. щатски долара, а макроводораслите могат да служат като устойчива алтернатива на конвенционалните пластмаси на петролна основа. Този преход към екологично чисти материали е в съответствие с търсенето на потребителите на устойчиви продукти и създава значителни възможности за пазара на макроводорасли.

д. Принос към потенциала за смекчаване на изменението на климата

Ролята на макроводораслите в смекчаването на климатичните промени също предлага очаквания за растеж. Отглеждането на макроводорасли може да допринесе за борбата с глобалното затопляне чрез значително намаляване на количествата на въглеродния диоксид в атмосферата. Според проучване, проведено от Световната банка, отглеждането на морски водорасли може да абсорбира до 1,5 милиарда тона въглероден диоксид годишно. Този потенциал за абсорбиране на въглерод не само укрепва профила на макроводораслите по отношение на устойчивостта, но и привлича инвестиции от организации, фокусирани върху околната среда, и правителства, които се стремят да постигнат климатичните си цели.

1.5.2. Разширяване на пазара

Разширяващите се пазари в Запада допълнително увеличават възможностите за растеж. Нарастващата популярност на растителните диети в Европа и Северна Америка води до по-високо търсене на продукти от морски водорасли. В Съединените щати се очаква пазарът на ядливи морски водорасли да расте с 10% годишно, достигайки приблизително 2 милиарда долара до 2025 г. Основна тенденция на пазара на макроводорасли е нарастващата популярност на растителните диети.

1.3. Пазарна волатилност и ценови колебания

Ценовата нестабилност също е критичен проблем. Пазарът на макроводорасли може да бъде изложен на колебания, причинени от фактори като климатичните промени, които могат да повлияят на условията за отглеждане и добивите. Например, в доклад на Международната асоциация за морски водорасли се отбелязва, че неблагоприятните метеорологични условия могат да доведат до значително намаляване на обема на реколтата от морски водорасли, което да доведе до по-високи цени. През 2020 г. цената на сушените морски водорасли се повиши рязко – с до 30 % – поради прекъсвания в веригата на доставки, причинени от пандемията от COVID-19, което отново подчертава уязвимостта на пазара.

1.4. Технологични ограничения

Технологичните ограничения в отглеждането и преработката могат да ограничат растежа на пазара. Въпреки че е постигнат напредък, много производители все още разчитат на традиционни методи, които може да не са достатъчно ефективни или устойчиви. Например, добивите при отглеждането на макроводорасли могат да варират значително – от 5 до 20 тона на хектар – в зависимост от прилаганите техники за отглеждане. Неефективните практики могат да подкопаят рентабилността и да затруднят мащабирането на дейностите, за да се отговори на нарастващото търсене.

1.5. SWOT анализ на пазара

1.5.1. Възможности:

а. Нарастващо търсене на устойчиво производство на храни

Една от най-значимите възможности за растеж на пазара на макроводорасли е свързана с потенциалната им роля в устойчивото производство на храни. С нарастването на световното население и търсенето на питателна храна, макроводораслите предлагат жизнеспособно решение. Според ООН, се очаква световното население да достигне приблизително 9,7 милиарда души до 2050 г., което ще доведе до 70% увеличение на търсенето на храни. Тъй като макроводораслите са богати на основни хранителни вещества, те все по-често се използват като ценна съставка в редица хранителни продукти – от закуски до хранителни добавки.

б. Повишаване на осведомеността на потребителите по отношение на здравето

Нарастващото съзнание на потребителите за здравето и благосъстоянието води до увеличаване на търсенето на функционални храни. Ползите за здравето от макроводораслите, известни с високото си съдържание на витамини, минерали и антиоксиданти, се признават все повече. Доклад, изготвен от СЗО, показва, че консумацията на морски водорасли може да допринесе за подобряване на храненето, особено в региони с ограничен достъп до разнообразни източници на храна. Тъй като потребителите търсят по-здравословни варианти за хранене, се очаква пазарът на продукти на базата на макроводорасли да се разшири значително.

Таблица 1: Прогнози за световния пазар на макроводорасли (2024–2034 г.)

Характеристика на пазара	Подробности
Размер на глобалния пазар (2024 г.)	12,7 млрд.
Размер на глобалния пазар (2032)	18,39 млрд.
Прогнозна пазарна стойност (2024)	22,82 млрд.
Прогнозна пазарна стойност (2032)	34,56 млрд.
Глобален СТР (2024–2032)	6 %
Глобален СТР (2024–2034)	8,20 %
Пазарен дял в Азия-Тихия океан (2023 г.)	77,07 %
Сегмент на червените водорасли (2024)	5,41 млрд.
Сегмент на люспите (2024)	4,86 млрд.

Източник: Fortune Business Insights, 2024

Макроводораслите, особено сортовете спинулина и хлорела, са добре известни с ползите си за здравето. Проучванията показват, че тези водорасли са богати на протеини, със съдържание до 70% в сухо вещество. Нарастващият интерес към растителните диети и функционалните храни допълнително увеличава търсенето. Тази тенденция е особено актуална за макроводораслите, тъй като те се включват в широка гама от продукти, включително закуски, добавки и напитки.

1.2. Глобални търговски пазари за макроводорасли

Пазарът е сегментиран по няколко измерения, включително видове, форма на продукта и географско разпределение.

- **Географско разпределение:** Регионът на Азия и Тихия океан е ясен лидер на пазара, като през 2023 г. ще представлява 77,07 % от световния пазар на морски водорасли (Fortune Business Insights, 2024). Китай е сред основните страни, които стимулират производството и продажбите, подпомагани от благоприятни климатични условия. Северна Америка, и по-специално САЩ, отбелязва забележителен растеж с очакван среден годишен ръст от 6,5 %, свързан с нарастващото използване на макроводорасли в кулинарията и повишеното търсене на растителни продукти. Европейският пазар също отбелязва стабилен растеж (Fortune Business Insights, 2024).
- **Тип продукт:** Сред видовете макроводорасли, сегментът на червените водорасли заема водеща позиция на пазара, подкрепен от функционални характеристики като относително високо съдържание на протеини и витамини. Този сегмент е оценен на приблизително 5,41 милиарда щатски долара през 2024 г. и се очаква да нарасне с 6,5% CAGR.
- **Форма на продукта:** Макроводораслите се използват най-често под формата на люспи. Този сегмент е оценен на приблизително 4,86 милиарда щатски долара през 2024 г. и се очаква да нарасне с CAGR от 6,8%.

