



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ & ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ**  
**ΣΤΗΝ ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ**

**Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία**

Σύγχρονες εξελίξεις στην καλλιέργεια υδρόβιων φυτικών οργανισμών

**Αναστάσιος Γ. Πλατής**

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:  
Ελένη Μήλιου, Καθηγήτρια ΓΠΑ

**ΑΘΗΝΑ**  
**2023**

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία**

Σύγχρονες εξελίξεις στην καλλιέργεια υδρόβιων φυτικών οργανισμών

«Modern developments in the cultivation of aquatic plant organisms»

**Αναστάσιος Γ. Πλατής**

Εξεταστική Επιτροπή:

Ελένη Μήλιου, Καθηγήτρια ΓΠΑ (επιβλέπουσα)

Ναυσικά Καρακατσούλη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΓΠΑ

Εμμανουήλ Μαλανδράκης, Επίκουρος Καθηγητής ΓΠΑ

## Σύγχρονες εξελίξεις στην καλλιέργεια υδρόβιων φυτικών οργανισμών

*ΔΠΜΣ: Επιχειρηματικότητα & Συμβουλευτική στην Αγροτική Ανάπτυξη*

*Τμήμα Αγροτικής Οικονομίας & Ανάπτυξης*

*Τμήμα Επιστήμης Ζωικής Παραγωγής*

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φυτά που αναπτύσσονται εντός και γύρω από το νερό έχουν αναγνωριστεί από τους ερευνητές ως σημαντικοί οργανισμοί με πολλαπλά οφέλη, ήδη από τις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Τα οφέλη αυτά οδήγησαν στη διερεύνηση των πολλαπλών τους χρήσεων και στην ανάπτυξη τεχνολογιών για την καλύτερη και αποτελεσματικότερη επεξεργασία τους. Μια ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία των υδρόβιων οργανισμών που χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε πολλούς τομείς, αποτελούν τα φύκη. Με την παρούσα εργασία, λοιπόν, αποσκοπείτε η διερεύνηση των χρήσεων των φυκών και των τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί γύρω από την καλλιέργειά τους, αλλά και τη σημασία ανάπτυξης τεχνολογιών προς την κατεύθυνση αυτή.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζονται βασικοί εννοιολογικοί ορισμοί σχετικά με τους υδρόβιους οργανισμούς, ενώ στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η κατηγορία των φυκών. Ειδικότερα, εξετάζεται η σπουδαιότητα της αξιοποίησής τους σε πολλούς τομείς, οι δυνατότητες χρήσης τους και τα οφέλη. Έπειτα, στο τρίτο κεφάλαιο διερευνάται η σημασία καλλιέργειάς τους και διάφοροι τρόποι πραγμάτωσης αυτής αξιοποιώντας τη σύγχρονη τεχνολογία, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο υλοποιείται η παρουσίαση της κατηγορίας των μακροφυκών, τα οποία και αποτελούν το βασικό στοιχείο διερεύνησης. Εκτός, από τις βασικές κατηγορίες μακροφυκών, στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζονται και τα οφέλη από τις καλλιέργειες αυτών, αλλά και τα πλαίσια υλοποίησης των καλλιεργειών, με βάση τις ανάγκες που υπάρχουν. Εν συνεχεία, στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα για την καλλιέργεια των μακροφυκών, ενώ στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εξελίξεις σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζονται οι πιθανές κατηγορίες μακροφυκών που δύνανται να καλλιεργηθούν στην Ελλάδα, αλλά και οι δυνατότητες που υπάρχουν προς την κατεύθυνση αυτή στην Ελλάδα.

**Επιστημονική περιοχή:** Φυτική παραγωγή

**Λέξεις κλειδιά:** φύκη, καλλιέργεια, οφέλη, χρήσεις, τεχνολογία

## **Modern developments in the cultivation of aquatic plant organisms**

*Msc: Entrepreneurship & Consulting in Rural Development  
Department of Agricultural Economics & Development  
Department of Animal Science*

### **ABSTRACT**

Plants that grow in and around water have been recognized by researchers as important organisms with multiple benefits as early as the beginning of the 21st century. These benefits led to the investigation of their multiple uses and the development of technologies for their better and more efficient processing. A particularly important category of aquatic organisms that is used extensively in many fields are algae. With this work, therefore, it is intended to investigate the uses of seaweed and the technologies that have been developed around their cultivation, but also the importance of developing technologies in this direction.

In the first chapter of the work, basic conceptual definitions regarding aquatic organisms are presented, while then in the second chapter the category of algae is thoroughly analyzed. In particular, the importance of their utilization in many fields, their possibilities of use and benefits are examined. Then, in the third chapter, the importance of their cultivation and various ways of realizing it using modern technology are investigated, while in the fourth chapter, the presentation of the category of macroalgae is carried out, which are the main element of investigation. In addition to the basic categories of macroalgae, chapter four examines the benefits of these crops, as well as the frameworks for the implementation of the crops, based on the needs that exist. Then, in the fifth chapter, the methods used until now for the cultivation of macroalgae are examined, while in the sixth chapter, the developments at the global and European level are presented. Finally, in the seventh chapter, the possible categories of macroalgae that can be cultivated in Greece are examined, as well as the possibilities that exist in this direction in Greece.

**Scientific Area:** plant production

**Keywords:** algae, cultivation, benefits, uses, technology

## **Ευχαριστίες**

Ευχαριστώ την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη της.

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στη μνήμη του πατέρα μου.

Με την άδεια μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της.

## Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>Ευχαριστίες</b> .....	5
<b>Εισαγωγή</b> .....	8
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εννοιολογικοί ορισμοί</b> .....	12
1.1. Υδρόβια βλάστηση .....	12
1.2. Η σημασία της υδρόβιας βλάστησης .....	15
1.3 Φύκη και φυτοπλαγκτόν .....	16
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Φύκη</b> .....	20
2.1 Χημική σύσταση των φυκών .....	20
2.2.1. Χρήσεις και εφαρμογές των φυκών .....	22
2.2.2. Χρήση των φυκών για διαχείριση του βιοφίλμ.....	22
2.2.3. Παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοαποκατάσταση.....	23
2.2.4. Χρήσεις στις υδατοκαλλιέργειες .....	24
2.2.5. Χρήση των φυκών ως τρόφιμο.....	25
2.2.6. Χρήση των φυκών στην ιατρική και στη φαρμακολογία .....	26
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Καλλιέργεια φυκών</b> .....	29
3.1 Λόγοι καλλιέργειας φυκών .....	29
3.2 Καλλιέργειες μακροφυκών .....	31
3.2.1 Σημαντικότητα καλλιέργειας μακροφυκών .....	31
3.3 Αξιοποίηση της τεχνολογίας στις καλλιέργειες φυκών .....	33
3.4 Τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτόμες πρακτικές στην καλλιέργεια φυκών.....	35
3.4.1 Πρακτική Industry 4.0 για την καλλιέργεια μικροφυκών .....	35
3.4.2 Εφαρμογή της πρακτικής Phenomics.....	36
3.4.3 Εφαρμογή της Συνθετικής Βιολογίας.....	39
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Μακροφύκη</b> .....	41
4.1 Είδη μακροφυκών .....	41
4.2 Χρήση και καλλιέργεια μακροφυκών .....	47
<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Η σημασία της καλλιέργειας μακροφυκών και μέθοδοι καλλιέργειας</b> .....	50
5.1 Σημασία καλλιέργειας μακροφυκών.....	50
5.2 Μέθοδοι καλλιέργειας μακροφυκών.....	52

<b>Κεφάλαιο 6°: Οι εξελίξεις στην καλλιέργεια μακροφυκών.....</b>	<b>56</b>
<b>6.1 Εξελίξεις στις καλλιέργειες σε παγκόσμιο επίπεδο.....</b>	<b>56</b>
<b>6.2 Εξελίξεις στις καλλιέργειες σε ευρωπαϊκό επίπεδο .....</b>	<b>58</b>
<b>6.3 Σύγχρονες τεχνικές στην υδατοκαλλιέργεια φυκών.....</b>	<b>64</b>
<b>6.3.2 Μηχανολογία και Χημική Μηχανική.....</b>	<b>66</b>
<b>6.3.3 Πληροφορική και Ηλεκτροτεχνική μηχανική .....</b>	<b>67</b>
<b>6.3.4 Βιολογικές Επιστήμες και Μηχανική.....</b>	<b>68</b>
<b>6.3.5 Aquaculture 4.0 .....</b>	<b>69</b>
<b>Κεφάλαιο 7°: Πιθανότητες καλλιέργειας μακροφυκών στην Ελλάδα .....</b>	<b>72</b>
<b>Βιβλιογραφικές αναφορές.....</b>	<b>75</b>

## Εισαγωγή

Στις αρχές του εικοστού πρώτου αιώνα, οι ερευνητές αναγνώρισαν τη θεμελιώδη σημασία των φυτών που αναπτύσσονται μέσα και γύρω από το νερό, ενώ αναγνώρισαν και τη σημασία των υδάτινων οικοσυστημάτων στη λειτουργία και δομή του πλανήτη (Chambers et al., 2008). Πιο συγκεκριμένα, υποστήριξαν ότι τα υδρόβια φυτά αλληλοεπιδρούν και επηρεάζουν το υδρολογικό, γεωμορφολογικό και φυσικοχημικό περιβάλλον, ενώ αλληλοεπιδρούν και με ένα ευρύ φάσμα άλλων οργανισμών, καθώς συνιστούν τροφή για πολλούς οργανισμούς στα υδάτινα περιβάλλον (Wood et al., 2017). Η άποψη αυτή που υφίσταται σήμερα για τον ρόλο και τη λειτουργία των υδρόβιων φυτικών οργανισμών στην ευρύτερη δομή των οικοσυστημάτων, αντιτίθεται με τις παλαιότερες απόψεις σχετικά με τα φυτά αυτά, οι οποίες υποστήριξαν ότι τα υδρόβια φυτά αποτελούν ασήμαντα υδάτινα οικοσυστήματα και ότι θα μπορούσαν να αφαιρεθούν πλήρως χωρίς αυτή η δράση να επηρεάσει τη δομή και τη λειτουργία του πλανήτη (Chambers et al., 2008). Με το πέρασμα των χρόνων, όμως, και λόγω του ενδιαφέροντος των επιστημόνων να διερευνήσουν όλα τα είδη και τις ζωές του πλανήτη και του τρόπου με τον οποίο συμβάλλουν στη λειτουργία και στην εξισορρόπηση του περιβάλλοντος, αναδείχθηκε η σημασία και των υδρόβιων φυτών και αναπτύχθηκαν πολλές έρευνες προς τη διερεύνηση του ρόλου που διαδραματίζουν στα οικοσυστήματα, αλλά και της χρησιμότητας που δύνανται να προσφέρουν στον άνθρωπο. Ως συνέπεια της ανάπτυξης των ερευνών για τα υδρόβια φυτά έχουν αλλάξει σημαντικά σήμερα οι απόψεις μας για πολλά βασικά θέματα της υδρόβιας βοτανικής (Vermaat & Gross, 2016, Phillips et al., 2016).

Οι έρευνες σήμερα για το περιβάλλον αυξάνονται λόγω των αναγκών που έχουν παρουσιαστεί για την προστασία του, με αποτέλεσμα τους δύο τελευταίους αιώνες να υπάρχουν σημαντικές εξελίξεις τόσο για τον ρόλο του εδάφους όσο και για τον ρόλο των υδάτων στην επιβίωση του πλανήτη. Οι ρυθμοί των ερευνών που υλοποιούνται σε όλα τα περιβάλλοντα και οι αλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια είναι ραγδαίες, ενώ έχει αναγνωριστεί και η σημαντική αύξηση των παγκοσμίων αναγκών για τους υδάτινους πόρους (Dudgeon et al., 2006; Vorosmarty et al., 2010). Μάλιστα, έχει τονιστεί ότι στο μέλλον, οι έρευνες θα εστιάσουν ακόμα περισσότερο στα υδρόβια οικοσυστήματα και στα υδρόβια φυτά, καθώς αναδύονται συνεχώς καινούριες γνώσεις σχετικά με τα οφέλη τους. Για τον λόγο αυτό, οι



υδρόβιοι βοτανολόγοι επιχειρούν να αφυπνίσουν την παγκόσμια κοινότητα για το πεδίο αυτό έρευνας, το οποίο επηρεάζεται σημαντικά από την κλιματική αλλαγή, αλλά δύναται ακόμα να προσφέρει σημαντικά οφέλη στην ανθρωπότητα και στη ζωή του πλανήτη (Dudgeon et al., 2006).

Ο τομέας έρευνας για τους υδρόβιους φυτικούς οργανισμούς και οι συνεχείς γνώσεις που αναδύονται έχουν οδηγήσει στη διαμόρφωση εθνικών και διεθνών νομοθετικών οδηγιών για τον τρόπο που επιδρούν οι υδρόβιοι φυτικοί οργανισμοί, αλλά και για τους τρόπους με τους οποίους χρειάζεται να διερευνώνται. Για παράδειγμα, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, έχουν διαμορφωθεί και εφαρμοστεί κανονισμοί και οδηγίες σχετικά με τα ύδατα, με στόχο την αύξηση του ενδιαφέροντος για αυτά και την ορθή κατεύθυνση στη διερεύνησή τους (Hering et al., 2010). Απώτερος σκοπός των οδηγιών και των κανονισμών αυτών αποτελεί η διεύρυνση των γνώσεων και σε άλλες χώρες, ώστε να αναπτυχθεί σε παγκόσμιο επίπεδο το ενδιαφέρον για τα οφέλη των υδρόβιων φυτικών οργανισμών και να δημιουργηθούν έργα αποκατάστασης και προστασίας των υδάτινων περιβαλλόντων. Μια αρχική διεύρυνση της γνώσης αυτής έχει παρατηρηθεί στον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται τα συστήματα αξιολόγησης των γλυκών νερών στην Αφρική και στην Ασία (Kennedy et al., 2016). Ωστόσο, το παγκόσμιο οικονομικό κραχ το 2008 δυσχέρανε την απόκτηση χρηματοδότησης για έρευνα των υδάτινων συστημάτων σε πολλές χώρες, χωρίς βέβαια τη μείωση του ενδιαφέροντος προς την μακροπρόθεσμη κατανόηση των σύνθετων αλληλεπιδράσεων και διαδικασιών που υφίστανται τα υδάτινα οικοσυστήματα (Krugmann, 2012). Σε πολλές χώρες, μπορεί να μειώθηκε το ποσό χρηματοδότησης των ερευνών, αλλά έχουν δημιουργηθεί οι κατάλληλες βάσεις για τη χρήση τεχνικών και πρακτικών με λιγότερα χρήματα, διότι πλέον έχει αναγνωριστεί η σημασία των συστημάτων αυτών. Μερικές καθιερωμένες τεχνικές που αξιοποιούνται όλο και περισσότερο στην υδρόβια βοτανική, συνιστούν η μοριακή βιολογία, η οικολογική μοντελοποίηση και η υπολογιστική βιολογία, οι οποίες επιτρέπουν την ενσωμάτωση υδρόβιων φυτών σε μοντέλα (Wood et al., 2014; Stillman et al., 2015). Επίσης, η συνεχής ανάπτυξη του τηλεχειριστηρίου ανίχνευσης, η τεχνολογία drone και το λογισμικό για ερμηνεία αεροφωτογραφιών, σήμερα προσφέρουν νέους τύπους ανάλυσης των υδάτων (McKinley et al., 2017). Με τις τεχνικές αυτές οι υδρόβιοι βοτανολόγοι έχουν τη δυνατότητα να εργάζονται από μια ιδιαίτερα ισχυρή θέση, όπου η φυσιολογία των φυτών δύναται να προσδιοριστεί και να περιγραφεί πλήρως, παρέχοντας βαθιά γνώση των υδρόβιων φυτών και των ρόλων

τους στη λειτουργία των υδάτινων συστημάτων. Τα υδρόβια φυτά, επίσης εμφανίζουν και πολλαπλά πλεονεκτήματα έναντι του συνόλου των υδρόβιων βιοτόπων σε ερευνητικό επίπεδο, καθώς μπορούν να χαρτογραφηθούν με ακρίβεια και να διερευνηθούν και να καλλιεργηθούν εύκολα στο εργαστήριο (Wood et al., 2014).

Η επέκταση των ερευνών στα υδάτινα οικοσυστήματα έχει αναδείξει και τα πολυεπίπεδα οφέλη των υδρόβιων φυτικών οργανισμών. Πιο συγκεκριμένα, έχει αναγνωριστεί ότι τα υδάτινα οικοσυστήματα παρέχουν αναντικατάστατες οικονομικές και πολιτιστικές υπηρεσίες στις ανθρώπινες κοινωνίες, οι οποίες βιώνουν επί του παρόντος πιο σημαντικές απώλειες σε σύγκριση με τις υπηρεσίες που παρέχονται από τα χερσαία οικοσυστήματα (Dudgeon et al., 2006). Η κλιματική αλλαγή και τα περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν επηρεάσει σημαντικά τη λειτουργία και τη βιωσιμότητά τους. Για παράδειγμα έχει τονιστεί ότι οι περισσότερες ρηχές λίμνες που αποτελούν βασικά συστατικά του οικοσυστήματος γλυκού νερού αντιμετωπίζουν μια σειρά οικολογικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως η απώλεια υδάτων, ο κατακερματισμός των οικοσυστημάτων των λιμνών, η μείωση της βιοποικιλότητας και η αποδυνάμωση των οικολογικών λειτουργιών. Οι ανθρωπογενείς επιδράσεις, επιπλέον στα υδάτινα αυτά περιβάλλοντα όπως η ρύπανση των υδάτων, η αποχέτευση, η αποστράγγιση και η μετατροπή των υδάτινων περιβαλλόντων σε περιοχές για γεωργική ή αστική χρήση έχουν προκαλέσει την υποβάθμιση πολλών ρηχών λιμνών (De Vargas et al., 2015). Βέβαια σημαντικές επιδράσεις και περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν αναγνωριστεί ότι υφίστανται και στα θαλάσσια οικοσυστήματα, τα οποία διαθέτουν σημαντικό πλήθος υδρόβιων φυτικών οργανισμών χρήσιμων για τη διατήρηση της θαλάσσιας βιοποικιλότητας (De Vargas et al., 2015; Dudgeon et al., 2006).

Τα φύκη είναι μία μεγάλη πολυποίκιλη ομάδα που αποτελείται κυρίως από υδρόβιους, αυτότροφους, φωτοσυνθετικούς οργανισμούς που κυμαίνονται από μικροσκοπικές μονοκύτταρες μορφές έως πολυκύτταρες, που διακρίνονται από τα αγγειακά φυτά (vascular plants) ή ανώτερα φυτά γνωστά και ως Τραχειόφυτα (Tracheophyta), από την απουσία δομών όπως πραγματικές ρίζες, μίσχους, φύλλα και άνθη. Σύμφωνα με το λεξιλόγιο του FAO (2022), τα φύκη περιλαμβάνουν μακροφύκη, μονοκύτταρα μικροφύκη και τα Κυανοβακτήρια, τα οποία δεν είναι πραγματικά φύκη αλλά άτυπα είναι γνωστά ως κυανοπράσινα φύκη (π.χ. *Spirulina*). Στην παρούσα εργασία παρατίθενται εννοιολογικοί ορισμοί, βασικά χαρακτηριστικά, τεχνικές καλλιέργειας και χρησιμότητα των περισσότερων ομάδων των υδρόβιων

φυτικών οργανισμών με έμφαση στα μακροφύκη που αποτελούν και το μεγαλύτερο μέρος της υδρόβιας φυτικής ετήσιας παραγωγής από υδατοκαλλιέργειες.

Λαμβάνοντας υπόψη, λοιπόν, την αύξηση του ενδιαφέροντος των ερευνητών για τα υδάτινα περιβάλλοντα και τους υδρόβιους φυτικούς οργανισμούς, με την παρούσα εργασία επιχειρείται να διερευνηθεί το πεδίο καλλιέργειάς τους και οι πρακτικές και οι τεχνικές που αξιοποιούνται. Μάλιστα, με δεδομένο, ότι τα φύκη συνιστούν υδρόβιους φυτικούς οργανισμούς με πολλαπλές χρήσεις, η διερεύνηση του τρόπου καλλιέργειας τους εστιάζει στην καλλιέργεια των φυκών και των πρακτικών που χρησιμοποιούνται σε αυτή. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται οι βασικοί ορισμοί που χρησιμοποιούνται στην εργασία, ενώ στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να αξιοποιηθούν τα φύκη στις υδάτινες καλλιέργειες. Έπειτα στο τρίτο κεφάλαιο και τέταρτο κεφάλαιο αντίστοιχα διερευνάται η συμβολή των φυκών στη διατροφή των ανθρώπων και των ζώων. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σύγχρονες εξελίξεις σε εθνικό και διεθνές επίπεδο στην καλλιέργεια των φυκών.

## **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εννοιολογικοί ορισμοί**

Προτού ξεκινήσουμε την πραγμάτευση του κυρίου θέματος της εργασίας, το οποίο σχετίζεται με τη διερεύνηση των τρόπων καλλιέργειας των υδρόβιων οργανισμών, εστιάζοντας στις καλλιέργειες των φυκών, κρίνουμε σκόπιμο να διασαφηνίσουμε κάποιες βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται καθ' όλη την εργασία. Πιο συγκεκριμένα, στο παρόν κεφάλαιο διασαφηνίζεται η έννοια της υδρόβιας βλάστησης και των τύπων αυτής. Επίσης, επιχειρείται να διασαφηνιστεί ο λόγος για τον οποίο κρίνεται απαραίτητη η διατήρησή της και η φροντίδα της, λόγω της σημαντικότητας για τη διατήρηση των υδρόβιων οικοσυστημάτων.

### **1.1.Υδρόβια βλάστηση**

Η υδρόβια βλάστηση, σαν έννοια αναφέρεται σε όλα τα φυτά που βρίσκονται στο νερό, όπου ζουν και αναπτύσσονται πλήρως βυθισμένα ή κατά ένα μέρος βυθισμένα σε αυτό. Βέβαια, υπάρχουν και φυτικοί μικροοργανισμοί που αιωρούνται στο νερό, καθώς έχουν προσαρμοστεί στον τρόπο αυτό ανάπτυξης και διαβίωσης. Οι μικροοργανισμοί αυτοί, λόγω της προσαρμογής τους στις κινήσεις και στη ροή του νερού, διακρίνονται από παθητικότητα στη μετακίνηση, ενώ με έναν ορισμό ονομάζονται φυτοπλαγκτόν. Ωστόσο, η διάκριση και η διασαφήνιση των φυτών που ανήκουν στην υδρόβια βλάστηση και σε αυτά που ανήκουν στη χερσαία βλάστηση δεν καθίσταται πάντα εύκολη, καθώς υφίσταται μια δυναμική και στενή σχέση για τα δύο περιβάλλοντα (Sculthorpe, 1967). Για τον λόγο αυτό, για την έννοια της υδρόβιας βλάστησης στο πέρασμα των χρόνων έχουν διατυπωθεί πολλοί ορισμοί, οι οποίοι επιχειρούν να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά της και τον τρόπο λειτουργίας της. Μάλιστα οι ορισμοί μεταξύ τους διαθέτουν κάποιες διαφορές ανάλογα με την προσέγγιση και τις ανάγκες χρήσης νερού που κρίνουν οι επιστήμονες ότι παρουσιάζουν (Tiner, 1999). Ο πρώτος ορισμός σχετικά με την υδρόβια βλάστηση και τα φυτά αυτά, έρχεται από τον Warming (1909), ο οποίος επιχειρήσε να κατατάξει γενικά τη βλάστηση σε υδρόβια και χερσαία, ανάλογα με την τοποθεσία εμφάνισής της και τις ανάγκες νερού που διαθέτουν (όπ. αναφ. στο Tiner, 1999). Λίγα χρόνια αργότερα από τον Raunkiaer (1934) διατυπώθηκε άλλος ορισμός σχετικά με την υδρόβια βλάστηση. Πιο συγκεκριμένα, ως υδρόφυτα χαρακτηρίζονται τα φυτά εκείνα των οποίων τα βλαστικά μέρη βρίσκονται πλήρως βυθισμένα στο νερό ή μερικώς βυθισμένα, ενώ διασαφηνίζεται ότι η ύπαρξή τους και η ανάπτυξή τους σχετίζεται άμεσα με τις μεγάλες ποσότητες νερού που χρειάζονται. Ωστόσο, ο

ορισμός αυτός, παρόλο που είναι ιδιαίτερα χρηστικός και σαφής σχετικά με τη διαφορά ανάμεσα στα υδρόβια και τα χερσαία φυτά, αποκλείει μερικά υπερυδατικά φυτά, όπως εκείνα που ανήκουν στα γένη *Scirpus* για παράδειγμα, και τα οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι ριζωμένα στο υπόστρωμα.

Αργότερα, από τον Iversen (1936), διατυπώθηκε ένας άλλος ορισμός σχετικά με την υδρόβια βλάστηση, ο οποίος δεν αποκρίνεται ιδιαίτερα από αυτόν του Raunkiaer, αλλά προτάσσει μια επιπλέον κατηγορία σε αυτά. Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζει ότι τα λιμνόφυτα, όπως ονομάζει τα υδρόβια φυτά, αποτελούν τη μία κατηγορία, η οποία διαθέτει βλαστητικά μέρη πλήρως βυθισμένα στο νερό ή επιπλέοντα. Η δεύτερη κατηγορία που αναγνωρίζει την ονομάζει αμφίφυτα, τα οποία συνιστούν στην ουσία χερσαία φυτά, τα οποία όμως δύνανται να αναπτύξουν και υδρόβια μορφή εάν κριθεί αναγκαίο ή να βρεθούν σε υδάτινα περιβάλλοντα. Η δεύτερη αυτή κατηγορία φυτών, παρουσιάζει μια προσαρμοστικότητα στα περιβάλλοντα που τους επιτρέπει την ανάπτυξη και εξέλιξή τους (Iversen, 1936). Πέραν από τους παραπάνω ορισμούς έχουν διατυπωθεί και πολλοί ακόμα, οι οποίοι όμως στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στους παραπάνω ή συνιστούν εξέλιξή τους. Για παράδειγμα, οι Cook et al. (1974), με τον δικό τους ορισμό αναφέρθηκαν στην υδρόβια βλάστηση με τον όρο *μακρόφυτα των γλυκών νερών*, ο οποίος σχετίζεται και περιγράφει τα ανώτερα υδρόβια φυτά που διαθέτουν βυθισμένα φωτοσυνθετικά ενεργά μέρη καθ' όλη τη διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου, και στα υδρόβια φυτά τα οποία για μερικούς μήνες κατά τη διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου, δύνανται να αναπτυχθούν και να εξελιχθούν στην επιφάνεια του νερού.

Βέβαια, όλοι οι παραπάνω ορισμοί, εξετάζουν την υδρόβια βλάστηση μόνο από τη βιολογία τους και τον τρόπο ανάπτυξής τους, εξαιρώντας τον τρόπο λειτουργίας τους στα υδάτινα οικοσυστήματα (Dodds, 2002). Σήμερα χρησιμοποιείται εκτενώς ο όρος υδρόβιο μακρόφυτο, ο οποίος αναφέρεται και περιλαμβάνει όλες τις μακροσκοπικές μορφές υδρόβιας βλάστησης, όπως τα μακροφύκη, τα βρύα, αλλά και τα αγγειόσπερμα, τα οποία έχει διαπιστωθεί ότι προέκυψαν από τη χερσαία βλάστηση έπειτα από προσαρμογή της στα υδάτινα περιβάλλοντα (Cook 1996; Philbrick & Les 1996). Τα υδρόβια μακρόφυτα εμφανίζονται τόσο σε θαλασσινά νερά, σε υφάλμυρα νερά, αλλά και σε γλυκά, με αποτέλεσμα να αποτελούν μία ομάδα με πολλές διαφορετικές μορφές (Cook 1996, Dodds, 2002). Για τον λόγο αυτό κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης των υδρόβιων μακρόφυτων από διάφορους επιστήμονες. Για παράδειγμα μια διάκριση αυτών με βάση την επαφή τους

με το νερό, υλοποιήθηκε από τον Thunmark κατά τη δεκαετία του 1950 (Hutchinson, 1975). Σύμφωνα με τη διάκριση αυτή τα μακρόφυτα διακρίνονται σε:

- Υφυδατικά (hyphydates), μια κατηγορία που περιλαμβάνει φυτά που ζουν μόνιμα εντελώς βυθισμένα κάτω από το νερό.
- Εφυδατικά (ephydates), μια κατηγορία που περιλαμβάνει υδρόβια φυτά που έχουν τα βλαστητικά τους μέρη στην επιφάνεια του νερού.
- υπερυδατικά (hyperhydates), μια κατηγορία που περιλαμβάνει φυτά που αναπτύσσονται εντός του υδάτων, αλλά διαθέτουν βλαστητικά που αναδύονται στον αέρα.

Μια άλλη ευρέως διαδεδομένη διάκριση των μακρόφυτων, η οποία σχετίζεται με τον τρόπο προσκόλλησης που εμφανίζουν σε σχέση με το έδαφος, πραγματοποιήθηκε από τον Sculthorpe (1967). Η διάκριση αυτή, μάλιστα, έχει συμβάλει σημαντικά στην υλοποίηση διαφόρων ερευνών και μελετών, ενώ από τις βασικές κατηγορίες, υπάρχουν και διάφορες υποκατηγορίες. Έτσι, σύμφωνα με τη διάκριση του Sculthorpe (1967), οι κατηγορίες είναι οι εξής:

- Υδρόβια μακρόφυτα τα οποία προσκολλώνται στο υπόστρωμα, μια κατηγορία που διακρίνεται επίσης σε:
  - Υδρόβια μακρόφυτα τα οποία εξέχουν από την υδάτινη επιφάνεια και εμφανίζονται σε εδάφη που έχουν πλημμυρίσει ή διαθέτουν ποσότητα νερού που υπερχειλίζει. Τα συγκεκριμένα φυτά διαθέτουν τις ρίζες τους εντός των υδάτων, ωστόσο τα μέρη των φυτών που εμπλέκονται στη φωτοσύνθεση και στην αναπαραγωγή βρίσκονται στην επιφάνεια των υδάτων. Τα φυτά αυτά έχουν αρκετά μεγάλο βιολογικό κύκλο, όπως τα φυτά που σχηματίζουν του καλαμώνες.
  - Υδρόβια μακρόφυτα με φύλλα επιπλέοντα στο νερό, τα οποία αποτελούνται κυρίως από αγγειόσπερμα που είναι προσκολλημένα στο υπόστρωμα, αλλά τα φύλλα τους επιπλέον στην επιφάνεια των νερών. Τα μακρόφυτα που εντάσσονται στη συγκεκριμένη κατηγορία εκδηλώνουν το φαινόμενο της ετεροφυλλίας, σύμφωνα με το οποίο αναπτύσσουν δύο είδη φύλλων με διαφορετικές μορφές. Εκτός, όμως από τα φύλλα τους και τα όργανα αναπαραγωγής τους βρίσκονται στην επιφάνεια του νερού και επιπλέον, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις τα όργανα αναπαραγωγής τους δύνανται να βρίσκονται και στον αέρα.

- Υδρόβια μακρόφυτα πλήρως βυθισμένα, μια κατηγορία που περιλαμβάνει πτεριδόφυτα, βρύα, χαρόφυτα και αγγειόσπερμα. Τα φυτά αυτά ολοκληρώνουν τον βιολογικό τους κύκλο εντός του νερού, ενώ τα θρεπτικά τους στοιχεία τα λαμβάνουν τις περισσότερες φορές από το υπόστρωμα.
- Ελεύθερα μακρόφυτα που πλέουν, μια κατηγορία που περιλαμβάνει φυτά που διαθέτουν τις ρίζες τους εντός του νερού και κάποια μέρη τους ελεύθερα πλέοντα στην επιφάνεια. Τα αναπαραγωγικά τους μέρη συνήθως βρίσκονται στην επιφάνεια, ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις όπως στο γένος *Ceratophyllum* sp τα αναπαραγωγικά όργανα είναι βυθισμένα στο νερό. Τα φυτά της κατηγορίας αυτής συναντώνται σε στάσιμα νερά ή σε νερά που έχουν μικρή ροή, ενώ ο πολλαπλασιασμός τους οφείλεται στον πολλαπλασιασμό με παραφυάδες (Παπαστεργιάδου, 1990; Cronk & Fennessy, 2001).

