



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΒΡΩΣΙΜΑ ΦΥΚΗ: ΣΥΣΤΑΣΗ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

EDIBLE ALGAE: COMPOSITION, FUNCTIONAL
PROPERTIES AND SAFETY

Πτυχιακή Εργασία

ΙΩΑΝΝΑ ΖΥΓΙΩΤΗ (ΑΜ 16026)

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: κα. Βασιλική Κυρανά

Εξεταστική επιτροπή:

ΚΥΡΑΝΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ (Επιβλέπουσα Καθηγήτρια)

ΛΟΥΓΚΟΒΟΗΣ ΒΛΑΔΗΜΗΡΟΣ

ΚΑΝΕΛΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

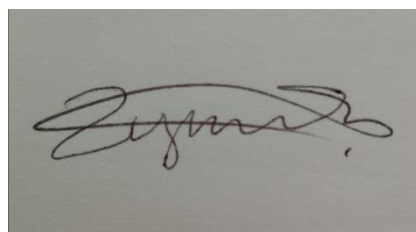
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ιωάννα Ζυγιώτη του Στυλιανού, με αριθμό μητρώου 16026, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Επιστημών Τροφίμων του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	5
1.1	Ιστορική αναδρομή	5
1.2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	6
1.3	Κατηγορίες φυκών	10
1.3.1	Μικροφύκη (Microalgae)	10
1.3.2	Μακροφύκη (Macroalgae)	11
2	Χημική Σύσταση	13
2.1	Λιπίδια	14
2.2	Πρωτεΐνες	16
2.3	Υδατάνθρακες / Πολυσακχαρίτες	18
2.4	Χρωστικές	20
2.5	Ανόργανες ουσίες	22
2.6	Βιταμίνες	23
3	Λειτουργικές ιδιότητες	24
3.1	Βιοδραστικά συστατικά των φυκών	27
3.1.1	Πολυσακχαρίτες	28
3.1.2	Πρωτεΐνες	29
3.1.3	Χρωστικές	30
3.1.4	Λιπίδια και πολυακόρεστα λιπαρά οξέα	30
3.1.5	Φαινολικές ενώσεις	31
3.1.6	Λοιπά βιοδραστικά συστατικά	33
4	Ασφάλεια	35
4.1.1	Αρσενικό (As)	37
4.1.2	Μόλυβδος (Pb) και αλουμίνιο (Al)	37
4.1.3	Υδράργυρος (Hg), Ιώδιο (I), Κάδμιο (Cd)	38
4.2	Προληπτική διαχείριση σε επίπεδο ασφάλειας	38

Περίληψη

Το πρωταρχικό γεγονός που διαδραματίστηκε στον πλανήτη Γη και αποτέλεσε κομβικό σημείο για την ανάπτυξη της ζωής, ήταν η εμφάνιση των πρώτων φωτοσυνθετικών οργανισμών, των φυκών. Γενικά τα φύκη απαρτίζουν την πλειοψηφία των αυτότροφων οργανισμών και είναι μείζονος σημασίας για τη διατήρηση της ζωής όλων των έμβιων όντων για δύο λόγους: Πρώτον, παράγουν το 60% του ατμοσφαιρικού οξυγόνου και δεύτερον, αποτελούν τον πρώτο κρίκο της τροφικής αλυσίδας για οργανισμούς τόσο του υδάτινου όσο και του χερσαίου περιβάλλοντος. Η συνεισφορά τους στους οργανισμούς όμως δεν σταματά εκεί. Τα φύκη περιέχουν ουσίες υψηλής θρεπτικής αξίας έτσι όταν ενσωματωθούν στην ανθρώπινη διατροφή, έχουν μεγάλο όφελος για την υγεία του. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους τομείς όπως της φαρμακευτικής, της γεωργίας, των υδατοκαλλιεργειών, της αισθητικής, εξυπηρετώντας ένα πλήθος λειτουργιών. Για όλους αυτούς τους λόγους, το ενδιαφέρον περί των φυκών παραμένει αμείωτο. Παρ' όλα αυτά, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξετάζονται θέματα ασφάλειας καθώς από τα φύκη δεν εκκλείπουν επικίνδυνες ουσίες.

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Τα φύκη είναι από τους πιο κοινούς οργανισμούς που κατοικούν στη γη και συναντώνται στο υδάτινο περιβάλλον. Η εμφάνισή τους προηγείται της εμφάνισης κάθε άλλου έμβιου οργανισμού και χρονολογείται περίπου 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια πριν. Μάλιστα, η παρουσία τους ήταν καθοριστική για την εξέλιξη της ανθρωπότητας.

Αρχαιολογικές αναλύσεις υπολειμμάτων φυκών, διαφόρων ειδών, που ήλθαν στο φως με ανασκαφές στη νότια Χιλή πριν από περίπου 14.000 χρόνια, έδειξαν ότι αυτά χρησιμοποιούνταν σαν τροφή αλλά και στην Ιατρική (Rajauria G. et al., 2015). Ακόμα, η χρήση τους για λόγους διατροφής εντοπίζεται και στην Κίνα, με τα πρώτα ιστορικά στοιχεία να τοποθετούνται στο 2700 π.Χ. Άλλες ιστορικές αναφορές, παρουσιάζουν συναλλαγές Ινδιάνων της νότιας Αμερικής, οι οποίοι εμπορεύονταν μακροφύκη από κατοίκους παράκτιων περιοχών, με αντάλλαγμα χρυσό που τα χρησιμοποιούσαν για ιαματικούς σκοπούς ιδίως για την αντιμετώπιση ασθενειών του θυρεοειδούς αδένος (Βουλτσιάδου Ε. και λοιποί, 2015).

Το είδος που μετρά τα περισσότερα χρόνια αναγνώρισης είναι εκείνο των κυανοβακτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, για αρκετούς αιώνες στη λίμνη Chad της Αφρικής, το κυανοβακτήριο σπιρουλίνα (*Arthrospira*) συλλέγονταν από τοπικούς πληθυσμούς και καταναλώνονταν σαν τροφή. Συλλέγεται ακόμα και σήμερα και μάλιστα σε καθημερινή βάση, στο βορειανατολικό άκρο της λίμνης και χρησιμοποιείται σαν πρώτη ύλη σε διάφορα πιάτα όπως οι σάλτσες λαχανικών και οι ζυμοί κρέατος, αφού πρώτα αποξηραθεί στον ήλιο. Στην άλλη άκρη του Ατλαντικού Ωκεανού, κυανοβακτήρια του ίδιου γένους συλλέγονταν από τον 13ο αιώνα μ.Χ. από Αζτέκους στη λίμνη Texcoco του Μεξικού, ενώ σύμφωνα με Ισπανούς ιστορικούς τα χρησιμοποιούσαν για την παρασκευή πίτας γνωστή με το όνομα “tecuiclatl” (Βουλτσιάδου Ε. και λοιποί, 2015).

Παρά το γεγονός ότι δεν ήταν γνωστή η σύνθεση και η διατροφική αξία των θαλάσσιων φυκών πριν από αιώνες, όταν αυτά άρχισαν να συμπεριλαμβάνονται στις διατροφικές συνήθειες των ανατολικών χωρών, έφτασαν σήμερα να αποτελούν παραδοσιακές τροφές. Ειδικότερα, το νηματοειδές κυανοβακτήριο *Nostoc commune*¹ καταναλώνεται σε διάφορες μορφές όπως ωμό, ξηρό, μαγειρεμένο στον ατμό ή μέσα σε σούπες. Ομοίως, το κυανοβακτήριο *Nostoc flagelliforme*² (γνωστό ως “facai”) θεωρείται σαν λαχανικό, το οποίο έχει μαύρο χρώμα και μοιάζει με τρίχες μαλλιών (νηματοειδής μορφή). Χρησιμοποιείται αποξηραμένο και σερβίρεται στην Κίνα σε διάφορες γιορτές. Λόγω της συνεχόμενης συγκομιδής του *N. flagelliforme* παρατηρήθηκε διάβρωση του εδάφους και για το λόγο αυτό, στα τέλη της δεκαετίας του 90 απαγορεύτηκε η συγκομιδή του. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην εμφάνιση ενός παρόμοιου αλλά μη γνήσιου προϊόντος.

Ακόμα ένα είδος της παραδοσιακής διατροφής της Κίνας, της Μογγολίας και της νότιας Αμερικής είναι το *N. punctiforme*, το οποίο σχηματίζει χερσαίες σφαιροειδείς αποικίες,

¹ αναπτύσσεται με τη μορφή μεγάλων ζελατινοειδών σωρών

² μεγαλώνει πολύ αργά με τη μορφή βιομεμβράνης (mat) και προσκολλάται στο έδαφος έρημων στεπών της βόρειας και βορειοδυτικής Κίνας.

γνωστές ως “lakeplum” (δαμάσκηνο της λίμνης). Άλλο ένα εδώδιμο είδος που καταναλώνεται στην Ιαπωνία είναι το κυανοβακτήριο *Aphanothece sacrum* που θεωρείται λιχουδιά με το όνομα “suizenji-nori”. Επίσης, στη Μπούρμα, την Ταϊλάνδη, το Βιετνάμ και την Ινδία στο ανθρώπινο διατροφολόγιο περιλαμβάνονται κάποια νηματοειδή χλωροφύκη (όπως τα *Spirogyra* και *Oedogonium*).

Στις αρχές του 17ου αιώνα, καταγράφεται η πρώτη εμπορική χρήση φυκών η οποία αφορούσε την παραγωγή γυαλιού στη Γαλλία και τη Νορβηγία³. Τα φύκη αυτά συλλέγονταν από παράκτιους αγρότες και στη συνέχεια καίγονταν για παραγωγή ποτάσας, απ’ την οποία κατασκευάζαν τελικά γυαλί και σαπούνη. Βέβαια, από αυτή την ενέργεια υπήρχαν συγκρούσεις, σύμφωνα με ιστορικές πηγές, μεταξύ αγροτών και πλοηγών διότι από την καύση έβγαινε πυκνός καπνός. Παρ’ όλα αυτά, η συγκεκριμένη δραστηριότητα εντατικοποιήθηκε προκειμένου να καλυφθεί η αυξημένη ζήτηση. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η έκταση της δραστηριότητας, αναφέρεται ότι το 1800, εξήχθησαν από τη Νορβηγία 1500 τόνοι ποτάσας για την παραγωγή γυαλιού και σαπουνιού. Στο μεταξύ, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση συγκομιδής των φυκών στην Ιρλανδία σαν αποτέλεσμα διαμοιρασμού της γης λόγω της αύξησης του πληθυσμού. Σε αυτήν την περίπτωση τα φύκη χρησιμοποιούνταν σαν λίπασμα για τη βελτίωση της απόδοσης των καλλιεργειών.

Αργότερα, τον 19ο αιώνα, τα φύκη χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ιωδίου. Αυτή ήταν και η κύρια χρήση τους, μέχρι τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν αντικαταστάθηκαν από χημικό υλικό. Ωστόσο, η βιομηχανία φυκών παρέμεινε και το 1950 διαδέχθηκε την παραγωγή φυκοκολλοειδών (άγαρ, αγαρόζη και ιδιαίτερα αλγινικά άλατα). Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο για τη βιομηχανία διαδραμάτισε η έρευνα της Βρετανίδας φυκολόγου Kathleen Drew Baker αναφορικά με τον κύκλο ζωής του nori. Μάλιστα, το έργο της ήταν σωτήριο για την Ιαπωνική βιομηχανία την περίοδο (του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου), καθώς υπήρχε ανάγκη για οποιαδήποτε τρόφιμο όμως, δεν μπορούσε να προσδιοριστεί για ποιο λόγο δεν ήταν αποτελεσματικές οι παραδοσιακές μέθοδοι καλλιέργειας.

Η διεύρυνση των εφαρμογών των φυκών στον δευτερογενή τομέα της μεταποίησης, σε συνδυασμό με τη την ανακάλυψη χρήσιμων ουσιών στη βιομάζα τους, γεγονός που σχετίζεται με ευεργετικές ιδιότητες, οδήγησε στην κατακόρυφη αύξηση του εμπορικού ενδιαφέροντος. Έτσι, μπορούμε πλέον να μιλάμε για μια περίοδο άνθισης της καλλιέργειας και αξιοποίησης των φυκών, καθώς ολοένα και περισσότερα είδη προστίθενται στον κατάλογο των εμπορικά καλλιεργούμενων φυκών.

1.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ο όρος «φύκη»⁴ (*Algae*, Ενικός: *Alga*) αναφέρεται σε μια τεράστια κατηγορία πάνω από 50.000 είδη φωτοσυνθετικών, στην συντριπτική πλειονότητα οργανισμών. Οι οργανισμοί αυτοί μπορεί να είναι είτε Προκαρυωτικοί (κυανοβακτήρια) είτε Ευκαρυωτικοί, μονοκύτταροι (μικροφύκη) έως πολυκύτταροι (μακροφύκη). Παρόλο που ευκολότερα

³ Εδώ να σημειώσουμε ότι, η χρήση αυτή οδήγησε στη θέσπιση κανόνων για την ρύθμιση της δραστηριότητας της συγκομιδής φυκών. Μάλιστα, το 1681 στη Γαλλία εκδίδεται το πρώτο διάταγμα, με το οποίο καθορίστηκαν οι εποχές και ο επιτρεπόμενος αριθμός ημερών συγκομιδής [4].

⁴ λανθασμένα συγχέονται με τα φύκια. Τα φύκια είναι θαλάσσια φυτά (σπερματοφύτα) με ρίζες, βλαστό, φύλλα, άνθη και καρπούς. Επίσης, λανθασμένος είναι και ο όρος άλγες για τα φύκια.

μπορούμε να ορίσουμε «Τι δεν είναι» παρά «Τι είναι», αν θέλαμε να δώσουμε έναν ορισμό θα λέγαμε ότι: «Ως φύκη ορίζονται εκείνοι οι Προκαρυωτικοί και Ευκαρυωτικοί οργανισμοί στο κύτταρο των οποίων υπάρχει χλωροφύλλη, δεν διαθέτουν ρίζες, αγγεία, κορμό και φύλλα και τα αναπαραγωγικά τους κύτταρα δεν περιβάλλονται από άγονα επικαλυπτικά κύτταρα». Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό λοιπόν, δεν κατατάσσονται στον κλάδο των φυτών ως «θαλλόφυτα» αλλά μαζί με τα Πρωτόζωα ανήκουν στο Βασίλειο Πρώτιστα [6].

Τα φύκη είναι υδρόβιοι οργανισμοί, απαντώνται σε υδάτινα οικοσυστήματα κάθε είδους, όπως θάλασσες, λίμνες, ποτάμια κ.λπ. Πρακτικά όμως, μπορούν να αναπτυχθούν οπουδήποτε αρκεί να υπάρχει ελάχιστη υγρασία. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, μπορούν να εντοπιστούν ακόμα και σε χιόνι, πάγο ή θερμές πηγές. Ζουν σαν επιπλέοντες οργανισμοί, αποτελώντας το φυτοπλαγκτό, ή σαν βενθικοί οργανισμοί προσκολλημένοι σε διάφορα υποστρώματα όπως ο θαλάσσιος πυθμένας τα βράχια κ.λπ.

Η μορφολογία των φυκών είναι εξαιρετικά ποικίλη και κυμαίνεται από απλή μονοκύτταρη μορφή έως και αρκετά πολύπλοκη. Τα μονοκύτταρα είδη φυκών, εμφανίζονται ως κοκκοειδή, δηλαδή με τη μορφή μικρών σφαιρών. Σε άλλα είδη φυκών σχηματίζονται αποικίες από δύο έως χιλιάδες κύτταρα, που διαμορφώνονται σε χαλαρή ή πιο αυστηρά καθορισμένη διάταξη. Έτσι, οι μορφές που προκύπτουν μοιάζουν με τσαμπιά σταφυλιού, φύλλα, μικροσκοπικούς θάμνους, δίχτυ, σωλήνες κ.α. Ο πιο κοινός μορφότυπος θα λέγαμε πως είναι ο νηματοειδής, που συντίθεται από κύτταρα ενωμένα σε γραμμική σειρά και μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες σειρές κυττάρων. Σε κάθε περίπτωση, η δομή του θαλλού (σώμα των φυκών), ακόμα και στα πολυκύτταρα φύκη όπως στα μακροφύκη *Macrocystis*, μπορεί να φαίνεται διαφοροποιημένη αλλά δεν αντιστοιχεί με αυτά των φυτών. Η βασικότερη διαφορά που θα πρέπει να τονιστεί, είναι ότι στα φύκη ολόκληρος ο θαλλός φωτοσυνθέτει και τα συστατικά που χρειάζεται, τα αντλεί από όλα του τα κύτταρα, σε αντίθεση με τα φυτά που η φωτοσύνθεση περιορίζεται στα φύλλα και τα συστατικά προσλαμβάνονται μόνο από τις ρίζες.