Пандемията от COVID-19 първоначално доведе до краткосрочно забавяне на пазара поради намаленото търсене на суровини и спада на цените. Въпреки това се посочва, че пазарът се е възстановил и е възвърнал динамиката си в периода след пандемията, като е отбелязал увеличение на съставния годишен темп на растеж. С привличането на вниманието на Световната здравна организация (СЗО) към ползите за здравето от макроводораслите, тази ситуация демонстрира стратегическото значение на макроводораслите в областта на здравето и храненето.

1.2.1. Прогнози за глобалния пазар на макроводорасли (2024–2034 г.)

Пазарът на макроводорасли е значително повлиян от нарастващото търсене на устойчиви и екологични продукти. През последните години повишеното съзнание на потребителите по отношение на здравето и околната среда допринесе за по-широкото използване на натурални съставки в храните и напитките.

Според доклад, изготвен от Организацията за прехрана и земеделие (ОПЗ), световният пазар на водорасли е бил оценен на приблизително 14 милиарда щатски долара през 2020 г. и се очаква да нарасне с около 8,1% годишно, за да достигне приблизително 21 милиарда щатски долара до 2025 г. Този растеж се дължи до голяма степен на нарастващата популярност на макроводораслите като хранителен източник, богат на хранителни вещества, особено поради съдържанието им на витамини, минерали и антиоксиданти.

Водораслите все повече се признават като потенциално важен компонент на глобалната продоволствена сигурност, наред с тяхната роля в смекчаването на климатичните промени и овластяването на жените. Последните проучвания позиционират отглеждането на водорасли като възможна алтернатива на сухоземното земеделие, като се позовават на относително простите методи на отглеждане, благоприятния състав на хранителните вещества и потенциала да допринесат за стратегиите за смекчаване на климатичните промени и адаптиране към тях. Очаква се също така, че производството на морски водорасли ще подкрепи много земеделски производители, особено жени, като увеличи покупателната способност на домакинствата, укрепи социалното овластяване и допринесе за усилията за намаляване на бедността. Въпреки значителния напредък в технологиите за отглеждане на морски водорасли през последните десетилетия, все още съществуват сериозни пречки за постигането на мащабно и устойчиво развитие. Те включват необходимостта от по-устойчиви производствени технологии, разнообразни приложения за крайна употреба и по-широко социално приемане и пазарно усвояване. Когато става въпрос за отглеждане, първата стъпка трябва да бъде внимателният подбор на подходящи видове и подходящи крайбрежни места за отглеждане, за да се постигне устойчиво производство с максимални ползи на приемлива цена. Също така е от съществено значение поддържането на пазарна цена, която да стимулира фермерите да участват в производствената система. Успоредно с това, установяването и прилагането на необходимите регулаторни и качествени изисквания е от решаващо значение за подобряване на качеството на видовете водорасли и производните продукти, предназначени за консумация от човека. Определянето на препоръчителни дневни дози за консумация на водорасли и продукти на основата на водорасли също е важно за подкрепата на здравословните хранителни навици. Накрая, развитието на устойчива индустрия за отглеждане на водорасли изисква по-силно международно сътрудничество и координация между страните, които произвеждат и използват водорасли.

Следва да се разработят най-добри управленски практики за технологиите за отглеждане на водорасли, които са икономически жизнеспособни, екологично съобразени и социално приемливи, и тези практики следва да се разпространяват от национални и международни организации в тропическите и субтропическите страни. Това следва да се направи своевременно, за да се гарантира, че тези богати на хранителни вещества водни храни могат да допринесат както за здравето на планетата, така и за благосъстоянието на човечеството.

За да се избегнат конфликти с други ползватели на крайбрежието (напр. корабоплаването) и да се ограничи въздействието върху околната среда, е необходимо пространствено планиране преди създаването на фермите. В Китай основните предизвикателства включват конкуренцията с други ползватели за подходящи места и осигуряването на достатъчна рентабилност (Duarte et al., 2017). Увеличаването на производството на водорасли често се представя като необходимост с принос към смекчаване на изменението на климата и адаптиране към него; обаче бързото увеличаване на производството може да доведе до понижаване на пазарните цени и да разубеди фермерите да продължат да участват (Duarte et al., 2017).

Интензивното отглеждане на водорасли с цел производство на биоенергия или биогорива, заедно с улавянето и съхранението на въглерод, е предложено като потенциална стратегия. Въпреки че концептуално е привлекателно и заслужава продължителни изследвания, все още съществуват значителни предизвикателства при прилагането му. Например, такива подходи могат да изискват много големи океански площи, а осъществимостта на постигането на двойната цел за производство на енергия и поглъщане на въглерод е поставена под въпрос (Melara et al., 2020). Въпреки десетилетия на изследвания, биогоривата на базата на водорасли все още не са достигнали пазара и тяхната търговска жизнеспособност не е доказана (Raven, 2017). Данните сочат също, че при океанска киселинност само поглъщането на въглерод не може да се използва като достатъчен индикатор за реакциите на водораслите (Britton et al., 2019). Освен това се очаква ефективността на култивирането с водорасли за намаляване на CO₂ да бъде повлияна от планетарни механизми, което добавя несигурност и поражда опасения относно ролята му в стратегиите за смекчаване на изменението на климата (Bach et al., 2021).

Ключово предизвикателство, което засяга участието на жените в отглеждането на водорасли, е ограниченият достъп до технически умения и подходящи ресурси. Проучване на място сред жени, отглеждащи водорасли в Занзибар, установи, че много от тях не знаят да плуват и нямат достъп до лодки (Hedberg et al., 2018). В резултат на това отглеждането на водорасли от жените често се ограничава до много плитки води. Докато мъжете фермери могат да работят ежедневно, дейността на жените може да бъде ограничена до работа по време на отлив – обикновено 3–5 дни в седмицата (Fröcklin et al., 2014). Поради това жените могат да имат по-ограничена роля в създаването на ферми за водорасли, особено когато това изисква значителна физическа работа, като поставяне на бамбукови колове, връзване на въжета и сглобяване на цялостната конструкция.