## 1.2.Η σημασία της υδρόβιας βλάστησης

Στους υγρότοπους που αποτελούν μια ενδιάμεση περιοχή των χερσαίων εκτάσεων και υδάτινων, υφίστανται πολλές κατηγορίες υδρόβιων φυτών, οι οποίες είναι πολύ περισσότερες από αυτές που αναπτύσσονται εντός των υδάτων ή στις χερσαίες εκτάσεις (Βερεσόγλου, 2002). Τα υδάτινα οικοσυστήματα κρίνονται απαραίτητα για την εύρυθμη λειτουργία του περιβάλλοντος, και για τον λόγο αυτό τα μακρόφυτα που αναπτύσσονται στις περιοχές αυτές αναγνωρίζονται ως πολύ σημαντικά είδη, καθώς επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις φυσικοχημικές ιδιότητες των παράκτιων περιβαλλόντων και των αβαθών νερών (Wetzel, 1983). Για τον λόγο αυτό η χρησιμότητά τους αναγνωρίζεται από:

- Τη συμβολή τους στην ενίσχυση της καθαρότητας των υδάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα μακρόφυτα ενισχύουν τα ύδατα με οξυγόνο το οποίο παράγεται από τη διαδικασία της φωτοσύνθεσής τους (Wetzel, 1983; Βερεσόγλου, 2002).
- Την προσφορά τους σε οργανική ύλη, καθώς τα νεκρά τους τμήματα αποικοδομούνται ενισχύοντας τα ύδατα με θρεπτικά συστατικά. Η οργανική αυτή ύλη κρίνεται απαραίτητη για τη διατήρηση του οικοσυστήματος (Wetzel, 1983).
- Τη συνεισφορά τους ως αποθηκευτικός χώρος θρεπτικών συστατικών, καθώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του βιογεωχημικού κύκλου

του νερού. Η συνεισφορά τους αυτή αναγνωρίζεται κυρίως σε περιπτώσεις ευτροφισμού (Wetzel, 1983).

- Τη συμβολή τους στη μείωση της ενέργειας του κυματισμού, ενώ συνεισφέρουν και στην αλλαγή των συνθηκών φωτισμού και τη μείωση της έντασης αυτού στα υδάτινα περιβάλλοντα (Wetzel, 1983).
- Τη χρήση τους ως βελτιωτικά μέσα της ποιότητας των υδάτων, αλλά και γενικά του περιβάλλοντος. Με δεδομένη, επίσης, τη σημαντική αυτή συμβολή τους στη διατήρηση της ισορροπίας του περιβάλλοντος, ολόένα και περισσότεροι τεχνητοί υγρότοποι δημιουργούνται σε διάφορες περιοχές, όπου και χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία διαφόρων ειδών αποβλήτων (Kent, 2001; Cronk & Fennessy, 2001).
- Τη λειτουργία τους ως σταθεροποιητές του ιζήματος στον πυθμένα. Με τον τρόπο αυτό προστατεύουν σημαντικά τις ακτές από τη διαδικασία της διάβρωσης και συμβάλλουν σημαντικά στην ενίσχυση των οχθών. Επίσης, προσφέρουν προστασία και σε διάφορα άλλα είδη υδρόβιας βλάστησης, όπως τα μικροφύκη (Γεράκης κ.ά., 2007).
- Τη συμβολή τους στην προστασία και ισορροπία της ιχθυοπανίδας. Επίσης, εκτός από την ιχθυοπανίδα συμβάλλουν σημαντικά και στη διατήρηση της ζωής άλλων ζώων, καθώς πολλά ζώα καταναλώνουν ως τροφή τα αποσυντιθέμενα μέρη τους (Pott, 1986).
- Την αισθητική τους αξία, καθώς δύναται να αποτελέσουν στοιχεία διακόσμησης οικιών και ενυδρείων. Επιπλέον δύναται να καταστούν δομικά υλικά για την κατασκευή διαφόρων αντικειμένων και κτιρίων, ενώ αναγνωρίζεται και η φαρμακευτική τους αξία (Wetzel, 1983).

### 1.3 Φύκη και φυτοπλαγκτόν

Τα φύκη χαρακτηρίζονται συλλογικά από πολλές ταξινομικές ομάδες φωτοσυνθετικών οργανισμών που δεν ανήκουν στο αυστηρώς ορισμένο βασίλειο των Φυτών (*Plantae sensu stricto*). Συχνά γίνεται λανθασμένη συσχέτιση των φυκών, με τα ανώτερα φυτά (Σπερματόφυτα) όπως το είδος *Posidonia oceanica* (Σπερματόφυτα: Αγγειόσπερμα). Τα φύκη είναι μια πολυφυλετική κατηγορία οργανισμών, δηλαδή αποτελείται από ταξινομικές ομάδες που δεν είναι άμεσα συγγενικές μεταξύ τους αφού ανήκουν σε διαφορετικά βασίλεια και συνομοταξίες. Πιο παλιά τα φωτοσυνθετικά προκαρυωτικά βακτήρια, δηλαδή τα Κυανοβακτήρια θεωρούνταν και



αυτά φύκη. Με την κατάταξή τους όμως εκτός των φυκών, τα φύκη είναι πλέον εξ ορισμού ευκαρυωτικά. Ορισμένα φύκη ανήκουν στο βασίλειο των Φυτών και άλλα στο βασίλειο των Χρωμιστών. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάπτυξης της φυλογενετικής ανάλυσης, έχουν γίνει μεγάλες ανακατατάξεις και αλλαγές στην ταξινόμηση των φυκών.

Το φυτοπλαγκτόν περιλαμβάνει όλους τους φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς (τόσο προκαρυωτικούς - Κυανοβακτήρια- όσο και ευκαρυωτικούς) που είναι προσαρμοσμένοι να ζουν αιωρούμενοι σε επιφανειακά ύδατα λιμνών, ποταμών και ωκεανών. Ο όρος φυτοπλαγκτόν προέρχεται από τις λέξεις «φυτό» και «πλαγκτός» που σημαίνει ταξιδευτής-περιπλανώμενος. Ως φυτοπλαγκτόν, ορίζονται οι μονοκύτταροι οργανισμοί διαφόρων διαστάσεων οι οποίοι φωτοσυνθέτουν, όπως Διάτομα και Δινομαστιγωτά. Τα μακρόφυτα συμπεριλαμβάνουν πολυκύτταρους οργανισμούς, οι οποίοι ανήκουν στα πράσινα, κόκκινα και καφέ φύκη και σχηματίζουν συνήθως νήματα ή θαλλούς. Μάλιστα, τα καφέ φύκη δεν έχουν μονοκύτταρους αντιπροσώπους, ενώ τα κόκκινα φύκη έχουν λίγους. Ως φωτοσυνθετικοί οργανισμοί, όλες αυτές οι ομάδες παίζουν βασικό ρόλο στην παραγωγικότητα του ωκεανού και αποτελούν τη βάση της θαλάσσιας τροφικής αλυσίδας.

Από την άλλη πλευρά, η χρήση μακροφυκών ως πιθανής πηγής χημικών υψηλής αξίας και για θεραπευτικούς σκοπούς έχει μακρά ιστορία. Πρόσφατα, τα μακροφύκη έχουν χρησιμοποιηθεί ως νέα τροφή με πιθανά διατροφικά οφέλη στη βιομηχανία και την ιατρική για διάφορους σκοπούς. Επιπλέον, τα μακροφύκη έχουν αποδειχθεί ότι παρέχουν μια πλούσια πηγή φυσικών βιοδραστικών ενώσεων με αντικές, αντιμυκητιακές, αντιβακτηριακές, αντιοξειδωτικές, αντιφλεγμονώδεις, υποχοληστερολαιμικές, υπολιπιδαιμικές, και αντινεοπλασματικές ιδιότητες (El-Baroty et al., 2007). Έτσι, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον στον τομέα της έρευνας για τις θετικές επίδραση των μακροφυκών στην ανθρώπινη υγεία και άλλα οφέλη, με αποτέλεσμα την αύξηση του ενδιαφέροντος για τη χρήση ως νέα και ασφαλή φυτικά υλικά που δύνανται να προσφέρουν σημαντικά και έχουν ιδιαίτερη αξία.

Ορισμένα φύκη θεωρούνται πλούσιες πηγές φυσικών αντιοξειδωτικών, αν και τα μακροφύκη έχουν λάβει μεγάλη προσοχή ως πιθανά φυσικά αντιοξειδωτικά. Τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμεύσουν ως συνεχής και αξιόπιστη πηγή φυσικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των αντιοξειδωτικών, επειδή μπορούν να καλλιεργηθούν σε βιοαντιδραστήρες σε μεγάλη κλίμακα. Επιπλέον, οι ιδιότητες των

κυττάρων μικροφυκών μπορούν να ελεγχθούν, ώστε να μην περιέχουν ζιζανιοκτόνα και φυτοφάρμακα, ή άλλες τοξικές ουσίες, χρησιμοποιώντας καθαρά θρεπτικά μέσα για την ανάπτυξη των μικροφυκών. Η αξία των μικροφυκών ως πηγής φυσικών αντιοξειδωτικών ενισχύεται περαιτέρω από τη σχετική ευκολία καθαρισμού των ενώσεων-στόχων (Shanab et al., 2011).

Τα μικροφύκη αντιπροσωπεύουν μια σχεδόν ανεκμετάλλευτη πηγή φυσικών αντιοξειδωτικών, λόγω της τεράστιας βιοποικιλότητάς τους, πολύ πιο διαφοροποιημένη από τα ανώτερα φυτά. Ωστόσο, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι ομάδες μικροφυκών ως φυσικές πηγές αντιοξειδωτικών, λόγω των ευρέως ποικίλων περιεχομένων τους σε προϊόντα-στόχους, του ρυθμού ανάπτυξης ή των αποδόσεων, της ευκολίας καλλιέργειας ή/και άλλων παραγόντων. Οι αναφορές για την αντιοξειδωτική δράση των μικροφυκών είναι περιορισμένες (Abou Elalla et al., 2009).

Επίσης, μια άλλη κατηγορία μικροοργανισμών, τα Κυανοβακτήρια έχουν αναγνωριστεί ως μία από τις πιο υποσχόμενες ομάδες οργανισμών από τις οποίες απομονώνονται νέα και βιοχημικά ενεργά φυσικά προϊόντα. Τα Κυανοβακτήρια ως προκαρυωτικοί οργανισμοί δεν κατατάσσονται πλέον στα φύκη, αλλά αποτελούν σημαντικό μέρος του φυτοπλαγκτού και ιδιαίτερα του πικο-φυτοπλαγκτού. Κυανοβακτήρια όπως *Spirulina*, *Anabaena*, *Nostoc* και *Oscillatoria* παράγουν μεγάλη ποικιλία δευτερογενών μεταβολιτών (Shalaby et al., 2010). Η μόνη συγκρίσιμη ομάδα δευτερογενών μεταβολιτών, αποτελούν οι ακτινομύκητες, οι οποίοι έχουν αποδώσει έναν τεράστιο αριθμό μεταβολιτών. Ο ρυθμός ανακάλυψης από παραδοσιακούς παραγωγούς μικροβιακών φαρμάκων, όπως οι ακτινομύκητες και οι υπομύκητες που βρίσκονται στο επίκεντρο της φαρμακευτικής έρευνας εδώ και δεκαετίες, μειώνεται και είναι καιρός να στραφούμε στα Κυανοβακτήρια και να εκμεταλλευτούμε τις δυνατότητές τους. Αυτό είναι υψίστης σημασίας για την καταπολέμηση των ολοένα και πιο ανθεκτικών παθογόνων και νεοεμφανιζόμενων ασθενειών (Hehmann et al., 2002). Επειδή τα Κυανοβακτήρια είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητα, αντιπροσωπεύουν μια πλούσια ευκαιρία για ανακάλυψη. Το αναμενόμενο ποσοστό εκ νέου ανακάλυψης είναι πολύ χαμηλότερο από ό,τι για άλλες καλύτερα μελετημένες ομάδες οργανισμών. Τα Κυανοβακτήρια παράγουν μια μεγάλη ποικιλία βιοδραστικών ενώσεων, βελτιώνουν το μεταβολισμό (Burja et al., 2001).

Τα Κυανοβακτήρια είναι επίσης γνωστό ότι παράγουν αντικαρκινικές, αντιαγκονικές και αντιμυκητιακές ενώσεις. Πολλές από τις φαρμακευτικά ενδιαφέρουσες ουσίες στα Κυανοβακτήρια είναι πεπτίδια, συμπεριλαμβανομένων των κυανοβακτηριακών τοξινών και είναι σημαντικές υποψήφιες ενώσεις για αντικαρκινικά φάρμακα. Οι πεπτιδικές συνθετάσες είναι κοινές στα Κυανοβακτήρια και είναι υπεύθυνες για την παραγωγή κυανοβακτηριακών ηπατοτοξινών και άλλων πεπτιδίων. Οι πολυκετιδικές ενώσεις εμπλέκονται επίσης στη βιοσύνθεση ορισμένων βιοδραστικών ενώσεων Κυανοβακτηρίων (π.χ. μικροκυστινών). Η τεχνολογία του φωτοβιοαντιδραστήρα έχει προχωρήσει σε σημείο όπου είναι σχετικά εύκολο να κλιμακωθούν οι καλλιέργειες, ώστε να παραχθεί αρκετό υλικό για ερευνητικούς σκοπούς. Τα Κυανοβακτήρια έχουν επίσης καλές δυνατότητες ως τροφή (Puglisi et al., 2004; Barros et al., 2005).

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Φύκη

### 2.1 Χημική σύσταση των φυκών

Η χλωρίδα στο υδάτινο περιβάλλον αποτελείται από εξελικτικά κατώτερους και ανώτερους υδρόβιους ή ημιυδρόβιους οργανισμούς, που ζουν απορροφώντας την ηλιακή ενέργεια μέσω της φωτοσύνθεσης. Ως κατώτεροι αναφέρονται τα μονοκύτταρα μικροφύκη και τα πολυκύτταρα μακροφύκη, ενώ ως ανώτεροι αναφέρονται τα φανερόγαμα ή θαλάσσια ανθόφυτα (ΙΝΑΛΕ 2013; Αμουτζοπούλου – Σχοινιά, 2007). Τα φύκη ονομάζονται λανθασμένα και ως άλγες ή άλγη από τη λατινική λέξη algae. Η μελέτη τους ονομάζεται Φυκολογία (Βεργίνη, 2014). Θεωρούνται ως η πρώτη μορφή ζωής στη Γη, 3.5 δισεκατομμύρια χρόνια πριν τον άνθρωπο (Margulis, 1981) και απαντώνται από πολικές σε τροπικές περιοχές και από ευτροφικές παράκτιες θάλασσες σε oligοτροφικούς ωκεανούς (Στεργίου & Τσίκληρας, 2015). Είναι υπεύθυνα περίπου για το 50% της φωτοσύνθεσης που συμβαίνει στη Γη κάθε χρόνο (Qin et al. 2012) συμβάλλοντας στη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, αφού συγκρατούν με τη φωτοσύνθεση το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας (Christaki et al., 2010). Η φωτοσύνθεση του θαλάσσιου περιβάλλοντος κυριαρχείται από τα Κυανοβακτήρια και ευκαρυωτικά φύκη (Qin et al. 2012).

Είναι μια εξαιρετικά ετερογενής ομάδα οργανισμών με πολλές μεταξύ τους διαφορές, όσον αφορά τη κυτταρική δομή, τη μορφολογία, τη φυσιολογία, τη φυλογένεση (Τζανής, 2018) καθώς και τη χημική σύσταση που ποικίλλει ευρέως (Christaki et al., 2010). Σύμφωνα με το μέγεθός τους διακρίνονται στα μικροφύκη, τα οποία είναι ορατά με τη βοήθεια μικροσκοπίου, με μέγεθος από 0,2μm έως >200μm και τα μακροφύκη, με μήκος λίγων χιλιοστών έως μερικών δεκάδων μέτρων (π.χ. γιγάντια Φαιοφύκη που φτάνουν τα 60m) (Βουλτσιάδου κ.α. 2015; Μάρκου κ.α. 2013). Ο αριθμός των φυκών υπερβαίνει τις 50.000 (καταγράφονται συνεχώς νέα είδη) (Χώτος, 2018), εκ των οποίων στον ελλαδικό χώρο υπάρχουν περίπου 600 είδη μακροφυκών και περισσότερα από 2000 είδη φυτοπλαγκτού (<https://www.pev.gr/index.php/epimorfoseis/epimorfosi-foreon/sinedria-epimorfosiforeon/850-6o-ekpaideftiko-symposio-fykologias>).

Στην κατηγορία των φυκών συμπεριλαμβάνονταν παλαιότερα και τα Κυανοβακτήρια (μπλε - πράσινα φύκη ή Cyanophyta), τα οποία πλέον ταξινομούνται στο βασίλειο των Βακτηρίων ως προκαρυωτικοί οργανισμοί και φυλογενετικά είναι πιο κοντά στα βακτήρια απ' ότι στα υπόλοιπα φύκη. Τα φύκη δεν αποτελούν

ταξινομική ομάδα αλλά οριοθετούνται σύμφωνα με τα οικολογικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά τους (Βουλτσιάδου κ.α. 2015). Τα φύκη είναι αερόβιοι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί, οι οποίοι χρησιμοποιούν ανόργανα συστατικά για την ανάπτυξή τους ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^-$ ) και το φως ως πηγή ενέργειας, παράγοντας  $\text{O}_2$  την ημέρα και καταναλώνοντάς το τη νύχτα. Τα περισσότερα είναι φωτοσυνθετικά, έχοντας ως κύρια φωτοσυνθετική χρωστική τη χλωροφύλλη α και τα αναπαραγωγικά τους κύτταρα δεν περιβάλλονται από άγονα επικαλυπτικά κύτταρα (Τζανής, 2018; Βουλτσιάδου κ.α., 2015; Qin et al., 2012). Υπάρχουν όμως και πολλά υποχρεωτικώς ετερότροφα (Cannell, 1993), τα οποία για τον μεταβολισμό και την ενέργειά τους βασίζονται στη γλυκόζη ή άλλες αξιοποιήσιμες πηγές C. Κάποια στελέχη αναπτύσσονται μιξοτροφικά (Carlsson et al., 2007). Γενικά, παρουσιάζουν ποικιλία σε μεγέθη, χρώματα και μορφές (ΙΝΑΛΕ 2013). Οι μορφές μπορεί να είναι μικροσκοπικές, αποικιακές, μονοκύτταρες, νηματοειδείς, διακλαδισμένες ή όχι. Κάποια μοιάζουν με μικρούς θαλλούς, φύλλα, δίχτυα, νήματα κ.ά. (<http://phycology.gr/index.php/en/blog-list/item/18-2019-05-18-10-30-38>). Τα πολυκύτταρα φύκη ορίζονται ως θαλλόφυτα, εφόσον δεν έχουν βλαστούς, ρίζες ή φύλλα και δεν σχηματίζουν άνθη, καρπούς ή σπέρματα. Οι μέθοδοι αναπαραγωγής έχουν πρωτόγονη οργάνωση, σε κατώτερες ταξινομικές ομάδες απλή και σε ανώτερες σύνθετη (Βουλτσιάδου κ.α. 2015; Κατσοπρινάχης 1996). Ορισμένα είδη έχουν πολύπλοκους βιολογικούς κύκλους ζωής (<http://phycology.gr/index.php/en/blog-list/item/18-2019-05-18-10-30-38>).

Η διαδικασία της αναπαραγωγής των φυκών γίνεται αγενώς με μιτωτικές διαιρέσεις στα βλαστητικά τους κύτταρα, όπου προκύπτουν δύο θυγατρικά κύτταρα, ή εγγενώς με σπόρια (Βουλτσιάδου κ.α., 2015). Τα φύκη μπορούν να αναπτυχθούν σε όλα τα περιβάλλοντα, από τις ερήμους μέχρι τους πόλους (Γεωργούλα, 2013). Απαντώνται σε όλα τα υδάτινα οικοσυστήματα και σε βάθη μέχρι το σημείο που φτάνει το φως για την αύξησή τους, αποτελώντας τους πρωτογενείς παραγωγούς και τη βάση των τροφικών πλεγμάτων (ΙΝΑΛΕ, 2013). Στα αντίστοιχα ενδιαίτηματα ζουν ως επιπλέοντες ή κολυμβητικοί οργανισμοί αποτελώντας το φυτοπλαγκτόν ή προσκολλώνται στον πυθμένα ή σε βράχους ως βενθικοί οργανισμοί (Βουλτσιάδου κ.α. 2015). Έχουν την ικανότητα να παράγουν  $\text{O}_2$  και οργανικές ουσίες, απορροφώντας το  $\text{CO}_2$  της ατμόσφαιρας και τα θρεπτικά άλατα του νερού, υπογραμμίζοντας το σημαντικό τους ρόλο στην παραγωγή ενέργειας, στη λειτουργία των υδάτινων οικοσυστημάτων και στη ρύθμιση του κλίματος της Γης. Με τη

πολυπλοκότητα της δομής τους επηρεάζουν το τοπικό περιβάλλον, προσφέροντας χώρο και καταφύγιο σε πολλές φυτοκοινωνίες και ζωοκοινωνίες αποτελώντας τροφή σε οργανισμούς π.χ. πρωτόζωα, νηματώδη και αμφίποδα (Λαζαρίδου & Σεφερλής, 1999). Τα φύκη αποτελούν μεγάλο ποσοστό της παγκόσμιας βιομάζας και για αυτό το λόγο έχουν μεγάλη σημασία. Οι φυκοκαλλιέργειες προωθούνται από τους υδατοκαλλιεργητές ως μέσο για την αύξηση της παραγωγικότητας (Hasan & Chakrabarti, 2009). Χρησιμοποιούνται στην ανθρώπινη και ζωική διατροφή, ως λιπάσματα στη γεωργία, στην κοσμετολογία (Qin et al., 2012; Λαζαρίδου & Σεφερλής, 1999), σε νέες εφαρμογές όπως τα βιοκαύσιμα και την παρασκευή φαρμακευτικών ουσιών και συμπληρωμάτων (Βουλτσιάδου κ.α., 2015). Παράγουν αρκετές ενώσεις πολύτιμες στη χημική βιομηχανία και την ανθρώπινη υγεία, συμπεριλαμβάνοντας έλαια, πολυσακχαρίτες και χρωστικές ουσίες (Qin et al., 2012). Εξ' αιτίας της υψηλής ικανότητάς τους για βιορρόφηση ή βιοσυσσώρευση χρησιμοποιούνται ως βιοφίλτρα σε συστήματα επεξεργασίας νερού αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, καθώς και αποβλήτων ιχθυοκαλλιέργειας (Τσαγκαμίλης, 2009) και επίσης ως δείκτες οργανικής ρύπανσης (Qin et al., 2012; Λαζαρίδου & Σεφερλής, 1999).

## **2.2 Χρήσεις και εφαρμογές των φυκών**

### **2.2.1. Χρήσεις και εφαρμογές των φυκών**

Τα φύκη αποτελούν σημαντικό στοιχείο των υδάτινων οικοσυστημάτων, ενώ έρευνες που έχουν υλοποιηθεί και συνεχίζουν να υλοποιούνται στον τομέα αυτό καταδεικνύουν την πολλαπλή τους χρήση. Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά οι τομείς και οι τρόποι χρήσης των φυκών, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου. Εξετάζοντας τη δυνατότητα χρήσης των φυκών σε διάφορους τομείς καταδεικνύεται η σημασία για την καλλιέργειά τους.

### **2.2.2. Χρήση των φυκών για διαχείριση του βιοφίλμ**

Το βιοφίλμ αποτελεί μια κοινότητα μικροοργανισμών που συσσωρεύεται και συνδέεται σε μια επιφάνεια, σχηματίζοντας μια βιολογική ταινία στις επιφάνειες αυτές. Τα βιοφίλμ δύνανται να δημιουργηθούν σε πολλά περιβάλλοντα, όπως τα φυσικά συστήματα, τα υδραγωγεία, σε διάφορες δεξαμενές όπου αποθηκεύεται νερό, σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, αλλά και σε διάφορα όργανα και εργαλεία που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ιατρικής. Με δεδομένη τη δυνατότητα δημιουργίας

βιοφίλμ σε διάφορους τομείς, αλλά και της παθολογικής του επιρροής στις επιφάνειες που δημιουργείται στο πέρασμα των χρόνων έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι απομάκρυνσης των στοιβάδων αυτών από τις διάφορες επιφάνειες. (Hall-Stoodley, et al., 2004; Fleming et al., 2010).

Τα τελευταία έτη έχουν διενεργηθεί διάφορες έρευνες, οι οποίες καταδεικνύουν τη σημαντική συμβολή των φυκών στην αντιμετώπιση του βιοφίλμ, το οποίο σε πολλές περιπτώσεις αναδεικνύεται ιδιαίτερα ανθεκτικό. Για παράδειγμα, υπάρχει μια έρευνα σχετικά με το πώς τα φύκη μπορούν να επιτεθούν στα βιοφίλμς του είδους *Salmonella enterica*. Η λειτουργία αυτή των φυκών συνιστά μια ιδιαίτερα σημαντική χρήση στην αντιμετώπιση της βακτηριακής αυτής ασθένειας που μεταδίδεται μέσω των τροφίμων. Στην έρευνα αυτή διαπιστώθηκε ότι το εκχύλισμα από τα κόκκινα φύκη *Delisea pulchra*, δύναται να παρέμβει στον σχηματισμό αυτού του είδους βιοφίλμ, ωστόσο η ακριβής χρήση τους και ο τρόπος που μπορεί να επιφέρει μακροπρόθεσμα αποτελέσματα κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί περαιτέρω (Janssens et al., 2008). Σε μια άλλη έρευνα αναδείχθηκε (Gandhi, et al., 2017) ότι το εκχύλισμα *Sesbania grandiflora* διαθέτει αντιβακτηριδιακή δράση κατά του *Staphylococcus aureus*. Οι αντιμικροβιακές, αντιβιοφίλμ και αντιρρυπαντικές ιδιότητες των εκχυλισμάτων των φυκών από τα θαλάσσια μακροφύκη διερευνήθηκαν, επίσης, χρησιμοποιώντας βακτήρια οδοντικής πλάκας ως μοντέλο, όπου και αναδείχθηκαν ιδιαίτερα αποτελεσματικές (Jun et al., 2018).

### **2.2.3. Παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοαποκατάσταση**

Τα φύκη δύναται να χρησιμοποιηθούν και στην παραγωγή βιοκαυσίμων. Ωστόσο, για να γίνει οικονομικά εφικτή η διαδικασία απόκτησης βιοκαυσίμων, τα φύκη χρειάζεται να παράγουν ταυτόχρονα και άλλα συστατικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν βιοχημικά και που έχουν αποδεδειγμένη εμπορική αξία (Baghel et al., 2015). Με τον τρόπο αυτό, δύναται να μειωθεί και ο ευτροφισμός των λιμνών, καθώς τα φύκη θα αξιοποιούνται κατάλληλα. Από τις διάφορες έρευνες στον τομέα αυτό αναδείχθηκε ότι η χρήση των φυκών για την παραγωγή βιοκαυσίμων διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά σχετίζεται με το γεγονός ότι η βιομάζα φυκών δύναται να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πολλών διαφορετικών ειδών ανανεώσιμων βιοκαυσίμων ανάλογα με την επεξεργασία που εφαρμόζεται (Kim et al., 2015).

Εκτός όμως από την παραγωγή βιοκαυσίμων, τα φύκη μπορούν να αξιοποιηθούν και για τη βιοαποκατάσταση, καθώς η συσσώρευση υψηλών ποσοτήτων οργανικής και ανόργανης ύλης αποτελεί παράγοντα κινδύνου για πολλά οικοσυστήματα και ως εκ τούτου για την ανθρώπινη υγεία. Για τον λόγο αυτό, πλέον διερευνώνται νέες λύσεις με στόχο την αντιμετώπιση αυτής της συσσώρευσης. Προς την κατεύθυνση αυτή, τα φύκη μπορούν να αποτελέσουν ένα φάρμακο σε επίπεδο υδάτινου οικοσυστήματος, καθώς συμμετέχουν ενεργά στον έλεγχο και τη βιοπαρακολούθηση των οργανικών ρύπων (Buschbaum et al., 2006). Τα φύκη αποτελούν μια ομάδα μεγάλου ενδιαφέροντος για το σκοπό αυτό, καθώς είναι ιδανικά για τη βιοαποκατάσταση των λυμάτων, διότι δύνανται να δεσμεύουν υψηλό ποσοστό μεταλλικών ιόντων τα οποία χαρακτηρίζονται επιβλαβή για τα οικοσυστήματα, προσφέροντας ταυτόχρονα μια οικονομική λύση για τη διαχείριση του προβλήματος, καθώς η καλλιέργειά τους είναι ιδιαίτερα οικονομική (Bwarwa et al., 2017; Zeraatkar et al., 2016). Ωστόσο, και η χρήση τους αυτή χρειάζεται να εξετάζεται κατά περίπτωση, καθώς υφίστανται κάποιες παράμετροι που καθορίζουν την επιτυχία τους. Για παράδειγμα χρειάζεται να ελέγχεται η θερμοκρασία των περιβαλλόντων στα οποία χρησιμοποιούνται, το pH, τα θρεπτικά συστατικά και η διαθεσιμότητα, μεταξύ άλλων, ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες υπό τις οποίες τα φύκη παρουσιάζουν την καλύτερη απορρόφηση, απομάκρυνση και βιοαποδόμηση διαφορετικών ρύπων (Bwarwa et al., 2017; Zeraatkar et al., 2016; Buschbaum et al., 2006).

#### **2.2.4. Χρήσεις στις υδατοκαλλιέργειες**

Οι περισσότερες από τις τροφές που χρησιμοποιούνται στην υδατοκαλλιέργεια παρασκευάζονται από τη σάρκα άλλων ψαριών. Ο τρόπος αυτός διαθέτει ένα σημαντικό μειονέκτημα, καθώς τα ψάρια πρέπει να τρέφονται δύο φορές και αυτό κοστίζει πολύ. Επιπλέον, τα αποθέματα ψαριών στον κόσμο μειώνονται και η υδατοκαλλιέργεια αυξάνεται, γεγονός που καθιστά αυτό το σύστημα μη βιώσιμο. Για τον λόγο αυτό, έχουν διερευνηθεί οι δυνατότητες χρήσης των φυκών, και ιδιαίτερα των μικροφυκών, στον τομέα αυτό, ως τροφή για τα ψάρια. Ωστόσο, οι διατροφικές πτυχές των μικροφυκών, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες καλλιέργειας καθώς και από παράγοντες όπως η φάση καλλιέργειας, η θερμοκρασία και η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών (Olsen et al., 2000). Έρευνες έχουν αναδείξει ότι τα μικροφύκη γενικά διαθέτουν πηγή μικροθρεπτικών, ενώ διαθέτουν και θετική



επίδραση στη φυσιολογική κατάσταση των ιχθυδίων λόγω, για παράδειγμα, της διαφοροποίησης της βακτηριακής χλωρίδας (Cañavate Hors , 2011). Επίσης, τα φύκη έχουν διερευνηθεί και ως βασική τροφή, αλλά και ως συμπληρωματική, αλλά και πάλι διαπιστώθηκε ότι σημαντικό ρόλο για την επίτευξη του στόχου αυτού χρειάζεται να διερευνείται η διαθεσιμότητα της βιομάζας, η σύνθεση και το κόστος παραγωγής και χρήσης αυτής (Shields et al., 2012). Βέβαια, οι υδατοκαλλιέργειες δεν δύναται να στηριχθούν αποκλειστικά στα φύκη για την παροχή τροφής στα ψάρια και τη διατήρηση της βιωσιμότητας των υδατοκαλλιεργειών, καθώς τα μικροφύκη διαθέτουν μεγάλο ποσοστό σε τοξικά μέταλλα που μπορεί να καταστεί καταστροφικό τόσο για τις υδατοκαλλιέργειες, όσο και για τα οικοσυστήματα εν γένει (Cañavate Hors, 2011).