Η αναπαραγωγική διαδικασία των φυκών σε ορισμένα είδη γίνεται αγενώς, με μιτωτικές διαιρέσεις των βλαστικών τους κυττάρων, ενώ σε άλλα γίνεται εγγενώς με σπόρια. Τα σπόρια διακρίνονται σε κύτταρα που φέρουν μαστίγια (πλανοσπόρια) και σε κύτταρα που δεν έχουν μαστίγια (απλανοσπόρια), τα οποία εν συνεχεία βλαστάνουν δίνοντας πανομοιότυπα κύτταρα με το μητρικό φύκος. Η εγγενής αναπαραγωγή πραγματοποιείται με σύντηξη δύο απλοειδών γαμετών σε ζυγωτή, αλλά με διαφορές από ομάδα σε ομάδα και για το λόγο αυτό, συνοδεύεται από πολλές μορφολογικές διαφοροποιήσεις των φάσεων του κύκλου ζωής. Όσον αφορά το προσδόκιμο ζωής, για τα περισσότερα φύκη μπορεί να είναι ημέρες, εβδομάδες ή και μήνες. Τα μικρά φύκη μπορεί να βρίσκονται σε αφθονία για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, αλλά το υπόλοιπο έτος να είναι σε αδράνεια. Η αδρανής μορφή για ορισμένα είδη, είναι μια ανθεκτική κύστη, ενώ άλλα είδη διατηρούνται σε φυτική κατάσταση μεν, αλλά σε πολύ χαμηλό πληθυσμό δε. Επίσης, στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, ο θαλλός μπορεί να χαθεί, όμως στην αρχή της επόμενης καλλιεργητικής περιόδου το τμήμα προσάρτησης παράγει νέα ανάπτυξη.

Τα φύκη είναι ως επί το πλείστον αυτότροφοι, φωτοσυνθετικοί οργανισμοί, δηλαδή φωτοσυνθέτουν παρόμοια με τα ανώτερα φυτά και η κύρια φωτοσυνθετική χρωστική τους

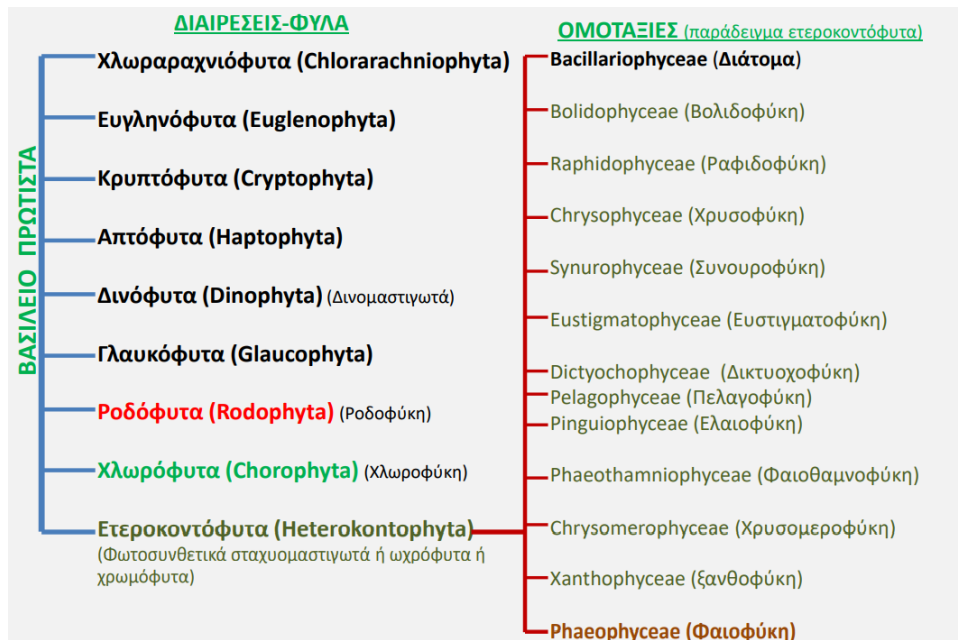
είναι η χλωροφύλλη Α . Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται, προσλαμβάνοντας άνθρακα από το διοξείδιο του άνθρακα και ενέργεια από τον ήλιο. Αυτό όμως δεν συμβαίνει σε όλα τα είδη και έτσι προκύπτουν διαφορετικά είδη μεταβολισμού. Ακόμα, ορισμένα ήδη έχουν τη δυνατότητα να διαφοροποιούν τον μεταβολισμό τους ανάλογα με τις συνθήκες που βρίσκονται. Έτσι παρατηρούνται τέσσερις διαφορετικοί τύποι μεταβολισμού κατά τους οποίους αναπτύσσονται τα φύκη:

- Φωτοαυτότροφος: Με αυτόν τον τρόπο αναπτύσσεται η πλειονότητα των φυκών και μοιάζει αρκετά με τη λειτουργία των φυτών. Σε αυτή την περίπτωση τα φύκη απορροφούν ηλιακή ενέργεια και άνθρακα από το CO₂.
- Ετερότροφος: Σ' αυτή την περίπτωση, τα φύκη δεν προσλαμβάνουν την απαιτούμενη ενέργεια από τον ήλιο αλλά ούτε τον άνθρακα από το CO₂. Απορροφούν άνθρακα και ενέργεια από διάφορες οργανικές ουσίες.
- Φωτοετερότροφος: Στην κατηγορία αυτή, η ενέργεια προσλαμβάνεται από τον ήλιο και ο άνθρακας από οργανικές ενώσεις. Κατ' αυτόν τον τρόπο αναπτύσσονται τα μικροφύκη.
- Μιξότροφος: Στην κατηγορία αυτή, τα φύκη μπορούν να προσαρμόζουν τον μεταβολισμό τους, ανάλογα με τις συνθήκες. Πρόκειται για μίξη φωτοαυτότροφου και ετερότροφου μεταβολισμού, όπου τα φύκη μπορούν να απορροφούν άνθρακα και ενέργεια με διάφορους τρόπους.

Με βάση, όλα όσα αναφέρθηκαν έως τώρα αντιλαμβανόμαστε ότι είναι αρκετά δύσκολο να γίνει κατηγοριοποίηση των φυκών λόγω της εξαιρετικής ποικιλίας που εμφανίζουν. Οι διαφορές εμφανίζονται σε επίπεδο μορφολογίας, στον τρόπο αναπαραγωγής, στον μεταβολισμό κλπ. Για το λόγο αυτό, η διάκριση γίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση το μέγεθος:

α) Τα Μικροφύκη: Τα οποία δεν είναι ορατά με γυμνό μάτι, παρά μόνο με μικροσκόπιο. Το μέγεθός τους κυμαίνεται από 0,2μm έως πάνω από 200μm και εμφανίζονται σε ορισμένες αποικιακές μορφές κυανοβακτηρίων. Οι βασικότερες ομάδες μικροφυκών είναι τα Χλωροφύκη (Chlorophyta), τα Ετεροκοντόφυτα (Heterokontophyta) ,με κύριες υποδιαίρεσεις τα Χρυσοφύκη (Chrysophyceae), τα Διάτομα (Bacillariophyceae ή Diatomeae), τα Ευστιγματοφύκη (Eustigmatophyceae) και τα Ραφιδοφύκη (Raphidophytes), τα Απτόφυτα (Haptophytes, Prymnesiophyceae), τα Κρυπτοφύκη (Cryptophyceae), τα Δινομαστιγωτά (Dinophyta) και τα Κυανοβακτήρια (Cyanobacteria – blue-green algae).

β) Τα Μακροφύκη: Των οποίων το μέγεθός (αναφερόμαστε κυρίως στο μήκος) κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά έως δεκάδες μέτρα. Οι βασικότερες ομάδες μακροφυκών είναι τα Χλωροφύκη (Chlorophyta), τα Ροδοφύκη (Rhodophyta) και τα Φαιοφύκη (Phaeophyta).



Εικόνα 1: Οι κυριότερες συστηματικές κατηγορίες των Ευκαρυωτικών φυκών

Γενικά, δεν είναι εύκολο να προσδιορίσουμε και να ταξινομήσουμε τα φύκη λόγω της ποικιλίας που εμφανίζουν ως προς την μορφολογία, τις χρωστικές και τους τρόπους αναπαραγωγής τους. Η διάκριση στις μεγάλες ομάδες γίνεται με βάση τα βιοχημικά κριτήρια (π.χ. χρωστικές) και τα μορφολογικά γνωρίσματα. Για να γίνει περαιτέρω ταξινόμηση σε γένη ή/και είδη χρειαζόμαστε πληροφορίες σχετικά με τα νερά όπου αναπτύσσονται, το μέγεθος, το χρώμα, το μεταβολισμό, τη μορφή, τα κύτταρα, τον τρόπο που κινούνται και αναπαράγονται αλλά και τον κύκλο ζωής τους. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ταξινόμηση των σημαντικότερων ειδών φυκών που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια της εργασίας.

Πίνακας 1. Κύρια χαρακτηριστικά σημαντικών αθροισμάτων φυκών

Φύλο- (Διαίρεση ή Αθροισμα)	Αριθμός ειδών περίπου	Φωτοσυνθετικές χρωστικές	Αποθησαυριστικό απόθεμα	Αριθμός και θέση μαστιγίων	Συστατικά κυτταρικού τοιχώματος	Περιβάλλον ύπαρξης
Dinophyta (Δινομαστιγωτά)	~1100	χλωροφύλλες a, c, καροτενοειδή	άμυλο	2, πλευρικός	κυτταρίνη	θάλασσα κυρίως και γλυκά νερά
Heterokontophyta (φωτοσυνθετικά σταχυομαστιγωτά)	~20000	χλωροφύλλες a, c, β-καροτένιο, ξανθοφύλλες	χρυσολαμιναρίνη, λιπίδια	2 άνισα μαστίγια το μακρύτερο τριχωτό	ορισμένα γυμνά, μερικά πυρίτιο/ οργανικές φολίδες, άλλα με κυτταρίνη και αλγινικά άλατα	θάλασσα και γλυκά νερά
Chrysophyceae (Χρυσοφύκη)	~850	χλωροφύλλη a, ενίοτε χλωροφ. c, καροτενοειδή, φυκοξανθίνη	λαμιναρίνη	1 ή 2 ακρολοφικός	ενώσεις πηκτίνης με πυριτικές ύλες	γλυκά νερά κυρίως
Bacillariophyceae (Διάτομα)	>12000	χλωροφύλλες a, c, καροτενοειδή, φυκοξανθίνη	λαμιναρίνη (λευκοσίνη), λιπίδια	μόνο στα αναπαραγωγικά κύτταρα, 2 συνήθως	ενυδατωμένο πυρίτιο σε οργανικό πλέγμα	θάλασσα και γλυκά νερά
Phaeophyceae	~1500	χλωροφύλλες a, c,	λαμιναρίνη	μόνο στα	πλέγμα	θαλάσσια σχεδόν

(Φαιοφύκη)		φυκοξανθίνη		αναπαραγωγικά κύτταρα, 2 συνήθως	κυτταρίνης με άλλους πολυσακχαρίτες	αποκλειστικώς, προτιμούν ψυχρά νερά
Euglenophyta (Ευγληνοειδή)	~800	χλωροφύλλες a, b, καροτενοειδή	Παράμυλο	1-3 ακρολοφικώς	όχι κυτταρικό τοίχωμα, πρωτεϊνικό υμένιο	γλυκά νερά κυρίως, μερικά θαλάσσια
Chlorophyta (Χλωροφύκη)	>7000	χλωροφύλλες a, b, καροτενοειδή	άμυλο	2 ή περισσότερα ακρολοφικώς ή υποακρολοφικώς	κυτταρίνη	γλυκά νερά κυρίως, μερικά θαλάσσια
Rhodophyta (Ροδοφύκη)	>4000	χλωροφύλλη a, α& β καροτένιο, ξανθοφύλλες, φυκοβιλίνες	ροδοφυκικό άμυλο	κανένα	κυτταρίνη, διάφορες ενώσεις πηκτίνης	θαλασσινά κυρίως, μερικά σε γλυκά νερά, πολλά είδη τροπικά
Glaucophyta (Γλαυκόφυτα)	15	χλωροφύλλη a, φυκοβιλίνες, β-καροτένιο, ξανθοφύλλες	άμυλο	2 μαστίγια ή απουσία	κυτταρίνη	γλυκά νερά
Cryptophyta (Κρυπτοφύκη)	>200	χλωροφύλλες a, c, φυκοβιλίνες, ξανθοφύλλες, α& β-καροτένιο	άμυλο	2 ακροπλευρικώς	πρωτεϊνικός περιπλάστης κάτω από πλασματική μεμβράνη	θάλασσα και γλυκά νερά
Haptophyta (Απτοφύκη)	>300	χλωροφύλλες a, c, ξανθοφύλλες, β-καροτένιο	χρυσολαμιναρίνη	2 ακρολοφικώς και 1 απτόνημα ανάμεσά τους	αρκετά με φολίδες CaCO ₃	θάλασσα κυρίως και γλυκά νερά
Clorarachniophyta (Χλωραραχιόφυτα)	?	χλωροφύλλες a, b, ξανθοφύλλες, β-καροτένιο	υδατάνθρακες	κανένα	γυμνά	θάλασσα
Cyanobacteria (προκαρυωτικοί)	>2000	Χλωροφύλλες a & b ή a & d, φυκοβιλίνες, ξανθοφύλλες, β-καροτένιο	κυανοφυκίνη, γλυκογόνο, ή φυτικό άμυλο	κανένα	πεπτιδογλυκάνη	θάλασσα και γλυκά νερά

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των μικροφυκών και των μακροφυκών, να επισημάνουμε ότι ο οικολογικός ρόλος των φυκών είναι ιδιαίτερα σημαντικός και μάλιστα σ' αυτόν οφείλεται η διαμόρφωση της έμβιας ζωής του πλανήτη μας. Και αυτό γιατί, αφ' ενός ένα μεγάλο μέρος των φυκών διαβιεί ως πλαγκτόν (φυτοπλαγκτόν) και αποτελεί τη βάση της τροφικής αλυσίδας και αφετέρου διότι ένα ποσοστό, μεγαλύτερο του 50% του φωτοσυνθετικώς παραγόμενου οξυγόνου της ατμόσφαιρας, προέρχεται από τα φύκη [6].

1.3 Κατηγορίες φυκών

1.3.1 Μικροφύκη (Microalgae)

Διαχωρίζοντας τα φύκη με κριτήριο το μέγεθος, προκύπτουν δύο μεγάλες κατηγορίες εκ των οποίων η μία είναι τα μικροφύκη. Το μήκος των μικροφυκών κυμαίνεται από μερικά μικρόμετρα 0.2-50 μm στα μονοκύτταρα έως 100-200 μm στους πολυκύτταρους

νηματοειδής σχηματισμούς όπως το *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*) ενώ ακόμα, μπορεί να φτάσει έως και κάποιες εκατοντάδες μικρόμετρα σε ορισμένα διάτομα (1-2.000 μm). Η κατηγορία αυτή αποτελείται από Ευκαρυωτικούς αλλά και Προκαρυωτικούς (Κυανοβακτήρια), φωτοσυνθετικούς οργανισμούς μεταξύ των οποίων υπάρχουν διαφορές στη βιολογία, τη φυσιολογία και την οικολογία, ανάλογα με τις οποίες χωρίζονται σε ομάδες. Αναπτύσσονται μεμονωμένα, σε αλυσίδες σε ομάδες και αποκτούν κοκκοειδείς, μαστιγωτές, ή παλμελοειδείς μορφές και τριχώματα αλλά και μεγάλους αποικιακούς σχηματισμούς με νήματα, μικροθαλλούς ή πιο περίπλοκες συσσωματώσεις. Διαβιώνουν σε υδάτινο περιβάλλον, σαν φυτοπλαγκτό ή σαν βενθικά μικροφύκη στον εύφορο πυθμένα, ενώ ακόμα μπορούν να επιβιώσουν σε ακραία περιβάλλοντα όπως οι θερμοπηγές και οι παγετώνες. Ακόμα, αναπτύσσονται ταχύτατα (2-5 ημέρες) και έχουν αυξημένη φωτοσυνθετική ικανότητα. Μέσω του μηχανισμού της φωτοσύνθεσης μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα σε υψηλής αξίας βιοενεργά μόρια όπως τα τρόφιμα, τα βιοκαύσιμα κ.λπ. Σύμφωνα με ιστορικές αναφορές, χρησιμοποιούνται από αρχαιοτάτων χρόνων στην ανθρώπινη διατροφή και σήμερα κεντρίζουν το ενδιαφέρον σχετικά με το πως θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν.