Много жени не могат да използват лодки за транспорт. В резултат на това често се налага да плащат за транспорт и да стават зависими от мъжете по време на подготовката на фермата и прибирането на реколтата. Предходни проучвания също показват, че жените, които отглеждат водорасли, могат да изпитват редица здравословни проблеми, свързани с работата (Vestling & Forsberg, 2018).

Водораслите, отглеждани или събирани в замърсени води, също могат да натрупват замърсители, най-вече тежки метали. Токсините могат да се натрупват в някои видове водорасли (Giusti, 2001; Sudharsan et al., 2012) и могат да представляват риск за човешкото здраве. Освен това, разработването на хранителни продукти с добавена стойност на базата на морски водорасли за консумация от човека е ограничено от липсата на клинични изпитвания и данни от животински и клетъчни изследвания (Brown et al., 2014; Hafting et al., 2015). Накрая, регулаторните ограничения върху видовете морски водорасли, които нямат история на консумиране от хората, остават една от основните пречки за интегрирането на морските водорасли в храните (Hafting et al., 2015).

От гледна точка на климатичните промени, едно от основните предизвикателства, свързани с отглеждането на водорасли, е свързано с емисиите на халогенни въглеводороди от водорасловите легла (Phang et al., 2015). Хлороформът и бромформът се произвеждат естествено от определени видове водорасли (Nightingale et al., 1995; Pyle et al., 2011). Летките халогенирани въглеводороди могат да допринесат значително за концентрациите на халогенни радикали в атмосферата, които играят роля в каталитичното разрушаване на озона (Phang et al., 2015). В системите за отглеждане на водорасли в голям мащаб се използват различни изкуствени материали за осигуряване на стабилен субстрат. Значителна част от тези материали се състои от комбинации от синтетични полимери, които са силно устойчиви на разграждане.

Ако системите за отглеждане не се поддържат правилно, може да възникне замърсяване поради изхвърлени или изгубени материали (Campbell et al., 2019). Такива загуби могат също да увеличат количеството пластмаса в морските хранителни вериги (Andrady, 2011; Derraik, 2002). Друг критичен проблем е конкуренцията за слънчева светлина: отглеждането на водорасли на повърхността може да засенчи екосистемите под тях и да повлияе на автотрофните общности под отпечатъка на фермата (Campbell et al., 2019). Настоящите технологии за отглеждане на водорасли, често базирани на относително прости структури, обикновено могат да се прилагат само в защитени райони, което ограничава разширяването до ограничен поднабор от подходящи места (Duarte et al., 2017). Освен това затоплянето на океаните може да покритието на кафяви водорасли (фукоиди) чрез физиологичен стрес, да засили натиска от пашата на тревопасните животни в по-топлите води и да взаимодейства с повишената активност на бурите и намаляващата наличност на хранителни вещества, което потенциално може да намали възможностите за отглеждане (Harley et al., 2012; Callaway et al., 2012). Трябва да се имат предвид и потенциалните последици от разрастването на културите чрез въвеждането на неместни (екзотични) видове водорасли (McLaughlan et al., 2014). Морските тревни ливади са признати за горещи точки на въглероден диоксид и затова са важни за декарбонизираните екосистеми (Duarte et al., 2005, 2013; Fourqurean et al., 2012). Те могат да бъдат чувствителни към човешкото въздействие от съседните ферми за водорасли, което може да причини механични повреди и засенчване (Waycott et al., 2009).

Фигура 2: Глобален пазар на макроводорасли (2023 г.)



Източник: Fortune Business Insights, 2024 г.

Подобно на сухоземните растения, морските водорасли не осигуряват еднакви хранителни ползи за всички: максималната хранителна стойност може да варира значително в зависимост от вида, индивидуалните хранителни нужди и характеристиките на хората, които ги консумират. По тази причина, наред с изследванията в областта на отглеждането и разработването на продукти, трябва да се провеждат и проучвания за хранителните свойства на конкретни видове. В този контекст е важно да се отбележи, че в Япония, където водораслите се консумират от векове, някои хора изглеждат по-ефективни в усвояването им от други (Forster & Radulovich, 2015). Това се свързва с наличието на специфични чревни бактерии, които са придобили гени, позволяващи им да произвеждат ензими, разграждащи полизахарида, съдържащ се в *Porphyra* (нори) (Forster & Radulovich, 2015). Счита се, че тези гени вероятно произхождат от морски микроорганизми, погълнати заедно с нори (Ledford, 2010). Следователно, хората, които включват водорасли в диетата си за първи път, могат да изпитат проблеми с храносмилането по време на периода на адаптация.

Друго опасение, свързано с усвояването на тази храна, е до високото съдържание на микро и макроелементи в морските водорасли, чиято прекомерната консумация може да има неблагоприятни ефекти върху здравето. Например, нивата на йод в някои видове морски водорасли могат да доведат до повишени нива на хормона, стимулиращ щитовидната жлеза, а при редовна консумация на морски водорасли в значителни количества са наблюдавани случаи на каротинодермия (пожълтяване на кожата) (Nishimura et al., 1998).

по-широкото им приемане и по-дълбокото проникване на пазара.

В селското стопанство макроводораслите се използват предимно като биоторове и подобрители на почвата. Тяхното органично съдържание подпомага плодородието на почвата и здравето на растенията, което насърчава използването им в биологичното и устойчиво земеделие. С нарастването на екологичната осведоменост търсенето на тези продукти продължава да расте.

Във фармацевтичния сектор макроводораслите се ценят заради своите биоактивни съединения с потенциални свойства, свързани със здравето. Този сегмент се основава на терапевтичния потенциал на съединенията от водорасли, често обсъждани в литературата във връзка с тяхната антивирусни и противоракови свойства, което го прави ключова област за научни изследвания и последващо разработване на продукти.

Козметичната и козметичната промишленост използват екстракти от макроводорасли за функционални свойства, свързани с хидратация и подхранване на кожата, както и за продукти, свързани с анти-старееене. По-широката тенденция към естествени и устойчиви козметични продукти допълнително укрепва този сегмент, като макроводораслите все по-често се включват в състава на продуктите за грижа за кожата.