#### **2.2.5. Χρήση των φυκών ως τρόφιμο**

Η χρήση των φυκών ως τρόφιμο αντιπροσωπεύει την κύρια παγκόσμια αγορά για τα φύκη. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη κατανάλωση που υπάρχει στις ασιατικές χώρες, όπου είναι παραδοσιακά προϊόντα υψηλής κατανάλωσης, ενώ για τη χρήση αυτή αξιοποιούνται πολλές κατηγορίες φυκών, από τις οποίες παράγονται διάφορα διατροφικά προϊόντα (Holdt et al., 2011). Τα προϊόντα φυκών καταναλώνονται ως τρόφιμα με διάφορους τρόπους, ενώ δύναται να χρησιμοποιηθούν και ως βασικά συστατικά για την παραγωγή άλλων τροφίμων. Τα φύκη και τα παραγόμενα προϊόντα από αυτά χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες (τρόφιμα, φάρμακα, ζωγραφική, καλλυντικά κ.λπ.) λόγω των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους. Αυτές είναι η δεύτερη πιο κοινή χρήση φυκών. Σύμφωνα με την παραπάνω έρευνα (Holdt et al., 2011) πολλά κόκκινα και καφέ φύκη χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τριών υδροκολλοειδών που λειτουργούν ως υδροδιαλυτοί υδατάνθρακες, οι οποίοι στη συνέχεια χρησιμοποιούνται κυρίως για τον σχηματισμό υδροδιαλυτών μεμβρανών και για τη σταθεροποίηση ορισμένων προϊόντων. Ωστόσο, τα φύκη διαθέτουν και άλλα λειτουργικά συστατικά που χρησιμοποιούνται ως χρωστικές τροφίμων και σαν συμπληρώματα ζωοτροφών. Τα συστατικά αυτά αφορούν τα λιπίδια, τις πρωτεΐνες, τους πολυσακχαρίτες και τις φαινολικές ενώσεις, τα οποία αξιοποιούνται για την σταθεροποίηση των παραγόμενων προϊόντων (Kim et al., 2015).

### **2.2.6. Χρήση των φυκών στην ιατρική και στη φαρμακολογία**

Τα συστατικά που διαθέτουν ή δύνανται να παραχθούν από τα φύκη έχουν αναδειχθεί από διάφορες έρευνες ότι μπορούν να αξιοποιηθούν και στην ιατρική και στη φαρμακολογία. Τα φύκη παράγουν βιοδραστικές ενώσεις με πλούσιο φαρμακολογικό δυναμικό. Οι ενώσεις αυτές παράγονται ως απόκριση στις περιβαλλοντικές συνθήκες και συμβάλλουν σημαντικά στην παραγωγή φαρμάκων (Salvador et al., 2007). Τα τελευταία χρόνια, τα φύκη έχουν αναγνωριστεί ως παραγωγοί ενός τεράστιου φάσματος βιολογικά ενεργών ενώσεων, αλλά η βιοδραστικότητα του ίδιου του προϊόντος δύναται να διαφοροποιείται ανάλογα με τη γεωγραφική ζώνη παραγωγής των φυκών, καθώς επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον και τις συνθήκες που επικρατούν στις περιοχές (Salvador et al., 2007). Οι εφαρμογές και η χρήση των φυκών στη φαρμακολογία περιλαμβάνει τις εξής δραστηριότητες:

- **Εφαρμογές Αντισυλληπτικής Δραστηριότητας**

Η χρήση των φυκών για την παραγωγή φαρμάκων με αντισυλληπτική ως είδος αναδείχθηκε σε έρευνες όπου χρησιμοποιήθηκαν εκχυλίσματα από κόκκινα φύκη ως συστατικό των φαρμάκων (Ratnasooriya et al., 1994; de Almeida et al., 2011). Για την αξιολόγηση της αντισυλληπτικής δράσης των φυκών διεξήχθησαν έρευνες σε αρουραίους. Αυτά τα εκχυλίσματα χορηγήθηκαν σε θηλυκούς αρουραίους τις πρώτες επτά ημέρες της εγκυμοσύνης τους και τα αποτελέσματα της έρευνας ανέδειξαν ότι τα εκχυλίσματα των κόκκινων φυκών διαθέτουν αντισυλληπτική δράση, χωρίς μάλιστα να εμφανίζουν και παρενέργειες. Για τον λόγο αυτό, προτάθηκε η αξιοποίησή τους σε φάρμακα με αυτή την κατεύθυνση.

- **Αντιβιοτική, αντική και αντιμυκητιακή δράση των φυκών**

Η αντιβιοτική δράση των φυκών αναδείχθηκε από διάφορες έρευνες στον τομέα αυτό και διάφορους ερευνητές, οι οποίοι υλοποίησαν σχετικές δοκιμές με εκχυλίσματα φυκών στοχεύοντας να αναδείξουν τις κατηγορίες των φυκών που δύνανται να καταστούν αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση των ιών και των μυκήτων. Για παράδειγμα ενάντια στα Gram βακτήρια τα εκχυλίσματα φυκών εμφανίζουν σημαντικά αποτελέσματα. Η εύρεση αυτών των νέων πηγών αντιβιοτικών χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα σημαντική διότι με το πέρασμα των χρόνων και τη χρήση των αντιβιοτικών για την αντιμετώπισή τους, οι ιοί γίνονται όλο και πιο ανθεκτικοί, με αποτέλεσμα να χρειάζεται οι επιστήμονες να διερευνούν ολοένα και περισσότερες

λύσεις. Επίσης, η στροφή στη φυτική προέλευση των φαρμάκων αποσκοπεί και στη μείωση των τοξικών και ανεπιθύμητων παρενεργειών (Omar et al., 2018). Οι ιογενείς ασθένειες εξακολουθούν να είναι μία από τις κύριες αιτίες θανάτου στον κόσμο. Μερικές φορές οι θεραπείες αποτυγχάνουν λόγω των παρενεργειών μολυσματικών ασθενειών ή λόγω αντοχής στα φάρμακα. Ως εκ τούτου, η μελέτη των ενώσεων φυκών με αντικτική δράση παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Σύμφωνα με άλλους συγγραφείς (Smit et al., 2004; Rizzo et al., 2017) τα φύκη από τις τρεις μεγάλες ομάδες (πράσινα, καφέ και κόκκινα φύκη) παράγουν ενδιαφέροντες πολυσακχαρίτες που παρουσιάζουν αντιβακτηριδιακή δράση έναντι ορισμένων παθογόνων βακτηρίων όπως το *Aeromonas salmonicida* ή το *Pseudomonas aeruginosa*, τα οποία διαθέτουν υψηλή παθογένεια, αντοχή και συχνότητα εμφάνισης στον άνθρωπο (Capillo et al., 2018). Ένας από τους κύριους τομείς ενδιαφέροντος για την αξιοποίηση των φυκών στην παραγωγή φαρμάκων αποτελεί ο ιός του απλού έρπητα τύπου 1 (HSV-1), ο οποίος συνιστά μια ενδημική ασθένεια, ενώ ο ιός σε πολλές περιπτώσεις αναπτύσσει ανθεκτικότητα και δυσκολεύεται η διαχείριση και αντιμετώπιση αυτού. Επίσης, τα φάρμακα για την αντιμετώπισή του κάποιες φορές έχουν σημαντικές παρενέργειες, γεγονός που δυσχεραίνει την καταπολέμησή του (De Souza Barros et al., 2015).

- **Χρήση των φυκών για φάρμακα με αντικαρκινική δράση**

Ο καρκίνος αποτελεί μια από τις κύριες αιτίες θανάτου σε όλο τον κόσμο, επομένως, η εύρεση νέων θεραπειών για αυτήν την ασθένεια χαρακτηρίζεται ως μια μεγάλη πρόκληση. Ορισμένες μελέτες έχουν συνδέσει την αντικαρκινική ικανότητα ορισμένων φυκών με την περιεκτικότητα σε ενώσεις με αντιοξειδωτικές ιδιότητες. Οι περισσότερες μελέτες των αντικαρκινικών ιδιοτήτων στα φύκη έχουν πραγματοποιηθεί σε εκχυλίσματα μικροφυκών ή κλάσματα που λαμβάνονται με μεθόδους χαμηλής ανάλυσης (εκχύλιση υγρού-υγρού, εκχύλιση στερεού-υγρού) (Martínez Andrade et al., 2018). Εκχυλίσματα από τα φύκη *Bryopsis* sp. περιέχουν ορισμένες ενώσεις, οι οποίες μπορεί να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμες και αποτελεσματικές στη διαχείριση του καρκίνου του πνεύμονα, σε όγκους και σε μελλοντικά φάρμακα για την αντιμετώπιση του AIDS (Smit et al., 2004). Ένα άλλο παράδειγμα ουσίας που διαθέτουν τα φύκη και μπορεί να αξιοποιηθεί στη θεραπεία του καρκίνου αποτελούν τα τερπένια. Μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας εκχυλίσματα *Chlorella sorokiniana* και *Chaetoceros calcitrans* κατέληξε στο συμπέρασμα ότι παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες δραστηριότητες σε

σύγκριση με τα εμπορικά διαθέσιμα θαλάσσια αντικαρκινικά φάρμακα (Martínez Andrade et al., 2018).

- **Αντιπηκτική δραστηριότητα των φυκών**

Συστατικά που περιέχουν τα καφέ φύκη έχουν αναδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην παραγωγή φαρμάκων με αντιπηκτική δραστηριότητα (Liu et al., 2018; Kim et al., 2011; Magalhaes et al., 2011; Athukorala et al., 2007). Για παράδειγμα, σε μια έρευνα που διεξήχθη από τους Faggio et al. (2016) διερευνήθηκε η επίδραση ορισμένων εκχυλισμάτων πλούσιων σε πολυσακχαρίτες που λαμβάνονται από τα πράσινα φύκη *Ulva fasciata* και τα κόκκινα φύκη *Agardhiella subulata* στο χρόνο θρομβοπλαστίνης και στο χρόνο προθρομβίνης. Τα αποτελέσματα της έρευνας ανέδειξαν ότι και τα δύο εκχυλίσματα φυκών μπορούν να αναστείλουν για σημαντικό χρονικό διάστημα την πήξη του αίματος. Ωστόσο, η αντιπηκτική δράση έχει διερευνηθεί κυρίως *in vitro* ή σε ποντίκια, με αποτέλεσμα περεταίρω διερεύνηση να κρίνεται αναγκαία (Kim et al., 2011).

- **Αντιφλεγμονώδης δραστηριότητα των φυκών**

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι ορισμένα εκχυλίσματα και ενώσεις από μια μεγάλη ποικιλία φυκών έχουν πιθανές αντιφλεγμονώδεις ενώσεις. Για παράδειγμα, σε μια έρευνα διερευνήθηκε η αντιφλεγμονώδης δράση των εκχυλισμάτων των κόκκινων φυκών (Delgado et al., 2013), ενώ σε άλλη έρευνα εξετάστηκαν προς την κατεύθυνση αυτή τα εκχυλίσματα των καφέ φυκών (Lin et al., 2016). Ομοίως, στην έρευνα των Radhika et al. (2013) διαπιστώθηκε ότι τα θαλάσσια φύκη από την ακτή Mannar εμφανίζουν σημαντική αντιφλεγμονώδη δράση.

- **Αντιοξειδωτική δραστηριότητα των φυκών**

Σε διάφορες έρευνες που έχουν διενεργηθεί με στόχο την ανάδειξη φυτικών προϊόντων που δύνανται να έχουν αντιοξειδωτική δράση συμπεράναν ότι τα φύκη σε μεγάλο βαθμό προσφέρουν ουσίες και δύνανται να παράγουν προϊόντα προς την κατεύθυνση αυτή (Foon et al., 2013; Lee et al., 2015; Vieira et al., 2016). Για τον λόγο αυτό, έχει ξεκινήσει εκτενής χρήση των φυκών και των εκχυλισμάτων τους από διάφορες κατηγορίες με στόχο την παραγωγή φαρμάκων και φαρμακευτικών σκευασμάτων με αντιοξειδωτική δράση.

## **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Καλλιέργεια φυκών**

### **3.1 Λόγοι καλλιέργειας φυκών**

Μέχρι το 2050, υπολογίζεται ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός θα ξεπεράσει τα 10 δισεκατομμύρια άτομα. Η γεωργία έχει ήδη σχεδόν τη μέγιστη εκμετάλλευση, η περισσότερη καλλιεργήσιμη γη χρησιμοποιείται ήδη και ζητήματα όπως η κλιματική αλλαγή και η αστική επέκταση θέτουν σημαντικές προκλήσεις για το μέλλον της γεωργίας (Foley et al., 2011). Η απλή αύξηση του ρυθμού γεωργικών καλλιεργειών, η αλιεία και η εξόρυξη ορυκτών ελαίων έχει αναγνωριστεί ότι δεν θα είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες των επόμενων γενεών. Επίσης η κλιματική αλλαγή που ταλανίζει την ανθρωπότητα και δημιουργεί κινδύνους για τη βιωσιμότητα του πλανήτη έχει διαμορφώσει νέες συνθήκες στις καλλιέργειες και στον τρόπο που αξιοποιείται η τεχνολογία σε αυτές (Wurtzel et al., 2019). Στόχο των αλλαγών αυτών αποτελεί η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω της βιώσιμης προμήθειας εμπορευμάτων, όπως τα τρόφιμα και τα βιοπροϊόντα. Η εφαρμογή προσεγγίσεων μηχανικής και μοριακής γενετικής υψηλής τεχνολογίας, με τη μορφή της φαινομενικής και της γενετικής μηχανικής, έχει βελτιώσει αποτελεσματικά την παραγωγικότητα, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των γεωργικών καλλιεργειών όπως η σόγια, το καλαμπόκι, το σιτάρι και το ρύζι (Mir et al., 2019). Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται εναλλακτικές λύσεις φυτικής προέλευσης για τρόφιμα ζωικής προέλευσης, όπως το κρέας και τα γαλακτοκομικά, και προϊόντα που προέρχονται από το πετρέλαιο όπως τα πλαστικά (Zhu et al., 2016).

Παρά τα σαφή πλεονεκτήματα αυτών των λύσεων, η χρήση καλλιεργειών τροφίμων για την αντικατάσταση λιγότερο βιώσιμων πρακτικών παραγωγής θα συμβάλει τελικά στην αύξηση της γεωργικής ζήτησης και θα αντιμετωπίσει τις ίδιες προκλήσεις που χαρακτηρίζουν τη «συζήτηση για τα καύσιμα εναντίον των τροφίμων». Ως εκ τούτου, απαιτούνται νέες λύσεις και πρόσθετοι πόροι για την κάλυψη των αυξανόμενων απαιτήσεων. Τα φωτοσυνθετικά μικροφύκη είναι μικρόβια που έχουν αποικίσει κάθε βιότοπο στη Γη και παρουσιάζουν εξαιρετική βιολογική ποικιλότητα, που εκτιμάται ότι είναι μεγαλύτερη από 200.000 είδη (Guiry, 2012), η οποία αντανακλά ένα τεράστιο φάσμα οικολογικών προσαρμογών. Σε αντίθεση με άλλα μικρόβια που συχνά εκμεταλλεύονται για παραγωγή βιολογικών προϊόντων, όπως μαγιά και βακτήρια, τα φωτοτροφικά φύκη έχουν το πλεονέκτημα να χρησιμοποιούν το ηλιακό φως για να σταθεροποιήσουν τον ατμοσφαιρικό άνθρακα,

μειώνοντας την εξάρτησή τους από τα σάκχαρα για τη ζύμωση. Φυσικά ευδοκιμώντας σε περιβάλλοντα με διαλείπουσα και σπάνια διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών, πολλά είδη μικροφυκών έχουν υποστεί αποτελεσματικές μεταβολικές προσαρμογές για να αναπτυχθούν γρήγορα υπό ευνοϊκές συνθήκες (Smetacek, 1999; Litchman, 2007). Ως αποτέλεσμα, τα φύκη έχουν συχνά υψηλότερη φωτοσυνθετική απόδοση από τα ανώτερα φυτά (Bhola et al., 2014), η οποία μεταφράζεται σε υψηλότερη ικανότητα παραγωγής βιομάζας (Benedetti et al., 2018). Όταν καλλιεργούνται σε μεγάλη κλίμακα - είτε σε λίμνη είτε σε φωτοβιοαντιδραστήρα - τα μικροφύκη είναι πιο αποδοτικά στο νερό από τα φυτά χερσαίων καλλιεργειών (Demirbas, 2009) και μπορούν να καλλιεργηθούν σε μη καλλιεργήσιμη γη με ελάχιστη χρήση γλυκού νερού (Demirbas, 2009) ή ακόμη και να αναπτυχθούν στο θαλασσινό νερό ή στα λύματα. Έτσι, πολλές γεωγραφικές περιοχές που δεν είναι κατάλληλες ή επαρκώς γόνιμες για καλλιέργειες ανώτερων φυτών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για καλλιέργεια φυκών μεγάλης κλίμακας.

Πολλά είδη φυκών αποτελούν φυσικά αποτελεσματικούς παραγωγούς υδατανθράκων, λιπιδίων, πρωτεϊνών, χρωστικών, καθώς και μιας σειράς εμπορικών δευτερογενών μεταβολιτών που προέρχονται επί του παρόντος από τη συμβατική γεωργία (Koyande et al., 2019). Επίσης, τα μικροφύκη αναδεικνύονται ως πρώτη ύλη που δύναται να καλύψει τις ανάγκες της επόμενης γενιάς, καθώς αποτελούν μια ποικιλόμορφη ομάδα μονοκύτταρων φωτοσυνθετικών οργανισμών. Έτσι, η εκτεταμένη βιολογική ποικιλιότητα των φυκών μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή πληθώρας πολύτιμων βιοπροϊόντων, είτε φυσικά είτε μέσω γενετικής διαχείρισης αυτών. Τα μικροφύκη διαθέτουν επιπλέον ένα σύνολο εγγενών πλεονεκτημάτων, όπως χαμηλό κόστος παραγωγής, καμία απαίτηση για καλλιεργήσιμη γη και ικανότητα ταχείας ανάπτυξης τόσο σε μεγάλης κλίμακας υπαίθρια συστήματα όσο και σε κλιμακωτούς, πλήρως περιεχόμενους φωτοβιοαντιδραστήρες. (Rasala & Mayfield, 2015; Vavitsas et al., 2018).

Για τον λόγο αυτό δύναται να δημιουργηθούν τα βιοεργοστάσια καλλιέργειας και επεξεργασίας μικροφυκών, τα οποία αποτελούν λιγότερο δαπανηρές και πιο βιώσιμες πλατφόρμες που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ορισμένα προϊόντα φυτικής προέλευσης (Vavitsas et al., 2018). Επί του παρόντος, τα φύκη χρησιμοποιούνται για ένα σχετικά μικρό αριθμό βιομηχανικών εφαρμογών. Πρόσφατες έρευνες έχουν περιγράψει λεπτομερώς τη μετάβαση της εστίασης από τη βιοενέργεια με βάση τα φύκη σε βιοπροϊόντα υψηλής αξίας και το μοντέλο των

βιοδιωλιστηρίων με βάση τα φύκη, αξιοποιώντας όλες της δυνατότητες της τεχνολογίας στην καλλιέργεια των φυκών παρέχοντας στην ανθρωπότητα λύσεις για τις αυξημένες ανάγκες της (Laurens et al., 2017).

### **3.2 Καλλιέργειες μακροφυκών**

#### **3.2.1 Σημαντικότητα καλλιέργειας μακροφυκών**

Η έλλειψη πόρων και οι σημαντικοί κίνδυνοι από αυτή, έχουν αναδείξει τα φύκη σε κατάλληλη πηγή για την διαχείριση του προβλήματος. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η αξιοποίηση των φυκών και των μικροοργανισμών, ως βιολογικοί πόροι, χρειάζεται να δημιουργηθούν οι κατάλληλες καλλιέργειες αυτών και να εφαρμοστούν τα απαραίτητα μέτρα προς την κατεύθυνση αυτή. Η βασική αρχή της δημιουργίας καλλιεργειών φυκών αποτελεί η διατήρηση της υγείας και της διαβίωσης χωρίς απώλεια των ιδιοτήτων των πρώτων υλών, αλλά και την εφαρμογή ρυθμιστικών και προστατευτικών μέτρων για τη διασφάλιση των κατάλληλων συνθηκών ανάπτυξης και διατήρησης (Stacey και Ημέρα, 2007). Για τον λόγο αυτό, διάφορες χώρες και ιδρύματα έχουν ιδρύσει καλλιέργειες για μικροοργανισμούς, ενώ στις καλλιέργειες αυτές ανά πάσα στιγμή δύναται να εφαρμοστεί έλεγχος, ώστε να διαπιστωθεί ότι λειτουργούν ορθά. Οι καλλιέργειες, λοιπόν, χρειάζεται να λειτουργούν και να δημιουργούνται με βάση κάποια πρωτόκολλα (WFCC, 2010).

Τα BRC, συνιστούν πρωτόκολλα προς την κατεύθυνση αυτή, ενώ σε πολλές χώρες έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο. Ειδικότερα, τα πρωτόκολλα αυτά είναι σε θέση να διατηρούν και να παρέχουν βιολογικούς πόρους για επιστημονικά, βιομηχανικά και γεωργικά προϊόντα, ενώ παράλληλα κρίνεται αναγκαίο να διασφαλίζουν ότι οι καλλιέργειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβαλλοντικές και ιατρικές εφαρμογές, διατηρώντας παράλληλα τη βιοποικιλότητας. Για να μπορέσει να διασφαλιστεί αυτό, τα πρωτόκολλα χρειάζεται να διασφαλίζουν ότι οι πρώτες ύλες και οι βασικές ιδιότητες των φυτών δεν αλλοιώνονται (ΟΟΣΑ, 2007).

#### **3.2.2 Χαρακτηριστικά καλλιέργειας μακροφυκών και διατήρηση των καλλιεργειών**

Η Συλλογή της Παγκόσμιας Ομοσπονδίας Πολιτισμού (WFCC) είχε επισημάνει ότι είναι απαραίτητο κάθε χώρα να αποφασίζει για τον στόχο κάθε καλλιέργειας που ταιριάζει με την πολιτική της, με βάση την ταυτότητά της, είδη πολιτισμών και την ποσότητα που πρέπει να διατηρηθεί. Εκτός από αυτό, η

προετοιμασία για τη δημιουργία χρειάζεται να στηρίζεται σε έναν ποιοτικό έλεγχο και στη διατήρηση αρχείων, των διαδικασιών της προετοιμασίας που ακολουθούνται και τρόπος εποπτείας για τη διακίνηση των υλικών που χρησιμοποιούνται στην καλλιέργεια, αλλά και παράγονται από αυτή. έχουν καθοριστεί τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο μεταξύ των εταιρικών οργανισμών (UKNCC, 1998; Smith, 2001; Yumuşak et al., 2005). Ειδικότερα, τα βιολογικά υλικά πρέπει να διατηρούνται σε συνθήκες περιβάλλοντος, παραμέτρους που διασφαλίζουν τη σταθερότητα των ιδιοτήτων του όπως τεκμηριώνεται (ΟΟΣΑ, 2007).

Με την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας οι συντηρήσεις έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία, λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υπάρχει καμία ενιαία μέθοδος για όλους τους μικροοργανισμούς προτάσσοντας διαφορετικές μεθόδους ανάλογα με το είδος που περιλαμβάνει η εκάστοτε καλλιέργεια (Halkman & Dogan, 2000). Οι μικροοργανισμοί συχνά απαιτούν ειδικές μεθόδους συντήρησης για βέλτιστη βιωσιμότητα, ανάκτηση της διατηρημένης καλλιέργειας και αποφυγή μολυσματικών ουσιών στην καλλιέργεια, καθαρότητα, αυθεντικότητα, ακεραιότητα γονιδιώματος και αποθήκευση (ΟΟΣΑ, 2007; WFCC, 2010). Επίσης, δύναται να εφαρμοστεί ξήρανση με κατάψυξη ή αποθήκευση σε εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία, η οποία και αποτελεί την πιο χρησιμοποιημένη προσέγγιση για βιώσιμη διατήρηση μικροβιακών καλλιεργειών για μεγάλες περιόδους. Σε κάθε περίπτωση οι καλλιέργειες χρειάζεται να εφαρμόζουν όσα προτείνονται από τα πρωτόκολλα (OECD, 2007, WFCC, 2010).

Οι περισσότερες μέθοδοι χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες των μακροφυκών, ενώ αντίθετα, έχει γίνει σχετικά μικρή έρευνα για τη βελτίωση των μεθόδων μακροπρόθεσμης διατήρησης των μικροφυκών (Day et al., 2000). Η λυοφιλοποίηση και η κρυσυντήρηση είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για διατήρηση. Λυοφιλοποίηση, με άλλα λόγια, ξηρή κατάψυξη, σε συλλογές καλλιεργείας, ή βιομηχανία, χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα. Στη λυοφιλοποίηση, το υλικό απλώς καταψύχεται και μέσω εξάχνωσης στεγνώνει με αναρρόφηση του υδρατμού (Halkman & Dogan, 2000). Μαζί με τις γενικές αρχές της, η λυοφιλοποίηση βασίζεται σε τρία βασικά φάσεις: κατάψυξη, προξήρανση (εξάχνωση) και ενδιάμεση ξήρανση (εκρόφηση). Με αυτό τεχνική, το διάλυμα αρχικά ψύχεται μεταξύ  $-40^{\circ}$  και  $-50^{\circ}\text{C}$  και στη συνέχεια ψύχεται, αναρροφάται με κενό και θερμαίνεται σταδιακά επιτρέποντας στον πάγο να εξατμιστεί ενώ το νερό διαχωρίζεται από τη λύση. Η μέθοδος λυοφιλοποίησης έχει εφαρμοστεί με επιτυχία



στο διατήρηση ζυμομυκήτων και σπορίων μυκήτων καθώς και βακτηρίων. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν προστασία από μόλυνση ή προσβολή κατά την αποθήκευση, βιωσιμότητα, και διευκόλυνση της κατανομής του στελέχους (Berny & Hennebert, 1991).

Οι παραπάνω μέθοδοι είναι κατάλληλες για Κυανοβακτήρια και για μικροφύκη, με αποτέλεσμα να αξιοποιούνται από διάφορες χώρες για την κατεύθυνση αυτή. Μερικές από τις καλλιέργειες που αξιοποιούν τις μεθόδους αυτές αποτελούν οι εξής:

- The Culture Collection of Algae and Protozoa (UK).
- Το Provasoli-Guillard Εθνικό Κέντρο Καλλιέργειας Θαλάσσιου Φυτοπλαγκτού (CCMP: Center for the Culture of Marine Phytoplankton) (ΗΠΑ).
- The Sammlung von Algenku Huren Göttingen (SAG) (Γερμανία).
- The Culture Collection of Algae at the University of Texas at Austin (UTEX) (ΗΠΑ).
- Η Συλλογή Μικροβιακών Καλλιεργειών (Κυανοβακτήρια, ευκαρυωτικά μικροφύκη, κλπ) στο Εθνικό Ινστιτούτο για τις Περιβαλλοντικές Μελέτες (NIES: National Institute for Environmental Studies) και τη Συλλογή Καλλιεργειών Παστέρ.

### **3.3 Αξιοποίηση της τεχνολογίας στις καλλιέργειες φυκών**

Ενώ τα ανώτερα φυτά καλλιεργούνται εδώ και χιλιετίες για την απομόνωση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών και την απόκτηση εξαιρετικά παραγωγικών στελεχών, όλα τα υπάρχοντα είδη μικροφυκών χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα περιβαλλοντικής απομόνωσης που διαθέτουν σαν είδος. Για τη μεγιστοποίηση, όμως, της παραγωγικότητας κρίνεται αναγκαίο να βελτιστοποιηθεί τόσο ο οργανισμός όσο και το περιβάλλον που υποστηρίζει την ανάπτυξή τους. Στο παρόν κεφάλαιο, λοιπόν, παρουσιάζονται οι τεχνολογικές καινοτομίες που δύνανται να χρησιμοποιηθούν στην καλλιέργεια των μικροφυκών, τα οποία έχουν μεγάλες δυνατότητες παραγωγής χωρίς κόστος. Ένα από τα πιο ελκυστικά εγγενή χαρακτηριστικά πολλών ειδών φυκών είναι ότι είναι ικανά να παράγουν γρήγορα και οικονομικά μεγάλες ποσότητες βιομάζας σε σύγκριση με τα ανώτερα φυτά (Brennan & Owende, 2010). Στη φύση, τα μικροφύκη είναι ικανά να φτάσουν σε υψηλές συγκεντρώσεις βιομάζας υπό ευτροφικές συνθήκες, αλλά, από την άποψη της μαζικής καλλιέργειας, ακόμη και αυτές οι

συγκεντρώσεις δεν είναι επαρκείς. Την περασμένη δεκαετία, πλήθος ερευνών επικεντρώθηκε στη βελτιστοποίηση των συνθηκών που προάγουν στο μέγιστο τους ρυθμούς ανάπτυξης φυκών. Ωστόσο, ένας από τους μεγαλύτερους περιορισμούς στη μαζική καλλιέργεια φυκών συνιστά η δημιουργία ενός οικονομικά αποδοτικού συστήματος παραγωγής. Από αυτή την άποψη, ένα ευρύ φάσμα τεχνικών καλλιεργειών φυκών δύναται να προσφέρει διαφορετικά επίπεδα ελέγχου της ανάπτυξης και της απόδοσης του προϊόντος, με μικρό σχετικό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας (Sutherland et al., 2015).

Από τις έρευνες στα φύκη αναδείχθηκε ότι ορισμένα φύκη διαθέτουν την ικανότητα να αναπτύσσονται ετεροτροφικά. Η ικανότητά τους αυτή προσφέρει τη δυνατότητα να προσπερνιούνται και να διαχειρίζονται οι περιορισμοί στις καλλιέργειες που σχετίζονται με την πρόσβαση σε φως. Επίσης, στις καλλιέργειές τους υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης οργανικού άνθρακα (Venkata Mohan et al., 2015).

Τα φύκη έχουν τις ίδιες βασικές απαιτήσεις με τα ανώτερα φυτά, καθώς χρειάζονται βιολογικά διαθέσιμο άζωτο και φώσφορο, καθώς και ιχνοστοιχεία (π.χ. θείο, ασβέστιο, σίδηρος, πυρίτιο.) και διαχείριση των επιπέδων pH για τη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών (White & Ryan, 2015). Η πηγή νερού δύναται να επηρεάσει τα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται επιπρόσθετα, ενώ η διαθεσιμότητα και η ανάκτηση νερού χαρακτηρίζεται καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό των ειδών φυκών που μπορούν να επιλεγούν. Τα φύκη μπορούν να αναπτυχθούν σε διαφορετικές πηγές νερού, όπως θαλάσσια, γλυκά ή λύματα. Τα λύματα είναι φυσικά πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, αλλά έχουν πρόσθετους ρύπους που θα μπορούσαν να προκαλέσουν προβλήματα στις καλλιέργειες. Στα θαλάσσια περιβάλλοντα, επίσης υπάρχει μεγάλη ποικιλία από θαλάσσια φύκη και διαθεσιμότητα από θαλασσινό νερό για να καλύψει τις ανάγκες των φυτών. Ωστόσο, το θαλασσινό νερό απαιτεί την προσθήκη λιπασμάτων και, σε ανοιχτά συστήματα, υπόκειται σε εξάτμιση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση της ποσότητας αλατιού που διαθέτει το νερό και ανάγκη παρακολούθησης αυτής για να καταστεί η καλλιέργεια βιώσιμη (White & Ryan, 2015).