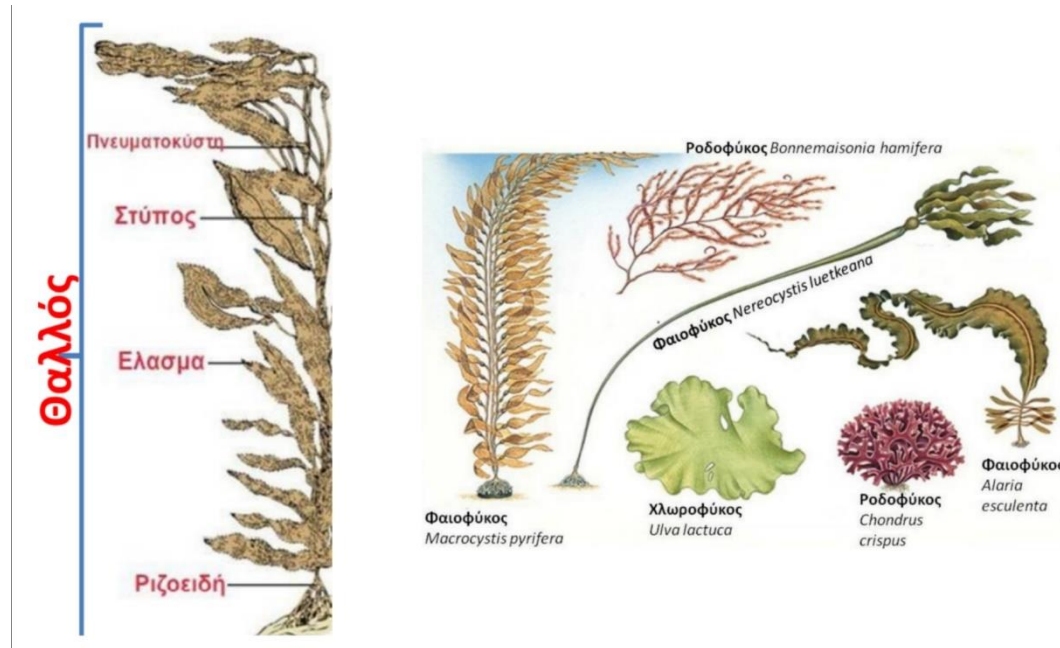
Εικόνα 2 : Μονοκύτταρα και αποικιακά μικροφύκη του γλυκού νερού

1.3.2 Μακροφύκη (Macroalgae)

Η δεύτερη κατηγορία που προκύπτει από το διαχωρισμό των φυκών με βάση το μέγεθος είναι τα μακροφύκη. Το μήκος τους ξεκινά από μερικά εκατοστά, αλλά φτάνει σε πολλά μέτρα (50-70) όπως για παράδειγμα στα γιγάντια Φαιοφύκη (καφέ φύκη, *kelps*⁵). Τα

⁵ *kelps*: Φυλλόμορφες, πολύπλοκες και μεγάλων διαστάσεων μορφές φαιοφυκών.

μακροφύκη είναι αποκλειστικά Ευκαρυωτικοί, φωτοσυνθετικοί και ως επί το πλείστον πολυκύτταροι οργανισμοί. Σε αντιδιαστολή προς τα μικροφύκη, οι δομές των μακροφυκών είναι πιο σύνθετες και η αναπαραγωγή τους πιο πολύπλοκη. Παρ' όλο που είναι πιο εξελιγμένα από τα μικροφύκη, στερούνται των πολύπλοκων δομών και αναπαραγωγικών μηχανισμών των ανώτερων φυτών της ξηράς. Ολόκληρο το σώμα των μακροφυκών λέγεται θαλλός και είναι κοινοκυτταρικός (ένα αρκετά μεγάλο πολυπύρηνο κύτταρο) είτε παρεγχυματώδης (τρισιδιάστατες σειρές κυττάρων) είτε ψευδοπαρεγχυματώδης (δίνει την εντύπωση ότι συντίθενται από ιστό, αλλά στην πραγματικότητα είναι νηματοειδής).



Εικόνα 3 : Αριστερά τμήματα του θαλλού - Δεξιά θαλλός ποικιλιών μακροφυκών

Τα μακροφύκη δεν διαθέτουν πραγματικά φύλλα, βλαστούς και ρίζες όπως τα φυτά και σε αντίθεση με αυτά, όλα τα τμήματα του θαλλού έχουν τη δυνατότητα να φωτοσυνθέτουν με την προϋπόθεση ότι διαθέτουν χλωροφύλλη. Τα ελάσματα (φυλλοειδή πεπλατυσμένα τμήματα) είναι οι κύριες φωτοσυνθετικές επιφάνειες και καταλήγουν σε κύστες με αέριο (πνευμονοκύστες)⁶, οι οποίες τα βοηθούν να επιπλέουν αλλά και να εκτίθενται στο φως. Ορισμένα μακροφύκη διαθέτουν μια μισχοειδή κατασκευή, τον στύπο, επιτυγχάνοντας στήριξη, επίσης από εκεί εκφύονται τα ελάσματα. Τα ριζοειδή είναι δομές που μοιάζουν με ρίζα και ο ρόλος τους είναι να συγκρατούν το θαλλό στο έδαφος και όχι να απορροφούν νερό και θρεπτικά συστατικά για τη φωτοσύνθεση, κάτι το οποίο γίνεται από όλη την επιφάνεια του θαλλού. Η αναπαραγωγή των μακροφυκών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία μπορεί να γίνει αγενώς ή εγγενώς. Τέλος, ανάλογα με τον χρωματισμό τους ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: Τα Φαιοφύκη (καφέ χρώμα), τα Ροδοφύκη (κόκκινο χρώμα) και τα Χλωροφύκη (πράσινο χρώμα).

Φαιοφύκη (Phaeophyta, brown algae): Αποτελούν κατά κύριο λόγο θαλάσσια βενθικά φύκη (από τα 250 γένη που έχουν περιγραφεί μόνο τα 3 προέρχονται από γλυκά νερά), με

⁶ σε μερικά μικροφύκη, το μίγμα αερίων που υπάρχει στις πνευμονοκύστες περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα το οποίο είναι τοξικό για τον άνθρωπο.

χαρακτηριστικό καφέ χρώμα λόγω της χρωστικής φουκοξανθίνης που επικρατεί έναντι της χλωροφύλλης A (τα νεκρά Φαιοφύκη που εκβράζονται στην ακτή έχουν καφέ- μαύρο χρώμα λόγω των περιεχόμενων ταννινών). Είναι Ευκαρυωτικοί πολυκύτταροι οργανισμοί και παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στη μορφή και τη δομή τους. Εμφανίζονται σε απλές μορφές, στα νηματοειδή ή σε σχήμα δίσκου ή σε πιο περίπλοκες, φυλλόμορφες και μεγάλων διαστάσεων μορφές, φτάνοντας να σχηματίζουν μέχρι και υποθαλάσσια δάση (keelps της τάξης Laminales). Τα περισσότερα Φαιοφύκη απαντώνται σε παράκτιες περιοχές, στερεωμένα σε διάφορα υποστρώματα και ιδίως σε βραχώδεις ακτές. Λόγω του ότι πολλά από αυτά ζουν σε ρηχά νερά, με τη δράση των κυμάτων έχουν προσαρμοστεί, έτσι ώστε να επιβιώνουν, για παράδειγμα έχουν αναπτύξει σκληρό και εύκαμπτο σώμα ώστε να λυγίζει στον κυματισμό. Τέλος, να αναφέρουμε ότι τα Φαιοφύκη της τάξης Laminales είναι όλα βρώσιμα και εντάσσονται στην ανθρώπινη διατροφή ιδιαίτερα σε χώρες της Άπω Ανατολής, εκτός αυτού όμως, γενικά η περιεκτικότητα των Φαιοφυκών σε αλγινικά άλατα, αυξάνει ιδιαίτερα το ενδιαφέρον και το εύρος εφαρμογών τους.

Ροδοφύκη (Rhodophyta, red algae): Αποτελούν κατά κύριο λόγο θαλάσσια φύκη όμως υπάρχουν και μερικά των γλυκών νερών. Στην πλειοψηφία τους είναι πολυκύτταρα (λίγα μονοκύτταρα), με πολύπλοκη συχνά δομή και οι διαστάσεις των περισσότερων θαλάσσιων Ροδοφυκών είναι σχετικά μικρές όμως ορατές με γυμνό μάτι. Πέραν της χλωροφύλλης A έχουν ακόμα φυκοερυθρίνη και φυκοκυανίνη, οι οποίες απορροφούν το πράσινο και το μπλε φως και τα επιτρέπουν να αναπτύσσονται μέχρι και στα 200 μέτρα βάθος (σε καθαρά νερά). Μάλιστα, το όνομά τους οφείλεται στη φυκοερυθρίνη, η οποία είναι υπεύθυνη για το χαρακτηριστικό ρόδινο χρώμα που έχουν τα περισσότερα από αυτά. Επίσης, ένα χαρακτηριστικό που παρατηρείται σε ορισμένα Ροδοφύκη είναι η ενασβέσωση (ασβεστοποίηση) του Θαλλού και γι' αυτό πάνω από 400 είδη έχουν χαρακτηριστεί σαν «κοραλλοειδή» φύκη. Κλείνοντας, ένα από τα συστατικά του κυτταρικού τους τοιχώματος είναι η βλέννα, η οποία αποτελείται από γαλακτάνες, άγαρ και κολλοειδή. Αυτά έχουν σταθεροποιητική και πηκτική ικανότητα και για το λόγο αυτό βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στη βιομηχανία τροφίμων και όχι μόνο.

Χλωροφύκη (Chlorophyta, green algae): Είναι μια εκτενής ομάδα με περισσότερα από 400 γένη και 6.000 είδη και περιλαμβάνει τόσο μονοκύτταρους, όσο και πολυκύτταρους ευκαρυωτικούς οργανισμούς. Εμφανίζουν μορφολογική ποικιλία ως προς το μέγεθός τους (ορατοί με γυμνό μάτι ή όχι), την ύπαρξη μαστιγίων (κινητοί ή ακίνητοι) και τις αποικίες (νηματοειδείς, διακλαδιζόμενες ή μη). Συνήθως είναι πράσινου χρώματος επειδή επικρατεί η χλωροφύλλη A, όμως αυτό μπορεί να τροποποιηθεί από άλλες περιεχόμενες χρωστικές όπως χλωροφύλλη B, καροτένια α και β και φανθοφύλλες. Η αναπαραγωγή τους γίνεται αγενώς αλλά και εγγενώς. Στην πλειοψηφία τους βρίσκονται σε γλυκά νερά αλλά υπάρχουν και κάποια θαλάσσια, κυρίως μεγαλύτερων διαστάσεων. Ακόμα, κάποια είδη διαβιούν παρασιτικά σε άλλα μακροφύκη, ενώ άλλα ζουν στο εσωτερικό κοραλλιών και οστράκων.

2 Χημική Σύσταση

Μέχρι πρόσφατα η εξερεύνηση και η εκμετάλλευση των φυκών ήταν περιορισμένη παρά τις πιθανές γεωργικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Παράλληλα, το διατροφικό πρότυπο

τροποποιείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ανθρώπινης εξέλιξης, δίνοντας βάση στα περιεχόμενα θρεπτικά συστατικά. Ακόμα, υπάρχει η ανάγκη από τη βιομηχανία να βρεθούν εναλλακτικές πηγές και συστατικά τα οποία θα είναι αποτελεσματικά, ως προς την ανάπτυξη όπως (η ηλιακή ενέργεια, η γη, το νερό), με το μικρότερο δυνατό κόστος, φιλικά προς το περιβάλλον και να έχουν ευεργετικές ιδιότητες. Έτσι, τα φύκη έρχονται στο προσκήνιο καθώς αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη πηγή βασικών θρεπτικών συστατικών.

Τα φύκη είναι Αυτότροφοι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί και έχουν υψηλό δείκτη ανάπτυξης. Η καλλιέργεια τους απαιτεί κυρίως ηλιακή ενέργεια και υψηλές θερμοκρασίες. Η παραγωγή τους προέρχεται από δύο πηγές: Φυσικά αποθέματα και υδατοκαλλιέργειες. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η έκταση της παραγωγής φυκών, αξίζει να αναφέρουμε, ότι το 2017 συλλέχθηκαν παγκοσμίως 973,09 τόνοι (υγρό βάρος) φυκών από φυσικά αποθέματα και 31.492,754 τόνοι από υδατοκαλλιέργειες (Lozano Muñoz, I., & Díaz, N. F., 2020). Από το σύνολο των παραγόμενων φυκών, το 80% περίπου χρησιμοποιείται για άμεση ανθρώπινη κατανάλωση ενώ το υπόλοιπο 20% βρίσκει άλλες χρήσεις (λιπάσματα, ζωτροφές, πρόσθετα τροφίμων κ.λπ.).

Η θρεπτική αξία των φυκών εξαρτάται από το μέγεθός τους, την πεπτικότητά τους, την παραγωγή τοξικών ουσιών και τη χημική τους σύσταση (Ε. Χρηστάκη, Μ. Καρατζιά, Π. Φλώρου-Πανέρη, 2010). Βέβαια, δεν υπάρχει ακόμα ολοκληρωμένη γνώση για τις θρεπτικές ιδιότητες των φυκών και συνήθως εκτιμώνται αποκλειστικά με βάση τη χημική σύνθεση. Κατ' επέκταση, η χημική σύνθεση δεν είναι σταθερή αλλά ποικίλει ανά είδος, τον βιότοπο, την ωριμότητα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Yaich, H., et al., 2011). Σε κάθε περίπτωση, παρά τις διαφορές που υπάρχουν στη σύσταση, τα φύκη διατηρούν υψηλή θρεπτική αξία λόγω των περιεχόμενων πρωτεϊνών, υδατανθράκων, βιταμινών, πολυακόρεστων λιπαρών οξέων και ιδιαίτερα των ανόργανων συστατικών.

2.1 Λιπίδια

Τα λιπίδια αποτελούν ένα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά για τον άνθρωπο. Τα συστατικά τους είναι λιπαρά οξέα (FAs), τα οποία ταξινομούνται σε κορεσμένα (SFAs-απουσία διπλών δεσμών), μονοακόρεστα (MUFAs-με έναν διπλό δεσμό) και πολυακόρεστα (PUFAs-με δύο ή πάνω από έξι διπλούς δεσμούς). Ο ανθρώπινος οργανισμός είναι σε θέση να συνθέσει τα κορεσμένα και τα μονοακόρεστα λιπαρά οξέα, ενώ τα πολυακόρεστα με τον πρώτο δεσμό στο τρίτο ή στο έκτο άτομο άνθρακα (ω -3 & ω -6), λόγω αδυναμίας σύνθεσης, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται από την τροφή.

Η περιεκτικότητα σε λιπίδια, στα συνήθη χρησιμοποιούμενα φύκη, κυμαίνεται μεταξύ 1-5% (σε ξηρό βάρος) και ως εκ τούτου, θεωρούνται ως τρόφιμα χαμηλής ενέργειας. Παρόλο που η σύνθεση των λιπιδίων στα φύκη ποικίλει ανά είδος και γεωγραφική τοποθεσία και εξαρτάται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, τα γλυκερολιπίδια (GL- glycolipid) αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το ήμισυ των συνολικών λιπιδίων. Στο ποσοστό που απομένει ανευρίσκονται φωσφολιπίδια (PL- phospholipids), τριγλυκερίδια (TAG- triacylglycerols), στερόλες και χρωστικές. Η συνολική περιεκτικότητα σε λιπαρά οξέα στα φύκη φθάνει έως 20-50% κατά βάρος των συνολικών λιπιδίων εκ των οποίων, ένα σημαντικό ποσοστό αντιστοιχεί σε ω -3 (20:5 n-3, 18:4 n-3, 18:3 n-3) και ω -6 (20:4 n-6 18:2 n-6) πολυακόρεστα λιπαρά οξέα.

Τα γλυκερολιπίδια (GL) είναι το κύριο συστατικό των μεμβρανών ενώ, τα τριγλυκερίδια (TAG) λειτουργούν αποθηκευτικά και διαμορφώνουν το κύριο μέρος των λιπιδίων φυκών (Mišurcová, L., Ambrožová, J., & Samek, D., 2011). Η σύνθεση λιπαρών οξέων στα φύκη, πέρα των άλλων, είναι πλούσια σε ακόρεστα λιπαρά οξέα και ιδιαίτερα σε ω-3 αλλά και ω-6 λιπαρά οξέα. Τα κυριότερα ω-3 που συναντάμε είναι το εικοσαπεντανοϊκό οξύ (EPA, 20:5 n-3), στεαριδονικό οξύ (SDA, 18:4 n-3) και α-λινολενικό οξύ (LNA, 18:3 n-3) ενώ, το σημαντικότερο ω-6 είναι το αραχιδονικό οξύ (ARA, 20:4n6). Εξ' αυτών, το α-λινολενικό, όπως και το λινελαϊκό οξύ, θεωρούνται απαραίτητα λιπαρά οξέα, επίσης ορισμένες φορές θεωρούνται απαραίτητα και τα εικοσαπεντανοϊκό και αραχιδονικό οξύ μιας και σε περίοδο προωρότητας και ανάπτυξης παράγονται ανεπαρκώς.

Σε γενικές γραμμές, η περιεκτικότητα σε λιπίδια όπως και η σύνθεση των λιπαρών οξέων των φυκών είναι αρκετά μεταβλητές και εξαρτώνται τόσο από γενετικούς παράγοντες όσο και από περιβαλλοντικές συνθήκες. Η μεταβλητότητα είναι έντονη τόσο μεταξύ των διαφορετικών ομάδων αλλά, ακόμα και εντός του ίδιου είδους. Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές συνθήκες είναι μια σειρά παραγόντων που επηρεάζουν, όπως το επίπεδο φωτός και αλατότητας, η εποχή του έτους, η περιβαλλοντική ρύπανση από βαρέα μέταλλα και ζιζανιοκτόνα, το επίπεδο αζώτου στο θαλασσινό νερό (χαμηλότερη περιεκτικότητα λιπιδίων έχει αναφερθεί από ανεπάρκεια αζώτου), καθώς και η επάρκεια μαγγανίου στην υδατοκαλλιέργεια. Ακόμα, έχουν αναφερθεί διαφορές στη σύνθεση λιπιδίων μεταξύ φυκών από φυσικά αποθέματα και εκείνων από υδατοκαλλιέργειες (Mišurcová, L., Ambrožová, J., & Samek, D., 2011). Σημαντικός παράγοντας είναι και η θερμοκρασία, καθώς τα φύκη συσσωρεύουν PUFAs σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και έτσι τα είδη που βρίσκονται σε ψυχρές περιοχές εμφανίζουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε σχέση με εκείνα των μέτρων ή υψηλών θερμοκρασιών (Devina Lobine, Kannan R. R. Rengasamy & Mohamad Fawzi Mahomoodally, 2021).