Едно от основните предизвикателства при позиционирането на водораслите като основна храна е да се направят хранителните продукти на базата на водорасли достъпни до хората. Допълнителна трудност е да се избегне объркването на потребителите относно това дали храните на базата на водорасли са сравними по хранителна стойност с храните, които те консумират редовно (Forster & Radulovich, 2015). Както при всеки нов хранителен продукт, възприемането на нов продукт от широкото обществено отнема време, като в много региони морските водорасли се явяват като сравнително нова хранителна съставка. Ето защо възприемането от страна на потребителите в мащаб, сравним с други основни селскостопански хранителни продукти, ще бъде значително предизвикателство. Освен това очевидните ползи за здравето от морските водорасли може да не важат еднакво за всички потребители и продукти, тъй като ползите от определени видове изглежда зависят от усвояемостта (Forster & Radulovich, 2015).

Наличието на антихранителни фактори, като трипсин инхибитори и определени полизахариди, изглежда ограничава смилаемостта на протеина от морски водорасли в *Palmaria palmata*. Полизахаридите от морски водорасли, използвани като съгъстители и желиращи агенти в преработените храни, могат да предложат няколко ползи за здравето; обаче, те осигуряват малко или никаква питателност (Forster & Radulovich, 2015). Сравнително проучване на усвояването на хранителни вещества от вакаме (*Undaria pinnatifida*) и нори (*Neopyropia tenera*, по-рано *Porphyra tenera*) установи, че тези водорасли могат да служат като отличен източник на диетични фибри, но могат също да променят усвояемостта на минералите и протеините в храната (Urbano & Goñi, 2002).

1.1. Сегментация на пазара на и регионално доминиране

През 2023 г. култивираните червени макроводорасли заемат доминираща позиция на пазара, като представляват повече от 67,6 % от пазара. Този сегмент се възползва значително от контролираните практики на отглеждане, които позволяват висококачествени и постоянни добиви. Надеждността на доставките и еднородните характеристики на продуктите укрепват търсенето, особено от сектори като фармацевтиката и нутрицевтиката, където стандартизацията и постоянството на качеството са от решаващо значение.

Диво събраните (естествено събрани) макроводорасли представляват значителен сегмент от пазара. Те са особено ценени, защото се възприемат като органични и минимално модифицирани, което подкрепя търсенето на пазари, които дават приоритет на „естествените“ характеристики, като органични храни и натурална козметика. В същото време опасенията, свързани с устойчивостта и въздействието върху околната среда, влияят върху развитието, тъй като разширяването на пазара трябва да бъде балансирано с екологичните съображения.

През 2023 г. сушените червени макроводорасли заемат доминираща позиция на пазара, като представляват повече от 38,9 % от пазара. Тази форма се предпочита поради по-дългия срок на годност и лесното транспортиране, което я прави подходяща за глобална дистрибуция. Нейната универсалност в кулинарни и промишлени приложения допълнително засилва пазарната ѝ привлекателност.

Суровите (пресни) макроводорасли представляват по-нишова пазарна ниша, предпочитана заради свежестта и минималната обработка. Тази форма е особено разпространена на регионалните пазари в близост до районите на събиране, където близостта подпомага бързото използване „от фермата до масата“ и където крайбрежните общности поддържат установени кулинарни традиции.

Прахът от макроводорасли набира популярност благодарение на удобството си и лесната интеграция в хранителни добавки и смутита. Тази фина, универсална форма позволява включването му в ежедневната диета, което спомага за разширяване на потребителската база.

Течните екстракти, получени от макроводорасли, се използват все по-често в козметични и фармацевтични формули. Тази форма се цени заради концентрацията си на хранителни вещества и биоактивни съединения, предлагащи функционални ползи – като например антиейджинг ефект – привлекателни за разработчиците на продукти, търсещи формули с висока ефективност.

През 2023 г. секторът на храните и напитките заемаше доминираща позиция в индустрията на макроводораслите, като представляваше повече от 44,2 % от пазара. Растежът в този сегмент се дължи на нарастващата глобална популярност на водораслите като съставка с висока хранителна стойност и качества на овкусяване. Приложенията варират от ежедневни ястия до луксозни ресторанти, което подпомага

Използването на морски водорасли като източници на тези хидроколоиди датира от 1658 г., когато в Япония за първи път са открити желиращите свойства на агара, извлечен с гореща вода от червени морски водорасли. Екстрактите от друго червено водорасло, обикновено наричано ирландски мъх, съдържат карагенан и стават популярни като съгъстители през XIX век. За разлика от това, търговското производство на алгинат от екстракти от кафяви водорасли – и продажбата му като съгъстител и желиращ агент – започва едва през 1930-те години. След Втората световна война промишленото използване на екстракти от водорасли се разраства бързо, въпреки че понякога е ограничавано от наличността на суровини.

Днес се събират и преработват приблизително 1 000 000 тона пресни (мокри) водорасли за производството на трите хидроколоида, посочени по-горе. Това води до около 55 000 тона хидроколоиди с обща приблизителна стойност 585 000 000 USD.

Производството на алгинат (около 213 милиона щатски долара) се получава изцяло от диво събрани кафяви водорасли, тъй като отглеждането на кафяви водорасли специално за доставка на суровини за промишлеността се счита за твърде скъпо в голям мащаб.

Производството на агар (около 132 милиона щатски долара) се осъществява главно от два вида червени водорасли. Единият от тях се отглежда от 60-те и 70-те години на миналия век, но от 1990 г. насам отглеждането му се разширява в много по-голям мащаб, което води до значителен растеж на агарната промишленост.

Производството на карагенан (на стойност около 240 милиона щатски долара) първоначално е зависело от дивите водорасли, по-специално от ирландския мъх, малка водораслова растителност, която се среща в студените води и чиито природни ресурси са ограничени. Според данни на ФАО обаче, от началото на 70-те години на миналия век индустрията се разраства бързо, благодарение на наличието на други водорасли, съдържащи карагенан, които могат да се отглеждат успешно в страни с топли води и конкурентни производствени условия. Въпреки че все още има малък интерес към ирландския мъх и някои други диви видове от Южна Америка, по-голямата част от водораслите, използвани за производството на карагенан днес, се добиват от аквакултури (McHugh, D. J., 2003).