Από την άλλη, προβλήματα με τη διαθεσιμότητα του νερού εμφανίζεται και στους φυτικούς οργανισμούς που αναπτύσσονται σε γλυκά νερά. Πιο συγκεκριμένα, το γλυκό νερό επίσης απαιτεί πρόσθετα θρεπτικά συστατικά, ενώ μπορεί να αυξηθεί και η κατανάλωση των αποθεμάτων του νερού λόγω της λειψυδρίας που εμφανίζεται

σε κάποιες περιοχές. Για τον λόγο αυτό, η ανακύκλωση του νερού κρίνεται απαραίτητη για να μειωθούν τα προβλήματα διαθεσιμότητάς του και να υφίσταται οικονομική βιωσιμότητα σε αυτού του είδους τις καλλιέργειες. Η συνολική απαίτηση σε νερό εξακολουθεί να είναι χαμηλότερη από τις παραδοσιακές φυτικές χερσαίες καλλιέργειες (Rawat et al., 2013) με αποτέλεσμα τα φύκη να αποτελούν επιθυμητές εναλλακτικές για καλλιέργεια. Παραδοσιακά, τα μικροφύκη έχουν αναπτυχθεί σε απλές ανοιχτές λίμνες (Becker, 1994), αλλά η έρευνα και η τεχνολογική πρόοδος τις τελευταίες δεκαετίες οδήγησαν σε μια ποικιλία σχεδίων βιοαντιδραστήρα υψηλής παραγωγικότητας. Τα μεγάλης κλίμακας σχέδια παραγωγής αυτοτροφικών φυκών προσαρμόζονται στην αιωρούμενη ή προσκολλημένη ανάπτυξη αυτών, είτε σε ανοιχτά είτε σε κλειστά συστήματα, ή σε μια υβριδική μορφή αυτών, που αναφέρονται εκτενώς αλλού (Ugwu et al., 2008; Brennan & Owende, 2010; Harun et al., 2010; Christenson & Sims, 2011; Olivieri et al., 2014). Εκτός από τις στάσιμες λιμνούλες, η φθηνότερη επιλογή για μεγάλης κλίμακας παραγωγή μικροφυκών αποτελεί η σχεδίαση ρηχού αυλακιού ανοιχτής λίμνης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις οικονομικές δυνατότητες που προσφέρουν οι καλλιέργειες μικροφυκών και τη μειωμένη επίδραση τους στο περιβάλλον έχουν αναδειχθεί σε σημαντικό προϊόν παραγωγής. Με δεδομένο, όπως προαναφέρθηκε επίσης, ότι τα φύκη μπορούν να αξιοποιηθούν σε διάφορους τομείς και να καλύψουν πολλαπλές ανάγκες των ανθρώπων, αιτιολογείται η νέα αυτή στροφή στην καλλιέργειά τους, καθώς και οι δαπάνες που πραγματοποιούνται για την παραγωγή τους. Ωστόσο, η παραγωγή τους και η καλλιέργειά τους επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, διαμορφώνοντας νέα δεδομένα στον τρόπο αξιοποίησης της τεχνολογίας για την παραγωγή τους (Michalak & Chojnacka, 2015). Για τον λόγο αυτό, επί του παρόντος δεν υφίσταται ενιαία μέθοδος «βέλτιστης πρακτικής» για την καλλιέργεια φυκών. Ωστόσο, έχουν προταθεί διάφορες πρακτικές και μέθοδοι για την καλλιέργειά τους.

### **3.4 Τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτόμες πρακτικές στην καλλιέργεια φυκών**

#### **3.4.1 Πρακτική Industry 4.0 για την καλλιέργεια μικροφυκών**

Το Industry 4.0 αποτελεί μια προηγμένη προσέγγιση κατασκευής που βασίζεται σε τεχνολογίες επικοινωνίας από μηχανή με μηχανή (machine-to-machine communication technologies, γνωστές και ως “Internet of Things,” ή IoT (Atzori et al., 2010), όπου ο αυτοματισμός, οι αισθητήρες και η μηχανική μάθηση (machine

learning) δημιουργούν μια αυτοπροσαρμοζόμενη διαδικασία παραγωγής ικανή να προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο στις αλλαγές της ίδιας της διαδικασίας (Kagermann et al., 2011; Kagermann et al., 2013). Σε ένα βιοδιυλιστήριο παραγωγής μικροφυκών που αξιοποιείται η συγκεκριμένη πρακτική, δύναται να αυτοματοποιηθεί το σύστημα καλλιέργειας και συγκομιδής φυκών, ενώ ταυτόχρονα δύναται να μειωθεί σημαντικά το λειτουργικό κόστος παραγωγής. Επίσης, η συγκεκριμένη πρακτική προσφέρει τη δυνατότητα διαμόρφωσης ενός δικτύου αισθητήρων που επιτρέπει στους χειριστές να παρακολουθούν την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυκών σε πραγματικό χρόνο (Whitmore et al., 2015).

Η ιδέα εφαρμογής του Industry 4.0 στην καλλιέργεια μικροφυκών εξελίσσει την παραγωγή δημιουργώντας μια προσομοίωση, ή ψηφιακό δίδυμο (digital twin), της εγκατάστασης και της καλλιέργειας φυκών από τα δεδομένα του αισθητήρα. Η προσομοίωση προσφέρει προβλέψεις σε πραγματικό χρόνο της μελλοντικής κυτταρικής απόδοσης (Tuegel et al., 2011; Tao et al., 2018). Για παράδειγμα, ένα πλήρως εξοπλισμένο βιοδιυλιστήριο μικροφυκών που χρησιμοποιεί τη μέθοδο Industry 4.0 προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης μίας ελεγχόμενης κυτταρικής απόδοσης συγκεκριμένων συστατικών με την αυτοματοποιημένη σειριακή εξόρυξη αρκετών παραπροϊόντων που καθορίζονται από την τρέχουσα ζήτηση και όχι από την παραδοσιακή γραμμική παραγωγή αποθεμάτων που περιμένει ζήτηση. Τέτοιου είδους βιοδιυλιστήρια, μάλιστα, λόγω του ότι αποτελούν κλειστά συστήματα παραγωγής και δεν επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και αλλαγές, μπορούν να δημιουργηθούν σε περιφερειακούς κόμβους για την εξυπηρέτηση των γύρω παραγωγών (Kagermann et al., 2013).

### **3.4.2 Εφαρμογή της πρακτικής Phenomics**

Η πρακτική Phenomics ορίζεται ως μια διαδικασία απόκτησης φαινοτυπικών δεδομένων υψηλών διαστάσεων σε επίπεδο οργανισμού (Houle et al., 2010). Η πρακτική αυτή παραγωγής μικροφυκών βρίσκεται επί του παρόντος σε πολύ πρώιμα στάδια ανάπτυξης, ωστόσο, έχει μεγάλες δυνατότητες στην καλλιέργεια αυτών, ενώ μπορεί να αξιοποιηθεί σε διάφορους τομείς χρήσης των φυκών. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να αξιοποιηθεί στη χρήση φυκών για την παραγωγή τροφίμων, για την προμήθεια βιοπροϊόντων, για τη διαδικασία της βιοαποκατάστασης, αλλά και για τη δέσμευση άνθρακα. Δημιουργώντας μια βάση δεδομένων οι αρμόδιοι για την αξιοποίηση της συγκεκριμένης πρακτικής στην καλλιέργεια των μικροφυκών έχουν

τη δυνατότητα να ελέγξουν τη φυσική και τεχνητή ποικιλότητα για τον συνδυασμό αλληλόμορφων γονιδίων που θα συνδυάζουν βασικούς φαινοτύπους (Furbank & Tester, 2011). Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της φαινομενικής των φυτών υπογραμμίζουν τον πιθανό αντίκτυπο των τεχνικών και τεχνολογιών φαινομένων στα μικροφύκη. Για παράδειγμα, μια πρόσφατη έρευνα για το είδος *Arabidopsis thaliana* πρόσφερε ένα είδος που εμφάνιζε αυξημένη άμυνα σε παθογόνους οργανισμούς και μια σημαντική φωτοσυνθετική ανάπτυξη (Cruz et al., 2016). Στα μικροφύκη, μια τέτοια φαινομενική προσέγγιση θα μπορούσε να δημιουργήσει εξίσου δραματικούς συνδυασμούς χρήσιμων φαινοτύπων και την αύξηση κατ' επέκταση της παραγωγής καθώς θα προσφέρονται στους επιστήμονες καλύτερα δεδομένα για αυτή (Das et al., 2019).

Ωστόσο, στη σύγχρονη αξιοποίηση της πρακτικής αυτής στην καλλιέργεια των μικροφυκών υφίσταται ένας σημαντικός περιορισμός, λόγω της έλλειψης βάσεων δεδομένων φαινοτύπων με δυνατότητα αναζήτησης. Οι ερευνητές φυτών και ζυμομυκήτων, για παράδειγμα, μπορούν να σχεδιάσουν ή ακόμα και να εκτελέσουν πειράματα *in silico* χρησιμοποιώντας αντίστοιχα τις βάσεις δεδομένων “The Arabidopsis Information Resource (TAIR)” (Lamesch et al., 2011) και “PROPHECY” (Fernandez-Ricaud et al., 2016). Αυτά τα εργαλεία επιταχύνουν την έρευνα καταδεικνύοντας πώς διαφορετικά γονίδια μπορούν να συσχετιστούν με έναν κοινό φαινότυπο (Ohyama et al., 2008), ή ακόμη και διαφοροποιούν τις λειτουργίες φαινομενικά περιττών αντιγράφων γονιδίων (Yadav et al., 2007). Για να χρησιμοποιηθεί η δυνατότητα αυτή ανάλυσης στο πεδίο της έρευνας για τα φύκη, κρίνεται αναγκαίο να αναγνωριστεί η χρησιμότητα των φυτών αυτών και να γίνουν επενδύσεις για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης φαινοτυπικής βάσης δεδομένων. Το πεδίο της φαινομενικής των φυτών έχει ήδη δημιουργήσει τα πρότυπα για την ανταλλαγή δεδομένων, την ανάκτηση γνώσης και τον σχολιασμό οντολογίας (Oellrich et al., 2015, Neveu et al., 2019), τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν στα φύκη. Τα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για μοντέλα μικροβίων μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε μικροφύκη για τη μέτρηση δεδομένων φαινοτύπου από μορφές καλλιέργειας φυκών υψηλής απόδοσης χρησιμοποιώντας τυπικούς μικροβιολογικούς αισθητήρες όπως φασματοφωτόμετρα φθορισμού και απορρόφησης (Fernandez-Ricaud et al., 2016), υπερφασματικές κάμερες (Roitsch et al., 2019) και κυτταρόμετρα ροής (Cagnon et al., 2013). Ακόμη και οι μορφολογικοί φαινότυποι μπορούν να ψηφιοποιηθούν αυτόματα μέσω

προσεγγίσεων μηχανικής μάθησης (ML) (Sladojevic et al., 2016). Μια πρόκληση για την ανάπτυξη βάσεων δεδομένων φαινομένων μικροφυκών αποτελεί η επιλογή των περιβαλλόντων ανάπτυξης που προκαλούν τα μικροφύκη να εμφανίζουν μια σειρά φαινοτύπων με βάση τις γενετικές τους προδιαθέσεις. Για παράδειγμα, ερευνητές χρησιμοποιώντας υψηλές και χαμηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα επιχειρούν να αναγνωρίσουν τους ρόλους των γονιδίων στη φωτοσύνθεση (Duanmu et al., 2009).

Μια άλλη δυσκολία, επίσης, που αναγνωρίζεται ότι υφίσταται στη χρήση της πρακτικής Phenomics στα φύκη, συνιστά η περιορισμένη ικανότητα χειρισμού της γενετικής πολλών μη-μοντελοποιημένων ειδών μικροφυκών. Πολλά μικροφύκη έχουν πολύπλοκους κύκλους ζωής (Graham et al., 2009) και τα γονιδιώματά τους επαναλαμβάνονται πολύ συχνά, με αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση οι επιστήμονες να αναγνωρίσουν ακριβώς τη λειτουργία τους και τον τρόπο παραγωγής τους (Raaanen et al., 2017). Ωστόσο, έχουν ανευρεθεί διάφορες μέθοδοι 3ης γενιάς που επιτρέπουν την μακροχρόνια ανάγνωση της αλληλουχίας, όπως για παράδειγμα οι Nanopore και PacBio τεχνολογίες αλληλούχισης, οι οποίες έχουν αναδείξει τη δυνατότητα επίλυσης του ζητήματος της επανάληψης του γονιδιώματος και τις αλλαγές στον κύκλο ζωής των μικροφυκών. Επιπλέον, με δεδομένο ότι πολλά μικροφύκη είτε δεν αναπαράγονται εγγενώς καθόλου είτε αναπαράγονται εγγενώς μόνο κάτω από συχνά άγνωστες περιβαλλοντικές συνθήκες, χρειάζεται να αναπτυχθούν νέες προσεγγίσεις για την πλήρη αξιοποίηση της δύναμης των φαινοτυπικών πρακτικών. Μόλις επιλυθούν αυτές οι προκλήσεις, η εφαρμογή της Phenomics στα φύκη δύναται να επιφέρει σημαντικά οφέλη και σημαντικές αλλαγές στις καλλιέργειες των φυκών. Προς το παρόν, οι ερευνητές που ασχολούνται με τη βιοτεχνολογία φυκών επιλέγουν ένα μόνο στέλεχος που συνθέτει το προϊόν που τους ενδιαφέρει και στη συνέχεια προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν το περιβάλλον καλλιέργειας για να βελτιώσουν την παραγωγικότητα, ενώ σε πολλές περιπτώσεις έχει αποδειχθεί ότι συχνά καταλήγουν σε έναν ακριβό και περίπλοκο σχεδιασμό PBR (Vasumathi et al., 2012; Wang et al., 2012; Melnicki et al., 2013; Lucker et al., 2014). Σε περίπτωση εφαρμογής της φαινοτυπικής ανάλυσης των φυκών, οι ερευνητές θα είναι σε θέση καθορίσουν το περιβάλλον καλλιέργειας παραγωγής τους και να βελτιστοποιήσουν τα φύκη σε αυτό το περιβάλλον, όπως θα έκανε ένας γεωργός για τις καλλιέργειες αγρού (Jordan et al., 2011).

### 3.4.3 Εφαρμογή της Συνθετικής Βιολογίας

Η συνθετική βιολογία εφαρμόζει αρχές μηχανικής στον ορθολογικό σχεδιασμό των ζωντανών οργανισμών. Μέσα σε αυτόν τον κλάδο, ένα βιολογικό σύστημα θεωρείται ως μια συλλογή χαρακτηρισμένων γενετικών μερών που μπορούν να τροποποιηθούν και να επανασυναρμολογηθούν για να τροποποιήσουν τις υπάρχουσες λειτουργίες ή να τις δημιουργήσουν *de novo* σε εναλλακτικούς οργανισμούς ξενιστές. Τα γενετικά σχέδια αναθεωρούνται μέσω επαναλήψεων ενός κύκλου σχεδιασμού - κατασκευής - δοκιμής - μάθησης για την επίτευξη βελτιστοποιημένων μεταβολικών διαμορφώσεων για βιοτεχνολογικές εφαρμογές (Nielsen & Keasling, 2016). Η συνθετική βιολογία που εφαρμόζεται στα μικροφύκη δύναται να συνδυάσει αυτήν την ισχυρή νέα προσέγγιση με τα οφέλη ενός φωτοσυνθετικού μικροβιακού ξενιστή για τη δημιουργία νέων στελεχών παραγωγής προσαρμοσμένων στις μελλοντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Τα εργαλεία για τη γενετική μηχανική των μικροφυκών εξελίσσονται ταχέως, χάρη στην αυξημένη διαθεσιμότητα γονιδιωμάτων με αλληλουχία σε πολλαπλές σειρές φυκών. Η αλληλουχία των γονιδιωμάτων μικροφυκών έχει διευκολύνει την ανάπτυξη γενετικού εργαλείου στο Χλωρόφυτο *Chlamydomonas reinhardtii*, στα Ετερόκοντα *Phaeodactylum tricornutum* και *Nannochloropsis* sp. Και στο Κυανοβακτήριο *Synechocystis* sp. PCC 6803 (Hagemann & Hess, 2018), μεταξύ άλλων. Επιπλέον, οι μέθοδοι για τον γενετικό μετασχηματισμό σε μικροφύκη έχουν βελτιστοποιηθεί για πολλά είδη και περιλαμβάνουν φυσικό μετασχηματισμό, ηλεκτροδιάτρηση, χτύπημα σφαιριδίων, βιολογικό μετασχηματισμό και συζευγμένη μεταφορά πλασμιδίου (Qin et al., 2012). Τα γονιδιωματικά δεδομένα από αυτά τα είδη έχουν διευκολύνει τον εντοπισμό των εγγενών γενετικών στοιχείων που είναι απαραίτητα για τη γενετική μηχανική και τον επιτυχημένο μετασχηματισμό (Zhou et al., 2014).

Πολλαπλές μοριακές τεχνικές είναι διαθέσιμες για την τροποποίηση της φυσικής γονιδιακής έκφρασης ή για τη στόχευση συγκεκριμένων περιοχών του γονιδιώματος σε μικροφύκη. Η ρύθμιση της γονιδιακής έκφρασης (gene knockdown) με την εισαγωγή τεχνητών μικρών RNA και CRISPRi έχει εφαρμοστεί σε πολλαπλά συστήματα (Yao et al., 2016). Παρά τις ραγδαίες προόδους στα γενετικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα στις καλλιέργειες των μικροφυκών, υπάρχει ακόμα αρκετός δρόμος για την πλήρη και αποτελεσματική αξιοποίησή τους. Για πολλές δεκαετίες ερευνητές εξετάζουν την εφαρμογή πρακτικών της συνθετικής βιολογίας στην καλλιέργεια των μικροφυκών, με αποτέλεσμα να έχουν δημιουργηθεί σημαντικές

προσεγγίσεις και πρακτικές προς την κατεύθυνση αυτή. Προσεγγίσεις, όπως η μηχανική πρωτεϊνών και η κατευθυνόμενη εξέλιξη που έχουν εφαρμοστεί αποτελεσματικά διάφορα φυτά (Abatemarco et al., 2013), θα μπορούσαν επίσης να εφαρμοστούν και στα μικροφύκη με στόχο την επιτάχυνση της παραγωγή τους στις καλλιέργειες. Οι πρόοδοι στη συνθετική βιολογία επιτρέπουν επίσης το σχεδιασμό ολόκληρων μικροβιακών γονιδιωμάτων (Richardson et al., 2017), ενώ συνεχίζονται οι έρευνες για την εφαρμογή των πρακτικών της συνθετικής βιολογίας στα ευκαρυωτικά φύκη (Karas et al., 2015).

Προς το παρόν, οι πρακτικές αυτές που στηρίζονται σε γενετικούς μηχανισμούς περιορίζονται από τον αριθμό των σχεδίων δοκιμής του. Ωστόσο, αναμένεται ότι η αυξημένη ενσωμάτωση του υπολογιστικού σχεδιασμού και του αυτοματισμού στη βιολογία αναμένεται να αλλάξει γρήγορα αυτή τη διαδικασία. Η υπολογιστική μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη πολλών διαδικασιών στις καλλιέργειες με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή η εφαρμογή της συνθετικής βιολογίας σε ολοένα και περισσότερα είδη φυκών (Lin et al., 2017). Η συνθετική βιολογία μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση των γεωργικών αποτελεσμάτων για την καλλιέργεια μικροφυκών, συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης της φωτοσυνθετικής αποδοτικότητας και της βελτίωσης της χρήσης του άνθρακα (Gimpel et al., 2013; Erb and Zarzycki, 2016). Για παράδειγμα, έχουν προβλεφθεί υπολογιστικά σενάρια για τον συνθετικό επανασχεδιασμό πιο αποτελεσματικής φωτοσυνθετικής δέσμευσης άνθρακα (Bar-Even et al., 2010). Δεδομένων αυτών των εξελίξεων, η εφαρμογή της συνθετικής βιολογίας στα μικροφύκη έχει τεράστιες δυνατότητες για την αναμόρφωση συμβατικών ζωικών και φυτικών βιομηχανιών (Wells et al., 2017). Η βιομηχανία μικροφυκών δεν έχει ακόμη αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές της, με εκτιμώμενη παγκόσμια καθαρή αξία 1-1,5 δισεκατομμυρίων δολαρίων (Pulz & Gross, 2004). Λόγω του ιστορικού ασφαλούς παραγωγής και κατανάλωσης, τα Κυανοβακτήρια *Spirulina* sp., μαζί με τα Χλωρόφυτα *Chlorella* sp. και *C. reinhardtii* αναγνωρίζονται διεθνώς ως ασφαλή προϊόντα για κατανάλωση και αξιοποίηση τους σε πολλούς τομείς, επιλύοντας πολλά προβλήματα που προκύπτουν από τη μείωση των ανώτερων φυτών για καλλιέργειες και των αλλαγών που επέρχονται στον πλανήτη.



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Μακροφύκη

### 4.1 Είδη μακροφυκών

Τα μακροφύκη συνιστούν μια ποικιλόμορφη ομάδα φωτοσυνθετικών, πολυκύτταρων, ευκαρυωτικών οργανισμών με είδη που ταξινομούνται είτε στο βασίλειο Plantae είτε στο βασίλειο Chromista. Τα περισσότερα είδη μακροφυκών συναντώνται στη θάλασσα, όπου και κατέχουν σημαντικό ρόλο ως βασικοί παραγωγοί στις θαλάσσιες περιοχές (Levine, 2016). Ως κατηγορία φυτών, είναι ασβεστώδη και δεν διαθέτουν ρίζες, μίσχους, φύλλα και πολύπλοκες αναπαραγωγικές δομές. Ωστόσο, η εμφάνισή τους ομοιάζει με αυτή των ανώτερων φυτών που έχουν πραγματικές ρίζες, μίσχους, φύλλα και πολύπλοκες αναπαραγωγικές δομές. Ορισμένα μακροφύκη εμφανίζουν φυτοειδείς εμφανίσεις, καθώς διαθέτουν διαφοροποιημένους θαλλούς με όργανα προσκόλλησης (ριζοειδή), δομές που μοιάζουν με στελέχη (στύποι) και φωτοσυνθετικά ελάσματα (Dawes, 2016). Τα θαλάσσια μακροφύκη μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: Chlorophyta (πράσινα), Rhodophyta (κόκκινα) και Ochrophyta (καφέ), τα οποία εντάσσονται σε κατηγορίες με βάση την περιεκτικότητα χρωστικής για φωτοσύνθεση που διαθέτουν, τα αποθέματα υδατανθράκων, τα συστατικά του κυτταρικού τοιχώματος και την κατασκευή και τον προσανατολισμό του φυλλώματος που έχουν (Levine, 2016). Συνολικά, η ποικιλομορφία των παραπάνω κατηγοριών μακροφυκών ξεπερνά τα 10.000 είδη, ενώ συχνά ανακαλύπτονται και νέα είδη, ενώ τα περισσότερα είδη ανήκουν στα Rhodophyta (Guiry, 2021).

Τα μακροφύκη έχουν μεγάλη σημασία για τα οικοσυστήματα, ενώ μπορούν να αποτελέσουν και έναν σημαντικό βιολογικό πόρο, καθώς διαθέτουν ποικίλες χρήσεις. (Buchhol et al., 2012). Η σημασία των μακροφυκών, μάλιστα, είχε αναγνωριστεί ήδη από τους προϊστορικούς χρόνους, με τις πρώτες ανθρώπινες κοινότητες να αναζητούν τροφή στους θαλάσσιους πόρους, ενώ κάποιοι εγκαθίσταντο σε διαπαλιρροϊκούς οικοτόπους ως πεδία αναζήτησης τροφής για θαλάσσιους πόρους (Ainis et al., 2014). Σήμερα, τα μακροφύκη αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της ανθρώπινης διατροφής, ενώ η αναγνώριση της αξίας τους έχει επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού (Cornish et al., 2017). Για τον λόγο αυτό, ήδη από την αρχαιότητα, αλλά και σήμερα, οι άνθρωποι αναζητούν τρόπους καλλιέργειας των μακροφυκών, ενώ ταυτόχρονα ερευνητές διερευνούν τεχνολογίες, για την όσο το δυνατόν βέλτιστη χρήση τους, αλλά και για την αξιοποίησή τους και σε άλλες διαδικασίες πέραν της ανθρώπινης διατροφής. Ειδικότερα, λόγω της σύνθεσής τους,

αναζητείται η χρήση ως πηγή βιομάζας με στόχο την παραγωγή ενέργειας και βιοκαυσίμων, ενώ χρησιμοποιούνται και ως λίπασμα στη γεωργία ή ως ύλη στη βιομηχανία γυαλιού (Dillehay et al., 2008).

#### ➤ **Κόκκινα φύκη (Rhodophyta)**

Τα κόκκινα φύκη αποτελούν μία από τις τρεις κατηγορίες των μακροφυκών, η οποία και παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία στις αποχρώσεις λόγω των πρωτεϊνών που διαθέτουν. Για τον λόγο αυτό, μπορεί να συναντήσει κάποια μωβ, κάποια πορτοκαλί, ενώ υπάρχουν μέχρι και κίτρινα. Οι χρωστικές που διαθέτουν, οι οποίες τους προσδίδουν και το χρώμα τους, αποτελούν στοιχεία που επιτρέπουν στην κατηγορία αυτή να αναπτύσσεται σε πολύ μεγάλο βάθος, και για τον λόγο αυτό, σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες τα κόκκινα φύκη μπορούν να αναπτυχθούν και σε βάθος 200 μέτρων (Oilgae, 2010). Η σύνθεσή τους στηρίζεται στο άμυλο, το οποίο και αποτελεί τον μόνο υδατάνθρακα που διαθέτουν, ενώ εμφανίζεται με την ίδια σύσταση που διαθέτει και το κοινό άμυλο. Η βασική τους σύσταση με βάση το άμυλο, αποτελεί και μια βασική διαφοροποίηση της κατηγορίας αυτής από τα καφέ και τα πράσινα μακροφύκη, καθώς αποτελούν την μόνο κατηγορία που το εμπεριέχει (Yu et al. 2002). Η βασική τους χρήση είναι η ανθρώπινη διατροφή και η παραγωγή ζωοτροφών, ενώ τα πιο γνωστά γένη της κατηγορίας αυτής, σύμφωνα με τους Hasan και Chatrabarti (2009) είναι τα εξής:

**Gracilaria (Εικόνα 1):** αποτελεί ένα γένος το οποίο και χρησιμοποιείται ως βασική πηγή για την παραγωγή άγαρ, ενώ συχνά χρησιμοποιείται και ως ανθρώπινη εναλλακτική μορφή τροφής. Διαθέτει ένα κόκκινο χρώμα και μεγάλα, λεπτά φύλλα σαν μαστίγια, ενώ έχει αναγνωριστεί σε μεγάλο βαθμό η οικονομική του σημασία. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια διερευνάται η χρήση του και σε άλλες κατηγορίες, εκτός της διατροφής, ώστε να αξιοποιηθεί στο μέγιστο η αξία του.



**Εικόνα 1:** *Gracilaria* (πηγή: <https://eatalgae.org/gracilaria-uses-and-health-benefits/>)

***Gracilaria tikvahiae* (Εικόνα 2):** αποτελεί και αυτό ένα είδος κόκκινου φύκους, το οποίο, συναντάται και δύναται να αναπτυχθεί σε περιοχές με κρύες θάλασσες, όπως ο Ατλαντικός Ωκεανός, αλλά και σε θερμές υποτροπικές περιοχές, όπως η Φλόριντα. Το χρώμα του εμφανίζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με την περιοχή που φύεται, κι έτσι από το γένος αυτό μπορούμε να συναντήσουμε φύκη που διαθέτουν χρώμα από πολύ σκούρο πράσινο, όλες τις αποχρώσεις του κόκκινου, αλλά και καφέ. Οι περιοχές που μπορεί να αναπτυχθεί συχνά είναι βραχώδης, όπου και το γένος αυτό βρίσκεται προσκολλημένο στους βράχους, ενώ μπορεί να βρεθεί και σε άλλες υδάτινες περιοχές οι οποίες όμως δεν έχουν πολύ μεγάλο βάθος.



**Εικόνα 2:** *Gracilaria tikvahiae* (πηγές:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gracilaria\\_tikvahiae\\_%28graceful\\_redweed%29\\_%28Cayo\\_Costa\\_Island,\\_Florida,\\_USA%29\\_3\\_%2824022495910%29.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gracilaria_tikvahiae_%28graceful_redweed%29_%28Cayo_Costa_Island,_Florida,_USA%29_3_%2824022495910%29.jpg),  
<https://www.fau.edu/hboi/research/marine-ecosystem-conservation/sea-vegetables/red-seaweed/>)

***Porphyra* (Εικόνα 3):** αποτελεί ένα ιδιαίτερα γνωστό γένος, καθώς χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην ανθρώπινη διατροφή, όντας το βασικό υλικό για την παραγωγή σούσι. Το χρώμα του είναι κόκκινο έως αποχρώσεις του καφέ και διαθέτει ένα πλατύ φύλλωμα. Σαν γένος καλλιεργείται ιδιαίτερα στις Ασιατικές χώρες λόγω της μεγάλης του χρήσης στις διατροφικές τους συνήθειες.



**Εικόνα 3:** *Porphyra* (πηγή:

[https://alganex.com/en\\_US/products\\_on\\_request/porphyra-umbilicalis-powder](https://alganex.com/en_US/products_on_request/porphyra-umbilicalis-powder))

➤ **Καφέ φύκη**

Τα καφέ φύκη διαθέτουν 9 κατηγορίες, οι οποίες και διαθέτουν 265 γένη και πάνω από 1500 είδη. Σαν είδος δύναται να απορροφήσει πράσινο φως μεσαίου μήκους και για τον λόγο αυτό ευδοκίμει σε βάθος 30 έως 50 μέτρα. Τα περισσότερα είδη της κατηγορίας αυτής μακροφυκών εντοπίζεται σε παλιρροιακές περιοχές και σε ανώτερες υποπαράλιες ζώνες. Τα καφέ φύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιομάζας και για τον λόγο αυτό έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν σημαντική πηγή παραγωγής ενέργειας. Ο κύριος υδατάνθρακας που διαθέτουν σαν είδος είναι η μανιτόλη, η οποία όμως διαφοροποιείται σε ποσότητα και ποιότητα με τις αλλαγές των εποχών. Τα γνωστότερα γένη των καφέ φυκών αποτελούν τα εξής:

***Laminaria digitata* (Εικόνα 4):** το συγκεκριμένο είδος καφέ φυκών δύναται να φτάσει σε μέγεθος τα 2 με 3 μέτρα. Διαθέτει αρκετά σκούρο χρώμα και μικρό στύπο με αποτέλεσμα να είναι αρκετά ανθεκτικό και να μην σπάει εύκολα.