Ο μεταβολισμός των λιπαρών οξέων είναι περίπλοκος, με το μεταβολισμό και τις λειτουργίες των ω-6 και ω-3 PUFA να συνδέονται σε μεγάλο βαθμό και πολλά επίπεδα (Miyashita, K., Mikami, N., & Hosokawa, M., 2013). Η πιο αξιοσημείωτη μορφή λιπιδικής σύνθεσης είναι η ισορροπία μεταξύ ω-6 και ω-3 λιπαρών οξέων. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, η συνιστώμενη αναλογία ω-6 / ω-3 για τα τρόφιμα τα οποία ενδέχεται να μειώσουν τον κίνδυνο διάφορων παθήσεων (νευρολογικών, φλεγμονωδών και καρδιαγγειακών) είναι κάτω από 10, ενώ οι Ευρωπαϊκές Διατροφικές Εταιρείες προτείνουν αναλογία 5 (Devina Lobine et al., 2021).

Πίνακας 2. Περιεχόμενα λιπαρά οξέα (% των συνολικών) και συνολική περιεκτικότητα σε λιπίδια (% ξηράς ουσίας) σε ορισμένα καφέ, κόκκινα, πράσινα φύκη (Mišurcová, Ambrožová & Samek, 2011).

Λιπαρά Οξέα	καφέ φύκη									κόκκινα φύκη					πράσινα φύκη	
	<i>Laminaria sp.</i>	<i>Laminaria japonica</i>	<i>Laminaria japonica</i>	<i>Undaria pinnatifida</i>	<i>Undaria pinnatifida</i>	<i>Undaria pinnatifida</i>	<i>Hizikia fusiformis</i>	<i>Hizikia fusiformis</i>	<i>Palmaria sp</i>	<i>Palmaria palmata</i>	<i>Porphyra sp</i>	<i>Porphyra sp</i>	<i>Porphyra sp</i>	<i>Laurencia papillosa</i>	<i>Ulva lactuca</i>	<i>Ulva tubulosa</i>
C14:0	2.88	5.3	6.84	2.25	4.4	3.17	0.76	7.19	13.76	9.67	0.53	2.68	2.93	4.87	2.74	1.13
C16:0	36	12.3	35.4	13.5	26.8	16.51	26.8	41.4	45.44	54.1	63.19	30.8	47.6	37.8	43	49.2
C18:0	1.49	1	6.15	0.86	2.9	0.69	0.3	2.6	1.28	8.28	1.23	0.66	2.91	1.86	3.27	4.22
C16:1 ω7	1.71	3.9	0.68	0.44	0.1	3.7	0.15	6.58	5.26	2.66	6.22	2.24	2.77	2.25	5.77	2.05
C16:3 ω4						2.31			1.2		1.56					
C18:1 ω9		8.4			17.9	6.79			3.13		6.7			2.14	17.8	18.6
C18:2 ω6 (LA)	5.48	8.4	8.3	7.41	6.2	6.23	3.56	5.96	0.69	1.47	1.17	3.86	3.13	2.72	9.44	10.5
C18:3 ω3 (ALA)	0.76	6.1		11.2	5.8	11.97					0.23	5.66		2.25	1.02	
C18:3 ω6 (GLA)	1.6	4.2		1.71	1.2							0.31		0.31	3.22	2.24
C18:4 ω3	1.24	13.9		25.8	8.7	22.6			0.74		0.24	3.37				
C20:1 ω9	1.55		0.53				4.09			0.45	4.7	1.42	2.25			
C20:2 ω6							0.97	0.44								
C20:3 ω6	0.01			0.57			3.21									
C20:4 ω6 (AA)	12.4	14	6.65	13.3	12.7	15.87	5.3	10.4	1.45		6.8	8		21.4	2.5	1.83
C20:5 ω3 (EPA)	16.2	14		13.2	7.5	9.43	42.4		24.05		6.03	20.9		22.8	0.87	2.37
C22:6 ω3 (DHA)																
ω6/ω3	1.3:1	0.81:1		0.5:1	0.94:1	0.49:1	0.3:1		0.13		1.21	0.6:1		1.07	3.03	1.83
ολικά λιπίδια	1	0.58	1.83	4.5	0.38	1.05	1.4	1.17	1.8	0.64	1.03	2.8	0.93	1.73	1.27	2.13

2.2 Πρωτεΐνες

Οι πρωτεΐνες που περιέχονται στα φύκη κατατάσσονται στις Single Cell Protein (SCP), που περιγράφουν τις πρωτεΐνες βιομάζας διάφορων μικροβιακών πηγών (όπως ζύμες, μύκητες, βακτήρια, κύτταρα φυκών) και αναφέρονται σε ακατέργαστη ή εξευγενισμένη πρωτεΐνη. Η πλειοψηφία των στοιχείων της βιβλιογραφίας σχετικά με τις συγκεντρώσεις πρωτεϊνών φυκών, βασίζεται σε εκτιμήσεις ακατέργαστης πρωτεΐνης και στοχεύει στην αξιολόγηση τροφίμων και ζωοτροφών. Αυτό επιτυγχάνεται με υδρόλυση της βιομάζας των φυκών και την εκτίμηση του ολικού αζώτου. Βέβαια, εκτός από τις πρωτεΐνες, περιέχεται άζωτο και σε άλλα συστατικά των φυκών όπως (τα νουκλεϊκά οξέα, τις αμίνες, τα γλυκοζαμίδια και στα κυτταρικά τοιχώματα) και αυτό οδηγεί σε υπερεκτίμηση της πραγματικής περιεκτικότητάς τους σε πρωτεΐνες (Becker, E. W., 2007). Η περιεκτικότητα σε ακατέργαστη πρωτεΐνη (N * 6,25) των φυκών, κυμαίνεται μεταξύ 45 και 73% και η θρεπτική της αξία είναι παρόμοια με άλλες πηγές SCP (García-Garibay et al, 2014).

Οι πρωτεΐνες αποτελούνται από διαφορετικά αμινοξέα και ως εκ τούτου η θρεπτική αξία μιας πρωτεΐνης καθορίζεται από το περιεχόμενο, την αναλογία και τη διαθεσιμότητα των αμινοξέων της. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται δεδομένα σχετικά με το προφίλ των αμινοξέων διάφορων φυκών και άλλων συμβατικών πρωτεϊνούχων πηγών και παρουσιάζεται ένα πρότυπο αναφοράς μιας ισορροπημένης πρωτεΐνης, που συνιστάται από τους WHO / FAO. Παρατηρούμε πως η σύνθεση των αμινοξέων σχεδόν όλων των φυκών, ότι είναι καλύτερη συγκριτικά με άλλα πρωτεϊνούχα τρόφιμα (Becker, E. W., 2007). Υστερούν στα αμινοξέα μεθειονίνη και κυστίνη.

Πίνακας 3. Προφίλ αμινοξέων διαφορετικών φυκών σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές πρωτεΐνης με πρότυπο αναφοράς WHO / FAO(1973) , (g/100g πρωτεΐνης), (Becker, 2007).

	Ile	Leu	Val	Lys	Phe		Tyr	Met		Cys	Try	Thr	Ala	Arg	Asp	Glu	Gly	His	Pro	Ser
WHO/FAO	4	7	5	5.5		6			3.5		1									
αυγό	6.6	8.8	7.2	5.3	5.8		4.2	3.2		2.3	1.7	5		6.2	11	12.6	4.2	2.4	4.2	6.9
σόγια	5.3	7.7	5.3	6.4	5		3.7	1.3		1.9	1.4	4	5	7.4	1.3	19	4.5	2.6	5.3	5.8
Chlorella vulgaris	3.8	8.8	5.5	8.4			3.4	2.2		1.4	2.1	4.8	7.9	6.4	9	11.6	5.8	2	4.8	4.1
Dunaliella bardawil	4.2	11	5.8	7			3.7	2.3		1.2	0.7	5.4	7.3	7.3	10.4	12.7	5.5	1.8	3.3	4.6
Scenedesmus obliquus	3.6	7.3	6	5.6			3.2	1.5		0.6	0.3	5.1	9	7.1	8.4	10.7	7.1	2.1	3.9	3.8
Arthrospira maxima	6	8	6.5	4.6			3.9	1.4		0.4	1.4	4.6	6.8	6.5	8.6	12.6	4.8	1.8	3.9	4.2
Spirulina platensis	6.7	9.8	7.1	4.8			5.3	2.5		0.9	0.3	6.2	9.5	7.3	11.8	10.3	5.7	2.2	4.2	5.1
Aphanizomenon sp.	2.9	5.2	3.2	3.5				0.7		0.2	0.7	3.3	4.7	3.8	4.7	7.8	2.9	0.9	2.9	2.9

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ποιότητα των πρωτεϊνών, υπάρχουν διάφορα συστήματα αξιολόγησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η αξιολόγηση γενικά γίνεται με βάση την περιεκτικότητά σε αμινοξέα και την πεπτικότητα της πρωτεϊνικής πηγής. Η πλέον εγκεκριμένη μέθοδος για την εκτίμηση της ποιότητας των πρωτεϊνών είναι ο προσδιορισμός της αναλογικής απόδοσης των πρωτεϊνών (PER- protein efficiency ratio) και υπολογίζεται με το βάρος που πήρε ένα εξεταζόμενο άτομο διαιρούμενο με τις μονάδες πρωτεϊνών που κατανάλωσε κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής περιόδου [PER= gain in body mass (g)/ protein intake (g)].

Το 1993, οι US FDA και FAO/WHO υιοθέτησαν την μέθοδο PDCAAS (Protein digestibility-corrected amino acid score) ως προτιμώμενη μέθοδο για τον προσδιορισμό της ποιότητας των πρωτεϊνών. Με τη μέθοδο αυτή, η πρωτεϊνική κατάταξη γίνεται συγκρίνοντας το προφίλ αμινοξέων της πρωτεΐνης ενός τροφίμου με ένα προφίλ αναφοράς αμινοξέων. [PDCAAS = mg αναγκαίου αμινοξέος σε 1 g πρωτεΐνης δείγματος / mg του ίδιου αμινοξέος σε 1 g πρωτεΐνης αναφοράς] x ποσοστό πραγματικής πεπτικότητας κοπράνων]. Το μέγιστο σκορ είναι 1,0 και υποδεικνύει ότι μετά την πέψη της πρωτεΐνης, παρέχεται ανά μονάδα πρωτεΐνης το 100% ή παραπάνω των απαραίτητων αμινοξέων.

Άλλη μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της θρεπτικής αξίας των πρωτεϊνών, μέσω προσδιορισμού του αζώτου σε αυτές, είναι η μέτρηση της βιολογικής αξίας (BV) των πρωτεϊνών και εκφράζει το ποσοστό της απορροφούμενης πρωτεΐνης από μια τροφή που ενσωματώνεται στις πρωτεΐνες του οργανισμού. Οι πρωτεΐνες είναι η βασική πηγή αζώτου στις τροφές. Ως εκ τούτου, η μέθοδος BV θεωρεί ότι το άζωτο προέρχεται αποκλειστικά από τις πρωτεΐνες και μετρά την ποσότητα αζώτου που προσλαμβάνεται σε σχέση με την ποσότητα που στη συνέχεια εκκρίνεται.

Ακόμα μια σημαντική παράμετρος, που αντικατοπτρίζει την ποιότητα μιας πρωτεΐνης, είναι ο συντελεστής πεπτικότητας (DC- digestibility coefficient). Ένας ακόμα δείκτης τόσο της πεπτικότητας των πρωτεϊνών όσο και της βιολογικής αξίας των απορροφούμενων από τις τροφές αμινοξέων είναι το καθαρό ποσοστό χρησιμοποιούμενης πρωτεΐνης (NPU- net protein utilization) και ισοδυναμεί με τον υπολογισμό BV x DC. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το κυτταρικό τοίχωμα των φυκών (αντιπροσωπεύει περίπου το 10% dw) δεν είναι εύπεπτο και έτσι τίθεται σοβαρό πρόβλημα στην πέψη και χρήση της βιομάζας

των φυκών. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να γίνουν ενέργειες που θα διαταράξουν το κυτταρικό τοίχωμα ώστε να αυξηθεί η πεπτικότητα και κατ'επέκταση η θρεπτική αξία των φυκών. Έχουν μελετηθεί διαφορετικοί χειρισμοί, μετά τη συγκομιδή, όπως μηχανικές διαταραχές, εκχυλίσσεις με οργανικούς διαλύτες και επίδραση με βάσεις ή οξέα, οι οποίοι αξιολογούνται με τον προσδιορισμό της αναλογικής απόδοσης των πρωτεϊνών (PER). Επίσης, ένας παράγοντας επιρροής είναι και η μέθοδος ξήρανσης. Στα φύκη ξηραμένα σε τύμπανο, σε σύγκριση με φύκη που ξηράθηκαν με έκθεση στον αέρα, το καθαρό ποσοστό χρησιμοποιούμενης πρωτεΐνης (NPU) αυξήθηκε περίπου σε 100%, ενώ η πεπτικότητα αυξήθηκε περίπου σε 60%. Αυτό το φαινόμενο πιθανολογείται στη ρήξη των τοιχωμάτων των φυκών όταν το νερό απομακρύνεται, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες.

Πίνακας 4. Δεδομένα σύγκρισης σχετικά με τη βιολογική αξία (**BV**- biological value), τον συντελεστή πεπτικότητας (**DC**- digestibility coefficient), το καθαρό ποσοστό χρησιμοποιούμενης πρωτεΐνης (**NPU**- net protein utilization) και την αναλογική απόδοση πρωτεϊνών (**PER**-protein efficiency ratio), διαφορετικά επεξεργασμένων φυκών Becker, 2007).

φύκι	κατεργασία	BV	DC	NPU	PER
καζείνη		87.8	95.1	83.4	2.5
αυγό		94.7	94.2	89.1	
Scenedesmus obliquus	DD	75	88	67.3	1.99
Scenedesmus obliquus	SD	72.1	72.5	52	1.14
Scenedesmus obliquus	Cooked-SD	71.9	77.1	55.5	1.2
Chlorella sp.	AD	52.9	59.4	31.4	0.84
Chlorella sp.	DD	76.6	89	68	2
Coelastrum proboscideum	DD	76	88	68	2.1
Spirulina sp.	SD	77.6	83.9	65	1.78
Spirulina sp.	DD	68	75.5	52.7	2.1

AD: air dried, DD: drum dried, SD: sun dried

2.3 Υδατάνθρακες / Πολυσακχαρίτες

Οι πολυσακχαρίτες είναι το πιο άφθονο συστατικό στα φύκη, με την περιεκτικότητά τους να φτάνει έως και 76%, συνήθως κυμαίνεται στο 50% κατά μέσο όρο. Η υψηλή αυτή περιεκτικότητα συνεπάγεται υψηλό επίπεδο διαλυτών και αδιάλυτων διαιτητικών ινών που κυμαίνεται 33-50 g/100 g φυκών (DW), χαμηλότερη περιεκτικότητα έχουν τα φύκη *Laminaria ssp.* ενώ στο *Hizikia fusiforme* η περιεκτικότητα ξεπερνά το 60%. Το περιεχόμενο των φυκών σε πολυσακχαρίτες και η δομή των μορίων αυτών (μοριακό βάρος, φύση των δομικών μονάδων, περιεχόμενες θειικές ομάδες και οι θέσεις τους, τύπος γλυκοζιτικού δεσμού και γεωμετρία του μορίου) επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, βιολογικούς, περιβαλλοντικούς αλλά και από τις διαδικασίες εκχύλισης και καθαρισμού. Κατ'επέκταση, οι διαφορές έχουν αντίκτυπο στις λειτουργικές ιδιότητες των πολυσακχαριτών. Γενικά, οι πολυσακχαρίτες των φυκών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: Τους δομικούς

πολυσακχαρίτες των κυτταρικών τοιχωμάτων η πλειονότητα και τους πολυσακχαρίτες αποθήκευσης που βρίσκονται στα πλασμίδια. Κάθε κατηγορία διαδραματίζει διαφορετικό ρόλο στα φύκη.

Κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες μακροφυκών (όπου ανήκουν τα πιο χρησιμοποιούμενα είδη) έχει τους δικούς της χαρακτηριστικούς πολυσακχαρίτες. Για τα Φαιοφύκη είναι το αλγινικό οξύ και οι φουκάνες, για τα Ροδοφύκη οι θειούχες γαλακτάνες (καρραγενάνες και άγαρ) και για τα πράσινα φύκη πολύπλοκοι πολυσακχαρίτες, συχνά θειούχοι. Ακόμα, ανευρίσκονται και άλλα πολυμερή όπως κυτταρίνη (πράσινα φύκη), μαννάνες (Codium, Acetabularia), ξυλάνες, ημικυτταρίνες και συστατικά τύπου πηκτίνης. Όσον αφορά τους πολυσακχαρίτες αποθήκευσης των φυκών, αυτοί είναι το άμυλο στα χλωροφύκη και τα ροδοφύκη και η λαμιναρίνη στα φαιοφύκη (πολυσακχαρίτες από κατώτερα φυτά).

Πολυσακχαρίτες αποθήκευσης: Στα φύκη, οι υδατάνθρακες αποθήκευσης εξυπηρετούν ως φωτοσυνθετικά αποθέματα (ενέργειας) και μερικοί από αυτούς ως ρυθμιστές όσμωσης. Η περιεκτικότητά τους ποικίλει ανάλογα με το είδος αλλά επηρεάζεται και από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, τα συστατικά του νερού, η αλατότητά του, οι κινήσεις του κ.α. Σε διαφορετικά είδη φυκών και υπό συνθήκες αυξημένης αλατότητας, ανευρίσκονται αρκετές διαλυτές, οργανικές ουσίες, χαμηλού μοριακού βάρους όπως η μαννιτόλη (Phaeophyceae, Florideophyceae), η σακχαρόζη (Ulvo phyceae), floridoside (Florideophyceae), isofloridoside (Florideophyceae) και digeneaside (Bangiophyceae). Εκτός από αυτές, εμπεριέχονται και άλλοι μεγαλύτεροι πολυσακχαρίτες αποθήκευσης, οι οποίοι έχουν σημαντικό ρόλο στον κύκλο ζωής των φυκών ως κύρια πηγή ενέργειάς τους. Στα ροδοφύκη, το άμυλο Floridean είναι ο κύριος αποθηκευτικός υδατάνθρακας και εντοπίζεται στο κυτόπλασμα ενώ, στα χλωροφύκη το άμυλο βρίσκεται με τη μορφή κόκκων στους χλωροπλάστες. Στα καφέ φύκη, ο κύριος αποθηκευτικός πολυσακχαρίτης είναι η λαμιναρίνη και βρίσκεται στα χυμοτόπια των χλωροπλάστων.

Δομικοί πολυσακχαρίτες κυτταρικών τοιχωμάτων: Το κυτταρικό τοίχωμα των φυκών αποτελείται από διαφορετικούς πολυσακχαρίτες, ανάλογα την κατηγορία και επιτελεί μια σειρά ζωτικών λειτουργιών όπως είναι η προστασία από αφυδάτωση, κύματα, πάγο, κ.λπ., τη ρύθμιση της σπαργής (διόγκωση κυτταροπλάσματος), της συσσώρευσης διαλυμένων ουσιών, της κυτταρικής διαφοροποίησης (ανάπτυξη) και της έμφυτης ανοσίας. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα βασικά πολυμερή του κυτταρικού τοιχώματος για διαφορετικές τάξεις φυκών.

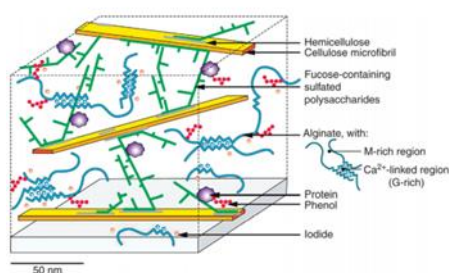
Πίνακας 5. Κυριότερα πολυμερή του κυτταρικού τοιχώματος σε διαφορετικές κατηγορίες φυκών (Rioux & Turgeon, 2015).

πολυμερή κυτταρικού τοιχώματος	Ulvo phyceae (πράσινα φύκη)	Bangiophyceae/ Florideophyceae (κόκκινα φύκη)	Phaeophyceae (καφέ φύκη)
Crystalline polysaccharides	Cellulose	Cellulose, (1→4)-β-D- mannan, (1→4)-β-D-xylan, (1→3)-β-D-xylan	Cellulose
Hemicelluloses	Xyloglucan,	Glucomannan,	Sulfated xylofucoglucan,

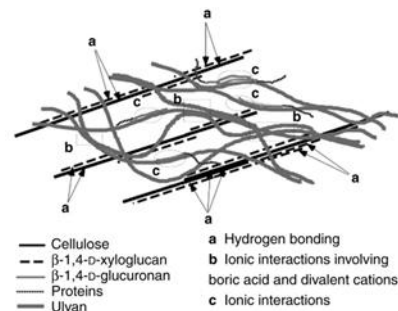
	Mannans, Glucuronan(1→3)- b-glucan	Sulfated(1→3),(1→4)-β- D-glucan, (1→3),(1→4)-β-D- xylan	Sulfated xylofucoglucuronan, (1→3)-b-glucan
Matrix carboxylic polysaccharides	Ulvans	-	Alginates
Matrix sulfated polysaccharides	Ulvans	Agars, Carrageenans	Homofucans

Για τα ροδοφύκη, όπως προκύπτει από την τάξη Floridophyceae, το άγαρ και οι καραγεννάνες (sulfated galactan) αποτελούν περίπου το 70% των συστατικών του κυτταρικού τοιχώματος ενώ, η κυτταρίνη (cellulose) αντιπροσωπεύει 7-24% ανάλογα με το είδος (για τα *Porphyra* spp. εντοπίστηκε χαμηλό επίπεδο κυτταρίνης 3,5%). Άλλοι πολυσακχαρίτες κυτταρικού τοιχώματος είναι η ξυλάνη (xylan), μαννάνη (mannan) και ημικυτταρίνες (glucomannan, sulfated mixed-linkage glucan, xylan). Στα καφέ φύκη, φουκάνες (sulfated fucans) και αλγινικά αντιπροσωπεύουν έως και 45% DW ενώ η κυτταρίνη υπολογίζεται 1-8% (μερικά *Laminaria* spp. μπορούν να περιέχουν έως και 20% κυτταρίνη). Άλλα συστατικά που συνεισφέρουν στη δομή είναι οι πρωτεΐνες, φλωροτανίνες (phlorotannins =protein phenol), το ιώδιο και η ημικυτταρίνη. Όσον αφορά τα πράσινα φύκη και συγκεκριμένα τα Ulvophyceae, η κυτταρίνη κυμαίνεται από 19-41% και σε μερικά από αυτά είναι σε κοκκώδη μορφή. Ακόμα, εντοπίζονται ημικυτταρίνη και σημαντικά ποσοστά πρωτεϊνών (13.9%) και ulvan (8–29%). Ενδεικτικά, παρατίθενται δύο εικόνες στις οποίες απεικονίζεται η δομή του κυτταρικού τοιχώματος για το Fucales Order (Ochrophyta) και *Ulva* spp (Chlorophyta) αντίστοιχα.

Εικόνα 4: Cell-Wall Model of Seaweed from the Fucales Order (Rioux & Turgeon, 2015).



Εικόνα 5: Cell-Wall Model of Seaweed of *Ulva* spp. (Rioux & Turgeon, 2015).



2.4 Χρωστικές

Αναπόσπαστο συστατικό των φυκών, όπως και όλων των φωτοσυνθετικών οργανισμών, είναι οι φωτοσυνθετικές χρωστικές ουσίες, οι οποίες δεσμεύουν ηλιακή ενέργεια και έτσι επιτυγχάνεται η φωτοσύνθεση. Οι ουσίες αυτές είναι ειδικά μεγάλα μόρια, που βρίσκονται στους χλωροπλάστες των Ευκαρυωτικών φυκών ή σε ειδικές μεμβράνες (θυλακοειδή) στα Προκαρυωτικά φύκη. Οι τρεις τύποι χρωστικών ουσιών των φυκών είναι: Οι χλωροφύλλες, τα καροτενοειδή και οι φυκοβιλίνες (βιλιπρωτεΐνες).

Οι χλωροφύλλες (χλωροφύλλη-a, -b, -c & -d) είναι ο σημαντικότερος τύπος χρωστικών. Το μόριο τους αποτελείται από ένα δακτύλιο πορφυρίνης, στο κέντρο του οποίου υπάρχει ένα άτομο μαγνησίου (Mg) και από μια μακρά αλυσίδα υδρογονανθράκων (φυτόλιο). Σε όλους τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς, ανεξάρτητα απ' τις διάφορες μορφές χλωροφύλλης που μπορεί να υπάρχουν, οπωσδήποτε εμπεριέχεται η χλωροφύλλη-a. Η συγκεκριμένη μορφή της χλωροφύλλης επιτελεί κατά βάση τη διεργασία της φωτοσύνθεσης, ενώ οι υπόλοιπες μορφές μαζί με τις άλλες χρωστικές έχουν συμπληρωματικό-βοηθητικό ρόλο.

Στη φωτοσύνθεση χρησιμοποιούνται φωτόνια του ορατού φάσματος με εύρος 400-700nm. Εξ' αυτών, η χλωροφύλλη-a λειτουργεί αποδοτικά απορροφώντας στις περιοχές 400-500nm (μπλε ακτινοβολία) και 630-700nm (κόκκινη ακτινοβολία), ανακλώντας πράσινο χρώμα. Στο υπόλοιπο μέρος του φάσματος μεταξύ 440-650nm δεσμεύουν οι συμπληρωματικές χρωστικές, ενισχύοντας τις ιδιότητες συλλογής του φωτός των φυκών, μεταδίδοντας τη διέγερση στη χλωροφύλλη.

Ακόμα μία σημαντική ομάδα φωτοσυνθετικών χρωστικών είναι τα **καροτενοειδή**, τα οποία διακρίνονται σε καροτένια (α-καροτένιο, β-καροτένιο κ.α.) και σε ξανθοφύλλες (λουτεΐνη, βιολαξανθίνη, ασταξανθίνη, φουκοξανθίνη κ.α.). Είναι γραμμικά μόρια, με 40 άτομα άνθρακα, αποκλειστικά υδρογονανθράκων (στα καροτένια) ή οξυγονωμένων υδρογονανθράκων (στις ξανθοφύλλες). Τα καροτενοειδή υπάρχουν σε όλα τα φωτοσυνθετικά κύτταρα αλλά σε διαφορετικές αναλογίες ανάλογα το είδος του οργανισμού. Το χρώμα τους είναι σε διάφορες αποχρώσεις του κίτρινου, πορτοκαλί και κόκκινου ενώ συχνά επικαλύπτεται από αυτό της χλωροφύλλης. Τα τελευταία χρόνια τα καροτενοειδή έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον λόγω του αντιοξειδωτικού τους χαρακτήρα, μιας και εξουδετερώνουν τις ελεύθερες ρίζες που είναι τοξικές για τον οργανισμό. Έτσι η βιομηχανία στρέφεται στα φύκη καθώς περιέχουν στα κύτταρά τους μεγάλες ποσότητες καροτενοειδών. Το πιο σημαντικό καροτενοειδές είναι το β-καροτένιο, το οποίο μετατρέπεται στον οργανισμό που θα το καταναλώσει σε βιταμίνη Α. Ορισμένα μικροφύκη, όπως το *Dunaliella salina* συσσωρεύει υπερβολικά β-καροτένιο, που από πράσινο το κύτταρό του μετατρέπεται σε κόκκινο. Γι' αυτό, καλλιεργείται σε βιομηχανική κλίμακα, για την παραγωγή β-καροτένιου με ιδιαίτερα υψηλή αξία που ξεπερνά τα 12.000€ το κιλό, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε διάφορα σκευάσματα. Εκτός αυτού και άλλα καροτενοειδή αποτελούν αντικείμενο παραγωγής, όπως το λυκοπένιο, η λουτεΐνη, η βιολαξανθίνη, η ασταξανθίνη (από τα φύκη *Haematococcus*), η φουκοξανθίνη (από τα φύκη *Undaria pinnatifida*, *Cladosiphon okamuranus*, *Hizikia fusiformis*, *Sargassum fulvellum*) λόγω των βιοδραστικών τους ιδιοτήτων.

Η τρίτη κατηγορία χρωστικών που απαντώνται στα φύκη και συγκεκριμένα στα κυανοβακτήρια και τα Ροδοφύκη, είναι **οι φυκοβιλίνες** (βιλιπρωτεΐνες). Έχουν σκούρο χρώμα και φθορίζουσα υδατοδιαλυτή φύση. Το χαρακτηριστικό που τις κάνει ιδιαίτερες είναι ότι απορροφούν ιδιαίτερα αποτελεσματικά στο φάσμα που δεν απορροφούν οι άλλες χρωστικές (πράσινο- κίτρινο- πορτοκαλί) και έτσι αναπτύσσονται ταχύτατα, ξεπερνώντας σε πληθυσμό τα υπόλοιπα φύκη. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του χρώματος χωρίζονται σε τρεις τύπους: Φυκοερυθρίνη (κόκκινα φύκη), φυκοκυανίνη (μπλε χρωστική) και αλλοφυκοκυανίνη (ανοιχτή μπλε χρωστική). Οι φυκοβιλίνες έχουν εξίσου ισχυρή αντιοξειδωτική δράση, και υψηλή αξία όπως τα καροτενοειδή και χρησιμοποιούνται τόσο

ως υγιεινή τροφή όσο και ως συστατικό σε διάφορα προϊόντα όπως συμπληρώματα διατροφής και καλλυντικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το κυανοβακτήριο σπιρουλίνα, το οποίο είναι εξαιρετική πηγή φυκοκυανίνης και φυκοερυθρίνης.

2.5 Ανόργανες ουσίες

Τα **ανόργανα συστατικά** (minerals) είναι χημικά στοιχεία που απαντώνται ευρέως στη φύση και είναι απαραίτητο να υπάρχουν στον ανθρώπινο οργανισμό, σε μια συγκεκριμένη ποσότητα, καθώς συμμετέχουν σε μια σειρά σημαντικών βιολογικών λειτουργιών. Από τα στοιχεία αυτά, κάποια είναι κύρια και βρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις (χαρακτηρίζονται ως μακροστοιχεία) όπως το Ca, P, Cl, K, Na και Mg, ενώ άλλα είναι δευτερεύοντα ιχνοστοιχεία όπως ο Fe, Zn, Cu, Co, κλπ. Τα φύκη περιέχουν αξιόλογες ποσότητες τέτοιων στοιχείων, με την περιεκτικότητά τους να φτάνει έως και 36% σε ξηρό βάρος, 10-20 φορές μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σχέση με τα φυτά της ξηράς.

Πίνακας 6. Απαραίτητα ανόργανα στοιχεία (mg/g d.w.) βρώσιμων φυκών (Lozano Muñoz & Díaz, 2020).

Απαραίτητα ανόργανα συστατικά (mg/g d.w.)													
	φύκη	K	Ca	Na	P	Cu	Fe	Se	Mn	Zn	Mg	Cr	I
πράσινα φύκη	Caulerpa spp.	3.18	18.5	25.74	0.29	8	0.813		0.04	0.06	3.8	3.1	
	Codium fragile	14.2	25.3	92.3			9.43				15.2	16.8	154
	Ulva clathrata (formerly Enteromorpha clathrata)	27.0	8.0	4.0	30.0	7.5	1.712	0.41	0.051	0.18	35.0	1.05	7530
	Monostroma nitidium	8.1	6.9	18.0	2.0		0.025						
κόκκινα φύκη	Gracilaria spp.	34.17	4.02	54.65	18.2	8.0	0.036			0.043	5.65		4260
	Palmaria palmata	81.0	3.8	10	5.0	3.7	0.717		0.011	0.037	1.6	0.9	72
	Porphyra tenera	35.0	3.9	36.2	2.0	15.8	1.832		0.360	0.020	5.65	2	185
	Porphyra/Pyropia spp	27.2	3.39	5.87	5.1	9.5	0.383	0.16	0.012	0.383	3.50	1.64	35.8
καφέ φύκη	Laminaria digitata	115.7	10.05	38.1	3.0	2.9	0.047	0.026	0.002	0.017	6.5	1.3	2000
	Saccharina japonica	96.3	12.7	29.2	4.8	<0.5	0.080	8.0	0.004	0.018	6.4	1.0	2100
	Saccharina latissima					<0.5	0.040					<0.5	230
	Macrocystis pyrifera	118	37.9	41.2	7.8	0.92	0.267	31.7	0.007	0.700	10.6	0.7	2100
	Sargassum fusiforme	52.63	18.6	32.9	1.16	1.0	0.886	10.0	0.001	0.013	13.46	0.55	430
	Undaria pinnatifida	4.8	8.9	98.4	3.6	4.3	0.184	8.0	0.0075	0.032	8.68	55	139

Ένα στοιχείο το οποίο είναι ιδιαίτερα άφθονο στα φύκη είναι το ιώδιο. Μάλιστα, σε ορισμένα είδη η περιεκτικότητα σε ιώδιο υπερβαίνει την ελάχιστη διατροφική απαίτηση (150mg/ ημέρα). Λαμβάνοντας υπόψιν ότι τα τρόφιμα που προέρχονται από χερσαία φυτά έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε ιώδιο, τα φύκη θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια επιλογή τροφής για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών σε ιώδιο. Ακόμα, τα φύκη περιέχουν ασβέστιο, το οποίο μπορεί να ανέρχεται έως και 7% επί του ξηρού τους βάρους. Συνεπώς, μια μερίδα φυκών (8g DW) με 7% ασβέστιο μπορεί να παρέχει μια αξιόλογη ποσότητα ασβεστίου (560 mg), αναφορικά με τη συνιστώμενη ημερήσια δόση (800-1000 mg).