През 60-те години на миналия век Норвегия е пионер в производството на брашно от морски водорасли, произведено от изсушени и смлени кафяви водорасли, което се използва като добавка в храната за животни. Тъй като сушенето обикновено се извършва в пещи, работещи с мазут, производствените разходи са чувствителни към цените на суровия петрол. Ежегодно се събират около 50 000 тона пресни (влажни) морски водорасли, от които се произвеждат около 10 000 тона суха маса морски водорасли, които се продават за около 5 милиона щатски долара. Общата стойност на промишлените продукти, произведени от морски водорасли, се оценява на 590 милиона щатски долара, а общата стойност на всички продукти от морската промишленост се оценява на около 5,6 милиарда щатски долара.

Тези характеристики са свързани главно с летливи органични съединения (ЛОС), включително алдехиди и кетони, произвеждани чрез различни метаболитни пътища през жизнения цикъл на макроводораслите. За да се позволи по-широкото им използване и да се подобри приемането им от потребителите, макроводораслите се нуждаят от интервенции, които да подобрят сензорната им привлекателност и да ги позиционират като жизнеспособни алтернативи на суровините за хранителни приложения. Съответно, стратегиите, които могат ефективно да модулират и подобрят сензорния профил на макроводораслите, са от решаващо значение. Микробната ферментация се очертава като обещаващ подход за трансформиране и подобряване на широка гама от хранителни субстрати, без да се генерират токсични остатъци.

Китай е най-големият производител на ядливи водорасли с приблизително 5 милиона тона, значителна част от които са комбу, произведено от *Laminaria japonica*, отглеждано на стотици окански хектари, окачени на дълги въжени носители. Република Корея отглежда около 800 000 тона от три различни вида; приблизително 50 % от този обем е вакаме, получено от *Undaria pinnatifida* и отглеждано по начин, подобен на отглеждането на *Laminaria* в Китай. Производството на Япония е около 600 000 тона, от които 75 % е нори, произведено от видове *Porphyra*. Нори е продукт с висока стойност, чиято цена е около 16 000 USD на тон, в сравнение с комбу на цена 2800 USD на тон и вакаме на цена 6900 USD на тон.

През 2023 г. червените макроводорасли заемат доминираща позиция на пазара, като представляват повече от 48,9 % от пазара. Този сегмент се ползва с широки приложения както в хранителната промишленост, така и в биотехнологичните приложения. Червените макроводорасли се ценят заради хранителния си профил и са ключова съставка в редица продукти за здраве и благосъстояние, което продължава да подкрепя растежа на търсенето.

Зелените макроводорасли, известни с многостранното си приложение в селското стопанство и аквакултурите, заемат значителен дял от пазара. Тяхната роля в пречистването на водата и като биоторове поддържа стабилно присъствие на пазара, докато нарастващият интерес към устойчиви селскостопански практики продължава да подкрепя ръста на търсенето в този сегмент.

Кафявите макроводорасли, които се използват често в производството на алгинати и фуражи за животни, също представляват важна част от пазара на макроводорасли. Освен това, тяхното приложение в козметичната промишленост, особено в продуктите за грижа за кожата, благодарение на овлажняващите им свойства, допринася за поддържането на пазарното търсене. Този сегмент се подкрепя допълнително от по-широкото разпространение на използването на натурални съставки в промишлеността за потребителски стоки (Анализ на пазара в САЩ).

Алгинатът, агарът и карагенанът са съгъстители и желиращи агенти, извлечени от морски водорасли, като тези три съединения са в основата на промишлените приложения на морските водорасли.

Успоредно с това нарастващият интерес към веганските и растителните диети засилва търсенето на макроводорасли като алтернатива с високо съдържание на хранителни вещества, особено предвид богатството им на протеини, витамини и минерали. Като цяло се наблюдава, че пазарът реагира на тези тенденции.

Използването на водорасли като храна датира от четвърти век в Япония и от шести век в Китай. Днес тези две страни, заедно с Република Корея, остават най-големите потребители на водорасли като хранителен продукт. Тяхното търсене поддържа индустрия, която събира приблизително 6 000 000 тона пресни (мокри) водорасли годишно в световен мащаб, с приблизителна стойност от около 5 милиарда щатски долара.

През последните петдесет години нарастващото търсене надхвърли капацитета на естествените (диви) запаси да задоволят нуждите на пазара. Изследванията на жизнения цикъл на тези водорасли от своя страна позволиха развитието на индустрии за отглеждане, които понастоящем задоволяват повече от 90 % от пазарното търсене.

В Съединените американски щати (САЩ) астаксантинът, извлечен от *H. pluvialis*, е разрешен за ограничено използване. Американската агенция за храните и лекарствата (ААХЛ) разрешава използването на брашно от водорасли *Haematococcus* като оцветител в храните за животни (например храна за съомги). Въпреки това, в публично достъпните записи за качество не се наблюдава статут на ОПБ (Общопризнат като Безопасен) на *H. pluvialis* за директна консумация от човека на цялата биомаса или под олеорезина форма. По същия начин, няма публично достъпни ОПБ одобрения или уведомления в контекста на храните за видовете *Porphyridium*. Въпреки това, в литературата се отбелязва, че *H. pluvialis* и видовете *Porphyridium*, включително *P. cruentum*, са посочени като част от група, считана за ОПБ от ААХЛ за специфични приложения, като извличане на пигменти (например астаксантин и фикоеритрин). Проучвания за остра и субхронична токсичност при плъхове показват, че биомасата на *H. pluvialis* и екстрактите, богати на астаксантин, се понасят добре, като отчетените LD₅₀ стойности надвишават 12 g/kg телесно тегло и няма значителни неблагоприятни ефекти върху хематологията или хистопатологията при включване в храната в количества до 20% в продължение на 90 дни (например LD₅₀ > 5000 mg/kg; леките промени в бъбречния пигмент се описват като нетоксикологично значими). В експерименти във водна среда, екстракти от екзополизахариди (ЕПЗ), при нива на експозиция до 15 % в продължение на 96 часа, не са причинили смъртност или аномалии в развитието на ембриони на Риби Зебра.