**Εικόνα 4:** *Laminaria digitata* (πηγή:

<http://www.freenatureimages.eu/plants/Phaeophyceae%2C%20Bruinwieren%2C%20Brown%20algae/Laminaria%20digitata/index.html>)

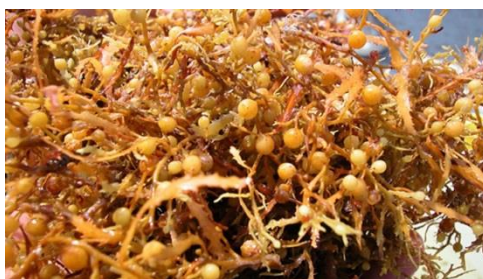
***Saccharina longicruris* (Εικόνα 5):** αποτελεί ένα γένος καφέ φυκών που δύναται να αναπτυχθεί σε κρύα νερά. Συναντάται στις βορειοδυτικές ακτές του Ατλαντικού και στους ωκεανούς της Αρκτικής. Σαν είδος δύναται να φτάσει τα 3 μέτρα, ενώ από αυτά το 1 μέτρο αποτελεί το φύλλο του φύκου. Η σύστασή του διαφοροποιείται ανάλογα με τις εποχές. Η χρήση του σχετίζεται με τη διατροφή, καθώς προσφέρει σημαντικά οφέλη για την υγεία, ενώ σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και για την παραγωγή τροφής ζώων.



**Εικόνα 5:** *Saccharina longicruris* (πηγή:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alga\\_Toco\\_Saccharina\\_latissima.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alga_Toco_Saccharina_latissima.jpg))

***Sargassum spp* (Εικόνα 6):** αποτελεί ένα γένος των καφέ φυκών που αναπτύσσεται σε τροπικές χώρες, ενώ τις περισσότερες φορές συναντάται σε κοραλλιογενείς υφάλους. Τα συγκεκριμένο γένος φυκών βρίσκεται σε δυτικές ακτές της Αφρικής, αλλά και σε περιοχές της Καραϊβικής.



**Εικόνα 6:** *Sargassum spp* (πηγή:

<https://sargassummonitoring.com/2022/04/10/element-concentrations-in-pelagic-sargassum-along-the-mexican-caribbean-coast-in-2018-2019/>)

### ➤ Πράσινα φύκη

Τα πράσινα μακροφύκη αποτελούν την κατηγορία Chlorophyta, τα οποία σαν βασική χρωστική ουσία διαθέτουν τη χλωροφύλλη. Τα χρώματά τους κυμαίνονται από ανοιχτό πράσινο έως σκούρο κίτρινο και διαθέτουν διαφορές στα χαρακτηριστικά μεταξύ τους σαν κατηγορίες. Η ανάπτυξή τους υλοποιείται μέσω του θρυμματισμού και της απελευθέρωσης αναπαραγωγικών σπόρων, η οποία και δύναται να επιτευχθεί κυρίως με τη χρήση θαλάσσιων ενυδρείων. Βασικά συστατικά τους αποτελούν το άμυλο και τα λιπίδια, ενώ το βασικό τους στοιχείο αποτελεί ο πολυσακχαρίτης ulvan (Jung et al., 2012). Τα πιο γνωστά είδη πράσινων μακροφυκών είναι το *Ulva lactuca*, το οποίο και αποκαλείται και μαρούλι της θάλασσας και το *Ulva intestinalis*. Τα πράσινα αυτά φύκη διαθέτουν υψηλή θρεπτική αξία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διατροφή και για τη σύσταση βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας (Oilgae, 2010). Υπάρχουν και άλλα είδη της κατηγορίας των μακροφυκών αυτών, τα οποία όμως δεν έχουν διερευνηθεί εκτενώς για τις δυνατότητες που έχουν να αξιοποιηθούν, παρόλο που η σύστασή τους προσφέρει σημαντικές πιθανότητες για πολλαπλές χρήσεις.

***Ulva lactuca* (Εικόνα 7):** Το γένος *Ulva* αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά γένη των πράσινων μακροφυκών και πρόκειται για ένα λεπτό και επίπεδο φύκος που μπορεί να φτάσει τα 18 με 30 εκατοστά. Το γένος αυτό μπορεί να διαθέτει είδη από πράσινο έως σκούρο πράσινο χρώμα, ενώ στο γένος υπάρχουν πολλά παρόμοια είδη. Το είδος *Ulva lactuca* φύεται κοντά ή πάνω σε βράχους, ενώ βρίσκεται σε παράκτιες και υποθαλάσσιες περιοχές σε όλον τον πλανήτη. Αποτελεί, επίσης, ένα είδος που βρίσκεται και στην Ευρώπη, ενώ λόγω των στοιχείων που παράγει δύναται να καταστεί τοξικό και επικίνδυνο εάν υπάρξει μεγάλη εξάπλωση του είδους. Ωστόσο, το συγκεκριμένο είδος διαθέτει θρεπτικές αξίες, και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται για διατροφή είτε ωμό είτε βρασμένο σε νερό. Χώρες, όπως η Σκωτία και η Χαβάη έχουν εντάξει στη διατροφή τους το φύκος αυτό (Guiry, 2007).



**Εικόνα 7:** *Ulva lactuca* (πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/The-seaweed-Ulva-lactuca-Chlorophyta-origin-the-Netherlands\\_fig1\\_325969737](https://www.researchgate.net/figure/The-seaweed-Ulva-lactuca-Chlorophyta-origin-the-Netherlands_fig1_325969737)).

*Ulva intestinalis* (**Εικόνα 8**): αποτελεί ένα είδος πράσινων μακροφυκών που συναντάται στην Ευρώπη σε περιοχές που διαθέτουν βράχους, λάσπη, άμμο και υφάλμυρο νερό. Τα φύκη αυτά μπορούν να αποκολληθούν από το υπόστρωμα και να ανέβουν στην επιφάνεια, όπου δεν σταματάει η ανάπτυξή τους, καθώς συνεχίζουν να αναπτύσσονται σε επιπλέουσες μάζες.



**Εικόνα 8:** *Ulva intestinalis* (πηγή: <https://www.marlin.ac.uk/species/detail/1469>).

#### 4.2 Χρήση και καλλιέργεια μακροφυκών

Όπως και άλλοι θαλάσσιοι οργανισμοί, πλέον και τα μακροφύκη αποτελούν οργανισμούς που περιλαμβάνονται στην ανθρώπινη διατροφή. Για τον λόγο αυτό, ορισμένα είδη μακροφυκών καλλιεργούνται συστηματικά, σε πολλές περιοχές του πλανήτη, ενώ πέραν της διατροφικής αξίας αναζητάται και η αξιοποίησή τους και σε άλλους τομείς (Valero et al., 2018). Μάλιστα, η ανάδειξη της σημασίας των μακροφυκών για τον άνθρωπο, αλλά και η διερεύνηση του τρόπου καλλιέργειας αυτών, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογιών καλλιέργειας. Οι

τεχνολογίες αυτές, εμφανίστηκαν για πρώτη φορά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα στην Κίνα και στην Ιαπωνία, μετά την περιγραφή του αναπαραγωγικού κύκλου της τάξης Bangiales (Rhodophyta) και κυρίως ειδών *Pyrotopia* sp. (Yang et al., 2017). Αμέσως μετά, η υδατοκαλλιέργεια μακροφυκών επεκτάθηκε γρήγορα και σε άλλες περιοχές, με αποτέλεσμα να αποτελεί ένα είδος υδατοκαλλιέργειας που συνεχώς εξελίσσεται και αναπτύσσεται, ώστε η εκμετάλλευση των φυσικών αποθεμάτων των ειδών αυτών να μην αποτελεί την κυρίαρχη μορφή αξιοποίησής τους (FAO, 2020).

Η αναγνώριση της αξίας των μακροφυκών σε πολλούς τομείς, έχει οδηγήσει την παραγωγή αυτών σε έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς της παγκόσμιας θαλάσσιας υδατοκαλλιέργειας, όπου η παραγωγή και το εμπόριο προσφέρει σημαντικές οικονομικές απολαβές σε πολλά κράτη. Για παράδειγμα, οι ΗΠΑ από τις υδατοκαλλιέργειες μακροφυκών κερδίζει ετησίως περίπου 13 δις δολάρια, ενώ η χρήση των μακροφυκών επεκτείνεται πέρα από την αξιοποίησή τους ως διατροφικό προϊόν και στον κλάδο της κοσμετολογίας με την παραγωγή καλλυντικών που παράγονται από μακροφύκη. Επίσης, πολλά γένη μακροφυκών χρησιμοποιούνται και στην φαρμακοβιομηχανία, όπου παράγονται πολλά φάρμακα από τα μακροφύκη (FAO, 2020). Μάλιστα, οι ερευνητές γύρω από τον κλάδο καλλιέργειας των μακροφυκών εικάζουν ότι ο κλάδος αυτός θα εμφανίσει περαιτέρω αύξηση και εξέλιξη στις δυτικές χώρες, λόγω των οικονομικών οφελών που επιφέρουν, αλλά και της υψηλής διατροφικής τους αξίας και ένταξή τους σε πολλές κουζίνες των χωρών. Επίσης, η ανάπτυξη του κλάδου αυτού θα επιφέρει και εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών για την καλλιέργειά τους, ώστε να αυξηθούν τα οφέλη από την παραγωγή τους (Banach et al., 2020).

Μέχρι σήμερα, ο βασικός όγκος της υδατοκαλλιέργειας μακροφυκών λαμβάνει χώρα σε χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας και του Ειρηνικού, εκ των οποίων η Κίνα, οι Φιλιππίνες, η Ινδονησία, η Δημοκρατία της Κορέας και η Ιαπωνία συνεισφέρουν με μεγαλύτερο ποσοστό. Ειδικότερα, οι παραπάνω χώρες καλύπτουν το 98% της καλλιέργειας και παραγωγής μακροφυκών, ενώ έχουν αξιοποιήσει και το εμπόριο για την εξαγωγή αυτών σε άλλες χώρες του πλανήτη. Οι βασικές τους καλλιέργειες και το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου των καλλιεργειών σχετίζεται με τα Rhodophyta είτε με τα Ochrophyta (FAO, 2020). Ορισμένα από αυτά τα μακροφύκη προορίζονται για τη βιομηχανία υδροκολλοειδών, όπως *Eucheuma* spp., *Karraphycus alvarezii* και *Gracilaria* spp., ενώ άλλα είδη χρησιμοποιούνται απευθείας ως ανθρώπινη τροφή. Πιο συγκεκριμένα, στην ανθρώπινη διατροφή



χρησιμοποιούνται τα είδη *Saccharina japonica*, *Undaria pinnatifida*, *Sargassum fusiform* και *Pyropia* spp. (FAO, 2020). Με τη σειρά τους, η παραγωγή πράσινων μακροφυκών (Chlorophyta) αντιπροσωπεύει επί του παρόντος μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτών, και πιο συγκεκριμένα το 1% της συνολικής καλλιέργειας, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η κατηγορία αυτή δεν διαθέτει στοιχεία για περαιτέρω ανάπτυξη της παραγωγής. Μάλιστα, παρά την παρουσίαση συγκριτικά χαμηλότερων στοιχείων παραγωγής, η υδατοκαλλιέργεια πράσινων φυκών έχει αναδείξει μια αυξανόμενη τάση στην παραγωγικότητα και την εμπορική διαφοροποίηση τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ στις κατηγορίες αυτές εφαρμόζονται σημαντικές καινοτομίες, με αποτέλεσμα να αυξάνουν τη βιωσιμότητα του κλάδου παραγωγής μακροφυκών.

Ωστόσο, υπάρχουν και μελετητές, οι οποίοι υποστηρίζουν ότι ο κλάδος παραγωγής μακροφυκών δεν δύναται να καταστεί απόλυτα βιώσιμος, καθώς δεν έχει αποδειχθεί ότι η ζήτησή τους θα αυξηθεί στο μέλλον, καθώς στη σημερινή κατάστασή τους δεν παρέχονται στις αγορές προϊόντα υψηλής ποιότητας. Μάλιστα, υποστηρίζουν ότι για να αυξηθεί η ποιοτική παραγωγή των πράσινων μακροφυκών, κρίνεται αναγκαίο να αξιοποιηθεί στο μέγιστο η χρήση της τεχνολογίας, η οποία και θα επιφέρει βελτιώσεις που θα αυξήσουν την παραγωγή και τη χρήση τους σε περισσότερους κλάδους, ενώ αντίστοιχα δύνανται να προσδώσουν ένα διαφορετικό και πιο βιώσιμο πρόσωπο στις ήδη υπάρχουσες καλλιέργειες (Buschmann et al., 2019; Banach et al., 2020).

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Η σημασία της καλλιέργειας μακροφυκών και μέθοδοι καλλιέργειας

### 5.1 Σημασία καλλιέργειας μακροφυκών

Η καλλιέργεια των μακροφυκών έχει αναγνωριστεί ως ιδιαίτερα σημαντική όχι μόνο για τα οικονομικά οφέλη που επιφέρει στις χώρες που τη υλοποιούν, αλλά και για τις ίδιες τις υδατοκαλλιέργειες, καθώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προστασία τους και στην εξέλιξή τους. Ειδικότερα, η καλλιέργεια μακροφυκών δύναται να επιφέρει αύξηση της θαλάσσιας απορρόφησης άνθρακα και του ρόλου που διαδραματίζει ο μπλε άνθρακας στους ωκεανούς (Chung et al., 2011, Duarte et al., 2017, Sondak et al., 2017). Οι θαλλοί των μακροφυκών, αλλά και τα τρίμματα τους, δύνανται να μετουσιωθούν σε αιωρούμενα σωματίδια οργανικού άνθρακα (RPOC) και σε διαλυμένο οργανικό άνθρακα (RDOC) (Chen et al., 2020), και έτσι μπορούν να αποθηκευτούν για χιλιετίες (Jiao et al., 2010). Κατά την ανάπτυξη μακροφυκών, για παράδειγμα *Saccharina*, μέρος των θάλλων τους δύναται να αποκοπεί από την κίνηση του νερού (Zhang et al., 2012) και τα τρίμματα των φυκών αυτών στη συνέχεια είναι σε θέση να μεταφερθούν μέσω ωκεάνιων ρευμάτων και βύθισης, σε βαθιές περιοχές του ανοιχτού ωκεανό. Η διαδικασία αυτή έχει αποδειχθεί ότι υφίσταται μέσω του eDNA μακροφυκών, δηλαδή το DNA εκείνο που απελευθερώνεται στο περιβάλλον, καθώς έχει ανιχνευθεί στον πυθμένα θαλασσών σε βάθος 4000 m (Ortega et al., 2019). Ενώ η συνεισφορά στο RPOC και το RDOC από τα μακροφύκη μπορεί να διαφέρει μεταξύ διαφορετικών κατηγοριών, έχει δειχθεί ότι περίπου 1,6% της παραγωγής βιομάζας από το πράσινο φύκος *Ulva* sp. διατηρείται ως RDOC μετά από ανοργανοποίηση αυτών με μεσολάβηση βακτηρίων (Chen et al., 2020).

Έτσι, τόσο τα φυσικά όσο και τα εμπορικά καλλιεργούμενα μακροφύκη συμβάλλουν στη δημιουργία δεξαμενών μπλε άνθρακα στους ωκεανούς (Hill et al., 2015; Trevathan-Tackett et al., 2015). Ωστόσο, η τελική τους αξιοποίηση και τα οφέλη αυτών στις θαλάσσιες περιοχές, σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την κυτταρική σύνθεση που εμφανίζουν, ιδιαίτερα για τα συστατικά του κυτταρικού τοιχώματος με διαφορετικούς ρυθμούς αποικοδόμησης, μια διαδικασία που διαφέρει μεταξύ των ειδών (Trevathan-Tackett et al., 2015). Δυσκολίες για την αξιοποίηση, επίσης, των οφελών από τα μακροφύκη σχετίζονται με τις διαφορές που εμφανίζουν στην ικανότητα *in situ* αποσύνθεσης και τη βιογεωχημική δραστηριότητα σε

διαφορετικές περιοχές. Έτσι, όσον αφορά την επίτευξη στόχων για την ουδετερότητα του άνθρακα σε διάφορες χώρες, η πρόοδος στις πράσινες βιομηχανίες, όπως η επέκταση της καλλιέργειας φυκών και η χρήση της βιομάζας τους για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μπορεί να θεωρηθούν ως εναλλακτικές προσεγγίσεις (Watanabe & Tanabe, 2013). Ο λόγος για την ανάδειξη των καλλιεργειών των μακροφυκών σε σημαντικό παράγοντα για τις υδατοκαλλιέργειες, απορρέει από τη δυνατότητά τους να αναπτύσσονται πολύ πιο γρήγορα από τα χερσαία φυτά, με αποτέλεσμα οι καλλιέργειες αυτών να μεγαλώνουν πολύ πιο γρήγορα (Falkowski & Raven, 2013). Έτσι, σε σχέση με τη βιομάζα που παράγεται από άλλα είδη ανώτερων φυτών, ο ρυθμός κύκλου εργασιών της βιομάζας που παράγεται από τα μακροφύκη και τα μικροφύκη, είναι περισσότερο από 300 φορές ταχύτερος. Ακόμη, αναγνωρίζεται ότι η καλλιέργεια φυκών στη θάλασσα αντιπροσωπεύει μια τεράστια δυνατότητα να παρέχει βιομάζα για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί και διάφορες τεχνολογίες για τη μετατροπή της φυτικής βιομάζας που παράγεται από τα μακροφύκη σε βιο-ανανεώσιμη ενέργεια (McKendry, 2002).

Ενώ τα φύκη έχουν προταθεί ότι έχουν υψηλότερη απόδοση παραγωγικότητας πετρελαίου από τις χερσαίες ελαιοκαλλιέργειες (Watanabe & Tanabe, 2013), τα μακροφύκη είναι πιο ελπιδοφόρα από τα μικροφύκη όσον αφορά την οικονομική θαλάσσια καλλιέργεια και άλλα υποκατάστατα καυσίμων, όπως του μεθανίου και της μεθανόλης (Gao, et al., 2020). Ειδικότερα, με τη χρήση της βιο-ανανεώσιμης ενέργειας που παράγεται από τα μακροφύκη, αναμένεται ότι μπορεί να μην παράγεται CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, καθώς οποιοδήποτε CO<sub>2</sub> που απελευθερώνεται κατά την καύση προέρχεται από αυτό που συλλαμβάνεται κατά τη διάρκεια της πρόσφατης φωτοσύνθεσης και μπορεί ενδεχομένως να αναληφθεί με τον ίδιο τρόπο (Moreira & Pires, 2016). Επιπλέον, η καλλιέργεια μακροφυκών στη θάλασσα δεν απαιτεί γη για την ανάπτυξή τους όπως τα ανώτερα φυτά. Τα παραπάνω στοιχεία, καταδεικνύουν ότι η καλλιέργεια μακροφυκών δύναται να συμβάλει στην προστασία των οικοσυστημάτων γενικά και στην προστασία του πλανήτη. Ωστόσο, για να μπορέσει να επιτευχθεί αυτό, χρειάζεται να εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό η καλλιέργεια των μακροφυκών σε όλον τον πλανήτη και να δαπανηθούν σημαντικά ποσά για την ενίσχυσή της (Chung et al., 2011; Chung, et al., 2017; Duarte et al., 2017). Κάποια αύξηση της παραγωγής μπορεί αναμφίβολα να προέλθει από την αύξηση των περιοχών των παράκτιων προς ανοιχτών ωκεανών που χρησιμοποιούνται για την καλλιέργεια τους (Duarte et al., 2017; Froehlich, et al., 2019). Ωστόσο, η αύξηση της

έκτασης του ωκεανού που προορίζεται για υδατοκαλλιέργεια μακροφυκών, αποτελεί ένα πρόβλημα που δεν έχει επιλυθεί ακόμα, διότι πολλές περιοχές είναι προστατευμένες και δεν μπορούν να παρασχεθούν για καλλιέργειες. Βέβαια, το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να επιλυθεί με την χορήγηση συγκεκριμένων περιοχών για υδατοκαλλιέργειες και την εφαρμογή των κατάλληλων τεχνολογιών για την προστασία τους, ενώ αντίστοιχα θα μπορούσαν να εφαρμόζονται συνεχείς έλεγχοι στις περιοχές αυτές (Raven, 2017).

## 5.2 Μέθοδοι καλλιέργειας μακροφυκών

Οι μέθοδοι καλλιέργειας των μακροφυκών, διακρίνονται στην ανάπτυξη φυσικών καλλιεργειών εντός των θαλάσσιων περιοχών, αλλά και σε χερσαίες καλλιέργειες με τη χρήση της τεχνολογίας. Ωστόσο, όποια μέθοδο και αν εφαρμοστεί κρίνεται απαραίτητο οι παραγωγοί να έχουν εξετάσει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των φυτών αυτών και τις ανάγκες τους, ώστε οι καλλιέργειες να είναι αποδοτικές. Στις φυσικές καλλιέργειες εντάσσονται η βλαστική καλλιέργεια και αυτή με αναπαραγωγικό κύκλο που περιλαμβάνει εναλλαγή γενεών. Ειδικότερα, κατά τη βλαστική καλλιέργεια λαμβάνονται μικρά κομμάτια μακροφυκών και τοποθετούνται σε συγκεκριμένες περιοχές για να αναπτυχθούν. Στη συνέχεια, και αφού αναπτυχθεί το φύκος, λαμβάνεται όλο το μέρος αυτού είτε το μεγαλύτερο μέρος του αφήνοντας ένα μικρό μέρος για να αναπτυχθεί ξανά. Όταν λαμβάνεται όλο το φυτό, κάποια κομμάτια του κόβονται και διατηρούνται με στόχο να δημιουργούν και άλλες καλλιέργειες. Για να μπορέσει να αναπτυχθεί η καλλιέργεια, ωστόσο των μακροφυκών, οι παραγωγοί χρειάζεται να έχουν εξετάσει το επίπεδο της αλατότητας του νερού, τα θρεπτικά στοιχεία που διαθέτουν οι περιοχές προς καλλιέργεια, η θερμοκρασία του νερού, ώστε να συνάδει με τις ανάγκες του είδους που καλλιεργούν, αλλά και την ένταση του φωτός που παρέχεται στα φυτά.

Οι γνώσεις αυτές, είναι απαραίτητες, λόγω της μεγάλης ποικιλότητας των μακροφυκών και των διαφορετικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν μεταξύ τους. Στις καλλιέργειες, στη συνέχεια, οι παραγωγοί χρειάζεται να εφαρμόσουν ορθούς τρόπους δεσίματος των φυτών ώστε να μη σπάνε και καταστρέφονται, χρησιμοποιώντας σκοινιά με τα οποία δένουν τα φύκη εντός του νερού ή τοποθετώντας σε αυτά ένα ξύλινο πλαίσιο που τα προστατεύει. Ακόμη, μπορούν να τα τοποθετήσουν σε λίμνες, όπου δεν υφίσταται τόσο μεγάλος κίνδυνος για της

υδατοκαλλιέργειες, με αποτέλεσμα να είναι σε θέση τα φυτά να μη δένονται (Hasan & Chatrabarti, 2009).

Στην καλλιέργεια μέσω του αναπαραγωγικού κύκλου οι παραγωγοί και πάλι χρειάζεται να διερευνήσουν τις ανάγκες των ίδιων των φυτών, καθώς υπάρχουν μακροφύκη, όπως τα καφέ, τα οποία μπορούν να καλλιεργηθούν μόνο με τον τρόπο αυτό. Τα είδη *Laminaria* είναι ένα καλό παράδειγμα. Ο κύκλος ζωής τους περιλαμβάνει εναλλαγή μεταξύ ενός μεγάλου σπορόφυτου και ενός μικροσκοπικού γαμετόφυτου - δύο γενεές με αρκετά διαφορετικά μορφές. Το σπορόφυτο είναι αυτό που συλλέγεται ως φύκος και για να αναπτυχθεί ένα νέο σπορόφυτο είναι απαραίτητο να περάσει μια αμφιγονική φάση που περιλαμβάνει το γαμετόφυτο. Το ώριμο σπορόφυτο απελευθερώνει σπόρια που βλασταίνουν και αναπτύσσονται σε μικροσκοπικά γαμετόφυτα. Τα γαμετόφυτα γίνονται γόνιμα, απελευθερώνουν σπέρμα και ωάρια που ενώνονται για να σχηματίσουν εμβρυϊκά σπορόφυτα. Αυτά σιγά σιγά εξελίσσονται στα μεγάλα σπορόφυτα που συλλέγουμε. Οι κύριες δυσκολίες σε αυτό το είδος καλλιέργειας έγκεινται στη διαχείριση των μεταβάσεων από σπόρο σε γαμετόφυτο και στη συνέχεια σε εμβρυϊκό σπορόφυτο. Αυτές οι μεταβάσεις πραγματοποιούνται συνήθως σε χερσαίες εγκαταστάσεις με προσεκτικό έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού, των θρεπτικών συστατικών και του φωτός. Επίσης, η διαδικασία παραγωγής με τη χρήση του αναπαραγωγικού κύκλου είναι αρκετά δαπανηρή. Το υψηλό κόστος μπορεί να απορροφηθεί εάν τα φύκη πωληθούν ως τρόφιμα, αλλά το κόστος είναι συνήθως πολύ υψηλό για την παραγωγή πρώτης ύλης για παραγωγή αλγινικών. Όπου η καλλιέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή φυκών για τη βιομηχανία υδροκολλοειδών (άγαρ και carrageenan), χρησιμοποιείται κυρίως η βλαστική μέθοδος, ενώ τα κύρια φύκη που χρησιμοποιούνται ως τροφή πρέπει να λαμβάνονται μέσω της εναλλαγής γενεών για την καλλιέργειά τους (Hasan & Chatrabarti, 2009).

Από την άλλη μεριά, η καλλιέργεια των μακροφυκών δύναται να επιτευχθεί και σε χερσαία συστήματα, όπου αξιοποιούνται διάφορα τεχνολογικά μέσα και διαμορφώνονται τα κατάλληλα περιβάλλοντα για τις καλλιέργειες. Ειδικότερα, η καλλιέργεια δύναται να επιτευχθεί με τη χρήση δεξαμενών, μια διαδικασία που διασφαλίζει υψηλή ποιότητα στα προϊόντα, λόγω του προστατευμένου περιβάλλοντος που παρέχεται στα φυτά και της εύκολης παρακολούθησης από τους καλλιεργητές. Η θερμοκρασία, η ένταση του φωτός, η ποσότητα του νερού και η παροχή θρεπτικών συστατικών είναι διασφαλισμένα, με αποτέλεσμα οι καλλιεργητές να έχουν καλύτερα

αποτελέσματα (Oilgae, 2010; Wegeberg & Felby, 2010). Οι υδατοκαλλιέργειες των μακροφυκών δύνανται να δημιουργηθούν και σε τεχνητές λίμνες, οι οποίες κατασκευάζονται για τον σκοπό αυτό, ενώ διαθέτουν και μικρότερο κόστος λειτουργίας σε σχέση με τις δεξαμενές. Στις καλλιέργειες μακροφυκών σε τεχνητές λίμνες, και πάλι τα φυτά είναι προστατευμένα και διασφαλίζεται ένα περιβάλλον που ενισχύει την ανάπτυξή τους, καθώς δεν υπάρχει φυσική ροή του νερού που μπορεί να καταστρέψει τα φυτά, αλλά ελεγχόμενη παροχή και εναλλαγή αυτού. Η καλλιέργεια των φυκών σε τεχνητές λίμνες αποτελεί ένα σύστημα καλλιέργειας περισσότερων φυκών και εμφανίζουν μεγαλύτερο κόστος στην παραγωγή, ωστόσο δύναται να καταστεί μια ελέγξιμη και ρυθμιζόμενη καλλιέργεια λόγω του περιορισμού τους, με αποτέλεσμα να είναι σε θέση ο καλλιεργητής να διαχειριστεί και το κόστος τους (Oilgae, 2010).

Για να καταστούν, ωστόσο, επιτυχημένες οι καλλιέργειες των μακροφυκών, χρειάζεται οι καλλιεργητές να ακολουθούν συγκεκριμένα πρωτόκολλα και να εφαρμόζουν τις κατάλληλες διαδικασίες. Αρχικά, οι καλλιεργητές πρέπει να εφαρμόζουν τη συλλογή των γόνιμων μακροφυκών κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ στη συνέχεια πρέπει να υλοποιούν την σπορίωση και τον εμβολιασμό τους, με στόχο να λάβουν τους απαραίτητους σπόρους για να ξεκινήσει η καλλιέργεια. Έπειτα, χρειάζεται να δημιουργούν τα σπορόφυτα κάτω από συγκεκριμένες διαδικασίες εργαστηρίου, ώστε οι σπόροι να είναι αποδοτικοί και να αναπτυχθεί η καλλιέργεια. Εν συνεχεία, τα σπορόφυτα πρέπει να αναπτύσσονται στη θάλασσα ή σε θαλασσινό νερό κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο και να πραγματοποιείται η συγκομιδή τους το καλοκαίρι (Lüning et al., 2008; Blouin et al., 2007).

Τα πιο απλά συστήματα καλλιιεργειών μακροφυκών, που εφαρμόζονται από πολλές χώρες, αποτελούν τα συστήματα εκείνα όπου δημιουργούνται μακριές γραμμές μακροφυκών εντός του νερού. Τέτοια συστήματα συναντάμε στη Γερμανία και στην Ιρλανδία, ενώ για την προστασία τους οι καλλιέργειες καλύπτονται με ένα πλέγμα (Buch & Buchholz 2004). Οι μακριές γραμμές καλλιιεργειών και τα πλέγματα που τοποθετούνται σε αυτές δένονται σε σκυρόδεμα για να σταθεροποιηθούν, ενώ χρειάζεται να υλοποιείται συχνά έλεγχος της θερμοκρασίας των νερών και του φωτός (Oilgae, 2010). Ένας άλλος τρόπος καλλιιεργειας των μακροφυκών είναι η δημιουργία δαχτυλιδιών, οι οποίες εφαρμόζονται συνήθως με τη χρήση δεξαμενών. Οι συγκεκριμένες καλλιιεργειες είναι προστατευμένες σε μεγάλο βαθμό και δύνανται με τον τρόπο αυτό να διαχειριστούν οι αλλαγές στη θερμοκρασία και οι καιρικές

συνθήκες. Εν συνεχεία, η συγκομιδή των μακροφυκών από τις καλλιέργειες υλοποιείται με τη χρήση γερανών που ανασύρουν από τις δεξαμενές τα δαχτυλίδια αυτά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος της παραγωγής τους (Wegeberg & Felby, 2010).

Τέλος, στις θαλάσσιες καλλιέργειες χρειάζεται να εφαρμόζονται και κάποιες διαδικασίες, οι οποίες αποσκοπούν στην προστασία των καλλιεργειών. Ειδικότερα, η περιοχή όπου έχει τοποθετηθεί η καλλιέργεια, χρειάζεται καθημερινά να καθαρίζεται από αχινούς, κοράλλια, αστερίες και βράχια, καθώς αποτελούν στοιχεία που βλάπτουν τις καλλιέργειες. Ακόμη, οι καλλιεργητές κρίνεται αναγκαίο συνεχώς να εξετάζουν την αλατότητα του νερού μέσα στο οποίο βρίσκεται η καλλιέργεια, ώστε να παρέχεται το κατάλληλο νερό, διότι οι καλλιέργειες δημιουργούνται σε ρηχές περιοχές. Οι μονάδες καλλιέργειας χρειάζεται να έχουν ελεγχόμενη ανάπτυξη, ώστε να διασφαλίζεται η επιβίωσή της από το ρεύμα του νερού, καθώς η αύξηση της καλλιέργειας πάνω από τα 5 κιλά, μπορεί να αυξήσει τη ροή και να αλλάξει το ρεύμα του νερού, με αποτέλεσμα την καταστροφή της καλλιέργειας. Επίσης, οι καλλιεργητές χρειάζεται να φροντίζουν οι καλλιέργειες να είναι συνεχώς υγιείς και να απομακρύνουν τα φύκη εκείνα που νοσούν, ενώ τέλος, ενώ τα δίχτυα που τοποθετούνται για την προστασία τους και οι πάσσαλοι που τα δένουν κρίνεται αναγκαίο να είναι λειτουργικά και τεντωμένα, για να μην καταστρέφεται η καλλιέργεια (Oilgae, 2010).