Τα ανόργανα συστατικά απορροφώνται από το νερό. Η σύνθεση των φυκών σε ανόργανα στοιχεία ποικίλει καθώς η συσσώρευση εξαρτάται από βιοτικούς παράγοντες (είδος, ηλικία, φυσιολογική κατάσταση, παρουσία πολυσακχαριτών στο κυτταρικό τοίχωμα) αλλά και από αβιοτικούς όπως (βαθμός ρύπανσης, αλατότητα, εποχή του έτους κ.α.). Ωστόσο, σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνουμε ότι, τα φύκη δεν συσσωρεύουν μόνο επιθυμητά συστατικά από το περιβάλλον, αλλά και ανεπιθύμητα τα οποία θέτουν ζητήματα ασφάλειας καθώς δυνητικά μπορούν να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στον οργανισμό. Αυτά είναι: Ο Υδράργυρος (Hg), ο μόλυβδος (Pb), το αργύλιο (Al), το κάδμιο (Cd) και το αρσενικό (As).

Πίνακας 7. Τοξικά ανόργανα συστατικά στα βρώσιμα φύκη (Lozano Muñoz&Díaz, 2020).

		Τοξικά ανόργανα συστατικά (mg/g d.w)					
		Al	Pb	Cd	As	Inorganic As	Hg
πράσινα φύκη	Caulerpa spp.		0.030	2.2			
	Codium fragile	95.7			15.9		
	Ulva clathrata (formerly Enteromorpha clathrata)		0.205	0.020	2.15	0.346	0.020
	Monostroma nitidum						
κόκκινα φύκη	Gracilaria spp.			3.0	7.5	0.93	
	Palmaria palmata		1.52	0.877	5.7	0.595	
	Porphyra tenera	2.6	0.123	0.83	24.1	0.280	0.44
	Porphyra spp.	1555	0.2	0.319	32.7	0.189	0.01
καφέ φύκη	Laminaria digitata	0.18	0.106	0.4	65.7	0.251	
	Saccharina japonica	8.9	<LOD	0.02	116	1.44	0.4
	Laminara saccharina	7		2.8	76.2		<0.05
	Macrocystis pyrifera	<50	0.3	6.5	68	1.7	0.05
	Sargassum fusiforme		0.88	0.62	111	75.4	0.0259
	Undaria pinnatifida		0.113	1.55	41.4	<LOD	0.014

LOD= limit of detection (όριο ανίχνευσης)

2.6 Βιταμίνες

Οι βιταμίνες είναι απαραίτητα οργανικά μικροθρεπτικά συστατικά, που ένας οργανισμός δεν μπορεί να συνθέσει άμεσα σε επαρκείς ποσότητες και έτσι πρέπει να ληφθούν με την τροφή. Λειτουργούν σαν πρόδρομες ενώσεις σε βασικές ενζυμικές λειτουργίες και είναι απαραίτητες για την επιτέλεση βασικών μεταβολικών λειτουργιών. Τα φύκη είναι πλούσια σε βιταμίνες και πιο συγκεκριμένα αποτελούν καλή πηγή βιταμινών του συμπλέγματος Β (ιδιαίτερα Β1 και Β12), λιπόφιλης βιταμίνης Α (η οποία προέρχεται από το καροτενοειδές β-καροτένιο), βιταμίνης Ε (τοκοφερόλη) και βιταμίνης C.

Σε αρκετές περιπτώσεις, οι συγκεντρώσεις βιταμινών των φυκών είναι συγκρίσιμες ή υπερβαίνουν εκείνες των συμβατικών τροφίμων. Για παράδειγμα, τα περιεχόμενα επίπεδα βιταμίνης C των φυκών *Porphyra umbilicalis*, *Himanthalia elongata* και *Gracilaria changii* είναι συγκρίσιμα με τα κοινά λαχανικά ντομάτα και μαρούλι, ενώ η περιεκτικότητα των καφέ φυκών *Eisenia arborea* (34,4 mg/ 100 g DW) προσεγγίζει την αντίστοιχη των μανταρινιών. Τα επίπεδα α-τοκοφερόλης (η πιο δραστική μορφή βιταμίνης E) του *Macrocystis pyrifera* (Kelp) ισοδυναμούν με φυτικά έλαια πλούσια σε αυτήν τη βιταμίνη, όπως φοινικέλαιο, ηλιέλαιο και σογιέλαιο. Οι τιμές του β-καροτένιου (προ-βιταμίνη A) που βρίσκονται στα φύκη *Codium fragile* και *Gracilaria chilensis* μπορεί να υπερβούν εκείνες που μετρώνται στα καρότα. Με βάση τα παραδείγματα αυτά, γίνεται αντιληπτό ότι τα φύκη μπορούν να αποτελέσουν εξαιρετική πηγή για το ευρύ φάσμα αυτών των βασικών μικροθρεπτικών συστατικών.

Εξίσου αξιοσημείωτη μπορεί να είναι και η σύνθεση βιταμινών των μικροφυκών. Έχει αποδειχθεί ότι τα *Tetraselmis suecica*, *Isochrysis galbana*, *Dunaliella tertiolecta* και *Chlorella stigmatophora*, είναι ιδιαίτερα πλούσια σε λιποδιαλυτές A και E αλλά και του συμπλέγματος B, συμπεριλαμβανομένων των βιταμινών B1, B2 (ριβοφλαβίνη), B6 και B12. Όσον αφορά τη βιταμίνη B12 (κοβαλαμίνη), είναι απαραίτητη στα μικροφύκη και παρόλο που δεν μπορούν να την συνθέσουν, την περιέχουν σε μεγάλη ποσότητα σε αντίθεση με τα φρούτα και τα λαχανικά που είναι κακές πηγές επειδή ούτε την χρειάζονται ούτε τη συνθέτουν. Η κοβαλαμίνη συντίθεται μόνο από Προκαρυωτικούς οργανισμούς και έχει αποδειχθεί ότι τα βακτήρια που την συνθέτουν συνδέονται στενά με ή συνυπάρχουν σε επιφάνειες Ευκαρυωτικών φυκών. Το *Pyroria yezoensis* (nori) περιέχει έως και 0,06 mg βιταμίνης B12/ 100 g DW, συγκρίσιμο με αυτό που βρίσκεται στο μοσχαρίσιο συκώτι. Χαμηλότερα επίπεδα βρίσκονται σε άλλα είδη όπως τα kelps (συμπεριλαμβανομένου του wakame) και το hijiki.

3 Λειτουργικές ιδιότητες

«Φάρμακο σας ας γίνει η τροφή σας και η τροφή σας ας γίνει φάρμακο σας» έλεγε τον 4ο αιώνα π.Χ. ο Ιπποκράτης, ο πατέρας της σύγχρονης δυτικής ιατρικής. Το συγκεκριμένο απόφθεγμα βασίζεται στην αντίληψη ότι η τροφή συνδέεται άρρηκτα με την ανθρώπινη υγεία και μέσω αυτού υπονοείται ότι τα καλύτερα φάρμακα προσφέρονται απλόχερα από τη φύση. Ωστόσο, η φιλοσοφία αυτή γνώρισε ιδιαίτερη παρακμή στις αρχές του 20^{ου} αιώνα με την άφιξη της σύγχρονης φαρμακευτικής θεραπείας. Τα αντιβιοτικά θεωρήθηκαν 'μαγικές σφαίρες', οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να στοχεύουν επιλεκτικά μικροοργανισμούς που ευθύνονται για την εμφάνιση ασθενειών. Όμως, η ανάπτυξη αντοχής των παθογόνων μικροοργανισμών στα αντιβιοτικά, σε συνδυασμό με την πιθανή εμφάνιση παρενεργειών σε δεύτερη φάση, αποτελεί μεγάλη απειλή και συνάμα πρόκληση για την ανεύρεση φυσικών προϊόντων με φαρμακευτικές ιδιότητες. Εκτός αυτού, η ποιότητας ζωής έχει μειωθεί αισθητά, λόγω διάφορων παραγόντων όπως η διατροφή, το κάπνισμα, το αλκοόλ, η σωματική αδράνεια κ.λπ. οι οποίοι αυξάνουν αισθητά την ανάπτυξη ασθενειών με έντονο επιπολασμό. Με το πέρασμα του χρόνου οι άνθρωποι γίνονται ευσυνείδητοι σε θέματα υγείας και κατ' επέκταση αλλάζουν την καταναλωτική τους τάση,

αναζητώντας προϊόντα υψηλής διατροφικής αξίας. Από αυτή την άποψη, τα λειτουργικά τρόφιμα διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο.

Η έννοια της λειτουργικής τροφής αναδύθηκε στην Ιαπωνία τη δεκαετία του 1980 και αργότερα μεταφέρθηκε στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου αναπτύχθηκε περαιτέρω. Σήμερα, τα λειτουργικά τρόφιμα αποτελούν ζωτικό κομμάτι της παγκόσμιας βιομηχανίας τροφίμων. Έως σήμερα, δεν υπάρχει επίσημα αποδεκτός όρος για τα λειτουργικά τρόφιμα, καθώς στις περισσότερες χώρες παγκοσμίως δεν υπάρχει σχετική νομοθεσία. Γενικά, αφορά τρόφιμα που αποδεικνύουν οφέλη για την υγεία των καταναλωτών, πέρα από την κάλυψη των βασικών θρεπτικών ουσιών, με τρόπο που σχετίζεται είτε με τη βελτίωση της υγείας, της ευεξίας ή τη μείωση του κινδύνου διάφορων ασθενειών. Συγχρόνως, θα πρέπει να είναι αποτελεσματικά σε φυσιολογικά επίπεδα κατανάλωσης.

Το θαλάσσιο οικοσύστημα, λόγω των διαφορετικών συνθηκών διαβίωσης που επικρατούν, π.χ. θερμοκρασία, αλατότητα, πίεση, φως, και θρεπτικά συστατικά, εμφανίζει εκπληκτική βιοποικιλότητα, καθώς έχει αναπτυχθεί πλήθος οργανισμών με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και κυρίως βιοδραστικά συστατικά. Αυτό, καθιστά το θαλάσσιο κόσμο ως στόχο για αναζήτηση φυσικών προϊόντων με οφέλη για την υγεία. Τα φύκη είναι μια αντιπροσωπευτική ομάδα θαλάσσιων οργανισμών με προοπτική να χρησιμοποιηθούν είτε σαν υγιεινή τροφή είτε σαν πηγή δραστικών συστατικών όπως λιπίδια, πρωτεΐνες, βιταμίνες κλπ.

Ωστόσο, στην προσπάθεια να αποδειχθεί ότι τα βιομόρια που προέρχονται από τα φύκη έχουν καθορισμένα οφέλη για την υγεία, προκύπτουν ορισμένα προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά, οφείλονται αφενός στο γεγονός ότι η επίδραση των βιοδραστικών ενώσεων στον ανθρώπινο οργανισμό είναι χαμηλή σε σύντομο χρονικό διάστημα. Παρ' όλα αυτά μπορεί να υπάρχει σημαντική συμβολή στην υγεία, όταν καταναλώνονται καθ' όλη τη διάρκεια του βίου, σε καθημερινή βάση. Αφετέρου, υπάρχει έλλειψη ερευνών ως προς τις θρεπτικές ιδιότητες αρκετών ειδών φυκών, ακόμα και για τα πιο δημοφιλή βρώσιμα φύκη, κάτι που είναι κατανοητό, δεδομένου του τεράστιου αριθμού ειδών που εμφανίζονται (περίπου 12.000 είδη παγκοσμίως). Παρά την έλλειψη πληροφοριών, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε δεδομένα για τα κύρια βρώσιμα φύκη, ώστε να επισημάνουμε ορισμένα αντιπροσωπευτικά θρεπτικά στοιχεία που θα αναδείξουν την αξία τους σαν τρόφιμο.

Για να πετύχουμε κάτι τέτοιο, μπορούμε να κάνουμε μια σύγκριση, χρησιμοποιώντας δημοσιευμένα δεδομένα, αναφορικά με τη σύνθεση των πιο χρησιμοποιούμενων βρώσιμων φυκών και των ποσοτήτων των τυπικών προσλήψεων. Βέβαια, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι είναι δύσκολο να καθοριστεί η καθημερινή κατανάλωση φυκών, για το λόγο ότι αυτά χρησιμοποιούνται με διάφορους τρόπους όπως noodles, σούπες, σαλάτες κ.α. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες προσεγγίσεις προκειμένου να υπάρχει ένα κοινό μέτρο και δυνατότητα σύγκρισης. Για παράδειγμα, στην Κορέα (σύμφωνα με την Κορεάτικη Εθνική Έρευνα για την Υγεία και την Διατροφή) η ημερήσια πρόσληψη φυκών είναι περίπου 8,5 g/ ημέρα, ενώ η αντίστοιχη για την Ιαπωνία φτάνει έως 10 g/ ημέρα (Gomez-Gutierrez et al., 2011). Στην Κορέα πάνω από το 95% της κατανάλωσης φυκών

αποτελείται από τα *Porphyra* sp., *Undaria pinnatifida*, και *Laminaria* sp. ενώ στην Ιαπωνία και την Κίνα χρησιμοποιούνται επίσης τα *Monostroma* sp., *Hizikia fusiformis*, *Ulva* sp. και *Palmaria palmata*. Τα ανωτέρω είναι από τα πιο συχνά καταναλώσιμα φύκη που ενσωματώνονται στις δυτικές διατροφικές συνήθειες. Εξίσου γνωστά είναι επίσης τα είδη *Gracilaria*, *Gellidium*, *Sargassum*, *Caulerpa*, και *Ascophyllum*. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας όπου γίνεται σύγκριση των περιεχόμενων συστατικών των φυκών σε σχέση με τα συνηθισμένα τρόφιμα.

Πίνακας 7: Διατροφικές πληροφορίες για τα βρώσιμα φύκη (Gomez-Gutierrez et al., 2011).

Θρεπτικό συστατικό	Διατροφικές πληροφορίες ⁷	
Ίνες	<i>Ulva lactuca</i> (5.3g) ≈ παπάγια (5.2g) <i>Ulva rigida</i> (4g) ≈ μπανάνα (3.9g)	> ξηρούς καρπούς (2.8g), muffin με πίτυρο σίτου (2.8g), μια φέτα ψωμί σίτου και σίκαλης (2.8g), πολύσπορο ψωμί (1.9g)
	<i>Laminaria digitata</i> & <i>Enteromorpha</i> sp. (3.6g) ≈ καφέ ρύζι (3.5g), blueberries (3.5g), μαγειρεμένα μανιτάρια (3.4g)	
	<i>Porphyra umbilicalis</i> , <i>Porphyra tenera</i> , <i>Palmaria palmata</i> , <i>Ascophyllum nodosum</i> , <i>Undaria pinnatifida</i> [σχεδόν ίδια (3.3g)] ≈ ωμά καρότα (3.1g), ωμά μάνγκο (3.3g), πορτοκάλια (3.1g), φράουλες (3.3g), χουρμάδες (3.3g)	
Ασβέστιο	<i>Caulerpa veravelensis</i> (395mg) ≈ milk shake με σοκολάτα (396mg), γάλα χαμηλών λιπαρών (305mg)	> γιαούρτι χαμηλών λιπαρών με φρούτα (345mg), γάλα χαμηλών λιπαρών εμπλουτισμένο με βιταμίνες A και D (305mg), γιαούρτι από αγνό γάλα (275mg)
	<i>Sargassum polycystum</i> (360mg)	
	<i>Ulva lactuca</i> (257mg)	
Βιταμίνη C	<i>Gelidiella aerosa</i> (311mg)	> συμπυκνωμένος χυμός πορτοκαλιού [η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε βιταμίνη C

⁷ Για τα φύκη η μερίδα είναι 9,5 g / d (ξηρό βάρος). Για τα χερσαία τρόφιμα, η κάθε μερίδα ισοδυναμεί με τυπικές μερίδες τροφίμων.