Ин витро тестове за цитотоксичност показват, че повечето ЕПЗ фракции проявяват ниска цитотоксичност, с изключение на някои подкиселени препарати, тествани при много високи концентрации. Въпреки високия си потенциал и многобройните си ползи, употребата на макроводорасли като хранителна съставка остава ограничена, главно поради нежелани сензорни характеристики — често описвани като „рибен“ или „морски“ вкус и мирис.

ЧАСТ I

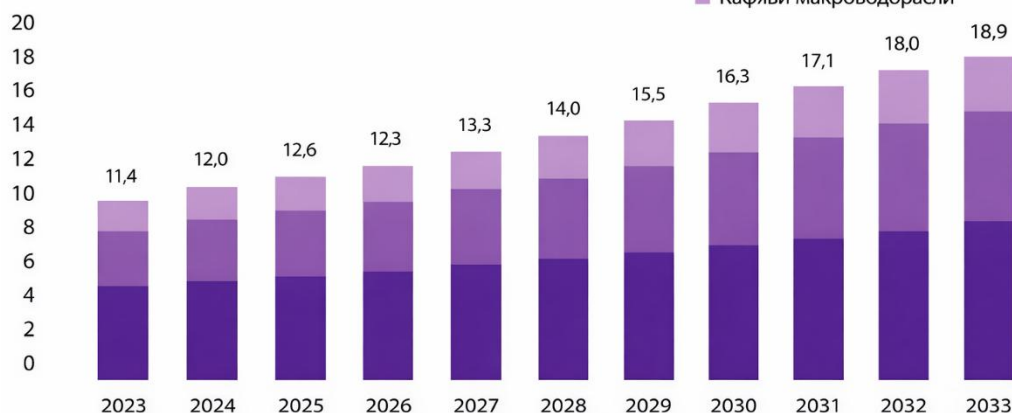
Размер и динамика на глобалния пазар

Секторът на макроводораслите отбеляза значителен растеж през последните години, като си осигури все по-видима позиция в световната икономика. Към 2024 г. стойността на световния пазар на морски водорасли се посочва на различни нива в различните пазарни проучвания, но всички прогнози сочат, че пазарът е значителен и се разраства. Според един доклад пазарната стойност през 2024 г. е приблизително 12,7 млрд. щатски долара, като се очаква да достигне 22,82 млрд. щатски долара до 2034 г., с годишен темп на растеж (CAGR) от 6 %. Друг пазарен анализ оценява размера на пазара на 17,14 млрд. щатски долара през 2023 г. и 18,39 млрд. щатски долара през 2024 г., като прогнозира увеличение до 34,56 млрд. щатски долара до 2032 г. с CAGR от 8,20 %. Разликите между тези цифри вероятно се дължат на продължаващото узряване на сектора и на факта, че методологиите за събиране на данни и проучване на пазара все още не са напълно стандартизирани. Тази разлика трябва да се тълкува като характеристика на един нов и бързо развиващ се пазар, а не като противоречие.

Фигура 1. Прогнози за глобалния пазар на търговски макроводорасли (2023–2033)

Глобален пазар на макроводорасли

Размер по вид, 2023–2033 г. (млрд. щатски долара)



Пазарът ще нараства със
Средногодишен темп
на растеж (CAGR) от **5,2%**

Прогнозен размер на пазара през 2033 г.:
18,9 млрд. щатски долара

Източник: Fortune Business Insights, 2024

Растежът на пазара се дължи на редица фактори, които стават все по-очевидни на глобално ниво. Повишеното екологично съзнание и нарастващото потребителско търсене на устойчиви продукти са сред основните фактори, ускоряващи разпространението на отглеждането на макроводорасли. Макроводораслите се считат за устойчив ресурс поради бързия си растеж, високото съдържание на хранителни вещества и ролята си в усвояването на въглерод чрез фотосинтеза.

Въпреки това регионът съчетава богата природна биомаса, нарастваща И&Р, ръководена от университетите, и нововъзникващо регионално сътрудничество, което го позиционира като регион с голям потенциал, но засега с ниска степен на комерсиализация. Международните доклади подчертават, че ускоряването на икономически жизнеспособна верига на стойността в региона ще зависи от засилените инвестиции в И&Р, подобренията в регулаторната рамка и подобряването на местното управление и капацитета за изпълнение.

В тази рамка докладът представя глобалните тенденции, нуждите на сектора, мненията на заинтересованите страни и перспективните прогнози за продуктите на базата на базата на макроводорасли. Резултатите от проучването са предназначени да послужат като основа за разработването на регионални политики и да подкрепят нови предприемачески и инвестиционни инициативи, насочени към икономическата valorisation на макроводораслите.

Бихме искали да благодарим на всички експерти, академици, представители на индустрията и инвеститори, които допринесоха за това проучване. Знанията, опитът и оценките, споделени по време на интервютата, предоставиха ценна доказателствена база, която помогна да се освети бъдещата траектория на екосистемата на макроводораслите в Черноморския басейн и Турция.

Съдържанието на този доклад е изцяло отговорност на авторите. Изразените мнения не отразяват непременно официалната позиция на Европейския съюз. Възпроизвеждането е разрешено, при условие че източникът е посочен и всички промени са ясно обозначени.

ВЪВЕДЕНИЕ

Макроводораслите все повече се признават като стратегически ресурс с екологично и икономическо значение на глобално ниво. Когато еутрофикацията се засилва, следствията от климатичните промени стават все по-видими, а колебанията в биомасата в морските екосистеми стават все по-чести, устойчивото използване на макроводораслите става от решаващо значение както от екологична, така и от икономическа гледна точка. В този контекст проектът MACRO CLEAN, реализиран чрез съвместните усилия на три държави от Черноморския басейн – Турция, България и Грузия, е инициатива с участието на много партньори, чиято цел е да проучи макроводораслите, да подкрепи действия свързани с почистване, да даде възможност за тяхното оползотворяване и да разработи пилотни приложения в целия Черноморски басейн. Проектът създава цялостна рамка за осигуряване на устойчиво и ефективно събиране, преработка и използване, както и превръщане на макроводораслите в икономически продукти с добавена стойност.