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Οι εξελίξεις στην καλλιέργεια μακροφυκών

### 6.1 Εξελίξεις στις καλλιέργειες σε παγκόσμιο επίπεδο

Τα τελευταία 20 χρόνια, η διαδικασία καλλιέργειας και παραγωγής φυκών έχει αυξηθεί σημαντικά και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον κλάδο της αλιείας σε αρκετές χώρες σε παγκόσμιο επίπεδο (Cai et al., 2021). Σύμφωνα με τα δεδομένα του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας (FAO), η παγκόσμια παραγωγή φυκών, τόσο σε επίπεδο υδατοκαλλιέργειας, όσο και σε επίπεδο φυσικής παραγωγής, έχει σχεδόν τριπλασιαστεί από 118.000 τόνους σε 358.200 τόνους από το 2000 έως το 2019 (FAO 2021). Ειδικότερα, το 2019, το 97% της παγκόσμιας παραγωγής υδατοκαλλιέργειας προήλθε από τεχνητή γεωργία των φυκών, στοιχείο που αναδεικνύει ότι αρκετές χώρες έχουν στραφεί στην παραγωγή του συγκεκριμένου είδους.

Ωστόσο, τα ποσοστά της καλλιέργειας καταδεικνύουν ότι η μεγαλύτερη παραγωγή και ανάπτυξη καλλιεργειών εντοπίζεται στην Ασία, στην οποία αντιστοιχεί το 97,38%, της παγκόσμιας παραγωγής. Μάλιστα, στην Ασία, μεγάλο ποσοστό της καλλιέργειας των φυκών υλοποιείται τεχνητά, καθώς έχουν αναπτυχθεί και αξιοποιούνται διάφορες τεχνικές και μέθοδοι καλλιέργειας. Από τις χώρες της Ασίας, η Κίνα κατέχει την πρώτη θέση παγκοσμίως όσον αφορά την παραγωγή υδατοκαλλιέργειας φυκών, αντιπροσωπεύοντας το 56,82% της παγκόσμιας παραγωγής, ενώ δεύτερη χώρα στην καλλιέργεια του είδους από την περιοχή της Ασίας είναι η Ινδονησία, η οποία αντιπροσωπεύει το 28,6% της παγκόσμιας αναπαραγωγής. Στην Ινδονησία, τα φύκη που επιλέγονται να καλλιεργηθούν είναι τα *Eucheuma* και *Gracilaria*, για την παραγωγή των οποίων χρησιμοποιούνται και πάλι τεχνητές μέθοδοι και τεχνολογικές πρακτικές, με στόχο την αύξηση της παραγωγής (Cai et al., 2021).

Εν συνεχεία, στη Νότια Κορέα εντοπίζεται μια ανεπτυγμένη βιομηχανία καλλιέργειας φυκών και πολλά είδη φυκών, οι οποίες καλλιέργειας και αντιπροσωπεύουν το 5,09% της παγκόσμιας παραγωγής. Μάλιστα, η ποικιλότητα στην καλλιέργεια φυκών στη Νότια Κορέα, εμφανίζεται με την καλλιέργεια των καφέ, κόκκινων και πράσινων φυκών. Από τις κατηγορίες αυτές, το ιαπωνικό φύκι αποτελεί την κατηγορία που επιλέγεται συχνότερα, ενώ ακολουθούν οι κατηγορίες *Porphyra tenera* και το *Undaria pinnatifida*. Σημαντική καλλιέργεια, ωστόσο, εμφανίζεται και στις Φιλιππίνες, η οποία και αντιπροσωπεύει το 4,19% της



παγκόσμιας αγοράς. Έπειτα, από τις Φιλιππίνες, το 1,6% της παγκόσμιας υδατοκαλλιέργειας εντοπίζεται στη Βόρεια Κορέα, η οποία και αναπτύσσει κυρίως καλλιέργειες ιαπωνικών φυκών, ενώ τελευταία στις καλλιέργειες φυκών στις ασιατικές χώρες είναι η Ιαπωνία, η οποία και αντιπροσωπεύει το 1,15% της παγκόσμιας παραγωγής φυκών, καλλιεργώντας και παράγοντας την κατηγορία των ιαπωνικών φυκών. Τέλος, και στη Μαλαισία υπάρχει καλλιέργεια φυκών, η οποία, όμως αντιπροσωπεύει το 0,53% της παγκόσμιας υδατοκαλλιέργειας, ενώ οι καλλιέργειες σχετίζονται κυρίως με καλλιέργειες βρύων (Cai et al. 2021, FAO 2021).

Εκτός, όμως από τις χώρες της Ασίας, μια σημαντική ανάπτυξη στην καλλιέργεια των φυκών εμφανίζεται και στις ΗΠΑ, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών, τον 95% περίπου προέρχεται από φυσικούς πόρους. Η Χιλή αποτελεί τον κύριο παραγωγό, αντιπροσωπεύοντας το 0,3% της παγκόσμιας παραγωγής, και καλλιεργεί κυρίως φύκη *Gracilaria* και *Spirulina maxima*, αλλά το 99% αυτών προέρχεται από φυσικές κοίτες ποταμών. Στη συνέχεια, το Μεξικό αντιπροσωπεύει το 0,02% της παγκόσμιας παραγωγής ακατέργαστων φυκών, όπου εντοπίζονται κυρίως οι κατηγορίες των καφέ και των κόκκινων φυκών, οι οποίες προέρχονται από φυσικές κοίτες ποταμών. Ωστόσο, η παραγωγή των φυκών στις ΗΠΑ υλοποιείται σε μεγάλο ποσοστό με φυσικούς πόρους, καθώς αυτός ο τρόπος έχει υιοθετηθεί στις ΗΠΑ, στο Περού και στον Καναδά, με αποτέλεσμα να μην έχει αναπτυχθεί σημαντική τεχνολογία γύρω από την καλλιέργειά τους. Σε ακόμη μικρότερο ποσοστό εμφανίζεται η καλλιέργεια των φυκών στην Ευρώπη, η οποία αντιπροσωπεύει το 0,8% της παγκόσμιας παραγωγής φυκών και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής, περίπου το 96% των φυκών προέρχεται από φυσικούς πόρους. Ωστόσο, το 2010 επιχειρήθηκε στην Ευρώπη μια καινοτόμος τεχνητή καλλιέργεια φυκών, η οποία και χρησιμοποίησε την τεχνολογία για να παράγει το προϊόν, αναγνωρίζοντας τις οικονομικές προεκτάσεις των καλλιεργειών αυτών (Cai et al. 2021, FAO 2021).

Καλλιέργειες φυκών εντοπίζονται και στην ήπειρο της Αφρικής, οι οποίες όμως αποτελούν το μικρότερο ποσοστό της παγκόσμιας αγοράς, καθώς η παραγωγή τους αντιπροσωπεύει το 0,41% των φυκών στον κόσμο. Μέχρι το 2019, το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής των φυκών, περίπου το 81% των φυκών προερχόταν από φυσικές καλλιέργειες, με κάποιες χώρες να κατέχουν τη μεγαλύτερη παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, η Ζανζιβάρη αντιπροσωπεύει το 0,5% της παγκόσμιας υδατοκαλλιέργειας, όπου εντοπίζονται κυρίως καλλιέργειες *Eucheuma*. Τέλος, η Ωκεανία, αντιπροσωπεύει το 0,05% του κόσμου. Το 99% προέρχεται από

καλλιέργειες φυκών, ενώ οι καλλιέργειες αφορούν τα καφέ φύκη (Cai et al. 2021, FAO 2021).

Για να κατανοηθεί καλύτερα, ωστόσο, η κατανομή της καλλιέργειας των φυκών σε παγκόσμιο επίπεδο, χρειάζεται να διασαφηνιστούν και τα είδη που αποτελούν τα πιο καλλιεργήσιμα φύκη, κι επομένως έχουν τις περισσότερες δυνατότητες για μελλοντικές καλλιέργειες. Το 95% της παγκόσμιας παραγωγής φυκών μέχρι και το 2019, αποτελείται από 5 είδη φυκών, τα οποία και εντοπίζονται σχεδόν σε όλες τις χώρες που αναφέρθηκαν. Από τα πέντε αυτά είδη, τα *Laminaria* και *Saccharina* αντιπροσωπεύουν το 34,65% της παγκόσμιας καλλιέργειας, και καλλιεργούνται κυρίως για ανθρώπινη κατανάλωση, σε σαλάτες, ως καρκεύματα και σε σάλτσες. Τα τροπικά φύκη *Kappaphycus* και *Eucheuma*, αντιπροσωπεύουν το 32,62% και χρησιμοποιούνται κυρίως για την εκχύλιση καραγενάνης. Τα είδη *Gracilaria*, *Porphyra* και *Undaria* αντιστοιχούν σε 10,32%, 8,33% και 7,16% αντίστοιχα. Στις χώρες της Ασίας και της Νότιας Αφρικής, τα φύκη χρησιμοποιούνται συχνά ως τροφή για ψάρια και από τα γένη που αναφέρθηκαν το *Laminaria* και το *Sargassum* χρησιμοποιούνται στην Κίνα, το *Kappaphycus* ως λίπασμα φυκών στην Ινδία και μετατρέπεται σε ζωοτροφές στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες (Cai et al. 2021, FAO 2021). Με εξαίρεση τα εμπορικά σημαντικά είδη καφέ φυκών, η έρευνα για τα πράσινα φύκη έχει επικεντρωθεί μέχρι στιγμής στα *Ulva lactuca*, *Enteromorpha prolifera*, *Monostroma nitidum*, *Chlorella pyrenoidosa* και *Ulva conglobata*, με τις βιοεπιδράσεις της ρύθμισης της εντερικής χλωρίδας και της βελτίωσης της λειτουργίας του ανοσοποιητικού συστήματος (Zheng et al. 2020a, 2020b). Αντίθετα, η ανάπτυξη βρώσιμων πόρων πράσινων φυκών δεν αρκεί. Περισσότερα θρεπτικά συστατικά στα φύκη ανακαλύπτονται τώρα και η πιθανή ζήτηση για ενώσεις φυκών και άλλες χημικές ουσίες που παράγονται από τη βιοτεχνολογία αυξάνεται (Zheng et al. 2020).

## 6.2 Εξελίξεις στις καλλιέργειες σε ευρωπαϊκό επίπεδο

Η ευρωπαϊκή παραγωγή βιομάζας μακροφυκών παρέμεινε σχετικά σταθερή τις τελευταίες δεκαετίες, αντιπροσωπεύοντας το 0,57% του παγκόσμιου όγκου (Araújo et al., 2021; FAO 2019). Η βιομηχανία μακροφυκών στην Ευρώπη αποτελεί έναν μικρό αλλά αναδυόμενο τομέα, καθώς υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός εταιρειών παραγωγής μακροφυκών, φτάνοντας περίπου τις 150 εταιρείες στην Ευρώπη (Araújo et al., 2021). Οι περισσότερες από αυτές τις εταιρείες βρίσκονται

στην Ισπανία, τη Γαλλία και την Ιρλανδία, ενώ ακολουθούν εταιρείες που εδρεύουν και δραστηριοποιούνται στη Νορβηγία, στο Ηνωμένο Βασίλειο και στη Δανία (Araújo et al., 2021). Σε αντίθεση με την Ασία, όπου κυριαρχεί η καλλιέργεια, στην Ευρώπη κυριαρχεί η φυσική συγκομιδή, η οποία συμβάλλει περίπου στο 99% της συνολικής ευρωπαϊκής παραγωγής βιομάζας μακροφυκών (Araújo et al., 2021). Η Νορβηγία είναι ο μεγαλύτερος προμηθευτής άγριων αποθεμάτων, ενώ ακολουθούν η Γαλλία, η Ιρλανδία και η Ισλανδία, καθώς διαπιστώνεται ότι οι χώρες αυτές παράγουν το 98% της ευρωπαϊκής παραγωγής βιομάζας (Camia et al., 2018).

Συνολικά, τα μακροφύκη που καλλιεργούνται περισσότερο στην Ευρώπη είναι *Laminaria*, αλλά υπάρχει και κάποια καλλιέργεια και άλλων ειδών (Barbier et al., 2019). Εστιάζοντας στην περιοχή της Βαλτικής Θάλασσας, μόνο το κόκκινο φύκος *Furcellaria lumbricalis* συλλέγεται για εμπορικούς σκοπούς (Weinberger et al., 2020). Η βιομηχανική συγκομιδή του *F. lumbricalis* ξεκίνησε τη δεκαετία του 1940 και διήρκεσε μέχρι τη δεκαετία του 1960 στην θαλάσσια περιοχή της Δανίας, αλλά ο πληθυσμός του μειώθηκε δραματικά από την εντατική καλλιέργεια (Schramm, 1998). Σήμερα, το *F. lumbricalis* βρίσκεται μόνο στη Θάλασσα του Αρχιπελάγους της δυτικής Εσθονίας, όπου η συνολική βιομάζα είναι περίπου 180.000 τόνοι (Weinberger et al., 2020). Η καλλιέργεια μακροφυκών στην Ευρωπαϊκή Ένωση συμβάλλει περίπου στο 1% στη συνολική ευρωπαϊκή παραγωγή βιομάζας μακροφυκών (Araújo et al., 2021). Η Γαλλία, η Δανία και η Ιρλανδία, και στη συνέχεια η Νορβηγία και η Γερμανία, αποτελούν τις ευρωπαϊκές χώρες με την υψηλότερη παραγωγή μακροφυκών υδατοκαλλιέργειας (Camia et al., 2018). Βέβαια, η διαπίστωση της καλλιεργήσιμης δυνατότητας που εμφανίζουν τα φύκη, έχει οδηγήσει και άλλες χώρες να δοκιμάσουν τις καλλιέργειες αυτές, όπου εφαρμόζονται μέχρι στιγμής εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας ή πραγματοποιούνται πιλοτικές δοκιμές καλλιεργειών (Camarena-Gómez & Lähteenmäki-Uutela, 2021). Για παράδειγμα, στη Νορβηγία υπάρχει ένας μακρύς κατάλογος αγροτών που ασχολούνται με την καλλιέργεια των μακροφυκών, ενώ η συγκεκριμένη βιομηχανία αναπτύσσεται στη δυτική ακτή της Σουηδίας (Camarena-Gómez & Lähteenmäki - Uutela, 2021). Ωστόσο, στην περιοχή της Βαλτικής Θάλασσας, συμπεριλαμβανομένης της σουηδικής ανατολικής ακτής, η καλλιέργεια μακροφυκών παραμένει οριακή. Οι προκλήσεις σε αυτή τη λεκάνη είναι πολλές, λόγω της ίδιας της φύσης της περιοχής και των καλλιεργειών. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει σύντομη καλλιεργητική περίοδος, χαμηλή αλατότητα και έλλειψη παράδοσης (Suutari et al.,

2017; Weinberger et al., 2020). Η χαμηλή αλατότητα της Βαλτικής Θάλασσας περιορίζει την ανάπτυξη των φυκών που συνήθως εμπορεύονται στη βιομηχανία μακροφυκών (Barbier et al., 2019). Η καλλιέργεια μακροφυκών μπορεί να διεξαχθεί σε χερσαίες δεξαμενές, λίμνες ή χρησιμοποιώντας συστήματα ανοιχτής θάλασσας (παράκτια και υπεράκτια) σχεδιασμένα με δίχτυα, σχοινιά ή σχεδίες. Οι περισσότερες από τις ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας βρίσκονται στη θάλασσα, είτε σε υπεράκτια ύδατα είτε σε παράκτια, και το 24% υλοποιείται σε επίγεια συστήματα (Araújo et al., 2021).

Βέβαια, η καλλιέργεια των μακροφυκών δεν σχετίζεται μόνο με την παραγωγή αυτών για εμπορικούς λόγους, αλλά και έχει συνδυαστεί και με άλλες υδατοκαλλιέργειες διότι εμφανίζει σημαντικά οφέλη. Ειδικότερα, σε συστήματα που βασίζονται στη θάλασσα, η καλλιέργεια μπορεί να συνδυαστεί με την καλλιέργεια μαλακίων και με ιχθυοκαλλιέργειες με βάση το πρότυπο της Ολοκληρωμένης Πολυτροφικής Υδατοκαλλιέργειας (IMTA), όπου η καλλιέργεια μακροφυκών μπορεί να αντισταθμίσει τα περιττά θρεπτικά συστατικά που απελευθερώνονται από την ιχθυοκαλλιέργεια (Kostamo et al., 2020).

Παρόλο που η καλλιέργεια μακροφυκών στην Ευρώπη δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη και σημαντική, τα κράτη της Ευρώπης έχουν αναγνωρίσει τα σημαντικά οφέλη μιας τέτοιας καλλιέργειας, ενώ ταυτόχρονα έχουν εντοπίσει και τους πιθανούς κινδύνους, με στόχο η ανάπτυξη των καλλιεργειών να υλοποιείται σε σταθερό πλαίσιο και να επιφέρει όσο το δυνατόν μεγαλύτερα οφέλη στα κράτη. Ειδικότερα, στην Ευρώπη έχει αναγνωριστεί ότι η παραγωγή βιομάζα μακροφυκών έχει πολλά κοινωνικοοικονομικά καθώς και περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ανθρώπινη τροφή έχει δημιουργήσει την ανάγκη να βρεθούν νέες εναλλακτικές λύσεις χαμηλού αποτυπώματος άνθρακα για τρόφιμα και ζωοτροφές. Για παράδειγμα, το κόκκινο φύκος *Asparagopsis taxiformis*, ως συστατικό ζωοτροφών, μπορεί να μειώσει την έκλυση εκπομπών μεθανίου από τα βοοειδή (Roque et al., 2021), γεγονός που μπορεί να επιτρέψει στα γαλακτοκομικά αγροκτήματα να επιτύχουν τους στόχους άνθρακα που τίθενται από την ίδια την Ευρωπαϊκή Ένωση (Lähteemäki-Uutela et al., 2021). Τα μακροφύκη έχουν επίσης, οφέλη για την υγεία για τον άνθρωπο, καθώς είναι πλούσια σε αντιοξειδωτικά (Freitas et al., 2012). Πράγματι, τα μακροφύκη προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα χρήσεων με δυνητικά υψηλή αγοραία αξία, όπως παράγωγα φαρμακευτικά προϊόντα, τρόφιμα και πρόσθετα τροφίμων, πρόσθετα ζωοτροφών και ζωοτροφών, βιο-

λιπάσματα και βιοδιεγερτικά και βιοϋλικά (Lähteemäki-Uutela et al., 2021). Ως θετική κοινωνικοοικονομική πτυχή, η βιομάζα μακροφυκών μπορεί να δημιουργήσει νέες άμεσες και έμμεσες ευκαιρίες απασχόλησης, με βάση τις τοπικές ικανότητες στις παράκτιες περιοχές και να προσφέρει μια εναλλακτική λύση στη φθίνουσα αλιευτική βιομηχανία (Araújo et al., 2021).

Η καλλιέργεια μακροφυκών, ακόμη, διαθέτει ένα επιπλέον πλεονέκτημα που σχετίζεται με την ίδια τη φύση της και τη διατήρησή της. Ειδικότερα, οι καλλιέργειες μακροφυκών δεν απαιτούν καλλιεργήσιμη γη, άρδευση ή τεχνητά λιπάσματα (Hoegh-Guldberg et al., 2019), ενώ είναι σε θέση να λειτουργήσουν ως σημείο απορρόφησης CO<sub>2</sub> (Wu et al., 2022). Επιπλέον, τα μακροφύκη προσλαμβάνουν ανόργανα θρεπτικά συστατικά, τα οποία μπορούν να μετριάσουν τον ευτροφισμό, να βελτιώσουν την ποιότητα του νερού και να καταπολεμήσουν τη μείωση της οξυγόνωσης που εμφανίζεται (Jiang et al., 2020; Racine et al., 2021). Στα συστήματα IMTA, η καλλιέργεια μακροφυκών μπορεί να αντισταθμίσει τα επίπεδα θρεπτικών ουσιών που παράγονται από την εκτροφή ψαριών ή μαλακίων (Kostamo et al., 2020). Με βάση τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι ο τομέας της καλλιέργειας των μακροφυκών δύναται να υποστηρίξει δυνητικά έως και επτά από τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ.

Ωστόσο, παρόλο που αναγνωρίζονται σημαντικά οφέλη για την αύξηση των συγκεκριμένων καλλιεργειών, τα κράτη της Ευρώπης έχουν εντοπίσει και τις προκλήσεις που καλούνται να διαχειριστούν, ώστε να είναι σε θέση μελλοντικά να αποτελέσουν ισχυρό παραγωγό στην παγκόσμια αγορά. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ότι στο ευρωπαϊκό επίπεδο δεν υφίσταται το κατάλληλο πλαίσιο για την ανάπτυξη τέτοιας βιομηχανίας, και για τον λόγο αυτό η καλλιέργεια μακροφυκών δεν μπορεί να επιτραπεί να επεκταθεί χωρίς κανόνες, καθώς υπάρχουν επίσης πιθανοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι (Campbell et al., 2019). Η μικρής κλίμακα καλλιέργεια μακροφυκών θεωρείται χαμηλού κινδύνου, καθώς δεν προσφέρει τη δυνατότητα επέκτασης σε μεγάλο εύρος, με αποτέλεσμα να μην υφίσταται σημαντική επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Αντίθετα, για να αποτελέσει η καλλιέργεια μακροφυκών σημαντικό παράγοντα ανάπτυξης της Ευρώπης, απαιτείται μεγαλύτερη κατανόηση των επιπτώσεών της και την ισορροπία μεταξύ περιβαλλοντικών οφελών και κινδύνων. Στους κινδύνους και τις συνέπειες, οι ερευνητές διαπιστώνουν ότι η επέκταση των καλλιεργειών μακροφυκών δύναται να μειώσει τις ροές του νερού και να αλλάξει τον ρυθμό καθίζησης μειώνοντας τη διεύδυση των σωματιδίων από τη

στήλη του νερού στον πυθμένα. Επίσης, τα συγκεκριμένα είδη καλλιέργειας ανταγωνίζονται για θρεπτικά συστατικά με φυσικούς πρωτογενείς παραγωγούς, με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η φυσιολογία του περιβάλλοντος, ενώ σαν είδος δύναται να απορροφήσει σημαντικό ποσοστό ρύπων, το οποίο εν συνεχεία, μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τους ανθρώπους, οι οποίοι επιλέγουν να τα καταναλώσουν. Επιπλέον, οι καλλιέργειες μακροφυκών, έχουν τη δυνατότητα να απελευθερώσουν διαλυμένη και σωματιδιακή οργανική ύλη και να αλλοιώσουν τις συνθήκες φωτός, σκιάζοντας ή αλλάζοντας το φυσικοχημικό περιβάλλον, το οποίο μπορεί να προκαλέσει αλλαγές. Τέλος, δύνανται να αυξήσουν τον κίνδυνο εισαγωγής ξένων ειδών ή παρασίτων που μπορεί να αλλάξουν τη γενετική πληθυσμού των τοπικών μακροφυκών και να μεταβάλουν και τη δομή της τοπικής χλωρίδας και πανίδας, η οποία μπορεί να επηρεάσει τα ψάρια, τα πουλιά και τα θαλάσσια θηλαστικά (Wood et al., 2017; Barbier et al., 2019; Campbell et al., 2019).

Με βάση τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι στην Ευρώπη έχει αναγνωριστεί η δυνατότητα αύξησης της παραγωγής των μακροφυκών, ωστόσο δεν έχει δημιουργηθεί ή δεν έχει αναγνωριστεί το κατάλληλο νομοθετικό πλαίσιο για την υλοποίηση του εγχειρήματος. Πιο συγκεκριμένα, στις περισσότερες χώρες λείπει ειδικό ρυθμιστικό πλαίσιο για τη συγκομιδή ή την καλλιέργεια μακροφυκών, αν και ισχύουν όλοι οι γενικοί περιβαλλοντικοί κανονισμοί, οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν στην περίπτωση των συγκεκριμένων καλλιεργειών. Στην ΕΕ, οι κύριοι κανονισμοί σχετικά με το περιβάλλον και το πλαίσιο των υδατοκαλλιεργειών, αποτελούν η Οδηγία για τους οικοτόπους 92/43/ΕΟΚ, η Οδηγία Θαλάσσιου Χωροταξικού Σχεδιασμού 2014/89/ΕΕ, η Οδηγία Πλαίσιο για τη Θαλάσσια Στρατηγική 2008/56/ΕΚ, η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά 2000/60/ΕΚ, οι Κανονισμοί Ξένων Ειδών 1143/2014/ΕΕ και 708/2007/ΕΚ και η Οδηγία 2011/92/ΕΕ για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Ο κανονισμός για τα βιολογικά τρόφιμα 2018/848/ΕΕ διαθέτει, επίσης, συγκεκριμένους κανόνες για την καλλιέργεια βιολογικών φυκών, οι οποίοι μπορούν να αξιοποιηθούν για να σχεδιαστεί η βάση του νομοθετικού πλαισίου για τις καλλιέργειες αυτές. Ακόμη, έχει διαπιστωθεί ότι όταν εξετάζεται το θέμα της ασφάλειας των τροφίμων των μακροφυκών που πρέπει να χρησιμοποιούνται ως τρόφιμα ή συστατικά, ο Κανονισμός για τα Νέα Τρόφιμα 2015/2283/ΕΕ πρέπει να αποτελεί το βασικό ρυθμιστικό πλαίσιο, ώστε να εισαχθούν στην Ευρώπη προϊόντα

που μέχρι τώρα δεν αποτελούσαν μέρη της αγοράς και δεν είχαν δοκιμαστεί ως τρόφιμα από τους κατοίκους των Ευρωπαϊκών κρατών.

Ένα εμπόδιο, ακόμη, στην ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας γενικά, και στην αναδυόμενη ευρωπαϊκή βιομηχανία μακροφυκών, αποτελεί η κοινωνική αποδοχή, γνωστή και ως κοινωνική άδεια λειτουργίας (Mather and Fanning, 2019; Billing et al., 2021). Η συζήτηση για την κοινωνική άδεια εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1990 στη βιομηχανία εξόρυξης (Mercer-Mapstone et al., 2017), και επιχειρεί να περιγράψει και να αποδώσει πώς μια άτυπη διαδικασία, που διεξάγεται από το κοινό, μπορεί να παρεμβαίνει στη διαχείριση κοινών πόρων και τις χρήσεις τους για ιδιωτικούς ή δημόσιους σκοπούς (van Putten et al., 2018). Η καλλιέργεια μακροφυκών αποτελεί μια θαλάσσια δραστηριότητα που μπορεί να επηρεάσει τα συμφέροντα διαφορετικών θαλάσσιων τομέων, συμπεριλαμβανομένης της κοινωνίας των πολιτών. Η κοινωνική άδεια λειτουργίας μπορεί να εξαρτάται από τη δημιουργία μιας σχέσης μεταξύ των παραγωγών μακροφυκών και όλων των ενδιαφερομένων, και τη διαβούλευση με τους ντόπιους για τον καλύτερο τρόπο δημιουργίας μιας επιχείρησης (Billing et al., 2021). Η νόμιμη άδεια, λοιπόν, στη συγκεκριμένη περίπτωση απορρέει και συνάδει με την κοινωνική άδεια που παρέχεται από τους πολίτες στους παραγωγούς. (Mackor, 2014). Η βιομηχανία μακροφυκών, αναγνωρίζοντας ότι δεν υφίσταται συγκεκριμένο νομικό πλαίσιο που να κατοχυρώνει τη λειτουργία της, αναφέρει συχνά τα νομικά εμπόδια ως περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξή της (Barbier et al., 2019), αναφερόμενη κυρίως στις ουσιαστικές και διαδικαστικές απαιτήσεις για την απόκτηση άδειας λειτουργίας (Araújo et al., 2021). Η διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης μπορεί να είναι αναποτελεσματική και χρονοβόρα, ανάλογα με το κοινωνικοπολιτικό πλαίσιο, την πολυπλοκότητα ή την καινοτομία της τεχνολογίας, τον κατακερματισμό του γραφειοκρατικού καθεστώτος και τα επίπεδα γνώσεων και πόρων του αιτούντος και του φορέα αδειοδότησης (Ulibarri et al., 2017). Η άδεια, γενικά, αποτελεί ένα στρατηγικό αντικείμενο για τις επιχειρήσεις και τις αρχές. Πιο συγκεκριμένα, για την επιχείρηση, η άδεια αποτελεί μια βασική προϋπόθεση για την έναρξη λειτουργίας της και για την πρόσβαση στην αγορά. Από τη σκοπιά του νόμου, η άδεια αποτελεί ένα αφηρημένο αντικείμενο που δημιουργήθηκε για να ρυθμίσει τη συγκεκριμένη συμπεριφορά στον πραγματικό κόσμο (Mackor, 2014). Η άδεια είναι ενσωματωμένη στο ευρύτερο νομικό σύστημα περί υδάτων και περιβαλλοντικών νόμων, το οποίο με τη σειρά του είναι ενσωματωμένο σε αρχές υψηλότερου επιπέδου της αειφόρου ανάπτυξης. Καθώς η άδεια είναι το σημείο όπου οι επιχειρηματικές στρατηγικές και

τα κοινωνικά συμφέροντα γίνονται συγκεκριμένες και αλληλοεπιδρούν, είναι ένα σημαντικό αντικείμενο που καθορίζει την ανάπτυξη της μπλε βιοοικονομίας και έχει αναγνωριστεί από την Ευρώπη ως ένα πλαίσιο που χρήζει διαχείρισης και διασαφήνισης, με στόχο η νέα βιομηχανία, όχι μόνο να επιτύχει στην Ευρώπη, αλλά και να επεκταθεί και σε παγκόσμιο επίπεδο (Barbier et al., 2019).

### **6.3 Σύγχρονες τεχνικές στην υδατοκαλλιέργεια φυκών**

Στη σύγχρονη εποχή της τεχνολογίας και της ραγδαίας εξέλιξης των επιστημών, δύναται να επιτευχθεί και η βελτιστοποίηση της υδατοκαλλιέργειας των μακροφυκών, αξιοποιώντας τεχνικές από διάφορες επιστήμες, αναπτύσσοντας με τον τρόπο αυτό ακόμη περισσότερο τον κλάδο της παραγωγής τους. Η νέα αυτή προσέγγιση που στηρίζεται σε διάφορες επιστήμες, χαρακτηρίζεται διεπιστημονική και αξιοποιεί τεχνικές που στηρίζονται στην τεχνολογία και προέρχονται από διάφορους κλάδους. Μέσω της διαδικασίας του προγραμματισμού δύνανται να ληφθούν τα μέγιστα δεδομένα των στοχευόμενων φυκών για την κατανόηση κάθε πτυχής του συστήματος υδατοκαλλιέργειας. Έτσι, αναδύεται ένα νέο πολυεπιστημονικό επίπεδο στην υδατοκαλλιέργεια μακροφυκών, που συνδέει διάφορους τύπους μηχανικής για την ενίσχυση της υδατοκαλλιέργειας των μακροφυκών στο επόμενο επίπεδο. Οι τύποι αυτοί είναι οι εξής (Aquaculture, 2020):

- (i) η υπολογιστική δυναμική ρευστών (CFD)
- (ii) η μηχανολογία και η χημική μηχανική
- (iii) η πληροφορική και ηλεκτροτεχνική μηχανική και
- (iv) οι βιολογικές επιστήμες και μηχανική

Αυτή η νέα διεπιστημονική προσέγγιση που εφαρμόζεται στην υδατοκαλλιέργεια φυκών είναι πολλά υποσχόμενη για τη βελτίωση των μεθόδων και τεχνικών υδατοκαλλιέργειας. Αυτή η νέα εποχή για την υδατοκαλλιέργεια φυκών αναπτύχθηκε κάτω από την ονομαστική βιομηχανία 4.0. Ειδικότερα, το Industry 4.0 αναπτύσσεται, προτείνοντας τη χρήση της μηχανικής και της επιστήμης των υπολογιστών σε συνδυασμό με πολυαισθητηριακά σχήματα στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας που σχετίζονται με διαδικτυακούς διακομιστές και σταθμούς εργασίας, με λογισμικό λογαριθμικής και τεχνητής νοημοσύνης για τη διαχείριση και τον έλεγχο του συστήματος από κάθε άποψη, ενώ η αλλαγή διαφορετικών παραγόντων στο σύστημα υδατοκαλλιέργειας μπορούν να παρέχουν καλύτερη



παραγωγικότητα και αποδοτικότητα της υδατοκαλλιέργειας, μειώνοντας το συνολικό κόστος (Aquaculture, 2020).