		(293.7mg)]
	Padina pavonica (242.25mg)	> ακατέργαστοι χυμοί: παπάγιας (185mg), πορτοκαλιού(124mg), grapefruit (94mg), ή μια μερίδα φράουλες (97.6mg).
	Ulva reticulata (232mg)	
ω-3, ω-6 PUFA (τα φύκη έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε λιπίδια (1–5%), αλλά περιέχουν υψηλά ποσοστά ω-3 and ω-6 λιπαρών οξέων)	Sargassum polycystum [77.5mg (ω-3), 75.6mg (ω-6)]	
	Eucheuma cottoni, [256mg (ω-3), 26 mg (ω-6)]	
	Ulva lobate [95mg (ω-3), 4mg (ω-6)]	
	Palmaria palmate [85.5mg (ω-3), 1.2mg (ω-6)]	
Αναλογία καλίου / νατρίου (Φύκη με αναλογία K / Na ≥ 2,0 και υψηλή περιεκτικότητα σε κάλιο)	Laminaria digitata (K/Na=3.2, K=1159 mg)	
	Himanthalia elongata (K/Na=2.25, K=360mg)	
	Porphyra umbilicalis (K/Na=2.5, K=252mg)	
	Palmaria palmata (K/Na=4.6, K=694mg)	
	Enteromorpha sp. (K/Na=6.8, K=257mg)	
	Gracilaria corticata (K/Na=3.3, K=1334mg), G. pudumadensis (K/Na=1.9, K=1087mg)	
	Sargassum myriocystum (K/Na=2.2, K=1153mg) and S. polycystum (K/Na=6.1, K=8371mg)	

3.1 Βιοδραστικά συστατικά των φυκών

Λαμβάνοντας υπόψιν το ευρύ φάσμα των βιολογικών δραστικών συστατικών που αποδίδουν τα φύκη, οι έρευνες αναφορικά με την καταλληλότητα βιοενεργών ενώσεων που προέρχονται από φύκη ως λειτουργικά συστατικά τροφίμων αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο και δυναμικά αναπτυσσόμενο πεδίο. Ήδη, υπάρχουν πολλές αναφορές για

ενώσεις με προέλευση από φύκη, που εμφανίζουν ένα ευρύ φάσμα βιολογικών δραστηριοτήτων όπως αντιβακτηριδιακές, αντιμυκητιακές, αντιικές, αντικαρκινικές και άλλες δράσεις.

3.1.1 Πολυσακχαρίτες

Αρκετοί πολυσακχαρίτες και ορισμένοι μονοσακχαρίτες από φύκη, έχουν χρησιμοποιηθεί για θεραπευτικές εφαρμογές. Θεικοί πολυσακχαρίτες έχουν χαρακτηριστεί για την ανασταλτική δραστηριότητά τους ενάντια των βακτηρίων αλλά και των ιών. Πολυσακχαρίτες κάθε κατηγορίας όπως καρραγενάνες και γαλακτάνες από κόκκινα φύκη, φουκάνες από καφέ φύκη και ιλvan από πράσινα φύκη, έχουν αναγνωρισθεί ότι εμφανίζουν αντιική δραστηριότητα.

Οι θεικοί πολυσακχαρίτες από κόκκινα φύκη, έχουν δείξει σημαντική αντιική δράση, ενάντια σε βασικούς παθογόνους ιούς όπως ο ιός ανθρώπινης ανοσοανεπάρκειας (HIV), ο ιός επιχείλιου έρπητα (HSV) 1 και 2, ο ιός Δάγκειου πυρετού (dengue virus) και ο κυτταρομεγαλοϊός (cytomegalovirus). Ο βασικός μηχανισμός δράσης, εμποδίζει την αλληλεπίδραση ιών με τα κύτταρα, αναστέλλοντας το σχηματισμό συγκυτίων (πολλά κύτταρα μαζί), που προκαλείται από τους ιούς. Εξετάστηκαν μια θεική γαλακτάνη από το φύκος *A. tenera* και μια θεική ξυλομαννάνη από το φύκος *N.fastigiata* και βρέθηκαν ενεργοί κατά το πρώτο στάδιο αντιγραφής RNA (απορρόφηση ιού στην επιφάνεια του κυττάρου), ενάντια των ιών HIV, HSV τύπου 1 και 2 και αναπνευστικού συγκυτιακού ιού (RSV). Σε αυτό το σημείο να επισημάνουμε ότι οι πολυσακχαρίτες με αντιική δράση, απαιτείται να έχουν χαμηλή κυτταροτοξική δράση, απέναντι στα κύτταρα των θηλαστικών. Αυτή η παράμετρος ικανοποιείται για τους περισσότερους πολυσακχαρίτες από φύκη, ιδιαίτερα από αυτούς των *A. tenera* και *N.fastigiata*.

Άλλοι πολυσακχαρίτες που εμφανίζουν δυναμική αντιική δραστηριότητα, είναι οι καρραγενάνες και τα φουκοειδή. Από μια σειρά αντιικών ουσιών που εξετάστηκαν για την αποτελεσματικότητά τους, σαν κολπικό μικροβιοκτόνο, ενάντια του έρπητα των γεννητικών οργάνων των ποντικών, η καρραγενάνη και τα φουκοειδή εγκρίθηκαν ως καλοί υποψήφιοι για περαιτέρω μελέτη. Να σημειωθεί ότι οι καρραγενάνες, δεν εμφανίζουν σημαντική κυτταροτοξικότητα ή αντιπηκτική δραστηριότητα. Επίσης, τα φουκοειδή, εμφανίζουν ισχυρές αντιικές ιδιότητες, εναντίον των RSV, HIV, HSV τύπων 1 και 2 και ανθρώπινου κυτταρομεγαλοϊού, αλλά και σημαντική αντιφλεγμονώδη, αντικαρκινική και αντιοξειδωτική δραστηριότητα.

Τα φουκοειδή θεωρούνται αξιόλογοι υποψήφιοι, για την ανάπτυξη κολπικού μικροβιοκτόνου, με αντισυλληπτικές ιδιότητες. Είναι γνωστή η αντικαρκινική, η αντιμεταστατική και η θρωμβολυτική τους δράση σε ποντίκια, καθώς και η ικανότητά τους να μειώνουν τον κυτταρικό πολλαπλασιασμό. Η φουκοειδίνη, έχει αναφερθεί *in vivo* και *in vitro*, ότι έχει αντικαρκινικά αποτελέσματα, καθώς επιφέρει απόπτωση και με αυτόν τον τρόπο παρεμποδίζει την αγγειογένεση και περιορίζει την μετάσταση στον πνεύμονα, του καρκίνου του μαστού. Αντιθρομβωτικές και αντιπηκτικές ιδιότητες, έχουν αποδοθεί στα φουκοειδή *in vivo* και *in vitro* και μάλιστα υποβοηθούνται από αναστολείς πήξης αίματος όπως η αντιθρομβίνη III. Η αντιπηκτική δραστηριότητα έγκειται στην αλληλεπίδραση φουκάνης-θρομβίνης και συνήθως αυξάνεται, όσο αυξάνεται ο βαθμός θείωσης.

Σημαντικές αντιπηκτικές ιδιότητες, αναφέρθηκαν για έναν θειικό πολυσακχαρίτη (rhamnante) που εξάγεται από το ευρέως καταναλωμένο πράσινο φύκος *Monostroma angicava*.

Επιπλέον, οι πολυσακχαρίτες προάγουν τη δράση των προβιοτικών. Σε μελέτη που έγινε στα φύκη *Gratelouiria filicina*, *Eucheuma spinosum*, *Ulva pertusa*, and *Ascophyllum nodosum* παρατηρήθηκε πρεβιοτική δράση *in vitro*, λόγω της περιεκτικότητας σε σάκχαρα, θειούχους πολυσακχαρίτες αλλά και μονοσακχαρίτες. Μάλιστα τα *G. filicina* και *E. spinosum* αύξησαν σημαντικά τον πολλαπλασιασμό του *bifidobacterium*. Χαρακτηριστικό πρεβιοτικό είναι η λαμιναρίνη, η οποία έχει και άλλες ιδιότητες, όπως αντιιικές, αντιβακτηριδιακές και αντιοξειδωτικές.

Μια άλλη κατηγορία πολυσακχαριτών είναι τα αλγινικά άλατα, τα οποία εκτός από αντιική ιδιότητα, προάγουν και άλλες δράσεις. Έρευνα που διεξήχθη σε χοίρους, των οποίων η διατροφή συμπληρώθηκε με 5% αλγινικά από καφέ φύκη, έδειξε μείωση της εντερικής απορρόφησης της γλυκόζης και ρύθμιση της απόκρισης ινσουλίνης. Σε μια άλλη μελέτη σε ενήλικες, η πρόσληψη αλγινικών αλάτων σε καθημερινή βάση μείωσε την πρόσληψη ενέργειας, υποδηλώνοντας ότι μπορούν να συμβάλουν στην αποτελεσματική διαχείριση του υπέρβαρου και της παχυσαρκίας.

Τέλος, πολυσακχαρίτες εντοπίζονται και στη βιομάζα μικροφυκών, αντιπροσωπεύοντας μια κατηγορία συστατικών υψηλής προστιθέμενης αξίας. Οι πολυσακχαρίτες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε τρόφιμα, φάρμακα, καλλυντικά κ.λπ. καθώς εμφανίζουν σημαντικά οφέλη για την υγεία. Αρκετοί πολυσακχαρίτες από φύκη έχουν ανοσορυθμιστικές ιδιότητες μέσω ενεργοποίησης μακροφάγων κυττάρων, επάγοντας διάφορους τύπους κυτοκινών ή παράγοντας αντιδραστικό οξυγόνο (reactive oxygen species- ros) και μονοξειδίο του αζώτου (nitric oxide- NO). Σύμφωνα με αναφορές, τα μικροφύκη *Chlorella vulgaris* και *Scenedesmus quadricauda* μπορούν πιθανώς να παράξουν πολυσακχαρίτες με προστατευτική δράση ενάντια του οξειδωτικού στρες, ενώ ακατέργαστα εκχυλίσματα *Chlorella pyrenoidosa* έχουν αντικαρκινική δραστηριότητα ενάντια του καρκίνου του πνεύμονα.

3.1.2 Πρωτεΐνες

Οι πρωτεΐνες των φυκών αποτελούν έναν σχετικά ανεξερεύνητο κομμάτι, το οποίο κερδίζει την προσοχή όλο και περισσότερων ερευνητών. Η πρωτεϊνική σύνθεση στα φύκη εμφανίζει μεγάλη διακύμανση (3-47% DW) και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το είδος, η εποχή του έτους κλπ. Την χαμηλότερη περιεκτικότητα κατέχουν τα καφέ φύκη (3±15% DW) και ακολουθούν τα πράσινα φύκη με (±26% DW). Μεταξύ των πολυάριθμων πρωτεϊνών που περιέχουν τα φύκη, το ενδιαφέρον κεντρίζουν οι φυκοβιλίνες (phycobiliproteins) και οι λεκτίνες, λόγω των βιοδραστικών δραστηριοτήτων τους.

Οι λεκτίνες είναι πρωτεΐνες που συνδέονται με υδατάνθρακες και έχουν υψηλή εξειδίκευση καθώς, έχουν την ικανότητα να αναγνωρίζουν και να δεσμεύονται σε συγκεκριμένους πολυσακχαρίτες. Οι πρωτεΐνες αυτές εμπλέκονται σε κρίσιμες βιολογικές διεργασίες (όπως η διακυτταρική επικοινωνία), ενώ έχει τεκμηριωθεί ότι έχουν και άλλες δράσεις, όπως είναι η αντιβιοτική, η αντιφλεγμονώδης, η αντι- HIV, η αντιεθιστική, η αναστολή συσσωμάτωσης αιμοπεταλίων, η αντιβακτηριδιακή δράση κ.α.

Ακόμα, αξίζει να γίνει αναφορά στα βιοδραστικά πεπτίδια (3-20 αμινοξέα), τα οποία εμφανίζουν πλήθος φαρμακολογικών ιδιοτήτων ανάλογα με τον αριθμό και την αλληλουχία των αμινοξέων. Χαρακτηριστικές ιδιότητες είναι η αντιοξειδωτική, η αντικαρκινική, η αντιμικροβιακή, η ανοσορυθμιστική, η αντιθρομβωτική και η αντι- υπερτασική τους δράση. Συγκεκριμένα έχουν αναφερθεί δύο βιοδραστικά πεπτίδια από κόκκινα φύκη (*Porphyra* spp.), για το δυναμικό αναστολής ενάντια του ενζύμου α-αμυλάσης, που σχετίζεται με το διαβήτη. Επίσης, από το φύκος *Gracilariaopsis lemaneiformis* (κόκκινα φύκη) έχει απομονωθεί ένα βιοδραστικό πεπτίδιο, με σημαντική ανασταλτική δράση ενάντια του ενζύμου μετατροπής της αγγειοτενσίνης-I, η οποία έχει να κάνει με την υπέρταση.

Τέλος, η θρεπτική αξία των πρωτεϊνών γενικότερα καθορίζεται από την ευπεπτότητα και το προφίλ των αμινοξέων. Υπάρχουν αναφορές ότι έχουν σημαντική ικανότητα πέψης.

3.1.3 Χρωστικές

Οι χρωστικές των φυκών είναι τα καροτενοειδή, οι χλωροφύλλες και οι φυκοβιλίνες και η παρουσία τους εξαρτάται από το είδος. Οι χρωστικές αυτές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και βρίσκουν πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων και φαρμακευτικών προϊόντων, λόγω των θεραπευτικών τους ιδιοτήτων. Ως επί το πλείστον έχουν αντιοξειδωτικές ιδιότητες, αλλά εκτός αυτού εμφανίζουν αντικαρκινική, αντιδιαβητική, ανοσορυθμιστική, αντιφλεγμονώδη, νευροπροστατευτική και κατά της παχυσαρκίας δράση.

Τα καροτενοειδή έχουν τεκμηριωθεί σαν αποτελεσματικά αντιοξειδωτικά. Περισσότερο από 10% της συνολικής παραγωγής καροτενοειδών αποτελεί η φουκοξανθίνη, η οποία μαζί με την φουκοξανθινόλη (ακετυλιωμένο παράγωγο της φουκοξανθίνης), αναφέρονται σε αρκετές μελέτες ότι προσφέρουν μεγάλα οφέλη στην υγεία του ανθρώπου, επίσης είναι γνωστή η αντικαρκινική τους δράση. Γενικότερα και άλλα καροτενοειδή έχουν αποδειχθεί αντικαρκινικοί παράγοντες, μάλιστα σε έρευνα με ασθενείς που ακολουθούσαν δίαιτα ενισχυμένη με καροτενοειδή όπως το α-καροτένιο και λυκοπένιο, έδειξε πως μείωναν τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα. Η ασταξανθίνη επίσης θεωρείται ισχυρό αντιοξειδωτικό καροτενοειδές. Το μικροφύκος *Haematococcus* sp. είναι πλούσια πηγή ασταξανθίνης και διατίθεται στο εμπόριο σαν συμπλήρωμα διατροφής. Επίσης, πηγή ασταξανθίνης είναι και το *H. pluvialis* (1-8% DW).

Όσον αφορά τις φυκοβιλίνες, είναι χρωστικές υψηλής βιολογικής αξίας και βρίσκουν χρήση στα τρόφιμα σαν πιθανές ατοξικές, μη καρκινογόνες φυσικές χρωστικές. Έχουν τη δυνατότητα να εξουδετερώνουν τις ρίζες υδροξυλίου, υπεροξειδίου και τις αλκοξυ-ρίζες και με αυτόν τον τρόπο εμφανίζουν ισχυρή αντιοξειδωτική δράση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το *Nostoc spongiaeforme*, με ισχυρή αντιοξειδωτική δράση λόγω των περιεχόμενων φαινολικών και φυκοβιλινών.

3.1.4 Λιπίδια και πολυακόρεστα λιπαρά οξέα

Οι δύο κύριες κατηγορίες λιπιδίων που απαντώνται στα φύκη είναι τα φωσφολιπίδια και τα γλυκολιπίδια. Παρά το γεγονός ότι τα φύκη είναι τρόφιμα χαμηλής ενέργειας, λόγω της χαμηλής τους περιεκτικότητας σε λιπίδια, τα πολυακόρεστα λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας (LC- PUFA) παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς είναι σημαντικά για την ανθρώπινη υγεία. Μάλιστα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, η περιεκτικότητα σε PUFA αυξάνεται.

Η πλειονότητα των πολυακόρεστων λιπαρών οξέων των φυκών εμφανίζεται υπό μορφή ω-3 και ω-6. Η μέγιστη αποτελεσματικότητα των φυκών σαν συμπλήρωμα διατροφής ή μέρος της δίαιτας (σε σταθερή βάση) εμφανίζει ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών μορφών. Ειδικότερα, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) προτείνει αναλογία ω-6:ω-3 κάτω από 10 για τρόφιμα που πιθανώς θα μειώσουν τον κίνδυνο νευρολογικών, φλεγμονωδών και καρδιαγγειακών παθήσεων, ενώ οι Ευρωπαϊκές Διατροφικές Εταιρείες συνιστούν αναλογία ίση με 5. Αρκετά βρώσιμα φύκη, με μεγάλη θρεπτική αξία έχουν αναλογία μέσα σε αυτά τα όρια.

Τα PUFA είναι πρόδρομα των εικοσαενοειδών, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη ρύθμιση ομοιοστατικών και φλεγμονωδών διεργασιών στον ανθρώπινο οργανισμό. Μερικές από αυτές τις διεργασίες που ρυθμίζουν, είναι η πήξη του αίματος, η αρτηριακή πίεση, η ολοκλήρωση της ανάπτυξης και η λειτουργία του εγκεφάλου καθώς και του νευρικού συστήματος. Επίσης, είναι ικανά να μειώνουν αποτελεσματικά τον κίνδυνο εμφάνισης διαφόρων παθήσεων, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου, της οστεοπόρωσης, του διαβήτη και των καρδιαγγειακών νοσημάτων. Τέλος, εκχυλίσματα λιπιδίων από το *Nostoc commune* (γαλαζοπράσινο φύκος), το οποίο εκτός από τρόφιμο (λιχουδιά), χρησιμοποιείται και ως φυτικό φάρμακο, αποδείχθηκαν αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση των ιών, του καρκίνου, των εγκαυμάτων όπως και της χρόνιας κόπωσης.