Настоящият доклад е изготвен с цел да предостави цялостен анализ на настоящите тенденции, динамиката на пазара, пречките пред търговската реализация и бъдещите възможности в сектора на макроводораслите. От методологична гледна точка проучването използва комбиниран изследователски подход, съчетаващ преглед на академичната литература с задълбочени интервюта с различни заинтересовани страни. Интервюираните лица бяха подбрани чрез подход на максимална вариация на извадката, за да се гарантира представителност на пълния спектър от роли в рамките на екосистемата. Участниците включват: академични лица, пряко ангажирани в изследвания на макроводорасли; компании, произвеждащи продукти на базата на макроводорасли или ангажирани в доставката на суровини, разработването на биотехнологии и внос/износ; участници във веригата на доставки; инвеститори; публични институции; общини; компании за управление на околната среда; лаборатории за И&Р дейност. Този подход гарантира, че всички сегменти от веригата на стойността са обхванати и позволява генерирането на сравними данни за всички групи заинтересовани страни.

Международната литература и секторните проучвания на пазара показват, че продуктите на базата на макроводорасли се превръщат в бързо разрастваща се икономическа област в световен мащаб. Към 2023 г. световният пазар на макроводорасли се оценява на 17–18 милиарда щатски долара, като прогнозите сочат, че до 2030 г. той може да надхвърли 30 милиарда щатски долара. Приблизително 95 % от производството се осъществява в Азиатско-тихоокеанския регион, докато в Европа се наблюдава нарастващо търсене, особено в областта на биопластмасите, биостимулантите, торовете, функционалните храни и козметиката. За разлика от това, Турция и Черноморският басейн все още са в ранен етап на развитие на пазара.

5.2. Профили на големи международни инвеститори	55
5.3. Потенциални турски инвеститори	55
ЧАСТ VI – Мнения за потенциалните области на приложение на продуктите на базата на макроводорасли	59
ЗАКЛЮЧЕНИЯ И ПРЕПОРЪКИ	79

СЪДАРЖАНИЕ

РЕЗЮМЕ	5
АКРОНИМИ	6
ВЪВЕДЕНИЕ	9
ЧАСТ I – Размер и динамика на глобалния пазар	11
1.1. Сегментация на пазара и регионално доминиране	15
1.2. Глобални търговски пазари на макроводорасли	21
1.2.1. Прогнози за глобалния пазар на макроводорасли (2024–2034)	21
1.3. Пазарна волатилност и ценови колебания	23
1.4. Технологични ограничения	23
1.5. SWOT анализ на пазара	23
1.5.1. Възможности	23
1.5.2. Разширяване на пазара	24
1.5.3. Мерки за подкрепа от страна на правителството	25
1.5.4. Технологични постижения	25
1.6. Верига на стойността на макроводораслите и основни приложения	26
1.6.1. Търговски и промишлени приложения	26
1.7. Технологии за отглеждане и преработка	28
1.7.1. Биотехнологии и подобряване на щамовете	29
1.7.2. Биорафинерия и преработка	29
1.8. Ролята на макроводораслите в синята икономика	30
1.8.1. Синя икономика	30
1.8.2. Потенциалът на синия въглерод за справяне с климатичните промени	31
1.8.3. Биоремедиация и подобряване на качеството на водата	32
1.8.4. Екосистемни услуги и възстановяване	32
ЧАСТ II – Сравнителен анализ: световни лидери и Турция	33
2.1. Политически рамки и механизми за подкрепа в водещите страни	34
2.1.1. Китайска народна република	36
2.1.2. Япония	36
2.1.3. Норвегия	36
2.1.4. Съединени Американски щати	37
ЧАСТ III – Настоящо състояние на сектора на макроводораслите в Турция и избрани екосистеми	39
3.1. Изследвания и развитие (И&Р)	39
3.2. Политическа и правна рамка	39
3.3. Пречки пред настоящото производство и търговска дейност	40
3.3.1. Китайска народна република — сектор на макроводораслите	42
3.3.2. Черноморски басейн	42
3.3.3. Бяло море (Русия)	46
ЧАСТ IV – Възможности, препоръки и оценка	47
4.1. Стратегически възможности за Турция и SWOT анализ	47
4.1.1. Силни страни / Възможности	47
4.1.2. Слабости и ключови ограничения. Структурни бариери	47
4.1.3. Инвестиционен и предприемачески потенциал в Турция	48
4.2. Принос на отглеждането на макроводорасли	51
4.3. Пречки пред процедурата за производство на гориво от водорасли	53
ЧАСТ V – Инвестиции в макроводорасли и финансови перспективи	55
5.1. Глобални инвестиционни тенденции	55

АКРОНИМИ

АРАС	Азия-Тихи океан
СТР	Средногодишен темп на растеж
КАМП	Китайска асоциация на микроводорасловата промишленост
CO ₂	Въглероден диоксид
ЕК	Европейска комисия
ОВОС	Оценка на въздействието върху околната среда
ЕИФ	Европейски инвестиционен фонд
ЕПЗ	Екзополизахариди
ЕС	Европейски съюз
ОПЗ	Организация за прехрана и земеделие (на Обединените нации)
ААХЛ	Американска агенция за храните и лекарствата
ОПБ	Общопризнат като безопасен
ИМА	Интегрирана мултитрофична аквакултура
ОРМСПТ	Организация за развитие на малките и средните предприятия в Турция
N	Азот
НКРР	Национална комисия за развитие и реформи (Китай)
НПО	Неправителствена организация
НОАА	Национална океанска и атмосферна администрация (САЩ)
P	Фосфор
PBR	Фотобиореактор
И&P	Изследвания и развитие
ЦУР	Цели за устойчиво развитие
МСП	Малки и средни предприятия
TÜVİTAK	Съвет за научни и технологични изследвания на Турция
САЩ	Съединени американски щати
ЛОС	Летливи органични съединения
СЗО	Световна здравна организация

Като цяло, това проучване предоставя изчерпателна картина на екосистемата на макроводораслите в Турция, представяйки контекст, структурни бариери, международни тенденции и приоритетни области за бъдещо развитие през интегрирана призма. Резултатите служат като стратегическа референция за политици, изследователи, предприемачи и инвеститори, подкрепяйки усилията за превръщане на ресурсите от макроводорасли в устойчива икономическа стойност в целия Черноморски басейн.