### 6.3.1 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD)

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) ασχολείται με την προσομοίωση συστημάτων μέσω διαφορικών εξισώσεων και περιγράφουν πληρέστερα τα φαινόμενα που συμβαίνουν στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας. Τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας βασίζονται στις διαφορικές εξισώσεις για τις αρχές που διέπουν τη ροή ρευστού, τη μεταφορά θερμότητας και μάζας και τις χημικές αντιδράσεις. Αυτές οι διαφορικές εξισώσεις αποτυπώνονται στη συνέχεια μέσω αλγεβρικών εξισώσεων που επιλύονται αριθμητικά σε χρόνο και χώρο για τα στοιχεία πλέγματος (Santisteban et al., 2019). Για τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, η ροή ρευστού είναι ο κύριος στόχος της ανάλυσης και επίσης η μεταφορά μάζας και οι βιοχημικές αντιδράσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάπτυξη του μοντέλου. Επιπλέον, στην παραγωγή μακροφυκών, τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης δεξαμενής φυκών σε σχέση με τις συμβατικές πειραματικές μελέτες είναι οι σημαντικές μειώσεις στους χρόνους παράδοσης, το κόστος πειραματικού σχεδιασμού και λειτουργίας και η μείωση των αποβλήτων που παράγονται από πειράματα. Τέλος, αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη διεξαγωγή παραμετρικών μελετών για τη βελτιστοποίηση του συστήματος υδατοκαλλιέργειας.

Ωστόσο, οι προσομοιώσεις CFD και η ανάπτυξη μοντέλων πρέπει να επικυρωθούν μέσω εργαστηριακών ή επιτόπιων μελετών για να διαπιστωθούν οι σημαντικότεροι παράγοντες που καθορίζουν την υδατοκαλλιέργεια (Neorì et al., 2008). Στο τέλος, τα αριθμητικά αποτελέσματα μπορούν να βοηθήσουν στον καθορισμό ενός καλύτερου σχεδιασμού των πειραμάτων. Οι προσομοιώσεις CFD είναι πολλά υποσχόμενες για την απόκτηση καλής ποιότητας εικόνας για την υδροδυναμική της υδατοκαλλιέργειας και την ίδια την καλλιέργεια των φυκών. Επιπλέον, οι βιοτικοί και αβιοτικοί παράγοντες που επηρεάζουν το περιβάλλον των μακροφυκών μπορούν να ληφθούν υπόψη στο μοντέλο CFD για να ληφθούν εξαιρετικά δεδομένα για να σχεδιαστεί ένα καλύτερο σύστημα (Behroozi et al., 2019).

Πιο πλήρη μοντέλα CFD περιλαμβάνουν πληθυσμούς, που δείχνουν τον πληθυσμό ως μια ολόκληρη ομάδα ή μια αύξηση ενός μεμονωμένου δείγματος και στη συνέχεια μια κλίμακα, για να κατανοήσουμε πλήρως την επίδραση στα

καλλιεργούμενα φύκη όλων των εισαγόμενων μεταβλητών στο μοντέλο αναλύθηκαν (Reid et al., 2020). Ένας μικρός αριθμός υπερ-ατόμων, που είναι τα άτομα-μοντέλα όπου το καθένα συμβολίζει αρκετές εκατοντάδες ή χιλιάδες πραγματικά άτομα, θα μπορούσε επίσης να εισαχθεί στο μοντέλο, κερδίζοντας έτσι έναν βαθμό μεταβλητότητας στον πληθυσμό (μοντέλα με βάση τα άτομα). Η χρήση στοχαστικών μοντέλων πληθυσμού μπορεί επίσης να είναι ένα σχέδιο για την αποκρυπτογράφηση της απόκλισης σε εξέλιξη στα άτομα. Όσο πιο προηγμένο και πιο εξελιγμένο είναι το μοντέλο, τόσο περισσότερα πραγματικά αυξανόμενα δεδομένα είναι απαραίτητα για την «εκπαίδευση μοντέλων» και την επικύρωση. Το πλεονέκτημα στην τεχνική αυτή είναι η εγγύηση ότι υπάρχουν απαραίτητα δεδομένα για τη βελτίωση της υδατοκαλλιέργειας σε ένα επόμενο επίπεδο παραγωγικότητας και τη μείωση του χρόνου σε πραγματικές δοκιμές καλλιέργειας.

Η ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια με συστήματα υδατοκαλλιέργειας ανακυκλοφορίας (IMTA-RAS) είναι επί του παρόντος ένα από τα καλύτερα ταλαντούχα σχέδια δράσης για την ενίσχυση της βιωσιμότητας των ιχθυοκαλλιεργειών και τη χρήση της καλλιέργειας φυκών για την παραγωγή καλύτερων συστημάτων. Στο IMTA-RAS, είτε ο αερισμός βυθού είτε το σύστημα πρόσκρουσης πίδακα, που στοχεύει στην ανατροπή των φυκών, συμβολίζει ένα από τα κύρια συστήματα καλλιέργειας φυκών (Το CFD αποτελεί έναν αναδυόμενο τομέα στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας που έχει μεγάλες δυνατότητες να προσομοιώσει αυτά τα συστήματα για να συμβάλει στην καλύτερη γνώση του συστήματος και να προβλέψει τη σωστή γεωμετρία και συνθήκες για μια καλή παραγωγή φυκών με χαμηλότερο ενεργειακό κόστος από τις τρέχουσες τιμές. Συνολικά, η στρατηγική CFD που εφαρμόζεται για την προσομοίωση συστημάτων υδατοκαλλιέργειας είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την τόνωση των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας μέσω της μείωσης του χρόνου των αναλύσεων, της μείωσης του κόστους παραγωγής και της αύξησης της ποσότητας και της ποιότητας των παραγόμενων φυκών.

### **6.3.2 Μηχανολογία και Χημική Μηχανική**

Η μηχανολογία που σχετίζεται με την υδατοκαλλιέργεια μακροφυκών παρέχει την ανάπτυξη νέων υλικών και σχεδίων συστημάτων για την απόκτηση πιο αξιόπιστων υλικών και τη βελτίωση της τεχνολογίας επεξεργασίας του υλικού υδατοκαλλιέργειας, σε χερσαία ή υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια. Οι νέες τεχνολογίες και η βελτίωση των υφιστάμενων υδατοκαλλιεργειών είναι καθοριστικής σημασίας

για τη βιομηχανία και την εξέλιξή της. Ειδικότερα, η τεχνολογία στη διαδικασία παραγωγής φυκών είναι σημαντική για την προστασία της υδατοκαλλιέργειας από οποιαδήποτε βλάβη από το ωκεάνιο περιβάλλον, που μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην καλλιέργεια. Στην υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια, μαζί με την πλωτή φάρμα δομικού τύπου, ένα αποτελεσματικό και αξιόπιστο σύστημα πρόσδεσης είναι απαραίτητο για την προστασία της υδατοκαλλιέργειας από τις βλάβες που προκαλούνται από το περιβάλλον (Olanrewaju, et al., 2017). Έτσι, οι μελέτες μηχανολογίας είναι απαραίτητες για τη δημιουργία πιο ανθεκτικής δομής υδατοκαλλιέργειας για να επιβιώσει από καταιγίδες και ακραίους αβιοτικούς παράγοντες, που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα της ίδιας της υδατοκαλλιέργειας.

Η Χημική Μηχανική, από την άλλη σαν κλάδος δίνει ιδιαίτερη έμφαση στις μετρήσεις της ποιότητας του νερού, των αβιοτικών παραγόντων και της ποιότητας των φυκιών. Τα δεδομένα που παρέχονται από τη χημική μηχανική αντιπροσωπεύουν σημαντικά δεδομένα εισαγωγής για προσομοιώσεις CFD. Η τοποθεσία υδατοκαλλιέργειας που σχετίζεται με τη συλλογή των δεδομένων είναι ουσιαστικός παράγοντας για την απόκτηση των πιο αξιόπιστων δεδομένων από τις προσομοιώσεις ώστε να δοθεί το καλύτερο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων (Sato et al., 2006). Έτσι, τα μοντέλα CFD βαθμονομημένα με πειραματικά δεδομένα αντιπροσωπεύουν μια κατάλληλη και αξιόπιστη υποστήριξη για την ανάπτυξη πλήρων μοντέλων για τον επιτυχή χαρακτηρισμό των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας. Η χημική μηχανική διαδραματίζει, επίσης, σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη καλύτερων υλικών στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, που σχετίζονται με τη μηχανολογία. Στο τέλος, τόσο η χημική όσο και η μηχανολογία μπορεί να είναι χρήσιμες για την ανάπτυξη νέων υλικών πιο ανθεκτικών για τις περιοχές υδατοκαλλιέργειας είτε είναι βαθιά, είτε κοντά στην ακτή είτε στην ξηρά. Αυτοί οι δύο τομείς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους για να ολοκληρωθεί η γνώση, μεταξύ τους και με στρατηγικές CFD (Xing et al., 2019).

### **6.3.3 Πληροφορική και Ηλεκτροτεχνική μηχανική**

Το πεδίο της πληροφορικής και της ηλεκτροτεχνικής μηχανικής αποκτά σταδιακά μεγαλύτερη σημασία για τη μελέτη των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας. Αυτό το αυξανόμενο ενδιαφέρον οφείλεται στον γενικό αυτοματισμό των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας, ο οποίος επιτρέπει την απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (RTD) για την υποστήριξη της διαχείρισης της υδατοκαλλιέργειας

προκειμένου να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την πλήρη λειτουργία της υδατοκαλλιέργειας. Ο τομέας της μηχανικής ασχολείται με αισθητήρες και απόκτηση δεδομένων χρησιμοποιώντας μια τεχνική πολλών αισθητήρων, καθώς εισάγονται αισθητήρες στο σύστημα υδατοκαλλιέργειας για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο της ποιότητας του νερού και των περιβαλλοντικών παραμέτρων (Neori et al., 2008). Αυτά τα δεδομένα μπορούν να βοηθήσουν στον λεπτομερή έλεγχο των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας, βοηθώντας τη διαχείριση της καλλιέργειας φυκών για την πρόληψη της ασθένειας και της μόλυνσης από τα φύκια, της ποιότητας του νερού ή των μηχανικών προβλημάτων στην υδατοκαλλιέργεια. Ο κύριος στόχος της χρήσης αισθητήρων είναι ο έλεγχος και η διατήρηση της ποιότητας και της παραγωγής των καλλιεργούμενων φυκών και η μείωση του κόστους παραγωγής μέσω της βελτιστοποίησης του συστήματος (Xing et al., 2019).

Η τεχνική πολλών αισθητήρων έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη στην υδατοκαλλιέργεια στην Κίτρινη Θάλασσα, όπως αναδείχθηκε στην έρευνα των Xing et al. (2019). Ειδικότερα, τα δεδομένα τηλεπισκόπησης πολλών αισθητήρων από δορυφορικές και επιτόπιες παρατηρήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση δεδομένων πολυχρονικής και χωρικής εξέλιξης στην καλλιέργεια *Neopyrodia yezoensis*. Ο στόχος της μελέτης που παρουσιάστηκε από τους Xing et al. (2019) ήταν ο προσδιορισμός της καλύτερης τοποθεσίας των συστημάτων καλλιέργειας φυκών για την πρόληψη της άνθισης φυκών που είναι επιβλαβείς για την παραγωγή στην υδατοκαλλιέργεια.

#### **6.3.4 Βιολογικές Επιστήμες και Μηχανική**

Αυτή η περιοχή συνδυάζει τη βιολογία φυκών, προσομοιώσεις CFD, πληροφορίες υλικού από τη μηχανολογία και μετρήσεις από τη χημική μηχανική. Επιπλέον, αυτό το πεδίο ολοκληρώνει την ανάπτυξη πολυεπιστημονικών μοντέλων χρήσιμων σε δοκιμές είτε στο πεδίο είτε στο εργαστήριο. Κάθε πραγματικός προσδιορισμός γίνεται κυρίως από βιολόγους που συνεργάζονται με μια διεπιστημονική ομάδα μηχανικών. Το γεγονός αυτό είναι ο κύριος κρίκος στη συνεργασία με τις άλλες περιοχές για τη συνεξέλιξη των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας για καλύτερη παραγωγή φυκών και μείωση του κόστους υδατοκαλλιέργειας. Ο τομέας της βιολογίας είναι ένας από τους πιο σημαντικούς γιατί είναι ο τομέας που γνωρίζει τη βιολογία των φυκών και εργάζεται πλήρως στο πεδίο για να κατανοήσει την υδατοκαλλιέργεια φυκών. Οι άλλοι τομείς που

αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι σημαντικοί για να βοηθήσουν την εξέλιξη της υδατοκαλλιέργειας στο επόμενο επίπεδο, την υδατοκαλλιέργεια 4.0 (αυτοματοποίηση των συστημάτων).

Η μελέτη των Mantri et al. (2015) αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο συμβάλει ο νέος τύπος διεπιστημονικής μελέτης, όπου αναλύεται το σύστημα υδατοκαλλιέργειας από την αρχή μέχρι την παραγωγή χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους εργαλείων για την αύξηση της παραγωγής του. Οι Azevedo et al. (2019), επίσης, με παρόμοιο τρόπο μελέτησαν τους περιβαλλοντικούς παράγοντες των κλασικών κατακόρυφων γραμμών με *Saccharina latissima*, οι οποίοι έχουν βελτιστοποιηθεί κατά τη διάρκεια των ετών, και παρακολούθησαν τα πραγματικά αβιοτικά δεδομένα. Μια άλλη σχετική μελέτη που παρουσιάζει μοντελοποίηση δεδομένων είναι η μελέτη της μοντελοποίησης θερμοκρασίας σε σύστημα χερσαίας υδατοκαλλιέργειας για την παραγωγή *Gracilaria pacifica* (Davison et al., 2015). Οι συγγραφείς δημιούργησαν ένα μοντέλο CFD επιλυμένο στο MATLAB που συσχετίστηκε με δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που ελήφθησαν από τις δοκιμές πεδίου υδατοκαλλιέργειας. Τα αποτελέσματα από το μοντέλο αποκάλυψαν μεγάλη ακρίβεια κάτω από τις περισσότερες καιρικές συνθήκες σε τοποθεσία υδατοκαλλιέργειας. Επίσης, πραγματοποίησαν και μια σειρά πιθανών τροποποιήσεων στο αρχικό μοντέλο CFD για να δώσουν περισσότερη δύναμη στην πρόβλεψη παραγωγής. Το μοντέλο ήταν αρκετά ισχυρό ώστε να δέχεται εκτιμώμενες τιμές από διάφορες εισροές και να παράγει ακριβή αποτελέσματα.

### **6.3.5 Aquaculture 4.0**

Μια νέα εποχή καλλιέργειας φυκών Το Industry 4.0 σχετίζεται με τη γνώση από τη μηχανική και την επιστήμη των υπολογιστών σε συνδυασμό με πολυαισθητηριακά σχήματα για τα συστήματα υδατοκαλλιέργειας που σχετίζονται με διαδικτυακούς διακομιστές και/ή σταθμούς εργασίας με το καταλληλότερο λογισμικό για τη διαχείριση και τον έλεγχο του συστήματος και, με αυτόν τον τρόπο, συμβάλει στη βελτίωση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας, μειώνοντας το συνολικό κόστος (Neori et al., 2008). Οι τεχνολογίες Aquaculture 4.0 αποτελούν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για τη βελτιστοποίηση των εκροών και τη μείωση του κόστους και της ρύπανσης στην υδατοκαλλιέργεια (Behroozi et al., 2019). Οι τεχνολογίες και οι μέθοδοι υδατοκαλλιέργειας 4.0 για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών αιτημάτων από την τοποθεσία της υδατοκαλλιέργειας και τα καλλιεργούμενα είδη

δύνανται να βοηθήσουν σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη των καλλιεργειών και τη βελτίωση της αποδοτικότητάς τους, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η ανάπτυξή τους. Δεδομένου ότι η υδατοκαλλιέργεια μπορεί να είναι υπεράκτια ή χερσαία, αβιοτικοί και βιοτικοί παράγοντες επηρεάζουν το σύστημα υδατοκαλλιέργειας, γεγονός που έχει μεγάλη επίδραση στην παραγωγικότητα της υδατοκαλλιέργειας. Για να αποκτηθούν μοντέλα πρόβλεψης της παραγωγής φυκιών στην υδατοκαλλιέργεια, απαιτείται η σύνδεση των μοντέλων ανάπτυξης φυκιών με ρητά μοντέλα CFD που παρέχουν τους σχετικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες (Olanrewaju et al., 2017).

Τα εργαλεία δοκιμαστικών σεναρίων Aquaculture 4.0 μπορούν να χρησιμοποιηθούν πριν από τη δημιουργία της υδατοκαλλιέργειας, ενώ είναι σε θέση να παρέχουν πληροφορίες σε οικονομικό και οικολογικό επίπεδο, το οποίο κρίσιμο για τη βιωσιμότητα της υδατοκαλλιέργειας. Κατά συνέπεια, όλες οι παράμετροι οικονομικών, καλλιεργητικών και κοινωνικοοικονομικών δεδομένων μπορούν να αναλυθούν για να επαληθευτεί η δυναμική των δεδομένων υδατοκαλλιέργειας και να δοθεί στον παραγωγό ένα σημαντικό εργαλείο απόφασης. Ωστόσο, αυτό το εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω με πραγματικά δεδομένα που προέρχονται από την υδατοκαλλιέργεια για να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εξέλιξη της διαχείρισης της υδατοκαλλιέργειας (Nobre et al., 2009).

Η θεωρία του Aquaculture 4.0 μπορεί να επεκταθεί στις στρατηγικές διαχείρισης εκτροφής μακροφυκών που περιλαμβάνουν τη συλλογή και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των ενωμένων ώστε να δημιουργηθούν πρακτικές και διαχείριση υπολογιστικού νέφους σε πραγματικό χρόνο . Περισσότερα μπορούν να επιτευχθούν στα συστήματα ελέγχου της υδατοκαλλιέργειας, για παράδειγμα το cloud computing και η τεχνητή νοημοσύνη (Sustainable European Aquaculture 4.0, 2020). Πολλές τεχνολογίες βρίσκονται επί του παρόντος στο στάδιο της εφαρμογής, σε άλλους τομείς που μπορούν να συμπεριληφθούν στο Aquaculture 4.0, στα Συστήματα Υδατοκαλλιέργειας Ανακυκλοφορίας (RAS), στις υπεράκτιες και χερσαίες έξυπνες υδατοκαλλιέργειες, ποιότητα νερού σε πραγματικό χρόνο (Aquaculture, 2020). Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της ποιότητας του νερού και των συνθηκών υδατοκαλλιέργειας που αναπτύχθηκε από τα προγράμματα Aquaculture 4.0 είναι πολύτιμη για τους αγρότες. Αυτά τα συστήματα μπορούν να δώσουν μεγάλο όγκο πληροφοριών σε διαστήματα δευτερολέπτων ή λεπτών, καθιστώντας δυνατό έναν πιο ακριβή προγραμματισμό των δραστηριοτήτων υδατοκαλλιέργειας και τη δυνατότητα προτροπής συναγεμίων σε περίπτωση μη ασφαλών συνθηκών/ποιότητας νερού ή

προειδοποιήσεων για τον καιρό, καθιστώντας επίσης δυνατή την ανάλυση στιγμιαίων τροποποιήσεων ως προς το χρόνο/ή την ένταση στις δεξαμενές φυκών. Επιπλέον, η παραγωγή μιας ευρείας εμβέλειας βάσης δεδομένων που θα βοηθήσει σε λεπτομερείς και ειδικές μελέτες για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της υδατοκαλλιέργειας σε μεσοπρόθεσμο και μεγάλο χρονικό διάστημα, μειώνοντας τους κινδύνους και ενισχύοντας την υδατοκαλλιέργεια φυκών. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η συγκεκριμένη τεχνική έχει αναδειχθεί σε μια ιδιαίτερα υποσχόμενη πρακτική και έχουν δημιουργηθεί αρκετά προγράμματα χρηματοδότησης για την εξέλιξη της υδατοκαλλιέργειας στο 4.0, αποτελώντας την τεχνολογία αναπαραγωγής και υδατοκαλλιέργειας τους κύριους στόχους του φορέα χρηματοδότησης (Sustainable European Aquaculture 4.0, 2020).

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Πιθανότητες καλλιέργειας μακροφυκών στην Ελλάδα

Η καλλιέργεια μακροφυκών στην Ελλάδα δεν είναι τόσο διαδεδομένη, καθώς δεν υπάρχει ιδιαίτερη αξιοποίηση του φυτών αυτών σε διάφορους κλάδους. Ωστόσο, παρόλο που γενικά τα φύκη δεν χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, ως χώρα που βρέχεται από τη Μεσόγειο, διαθέτει πολλές πιθανότητες να αναπτυχθούν καλλιέργειες φυκών και στη συνέχεια τα προϊόντα να εξάγονται ή να αξιοποιούνται σε εγχώριες παραγωγές. Για να μπορέσουν ωστόσο, να αναπτυχθούν καλλιέργειες μακροφυκών στην Ελλάδα χρειάζεται να εξεταστούν πρώτα τρεις βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχία του εγχειρήματος. Αρχικά, οι εν δυνάμει καλλιεργητές κρίνεται αναγκαίο να εξετάζουν το φυσικό περιβάλλον, τα είδη μακροφυκών που υπάρχουν στην Ελλάδα προς αξιοποίηση και η διαθέσιμη τεχνολογία για την επίτευξη καλλιεργειών. Ως προς το φυσικό περιβάλλον, υπάρχουν πολλές περιοχές στην Ελλάδα που διαθέτουν το κατάλληλο περιβάλλον για την ανάπτυξη καλλιεργειών, καθώς η χώρα εμφανίζει έντονο διαμελισμό, ώστε να μπορούν να βρεθούν θαλάσσιες περιοχές με αβαθή νερά και την κατάλληλη θερμοκρασία για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Ακόμη, η Ελλάδα διαθέτει και ευνοϊκό κλίμα για την ανάπτυξη των καλλιεργειών, καθώς έχει σημαντική ποσότητα φωτός και οι θερμοκρασίες των θαλασσών της δεν είναι χαμηλές (Ορφανίδης, 2009; Τσιάμης, 2012).

Η δεύτερη σημαντική παράμετρος για την ανάπτυξη των καλλιεργειών αποτελεί η διερεύνηση των ειδών των μακροφυκών που ευδοκούν στον ελλαδικό χώρο και δύνανται να έχουν εμπορικό ενδιαφέρον. Ένα γένος μακροφυκών που συναντάται στην Ελλάδα και ζει στη Μεσόγειο Θάλασσα αποτελεί το γένος *Cystoseira*, το οποίο εμφανίζονται σε βάθος περίπου 10 μέτρων και προσκολλάται σε βραχώδη υποστρώματα. Το γένος αυτό ανήκει στα καφέ μακροφύκη και παρουσιάζει μια ποικιλία 15 ειδών που μπορεί να αναπτυχθεί στη θαλάσσια περιοχή της Ελλάδας, όπως η θάλασσα του Αιγαίου. Σαν γένος, τα φύκη *Cystoseira* εμφανίζουν οικονομική αξία, διότι δύνανται να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή αλγινικών οξέων, ζωοτροφών και λιπασμάτων, ενώ η βιομάζα τους δύνανται να αξιοποιηθεί ως βιοφίλτρο βαρέων μετάλλων. Τέλος, το γένος αυτό, εμφανίζει χρησιμότητα και στην παραγωγή φαρμάκων, καθώς τα συστατικά του μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντι-φλεγμονώδη φάρμακα ή φαρμάκων για τη χοληστερόλη (Ορφανίδης, 2009). Ένα άλλο γένος που συναντάται στις ελληνικές και έχει αξία για να καλλιεργηθεί είναι το γένος *Gracilaria*, που ανήκει στην κατηγορία των κόκκινων φυκών. Το γένος αυτό



εμφανίζει ιδιαίτερη οικονομική αξία, διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διατροφή λόγω της δυνατότητας ωμής κατανάλωσής του, ενώ μπορεί να αξιοποιηθεί και για την παραγωγή λιπασμάτων. Σαν είδος καλλιεργείται σε χώρες της νοτίου Αμερικής και της Άπω Ανατολής, με αποτέλεσμα να υπάρχει δυνατότητα εξαγωγής του και ανάπτυξης εμπορικών σχέσεων με άλλες χώρες, καθώς σαν είδος εμφανίζει και αυξημένη ζήτηση. Στην Ελλάδα, το συγκεκριμένο γένος το συναντάμε κυρίως σε λιμνοθάλασσες και κλειστούς κόλπους, όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων για την ανάπτυξή του (Τσιάμης, 2012). Στις ελληνικές θάλασσες, επίσης, συναντάται και το γένος *Porphyra*, το οποίο είναι από τα μεγαλύτερα είδη Ροδόφυτων και έχει αναγνωριστεί σε διεθνές επίπεδο ως ένα σημαντικό είδος. Χρησιμοποιείται εκτενώς στην ασιατική κουζίνα λόγω του ότι διαθέτει υψηλή θρεπτική αξία, με αποτέλεσμα να εμφανίζει σημαντικές πιθανότητες εμπορικής ανάπτυξής του. Επιπλέον, στην περιοχή της Καβάλας εμφανίζεται το είδος *Porphyra rosengurttii* και στον κόλπο της Θεσσαλονίκης το είδος *P. olivii*, δύο είδη που εμφανίζουν και αυτά σημαντική αξία και χρησιμοποιούνται διεθνώς. Τέλος, στην Ελλάδα υπάρχουν πολλά είδη του γένους *Ulva*, τα οποία αναπτύσσονται κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι, και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διατροφή, αλλά και ως στην ολοκληρωμένη υδατοκαλλιέργεια, ως βιοφίλτρα θρεπτικών αλάτων (Ορφανίδης, 2009; Τσιάμης, 2012).

Ωστόσο, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η χρήση της τεχνολογίας για την καλλιέργεια των μακροφυκών, καθώς το σύστημα καλλιέργεια καθορίζει το κόστος παραγωγής και τις δυνατότητες ανάπτυξης της βιομηχανίας. Η χρήση δεξαμενών, τεχνητών λιμνών και οι θαλάσσιες καλλιέργειες αποτελούν συστήματα καλλιεργειών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον ελληνικό χώρο, ενώ αντίστοιχα δύνανται να χρησιμοποιηθούν και συστήματα ολοκληρωμένης πολυτροφικής υδατοκαλλιέργειας (ΙΜΤΑ). Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται αρκετά χρόνια σε πολλές χώρες και προσφέρουν σημαντικά οφέλη διότι παρέχουν ολοκληρωμένες διαδικασίες καλλιεργειών για πολλά είδη. Τα μακροφύκη στις καλλιέργειες αυτές μπορούν να παράσχουν σημαντικά θρεπτικά οφέλη και να αξιοποιηθούν ως βιομάζα για την ανάπτυξή τους. Ένα τέτοιο σύστημα υδατοκαλλιέργεια αποτελεί η καλλιέργεια μακροφυκών και αχινών, όπου τα μακροφύκη δύνανται να αναπτυχθούν μέσω των λυμάτων από τους αχινούς. Τέλος, οι καλλιέργειες μακροφυκών δύνανται να προσφέρουν τη δυνατότητα καθαρισμού των θαλασσών, καθώς η βιομάζα τους εμφανίζει σημαντική απορρόφηση βαρέων μετάλλων που καταστρέφουν τα θαλάσσια ύδατα (Ορφανίδης, 2009, Τσιάμης, 2012).

## Συμπεράσματα

Τα φύκη αποτελούν ένα είδος φυτού που αξιοποιείται σε πολλές χώρες ήδη από την αρχαιότητα και εμφανίζει ποικίλες δυνατότητες αξιοποίησής του σε διάφορους τομείς. Ειδικότερα, εμφανίζουν σημαντική χρήση στη διατροφή, στην κοσμετολογία, στη φαρμακοβιομηχανία και στην παραγωγή βιομάζας, με αποτέλεσμα πολλές χώρες να έχουν στραφεί στην καλλιέργεια των φυκών, τόσο των μακροφυκών όσο και των μικροφυκών. Βέβαια, λόγω της ευαισθησίας και των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν οι καλλιέργειες των φυκών, χρειάζεται οι καλλιεργητές να δημιουργούν τα κατάλληλα περιβάλλοντα για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την προστασία τους, ενώ η συνεχής αύξηση της ζήτησής τους σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει προωθήσει και την ανάπτυξη διαφόρων τεχνολογιών προς την κατεύθυνση αυτή. Επίσης, τα φύκη έχει αναγνωριστεί ότι μπορούν να συμβάλουν και στην προστασία του περιβάλλοντος και των οικοσυστημάτων, ώστε η καλλιέργειά τους πολλές φορές να προσφέρει σημαντικά οφέλη με μηδαμινό περιβαλλοντικό κόστος. Ανά τον κόσμο, λοιπόν, η βιομηχανία των φυκών έχει αυξηθεί και υλοποιούνται συνεχείς έρευνες για την αξιοποίηση όλων των ειδών.

Σημαντικό ενδιαφέρον, μάλιστα, εμφανίζουν τα μακροφύκη, τα οποία και είναι πιο ανθεκτικά από τα μικροφύκη με αποτέλεσμα οι καλλιέργειές τους να είναι πιο αποδοτικές. Στην Ελλάδα συναντώνται διάφορα είδη μακροφυκών λόγω της μορφολογίας της και των θαλασσών, ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μεγάλη αξιοποίησή τους, διότι δεν εμφανίζονται στην ελληνική διατροφή. Βέβαια, η συνεχής αναζήτηση καινοτόμων επιχειρηματικών ιδεών δύναται να οδηγήσει και στην αύξηση της καλλιέργειας μακροφυκών και στον ελλαδικό χώρο, καθώς σαν είδος έχει σημαντική οικονομική αξία. Σε πολλές περιοχές της χώρας εμφανίζονται διάφορα είδη που δύνανται να καλλιεργηθούν και να επιφέρουν οικονομικά οφέλη και η καλλιέργεια τους μπορεί να βελτίώσει την παραγωγικότητα της ελληνικής υδατοκαλλιέργειας. Μάλιστα, οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί πλέον και τα συστήματα καλλιέργειας μακροφυκών που προτείνονται, παρέχουν στους καλλιεργητές ένα είδος ασφάλειας για την αποδοτικότητα των καλλιεργειών τους. Για να μπορέσουν, ωστόσο τα παραπάνω να υλοποιηθούν χρειάζεται να δοθούν κίνητρα στους καλλιεργητές και να υπάρξει ενημέρωση σχετικά με τα οφέλη του είδους αυτού των καλλιεργειών, ενώ παράλληλα πρέπει να χρηματοδοτηθούν οι καλλιέργειες παρέχοντας στους καλλιεργητές τις απαραίτητες δεξαμενές και εξοπλισμό.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

1. **Abatemarco**, J., Hill, A., and Alper, H. S. (2013). Expanding the metabolic engineering toolbox with directed evolution. *Biotechnol. J.* 8, 1397–1410. doi: 10.1002/biot.201300021
  2. **Abou Elalla** FM, Shalaby EA. (2009). Antioxidant Activity of Extract and Semi-Purified Fractions of Marine Red Macroalga, *Gracilaria Verrucosa*. *Aust J Bas App Sci.*, 3, 3179–3185.
  3. **Ainis** AF, Vellanoweth RL, Lapeña QG, Thornber CS. Using non-dietary gastropods in coastal shell middens to infer kelp and seagrass harvesting and paleoenvironmental conditions. *J Archaeol Sci.* 2014; 49: 343- 360. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.05.024>
  4. **Aquaculture 4.0: Applying Industry Strategy to Fisheries Management**. Available online: <https://www.governmenteuropa.eu/aquaculture-4-0/93038/>
- Araújo, *et al.* (2021). Current status of the algae production industry in Europe: an emerging sector of the blue bioeconomy *Front. Mar. Sci.*, 7 (2021)
5. **Araújo**, R. Sanchez Lopez, J., L. Landa, L., Lusser, M. (2019). *Report on the community of practice workshop: algae production in europe: status, challenges and future developments, The European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy* (2019).
  6. **Atzori**, L., Iera, A., and Morabito, G. (2010). The internet of things: a survey. *Comput. Netw.* 54, 2787–2805.
  7. **Azevedo**, I.C.; Duarte, P.M.; Marinho, G.S.; Neumann, F.; Sousa-Pinto, I. (2019). Growth of *Saccharina latissima* (Laminariales, Phaeophyceae) cultivated o\_shore under exposed conditions. *Phycologia* 58, 504–515.
  8. **Baghel** R.S., Trivedi N., Gupta V., Neori A., Reddy C.R.K., Lali A., Jha B. (2015). Biorefining of marine macroalgal biomass for production of biofuel and commodity chemicals. *Green Chem.*, 17, 2436–2443.
  9. **Banach** JL, den Hil EFH, van der Fels-Klerx HJ. Food safety hazards in the European seaweed chain. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2020; 19(2): 332- 364. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12523>
  10. **Barros** MP, Pinto E, Sigaud-Kutner TCS, Cardozo KHM, Colepicolo P. (2005). Rhythmicity and oxidative/nitrosative stress in algae. *Biol Rhythm Res.*, 36, 67–82.
  11. **Becker**, E. W. (1994). *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*. New York, NY: Cambridge University Press.
  12. **Behroozi**, L.; Couturier, M.F. (2019) Prediction of water velocities in circular aquaculture tanks using an axisymmetric CFD model. *Aquac. Eng.* 85, 114–128.

Benedetti, M., Vecchi, V., Barera, S., and Dall'osto, L. (2018). Biomass from microalgae: the potential of domestication towards sustainable biofactories. *Microb. Cell Fact.* 17, 173.

**13. Βερεσόγλου, Δ.** 2002. *Οικολογία*. Περιφερειακές εκδόσεις 'Ελλά'.

Bhola, V., Swalaha, F., Ranjith Kumar, R., Singh, M., and Bux, F. (2014). Overview of the potential of microalgae for CO<sub>2</sub> sequestration. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11, 2103–2118.

**14. Brennan, L., & Owende, P.** (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 557–577.

**15. Bwapwa J.K., Jaiyeola A.T., Chetty R.** (2017). Bioremediation of acid mine drainage using algae strains: A review. *S. Afr. J. Chem. Eng.*, 24, 62–70.

**16. Buchholz CM, Krause G, Buck BH.** Seaweed and man. In: C Wiencke, K Bischof, eds. *Seaweed Biology: Novel Insights into Ecophysiology, Ecology and Utilization*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2012: 471- 493.

**17. Buschbaum C., Chapman A.S., Saier B.** (2006). How an introduced seaweed can affect epibiota diversity in different coastal systems. *Mar. Biol.*, 148, 743–754. doi: 10.1007/s00227-005-0128-9.

**18. Buschmann AH, Camus C.** An introduction to farming and biomass utilisation of marine macroalgae. *Phycologia*. 2019; 58(5): 443- 445. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1638149>

**19. Burja AM, Banaigs B, Abou-Mansour E, Burguess JG, Wright PC.** (2001). Marine cyanobacteria-a prolific source of natural products. *Tetrahedron*, 57, 9347–9377.

**20. Cañavate Hors J.P.** (2011). Las Algas Como Recurso. *Valorización. Aplicaciones Industriales y Tendencias Aplicaciones*. Vigo, Spain. Funciones de las microalgas en acuicultura.

**21. Chen, J., Li, H. M., Zhang, Z. H., He, C., Shi, Q., Jiao, N. Z., & Zhang, Y. Y.** (2020). DOC dynamics and bacterial community succession during long-term degradation of *Ulva prolifera* and their implications for the legacy effect of green tides on refractory DOC pool in seawater. *Water Research*, 185, 116268.

**22. Chung, I. K., Beardall, J., Mehta, S., Sahoo, D., & Stojkovic, S.** (2011). Using marine macroalgae for carbon sequestration: A critical appraisal. *Journal of Applied Phycology*, 23, 877–886.

**23. Γεράκης, Π.Α., Σ. Τσιούρης και Β. Τσιαούση** (2007). *Υδατικό καθεστώς και βιωτή υγροτόπων – προτεινόμενη ελάχιστη στάθμη λιμνών και παροχή ποταμών Μακεδονίας και Θράκης*. Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας, Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων – Υγροτόπων. Θέρμη Θεσσαλονίκης.

- 24. Cook**, C.D.K., B.J. Gut, E.M. Rix, J. Schneller and M. Seitz. (1974). *Water plants of the world. A manual for the identification of the genera of freshwater macrophytes*. Junk.
- 25. Cornish** ML, Critchley AT, Mouritsen OG. Consumption of seaweeds and the human brain. *J Appl Phycol*. 2017; 29: 2377- 2398. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-1049-3>
- 26. Christenson**, L., and Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnol. Adv.* 29, 686–702. doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.05.015
- 27. Cotas**, C.I.P. (2015). *Modelling of Fiber Suspensions Flow in Pipes*. Ph.D. Thesis, University of Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Cronk, J.K., and M.S. Fennessy. 2001. *Wetland Plants: Biology and Ecology*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- 28. Cruz**, J. A., Savage, L. J., Zegarac, R., Hall, C. C., Satoh-Cruz, M., Davis, G. A., et al. (2016). Dynamic Environmental photosynthetic imaging reveals emergent phenotypes. *Cell Syst.*, 2, 365–377. doi: 10.1016/j.cels.2016.06.001.
- 29. Das**, S., Das, S., and Ghangrekar, M. M. (2019). Quorum-sensing mediated signals: a promising multi-functional modulators for separately enhancing algal yield and power generation in microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.* 294, 122138. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122138
- 30. Davison**, A.V.; Piedrahita, R.H. (2015). Temperature modeling of a land-based aquaculture system for the production of *Gracilaria pacifica*: Possible system modifications to conserve heat and extend the growing season. *Aquac. Eng.* 66, 1–10.
- 31. Delgado** N.G., Frías Vázquez A.I., Sánchez H.C., del Valle R.M.S., Gómez Y.S., Suárez Alfonso A.M. (2013). Anti-inflammatory and antinociceptive activities of methanolic extract from red seaweed *Dichotomaria obtusata*. *Braz. J. Pharm. Sci.*, 49, 65–74. doi: 10.1590/S1984-82502013000100008.
- 32. Demirbas**, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Convers. Manag.*, 50, 14–34.
- 33. De Vargas**, C., Audic, S., Henry, N., Decelle, J., Mahe, F., Logares, R., et al. (2015). Ocean plankton. Eukaryotic plankton diversity in the sunlit ocean. *Science* 348, 1261605. doi: 10.1126/science.1261605.
- 33. Dodds**, K.W. (2002). *Freshwater Ecology. Concepts and Environmental Applications*. Academic press. U.S.A.
- 34. Duarte**, C. M., Wu, J. P., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2017). Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science*, 4, 100.
- 35. Dudgeon**, D., A. H. Arthington, M. O. Gessner, Z. I. Kawabata, D. J. Knowler, C. Le'véque, R. J. Naiman, A. H. Prieur-Richard, D. Soto, M. L. J. Stiassny & C. A.

Sullivan, (2006). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews* 81, 163–182.

**36. Duanmu, D., Miller, A. R., Horken, K. M., Weeks, D. P., and Spalding, M. H.** (2009). Knockdown of limiting-CO<sub>2</sub>-induced gene HLA3 decreases HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> transport and photosynthetic C<sub>i</sub> affinity in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106, 5990–5995. doi: 10.1073/pnas.0812885106

**37. Dawes C.** Macroalgae systematics. In: J Fleurence, I Levine, eds. *Seaweed in Health and Disease Prevention*. San Diego, CA: Academic Press; 2016: 107- 148.

Chambers, P. A., P. Lacoul, K. J. Murphy & S. M. Thomaz, (2008). Global diversity of aquatic macrophytes in fresh-water. *Hydrobiologia* 595, 9–26.

**38. El-Baroty GS, Moussa MY, Shallan MA, Ali MA, Sabh AZ, Shalaby EA.** (2007). Contribution to the Aroma, Biological Activities, Minerals, Protein, Pigments and Lipid Contents of the Red Alga: *Asparagopsis taxiformis* (Delile) Trevisan. *J App Sci Res.*, 3, 1825–1834.

**39. Gandhi A.D., Vizhi D.K., Lavanya K., Kalpana V.N., Devi Rajeswari V., Babujanathanam R.** (2017). In vitro anti-biofilm and anti-bacterial activity of *Sesbania grandiflora* extract against *Staphylococcus aureus*. *Biochem. Biophys. Rep.*, 12, 193–197. doi: 10.1016/j.bbrep.2017.10.004.

**40. Erb, T. J., and Zarzycki, J.** (2016). Biochemical and synthetic biology approaches to improve photosynthetic CO<sub>2</sub>-fixation. *Curr. Opin. Chem. Biol.* 34, 72–79. doi: 10.1016/j.cbpa.2016.06.026

**41. FAO.** *Fishery and aquaculture statistics. Global aquaculture production 1950-2018 (FishstatJ)*; 2020.

**42. FAO.** 2021. *The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses.* Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4476en>

**43. FAO** (2022). Διαθέσιμο στο <https://www.fao.org/3/cc0461en/online/sofia/2022/glossary.html>

**44. Fernandez-Ricaud, L., Kourtchenko, O., Zackrisson, M., Warringer, J., and Blomberg, A.** (2016). PRECOG: a tool for automated extraction and visualization of fitness components in microbial growth phenomics. *BMC Bioinformatics*, 17, 249. doi: 10.1186/s12859-016-1134-2.

**45. Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., et al.** (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478, 337–342. doi: 10.1038/nature10452

**46. Foon T.S., Ai L.A., Kuppusamy P., Yusoff M.M., Govindan N.** (2013). Studies on in vitro antioxidant activity of marine edible seaweed from east coastal region, peninsular Malaysia using different extraction methods. *Res. J. Appl. Sci.*, 1, 193–198.

- 47. Furbank, R. T., and Tester, M. (2011).** Phenomics—technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends Plant Sci.*, *16*, 635–644. doi: 10.1016/j.tplants.2011.09.005.
- 48. Guiry MD, AlgaeBase GGM.** World-wide Electronic Publication, National University of Ireland, Galway; 2021. <http://www.algaebase.org>
- 49. Guiry, M. D. (2012).** How many species of algae are there? *J. Phycol.*, *48*, 1057–1063. doi: 10.1111/j.1529-8817.2012.01222.x.
- 50. Guiry, M. (2007).** [\*"Overview of Ulva lactuca ecology"\*](#). *The Seaweed Site*.
- 51. Hagemann, M., and Hess, W. R. (2018).** Systems and synthetic biology for the biotechnological application of cyanobacteria. *Curr. Opin. Biotechnol.*, *49*, 94–99. doi: 10.1016/j.copbio.2017.07.008
- 52. Harun, R., Singh, M., Forde, G. M., and Danquah, M. K. (2010).** Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, *14*, 1037–1047. doi: 10.1016/j.rser.2009.11.004
- 53. Hering, D., A. Borja, J. Carstensen, L. Carvalho, M. Elliott, C.K. Feld, A.-S. Heiskanen, R. K. Johnson, J. Moe, D. Pont, A. L. Solheim & W. van de Bund (2010).** The European Water Framework Directive at the age of 10: A critical review of the achievements with recommendations for the future. *Science of the Total Environment*, *408*, 4007–4019.
- 54. Holdt S.L., Kraan S. (2011).** Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *J. Appl. Phycol.*, *23*, 543–597. doi: 10.1007/s10811-010-9632-5.
- 55. Hutchinson, G.E. (1975).** *A treatise on limnology III. Limnological Botany*. New York. John Wiley & Sons, Inc.
- 56. Houle, D., Govindaraju, D. R., and Omholt, S. (2010).** Phenomics: the next challenge. *Nat. Rev. Genet.*, *11*, 855–866. doi: 10.1038/nrg2897
- 57. Janssens J.C.A., Steenackers H., Robijns S., Gellens E., Levin J., Zhao H., Hermans K., De Coster D., Verhoeven T.L., Marchal K., et al. (2008).** Brominated furanones inhibit biofilm formation by *Salmonella enterica* serovar Typhimurium. *Appl. Environ. Microbiol.*, *74*, 6639–6648. doi: 10.1128/AEM.01262-08.
- 58. Jiao, N. Z., Herndl, G. J., Hansell, D. A., Benner, R., Kattner, G., Wilhelm, S. W., Azam, F. (2010).** Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nature Reviews Microbiology*, *8*, 593–599.
- 59. Jordan, D. R., Mace, E. S., Cruickshank, A. W., Hunt, C. H., and Henzell, R. G. (2011).** Exploring and exploiting genetic variation from unadapted sorghum germplasm in a breeding program. *Crop Sci.*, *51*, 1444–1457. doi: 10.2135/cropsci2010.06.0326

- 60. Jun J.Y., Jung M.J., Jeong I.H., Yamazaki K., Kawai Y., Kim B.M. (2008).** Antimicrobial and antibiofilm activities of sulfated polysaccharides from marine algae against dental plaque bacteria. *Mar. Drugs.*, *16*, 301. doi: 10.3390/md16090301.
- 61. Kagermann, H., Lukas, W.-D., and Wahlster, W. (2011).** *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. VDI Nachrichten.* Available online at: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>
- 62. Kagermann, H., Wahlster, W., and Helbig, J. (2013).** *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group.* Frankfurt: acatech – National Academy of Science and Engineering.
- 63. Kennedy, M. P., P. Lang, J. T. Grimaldo, S. V. Martins, A. Bruce, S. Lowe, H. Dallas, T. A. Davidson, H. Sichingabula, J. Briggs & K. J. Murphy (2016).** The Zambian Macrophyte Trophic Ranking scheme, ZMTR: A new biomonitoring protocol to assess the trophic status of tropical southern African rivers. *Aquatic Botany*, *131*, 15–27.
- 64. Kent, M.D. (2001).** *Applied Wetlands Science and Technology.* Lewis Publishers. Boca Raton London. New York Washington, D.C.
- 65. Kim J.K., Kottuparambil S., Moh S.H., Lee T.K., Kim Y.J., Rhee J.S., Choi E.M., Kim B.H., Yu Y.J., Yarish C. (2015).** Potential applications of nuisance microalgae blooms. *J. Appl. Phycol.*, *27*, 1223–1234. doi: 10.1007/s10811-014-0410-7.
- 66. Kim S.K., Wijesekara I. (2011).** *Anticoagulant Effect of Marine Algae.* Elsevier Inc.; Philadelphia, PA, USA.
- 67. Koyande, A. K., Chew, K. W., Rambabu, K., Tao, Y., Chu, D.-T., and Showa, P.-L. (2019).** Microalgae: a potential alternative to health supplementation for humans. *Food Sci. Hum. Wellness*, *8*, 16–24. doi: 10.1017/S1751731116001543
- 68. Krugmann, P. (2012).** *End this Depression Now!*. W. W. Norton & Company, London.
- 69. Lamesch, P., Berardini, T. Z., Li, D., Swarbreck, D., Wilks, C., Sasidharan, R., et al. (2011).** The Arabidopsis Information Resource (TAIR): improved gene annotation and new tools. *Nucleic Acids Res.*, *40*, D1202-D1210. doi: 10.1093/nar/gkr1090
- 70. Lee J.H., Kim G.H. (2015).** Evaluation of antioxidant activity of marine algae-extracts from Korea. *J. Aquat. Food Prod. Technol.*, *24*, 227–240. doi: 10.1080/10498850.2013.770809.
- 71. Levine I.** Algae: A way of life and health. In: J Fleurence, I Levine, eds. *Seaweed in Health and Disease Prevention.* San Diego, CA: Academic Press; 2016: 1- 5.
- 72. Lin H.T.V., Lu W.J., Tsai G.J., Te Chou C., Hsiao H.I., Hwang P.A. (2016).** Enhanced anti-inflammatory activity of brown seaweed *Laminaria japonica* by fermentation using *Bacillus subtilis*. *Process Biochem.*, *51*, 1945–1953. doi: 10.1016/j.procbio.2016.08.024.



- 73. Liu X., Wang S., Cao S., He X., Qin L., He M., Yang Y., Hao J., Mao W. (2018).** Structural characteristics and anticoagulant property in vitro and in vivo of a seaweed Sulfated Rhamnan. *Mar. Drugs.*, *16*, 243. doi: 10.3390/md16070243.
- 74. Litchman, E. (2007).** CHAPTER 16 - resource competition and the ecological success of phytoplankton. In *Evolution of Primary Producers in the Sea*, eds P. G. Falkowski and A. H. Knoll (pp. 351-375). Burlington: Academic Press.
- 75. Laurens, L. M. L., Chen-Glasser, M., and Mcmillan, J. D. (2017).** A perspective on renewable bioenergy from photosynthetic algae as feedstock for biofuels and bioproducts. *Algal Res.*, *24*, 261–264. doi: 10.1016/j.algal.2017.04.002.
- 76. Michalak, I., and Chojnacka, K. (2015).** Algae as production systems of bioactive compounds. *Eng. Life Sci.*, *15*, 160–176. doi: 10.1002/elsc.201400191
- 77. Magalhaes K.D., Costa L.S., Fidelis G.P., Oliveira R.M., Nobre L.T.D.B., Dantas-Santos N., Camara R.B.G., Albuquerque I.R.L., Cordeiro S.L., Sabry D.A., et al. (2011).** Anticoagulant, antioxidant and antitumor activities of heterofucans from the seaweed dictyopteris delicatula. *Int. J. Mol. Sci.*, *12*, 3352–3365.
- 78. Mantri, V.A.; Ashok, K.S.; Saminathan, K.R.; Rajasankar, J.; Harikrishna, P. (2015).** Concept of triangular raft design: Achieving higher yield in Gracilaria edulis. *Aquac. Eng.* *69*, 1–6.
- 79. McKinley, D. C., A. J. Miller-Rushing, H. L. Ballard, R. Bonney, H. Brown, S. C. Cook-Patton, D. M. Evans, R. A. French, J. K. Parrish, T. B. Phillips, S. F. Ryan, L. A. Shanley, J. L. Shirk, K. F. Stepenuck, J. F. Weltzin, A. Wiggins, O. D. Boyle, R. D. Briggs, S. F. Chapin, D. A. Hewitt, P. W. Preuss & M. A. Soukup (2017).** Citizen science can improve conservation science, natural resource management, and environmental protection. *Biological Conservation*, *208*, 15–28.
- 80. Mir, R. R., Reynolds, M., Pinto, F., Khan, M. A., and Bhat, M. A. (2019).** High-throughput phenotyping for crop improvement in the genomics era. *Plant Sci.*, *282*, 60–72. doi: 10.1016/j.plantsci.2019.01.007.
- 81. Neori, A.(2008).** Essential role of seaweed cultivation in integrated multi-trophic aquaculture farms for global expansion of mariculture: An analysis. *J. Appl. Phycol.* *2008*, *20*, 567–570.
- 82. Neveu, P., Tireau, A., Hilgert, N., Nègre, V., Mineau-Cesari, J., Bricchet, N., et al. (2019).** Dealing with multi-source and multi-scale information in plant phenomics: the ontology-driven phenotyping hybrid information system. *New Phytol.*, *221*, 588–601. doi: 10.1111/nph.15385
- 83. Ohyama, K., Ogawa, M., and Matsubayashi, Y. (2008).** Identification of a biologically active, small, secreted peptide in Arabidopsis by in silico gene screening, followed by LC-MS-based structure analysis. *Plant J.*, *55*, 152–160. doi: 10.1111/j.1365-313X.2008.03464.x
- 84. Olanrewaju, S.O.; Magee, A.; Kader, A.S.A.; Tee, K.F. (2017).** Simulation of o\_shore aquaculture system for macroalgae (seaweed) oceanic farming. *Ships Offshore Struct.* *12*, 553–562.

- 85. Olivieri, G., Salatino, P., and Marzocchella, A. (2014).** Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: Configurations, operating strategies and applications. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, *89*, 178–195. doi: 10.1002/jctb.4218
- 86. Olsen A.I., Olsen Y., Attramadal Y., Christie K., Birkbeck T.H., Skjermo J., Vadstein O. (2000).** Effects of short term feeding of microalgae on the bacterial flora associated with juvenile *Artemia franciscana*. *Aquaculture*, *190*, 11–25. doi: 10.1016/S0044-8486(00)00396-3.
- 87. Ορφανίδης, Σ. (2009).** Προοπτικές Υδατοκαλλιέργειας Μακροφυκών στην Ελλάδα. Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας.
- 88. Παπαστεργιάδου, Ε. (1990).** Φυτοκοινωνιολογική και Οικολογική μελέτη των υδρόβιων μακρόφυτων (υδρόφυτων), στη Β. Ελλάδα. Διδακτορική Διατριβή. ΑΠΘ. Επιστημονική Επετηρίδα του Τμήματος Βιολογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών.
- 89. Puglisi MP, Tan LT, Jensen PR, Fenical W. (2004).** *Capisterones A and B from the tropical green alga Penicillus capitatus: unexpected anti-fungal defenses targeting the marine pathogen Lindra thallasiae*. Tetrahedron.
- 90. Qin, S., Lin, H., and Jiang, P. (2012).** Advances in genetic engineering of marine algae. *Biotechnol. Adv.*, *30*, 1602–1613. doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.05.004
- 91. Radhika D., Veerabahu C., Prira R. (2014).** Anti-inflammatory activities of some seaweed collected from the gulf of mannar coast, tuticorin, south india. *Int. J. Pharma Bio Sci.*, *4*, 39–44.
- 92. Rasala, B. A., & Mayfield, S. P. (2015).** Photosynthetic biomanufacturing in green algae; production of recombinant proteins for industrial, nutritional, and medical uses. *Photosynth. Res.*, *123*, 227–239. doi: 10.1007/s11120-014-9994-7.
- 93. Rawat, I., Kumar, R. R., Mutanda, T., and Bux, F. (2013).** Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Appl. Energy*, *103*, 444–467. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.10.004.
- 94. Rechinger, K.H. (1965).** Der Endemismus in der griechischen Flora. *Rev. Roum. Biol.*, *10*, 135-138.
- 95. Roitsch, T., Cabrera-Bosquet, L., Fournier, A., Ghamkhar, K., Jiménez-Berni, J., Pinto, F., et al. (2019).** New sensors and data-driven approaches—A path to next generation phenomics. *Plant Sci.*, *282*, 2–10. doi: 10.1016/j.plantsci.2019.01.011
- 96. Philbrick, C.T. and D.H. Les. (1996).** Evolution of aquatic angiosperm reproductive systems. *BioScience*, 813-826.
- 97. Phillips, G., N. Willby & B. Moss (2016).** Submerged macro-phyte decline in shallow lakes: what have we learnt in the last forty years? *Aquatic Botany*, *135*, 37–45.
- 98. Pott, R. (1986).** *Die Vegetationsabfolgen unterschiedlicher Gewässertypen Nordwestdeutschlands und ihre Abhängigkeit vom Nährstoffgehalt des 99 wassers*. Festschrift 50 Jahre Geographische Kommission für Westfalen.

- 99. Reid, G.K.;** Lefebvre, S.; Filgueira, R.; Robinson, S.M.C.; Broch, O.J.; Dumas, A.; (2020). Chopin, T.B.R. Performance measures and models for open-water integrated multi-trophic aquaculture. *Rev. Aquac.* 12, 47–75.
- 100. Sato, K.;** Eksangsri, T.; Egashira, R. (2006). Ammonia-Nitrogen Uptake by Seaweed for Water Quality Control in Intensive Mariculture Ponds. *J. Chem. Eng.* 39, 247–255.
- 101. Shalaby EA,** Shanab SMM, Singh V. (2010). Salt stress enhancement of antioxidant and antiviral efficiency of *Spirulina platensis*. *J Med Plants Res.*, 4, 2622–2632.
- 102. Shanab SM,** Shalaby EA, El-Fayoumy E. (2011). *Enteromorpha compressa* exhibits potent antioxidant activity. *J Biomed Biotech.*, 72640.
- 103. Sladojevic, S.,** Arsenovic, M., Anderla, A., Culibrk, D., and Stefanovic, D. (2016). Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification. *Comput. Intell. Neurosci.*, 11. doi: 10.1155/2016/3289801
- Smetacek, V. (1999). Diatoms and the ocean carbon cycle. *Protist*, 150, 25–32. doi: 10.1016/s1434-4610(99)70006-4.
- 104. Stillman, R. A.,** K. A. Wood, W. Gilkerson, E. Elkinton, J.M. Black, D. H. Ward & M. Petrie (2015). Predicting effects of environmental change on a migratory herbivore. *Ecosphere* 6, 114.
- 105. Sculhorpe, C.D.** 1967. *The biology of the aquatic Vascular plants*. London.
- 106. Sustainable European Aquaculture 4.0: Nutrition and Breeding.** Available online: [https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020\\_DT-BG-04-2018-2019](https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_DT-BG-04-2018-2019)
- 107. Sutherland, D. L.,** Howard-Williams, C., Turnbull, M. H., Broady, P. A., and Craggs, R. J. (2015). Enhancing microalgal photosynthesis and productivity in wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour. Technol.*, 184, 222–229. doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.074.
- 108. Tao, F.,** Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., and Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 94, 3563–3576. doi: 10.1007/s00170-017-0233-1
- 109. Tiner, R.W.** 1999. *Wetland indicators: A guide to wetland identification, Delineation, Classification and Mapping*. Boca Raton, Florida, CRC Press.
- 110. Τσιάμης, Κ.** (2012). *Αλλόχθονα μακροφύκηστην υποπαλιρροική ζώνη των ελληνικών ακτών*. Διδακτορική διατριβή. Αθήνα: ΕΚΠΑ.
- 111. Tuegel, E. J.,** Ingraffea, A. R., Eason, T. G., and Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 154798.

- 112. Ugwu, C. U., Aoyagi, H., and Uchiyama, H. (2008).** Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresour. Technol.*, *99*, 4021–4028. doi: 10.1016/j.biortech.2007.01.046
- 113. Valero M, Guillemín M-L, Destombe C, et al.** Perspectives on domestication research for sustainable seaweed aquaculture. *Perspect Phycol.* 2017; 4(1): 33- 46. <https://doi.org/10.1127/pip/2017/0066>
- 114. Vavitsas, K., Fabris, M., and Vickers, C. E. (2018).** Terpenoid metabolic engineering in photosynthetic microorganisms. *Genes*, *9*, E520.
- 115. Venkata Mohan, S., Rohit, M. V., Chiranjeevi, P., Chandra, R., and Navaneeth, B. (2015).** Heterotrophic microalgae cultivation to synergize biodiesel production with waste remediation: Progress and perspectives. *Bioresour. Technol.*, *184*, 169–178. doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.056
- 116. Vermaat, J. A. & E. M. Gross, 2016.** Aquatic botany since 1975: Have our views changed?. *Aquatic Botany* *135*, 1–2.
- 117. Vieira V., Prieto M.A., Barros L., Coutinho J.A.P., Ferreira I.C.F.R., Ferreira O. (2018 ).** Enhanced extraction of phenolic compounds using choline chloride based deep eutectic solvents from *Juglans regia L.* *Ind. Crop. Prod.*, *115*, 261–271.
- 118. Vorosmarty, C. J., P. B. McIntyre, M. O. Gessner, D. Dudgeon, A. Prusevich, P. Green, S. Glidden, S. E. Bunn, C. A. Sullivan, C. R. Liermann & P. M. Davies (2010).** Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, *467*, 555–561.
- 119. Wells, M. L., Potin, P., Craigie, J. S., Raven, J. A., Merchant, S. S., Helliwell, K. E., et al. (2017).** Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *J. Appl. Phycol.*, *29*, 949–982.
- 120. Whitmore, A., Agarwal, A., and Da Xu, L. (2015).** The internet of things—A survey of topics and trends. *Inform. Syst. Front.*, *17*, 261–274.
- 121. Wood, K. A., R. A. Stillman, F. Daunt & M. T. O’Hare, 2014.** Can sacrificial feeding areas protect aquatic plants from herbivore grazing? Using behavioural ecology to inform wildlife management. *PLoS One*, *9*, e104034.
- 122. Wood, K. A., M. T. O’Hare, C. McDonald, K. R. Searle, F. Daunt & R. A. Stillman (2017).** Herbivore regulation of plant abundance in aquatic ecosystems. *Biological Reviews*, *3*, 225-229.
- 123. Wetzel, R. (1983).** *Limnology*. CBS College Publishing USA.
- White, R. L., and Ryan, R. A. (2015). Long-term cultivation of algae in open-raceway ponds: lessons from the field. *Ind. Biotechnol.*, *11*, 213–220.
- 124. Wurtzel, E. T., Vickers, C. E., Hanson, A. D., Millar, A. H., Cooper, M., Voss-Fels, K. P., et al. (2019).** Revolutionizing agriculture with synthetic biology. *Nat. Plants*, *5*, 1207–1210.

- 125. Xing, Q.;** An, D.; Zheng, X.;Wei, Z.;Wang, X.; Li, L.; Tian, L.; Chen, J. (2019). Monitoring seaweed aquaculture in the Yellow Sea with multiple sensors for managing the disaster of macroalgal blooms. *Remote Sens. Environ.* *231*, 111279.
- 126. Yang L-E, Lu Q-Q, Brodie J.** A review of the bladed Bangiales (Rhodophyta) in China: history, culture and taxonomy. *Eur J Phycol.* 2017; 52(3): 251- 263. <https://doi.org/10.1080/09670262.2017.1309689>
- 127. Yao, L., Cengic, I., Anfelt, J., and Hudson, E. P.** (2016). Multiple gene repression in cyanobacteria using CRISPRi. *ACS Synth. Biol.*, *5*, 207–212.
- 128. Zheng, J., Manabe, Y., & Sugawara, T.** (2020a). Siphonaxanthin, a carotenoid from green algae *Codium cylindricum*, protects Ob/Ob mice fed on a high-fat diet against lipotoxicity by ameliorating somatic stresses and restoring anti-oxidative capacity. *Nutrition Research*, *77*, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2020.02.001>
- 129. Zheng, L. X., Chen, X. Q., & Cheong, K. L.** (2020b). Current trends in marine algae polysaccharides: The digestive tract, microbial catabolism, and prebiotic potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, *151*, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.168>
- 130. Zeraatkar A.K., Ahmadzadeh H., Talebi A.F., Moheimani N.R., McHenry M.P.** (2016). Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. *J. Environ. Manag.*, *181*, 817–831.
- 131. Zhou, J., Zhang, H., Meng, H., Zhu, Y., Bao, G., Zhang, Y., et al.** (2014). Discovery of a super-strong promoter enables efficient production of heterologous proteins in cyanobacteria. *Sci. Rep.*, *4*, 4500.
- 132. Zhu, Y., Romain, C., and Williams, C. K.** (2016). Sustainable polymers from renewable resources. *Nature*, *540*, 354–362.