РЕЗЮМЕ

Изготвен като част от дейност 1.12 – Програма за предприемачество, фокусирана върху макроводораслите, в рамките на проекта MACRO CLEAN, този доклад предоставя многоизмерна оценка на икономическите възможности, свързани с макроводораслите, нововъзникващите тенденции и секторната трансформация в Черноморския басейн. Въз основа на полуструктурирани интервюта със заинтересовани страни от академичните среди, частния сектор, инвеститори и публични институции, проучването предлага консолидирана картина на настоящата ситуация с продуктите, базирани на макроводорасли и техния бъдещ потенциал.

Макроводораслите представляват стратегическа биомаса, която се използва в световен мащаб в широк спектър от приложения, включително храни, фуражи, торове, биопластмаси, биотехнологии и козметика. Този бързо разрастващ се сектор се формира от основни тенденции като устойчивост, потенциал за улавяне на въглерод, алтернативни източници на протеини и кръгова икономика. Въпреки че Турция има силен производствен потенциал благодарение на своето биоразнообразие, климатични условия и обширна брегова линия, секторът все още е в ранен етап на развитие.

Това проучване идентифицира основните предизвикателства и възможности, които оформят екосистемата на макроводораслите в Турция. Интервютата със заинтересованите страни като най-критичните бариери пред развитието на сектора се последователно посочват ограничения капацитет за отглеждане, пропуски в нормативната уредба, високи капиталови изисквания, ограничения в технологиите и инфраструктурата, както и пречки в доставките на суровини на вътрешния пазар. В същото време нарастващият академичен интерес, диверсификацията на усилията в областта на научноизследователската и развойна дейност, ранните търговски инициативи в областта на торовете и биопластмасите, както и възможностите за сътрудничество, предоставени от финансирането на Европейския съюз, създават силен импулс.

По-специално, натрупванията на макроводорасли, наблюдавани по крайбрежието на Черно море, все повече се разглежда както като екологично предизвикателство, така и като икономическа възможност, предлагаща значителен потенциал за суровини за торове, биопластмаси и биотехнологични приложения. Заинтересованите страни подчертават, че създаването на устойчива верига за създаване на стойност ще изисква преход от опортюнистично събиране към производство, основано на отглеждане, тъй като само отглеждането може да гарантира надеждни, проследими и мащабируеми обеми на суровини.

Докладът посочва, че продуктите на базата на макроводорасли представляват нововъзникваща, но растяща област за предприемачество и инвестиции в Турция. Интервютата обаче показват, че инвеститорите показват предпазливост поради дългите цикли на дейностите за изследване и развитие, че липсата на доказателство за концепцията (ДзК) ограничава достъпа на стартиращите компании до финансиране и че публичната подкрепа — особено в областта на регулирането, стимулите и благоприятната инфраструктура — е от решаващо значение за разрастването на сектора.



Co-funded by
the European Union



Interreg

NEXT Black Sea Basin

Дейност 1.12
Програма за предприемачество за
стартиращи компании, свързани с макроводораслите

Местен координатор на проекта

Елиф Кахраман

Съюзът на общините „Мармара“

E-mail: info@macroclean.org

Местен мениджър по комуникации

Ирем Селен

Съюзът на общините „Мармара“

Уебсайт на проекта: <https://www.macroclean.org/>

Настоящият документ се основава на дейностите по проекта MACRO CLEAN (Изследвания, методики за почистване, икономическа валоризация и пилотно приложение за цъфтеж на макроводорасли) с финансовата подкрепа на програмата Interreg NEXT Black Sea Basin.

Кореспондиращи автори:

Хакан Арджа

Д-р Ш. Наджи Адалилар

Преведено на български от:

Николай Колев, Кирил Вълканов, Марко Иванов,

д-р Иван Теленчев и Милка Делева

Дата на публикуване: април 2026 г.

Този доклад е изготвен и публикуван от Съюза на общините в Мармара.



Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“

Университетска 115, Шумен, България

+359 887 160 771, +359 895 029 919

ts.ignatovaivanova@shu.bg & p.marinova@shu.bg

<https://www.shu.bg/>

Отговорността за съдържанието на този документ е на партньорите по проекта BSB00584 MACRO CLEAN, изпълняван в рамките на програмата Interreg Next Black Sea Basin. Той представлява неформален консенсус относно най-добрите практики, договорени от всички партньори.



Co-funded by
the European Union



Interreg

Black Sea Basin

NEXT

Interreg



Co-funded by
the European Union

NEXT Black Sea Basin



ДОКЛАД ЗА АНАЛИЗ НА НАСТОЯЩИТЕ ТЕНДЕНЦИИ И ВЪЗМОЖНОСТИ ПРИ МАКРОВОДОРАСЛИТЕ

Изследвания, методики за почистване,
икономическа валоризация и пилотно приложение
за цъфтежа на макрководорасли

MACRO CLEAN – BSB00584



ШУМЕН 2026

MACRO CLEAN

Title of The Project / Име на проекта

Research, Cleaning Methodologies, Economic Valorization and Pilot Application for Macroalgal Blooms

Изследвания, методи за почистване, икономическа оползотворяване и пилотно приложение при цъфтеж на макроводорасли

Name of The Project Partner / Име на партньорската организация

Marmara Municipalities Union / Съюзът на общините „Мармара“

Contact Details of The Project Partner / Контакти на проектния партньор

e-mail: info@mbb.gov.tr

Phone: +90 212 402 19 00

www.marmara.gov.tr

Publishing Date/ Дата на публикуване

April 2026 / Април 2026

The responsibility for the content of this material is that of the author(s). The content of this material does not necessarily represent the official position of the European Union. Reproduction is authorized, provided the source is acknowledged, and any changes are indicated.

Отговорността за съдържанието на този материал носи(ят) авторът(ите). Съдържанието на този материал не отразява непременно официалната позиция на Европейския съюз. Разрешава се възпроизвеждането, при условие че се посочи източникът и се отбележат евентуалните промени.