Τα PUFA έχουν ενσωματωθεί σε διάφορα εμπορικά προϊόντα λόγω των αναφερόμενων θεραπευτικών ιδιοτήτων τους. Έως τώρα, τα ψάρια αποτελούσαν την βασική εμπορική πηγή ω-3 όμως λόγω της ιδιόρρυθμης οσμής και γεύσης τους τείνουν να αντικατασταθούν. Έτσι, προκειμένου να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση προϊόντων διατροφής με υψηλή περιεκτικότητα σε PUFA, το ενδιαφέρον στρέφεται προς τα φύκη. Ήδη καλλιεργούνται ελεγχόμενες ποσότητες μικροφυκών, κυρίως *Thraustochytrium* και *Schizochytrium*, για την παραγωγή PUFA.

3.1.5 Φαινολικές ενώσεις

Οι φαινολικές ενώσεις (ή αλλιώς πολυφαινόλες) εντοπίζονται σε υψηλά επίπεδα στα φύκη και είναι ισχυρά αντιοξειδωτικά. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι φλοροτανίνες (phlorotannins), οι οποίες έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον σαν λειτουργικά συστατικά των τροφίμων. Αυτό οφείλεται στις αντιοξειδωτικές, αντιφλεγμονώδεις, αντιδιαβητικές, αντικαρκινικές, αντιυπερτασικές, αντιυικές και αντιαλλεργικές ιδιότητες που εμφανίζουν. Σύμφωνα με κλινικές δοκιμές, μετά τη χορήγηση συμπληρωμάτων με *U. pinnatifida* και *Sacchariza polyschides*, σε καθημερινή βάση, παρατηρήθηκε εξισορρόπηση γλυκόζης στο αίμα, μείωση τριγλυκεριδίων στον ορό του αίματος και αύξηση της καλής χοληστερόλης (HDL) σε ασθενείς με διαβήτη τύπου 2. Σε άλλη μελέτη, εκχύλισμα από το *Ecklonia cava* χορηγήθηκε σε 80 προ-διαβητικούς ενήλικες (ηλικίας 20-65 ετών), με δόση 1,5g/ ημέρα και μετά από τρεις μήνες παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της μεταγευματικής γλυκόζης. Η αντιδιαβητική αυτή επίδραση αποδίδεται στο πλούσιο περιεχόμενο του εκχυλίσματος σε φλοροτανίνες (46%) και ιδιαίτερα στην υψηλή περιεκτικότητα στην φλοροτανίνη dieckol (10%).

Επίσης, ετεροκυκλικές φαινόλες και στερόλες παρουσιάζουν αντιβιοτικές ιδιότητες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντισηπτικά ή καθαριστικά μέσα, με το μειονέκτημα ότι η

αντιβιοτική τους δράση in vivo είναι αποτελεσματική αποκλειστικά σε μεγάλες/ τοξικές συγκεντρώσεις.

Πίνακας 8. Βιοδραστικές ενώσεις φυκών και κυανοβακτηρίων και οι εφαρμογές τους (Kini, Divyashree, Mani & Mamatha, 2020).

φύκη/ κυανοβακτήρια	βιοδραστικές ενώσεις	δράσεις
<i>Gelidium pusillum</i>	R-φουκοερυθρίνη, R-φουκοκυανίνη	αντιοξειδωτική, αντικαρκινική, νευροπροστατευτική, αντιική, ηπατοπροστασία / αντι-ηπατοτοξικότητα και υποχοληστερολαιμία
<i>Laurencia obtuse</i>	πολυφαινόλες	αντιοξειδωτική
<i>Hormosira banksii</i>	πολυφαινόλες	αντιοξειδωτική
<i>Lyngbya majuscula</i> , <i>Nostoc linckia</i>	λιποπεπτίδια	αντικαρκινική
<i>Nostoc ellipsosporum</i>	πρωτεΐνες	αντιική
<i>Scytonema varium</i>	πολυπεπτίδια	αντιική
<i>Spirulina platensis</i>	θειωμένοι πολυσακχαρίτες	αντιική
<i>Nostoc sp. GSV 224</i>	κυκλοπεπτίδια	αντικαρκινική
<i>Saccharina japonica</i>	καροτενοειδή, φουκοξανθίνη και φλοροτανίνες	αντιοξειδωτική και αντικαρκινική
<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Dunaliella salina</i> , <i>Arthrospira</i>	καροτενοειδή	
<i>Haematococcus pluvialis</i>	ασταξανθίνη	αντιοξειδωτική
<i>Himantalia elongata</i>	πολυσακχαρίτες	αντιική
<i>Cystoseira abies-marina</i> , <i>Sargassum vulgare</i> , <i>Halopitys incurvus</i> , <i>Sargassum muticum</i> , <i>Undaria pinnatifida</i> , <i>Porphyra spp.</i>	πολυφαινόλες, αντιοξειδωτικά, αμινοξέα	αντιμικροβιακή και αντιοξειδωτική
<i>S. japonica</i>	πολυφαινόλες	αντιοξειδωτική
<i>Sargassum thunbergii</i>	πολυσακχαρίτες	αντιοξειδωτική και υπογλυκαιμική
<i>Ulva prolifera</i>	πολυσακχαρίτες	αντι-υπερλιπιδαιμική και

		αντιοξειδωτική
Caulerpa racemosa	πολυφαινόλες	αντιοξειδωτική

3.1.6 Λοιπά βιοδραστικά συστατικά

Οι κακές συνθήκες υγείας και η αλλαγή διατροφικής συμπεριφοράς έχουν συσχετιστεί με την ανεπάρκεια ανόργανων συστατικών ή περίσσεια τοξικών ουσιών. Έτσι, τα φύκη λόγω της υψηλής περιεκτικότητας τους (έως 36% DW) μπορούν να έχουν σημαντική συμβολή στην καθημερινή πρόσληψη ανόργανων συστατικών.

Ο σίδηρος είναι ένα από τα βασικά στοιχεία με σημαντική συμβολή σε πλήθος μεταβολικών διεργασιών όπως η αναπνοή, η παραγωγή ενέργειας, η σύνθεση DNA και ο γρήγορος πολλαπλασιασμός των κυττάρων. Η έλλειψη σιδήρου είναι η κύρια αιτία αναιμίας και αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα υγείας, καθώς έχει σημαντική επίδραση στη ζωή των μικρών παιδιών και των γυναικών πριν την εμμηνόπαυση. Τα πράσινα φύκη *C. fragile* μπορούν να αποτελέσουν πηγή σιδήρου για άτομα με ανεπάρκεια σιδήρου σε vegan και χορτοφάγους.

Ο ψευδάργυρος είναι απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για τη δραστηριότητα αρκετών ενζύμων και παραγόντων μεταγραφής και διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην άμυνα του ξενιστή ενάντια στους παθογόνους. Η ανεπάρκεια ψευδαργύρου εκτιμάται ότι αποτελεί κίνδυνο περίπου για το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού και ιδίως για παιδιά κάτω των 5 ετών, λόγω των αυξημένων τους αναγκών για την υποστήριξη της ανάπτυξης. Η επίδραση της ανεπάρκειας ψευδαργύρου επηρεάζει το επιδερμικό, γαστρεντερικό, σκελετικό και αναπαραγωγικό σύστημα. Οι παθολογικές καταστάσεις που προκύπτουν είναι η χαμηλή ανοσία και οι διαταραχές ανάπτυξης του νευρικού συστήματος. Στον αντίποδα, η παρατεταμένη και υπερβολική πρόσληψη ψευδαργύρου μπορεί να επιφέρει ναυτία, πονοκέφαλο, πυρετό, κοιλιακό άλγος όπως και η έλλειψη χαλκού και σιδήρου. Επίσης, ο ψευδάργυρος προκαλεί ερεθισμούς στο ανθρώπινο δέρμα.

Το μαγγάνιο είναι επίσης ένα βασικό στοιχείο και εμπλέκεται στο μεταβολισμό των πρωτεϊνών, των λιπιδίων και των υδατανθράκων. Ακόμα, είναι απαραίτητο για την φυσιολογική ανοσολογική λειτουργία και ρύθμιση του σακχάρου στο αίμα. Ανεπάρκεια ή υπερπρόσληψη μαγγανίου είναι σχεδόν απίθανο να προκύψει μέσω της διατροφής. Παρ' όλα αυτά, η ανεπάρκεια μαγγανίου μπορεί να επιφέρει σοβαρές ανωμαλίες στο σκελετικό και αναπαραγωγικό σύστημα, ενώ οι μεγάλες προσλήψεις είναι ακίνδυνες για τον άνθρωπο εφόσον έχει φυσιολογική νεφρική λειτουργία. Εκτός αυτού, η τοξικότητα του μαγγανίου έχει συσχετιστεί με νευροψυχιατρικά συμπτώματα, με τη νόσο Parkinson και την ηπατική νόσο λόγω κατανάλωσης αλκοόλ (υψηλή περιεκτικότητα Mn στο ήπαρ).

Το χρώμιο είναι απαραίτητο για την παραγωγή ενέργειας από το σάκχαρο του αίματος και έχει ενεργή συμμετοχή στη λειτουργία της ινσουλίνης και στο μεταβολισμό των λιπιδίων. Η συγκέντρωση χρωμίου στα φύκη εμφανίζει μεγάλη μεταβλητότητα και είναι μεγαλύτερη στα πράσινα και καφέ φύκη. Συγκεκριμένα, σε σχέση με τις συνιστώμενες διατροφικές προσλήψεις, πολύ υψηλές συγκεντρώσεις εμφανίζει το καφέ φύκος *U. pinnatifida*. Ένα

μόνο γραμμάριο από το συγκεκριμένο είδος ικανοποιεί την ημερήσια συνιστώμενη ποσότητα χρωμίου (mg) για παιδιά ηλικίας 4-8 ετών. Ωστόσο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η περιεκτικότητα σε αλουμίνιο.

Το μαγνήσιο και το ασβέστιο είναι ζωτικής σημασίας για την υγεία των οστών και των δοντιών. Επίσης, καθένα από τα δύο αυτά στοιχεία ξεχωριστά διαδραματίζουν και άλλους ρόλους. Το μαγνήσιο συμμετέχει στον μεταβολισμό των κυττάρων αλλά και σε διάφορα ενζυμικά συστήματα. Αντίστοιχα, το ασβέστιο συμμετέχει στη ρύθμιση του καρδιακού παλμού, στη μετάδοση νευρικών σημάτων, στη μυϊκή σύσπαση, στην πήξη του αίματος, στην ενεργοποίηση της ινσουλίνης και της ορμόνης του θυρεοειδούς- καλσιτονίνη.

Ο φωσφόρος είναι σημαντικό στοιχείο των οστών και των δοντιών και είναι απαραίτητος στα ένζυμα που αποθηκεύουν ή απελευθερώνουν ενέργεια, όπως και για την εκτέλεση διάφορων λειτουργιών στο σώμα. Η περίσσεια φωσφόρου αντιδρά με άλλα στοιχεία, προς σχηματισμό αδιάλυτων αλάτων στα σπλάχνα και στο ουροποιητικό σύστημα και κατ' επέκταση συμβάλει σε εκφυλιστικές ασθένειες όπως νεφρική βλάβη και οστεοπόρωση.

Ο χαλκός είναι απαραίτητος για ισχυρό και εύκαμπτο συνδετικό ιστό και για τη σύνθεση αιμοσφαιρίνης. Η έλλειψη χαλκού μπορεί να οδηγήσει σε διόγκωση της καρδιάς, αυξημένη χοληστερόλη και μαλακά αιμοφόρα αγγεία. Αντίθετα, υψηλά επίπεδα χαλκού είναι τοξικά για τον άνθρωπο και μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε θάνατο (όπως συμβαίνει από σκόπιμη κατάποση μεγάλων ποσοτήτων θεικού χαλκού).

Το σελήνιο ενσωματώνεται σε πρωτεΐνες με αντιοξειδωτική και αντιφλεγμονώδη επίδραση στην παραγωγή ενεργής ορμόνης του θυρεοειδή. Χαμηλά ποσοστά σεληνίου σχετίζονται με κακή ανοσολογική λειτουργία και νοητική εξασθένηση. Υψηλότερα ποσοστά έχουν αντικά αποτελέσματα, είναι απαραίτητα για την επιτυχή αναπαραγωγή και μειώνουν τον κίνδυνο της νόσου του θυρεοειδή. Σε υπερβολικό βαθμό προκαλεί προβλήματα όπως αναπνοή με οσμή σκόρδου, κακή οδοντική υγεία, απώλεια μαλλιών και νυχιών, διαταραχές του δέρματος και του νευρικού συστήματος και αυξάνει τον κίνδυνο διαβήτη τύπου 2. Τα καφέ φύκη είναι καλή πηγή σεληνίου, ένα μόνο γραμμάριο ορισμένων ειδών, μπορεί να καλύψει το 100% των συνιστώμενων διατροφικών δόσεων σε μικρά παιδιά ηλικίας (4-8 ετών). Παρ' όλα αυτά απαιτείται προσοχή μιας και ορισμένα είδη, όπως τα *L. digitata* και *M. pyrifera*, υπερβαίνουν τα συνιστώμενα διατροφικά όρια για το σελήνιο.

Το ιώδιο είναι αναγκαίο για τη σύνθεση της θυροξίνης (T4) και της τρι-ιωδοθυροξίνης (T3) (ορμόνες του θυρεοειδή) που απαιτούνται για την ανάπτυξη των οργάνων και τη χρήση των θρεπτικών στοιχείων από τον οργανισμό. Η ανεπάρκεια ιωδίου εντείνει τον κίνδυνο χαμηλότερης νοητικής λειτουργίας, νοητικής καθυστέρησης και υποθυρεοειδισμού. Ακόμα, αποτελεί παγκοσμίως την πιο συχνή αιτία εγκεφαλικής βλάβης και διανοητικής καθυστέρησης. Σύμφωνα με τον ΠΟΥ εκτιμάται ότι 1,6 δισεκατομμύρια άνθρωποι κινδυνεύουν από ανεπάρκεια ιωδίου, ενώ τουλάχιστον 20 εκατομμύρια πάσχουν από ψυχικές ανωμαλίες που μπορούν να προληφθούν με διόρθωση της ανεπάρκειας σε ιώδιο. Η κύρια αιτία έλλειψης ιωδίου είναι η ανεπαρκής διατροφική πρόσληψη, από χερσαίους οργανισμούς-τρόφιμα από τα οποία το ιώδιο έχει εκπλυθεί με κάποιο τρόπο όπως με παγετώνα, με υψηλή βροχόπτωση, με πλημμύρα κ.λπ. Τρόφιμα θαλάσσιας προέλευσης, συμπεριλαμβανομένων των φυκών, είναι πλούσια σε ιώδιο λόγω της αυξημένης

συγκέντρωσης ιωδίου στο θαλασσινό νερό. Βέβαια, υπερβολική ποσότητα ιωδίου μπορεί να προκαλέσει υπερθυρεοειδισμό. Μάλιστα, η εκτεταμένη κατανάλωση φυκών, σε χώρες όπου αυτά παραδοσιακά χρησιμοποιούνται σαν τροφή, βρέθηκε να σχετίζεται με υπερθυρεοειδισμό και θυρεοειδίτιδα Hashimoto.

Τέλος, έχει αναφερθεί ότι τα φύκη έχουν ισορροπημένη περιεκτικότητα σε κάλιο και νάτριο και χαμηλή αναλογία νατρίου: καλίου. Αυτό είναι σημαντικό για την ανθρώπινη διατροφή, καθώς υψηλές αναλογίες νατρίου: καλίου συνδέονται με υπέρταση. Οι υψηλότερες αναλογίες νατρίου: καλίου ανήκουν στα πράσινα φύκη, με εξαίρεση το *Ulva clathrate*. Οι χαμηλότερες αναλογίες ανήκουν στα κόκκινα φύκη, με εξαίρεση το γνωστό *wakame* (*U. pinnatifida*). Ωστόσο, το συγκεκριμένο φύκος έχει αναφερθεί για την αντιυπερτασική του ιδιότητα. Αυτή σχετίζεται με την παρουσία πεπτιδίων που αναστέλλουν το ένζυμο μετατροπής της Αγγειοτενσίνης (ACE), το οποίο ρυθμίζει την αρτηριακή πίεση.

4 Ασφάλεια

Η κατανάλωση κάποιων τροφίμων μπορεί να ελλοχεύει πολλούς κινδύνους. Όσον αφορά τα φύκη, είναι πιθανό να εντοπιστούν ουσίες με τοξική δράση ή με αντιδιατροφικές ιδιότητες. Στους τοξικούς παράγοντες κατατάσσονται οι λεκτίνες που συγκολλούν τα ερυθρά αιμοσφαίρια, ενώ στους αντιδιατροφικούς παράγοντες ανήκει το φυτικό οξύ καθώς και παράγοντες που παρεμποδίζουν τη δράση των ενζύμων θρυψίνης και α-αμυλάσης. Ακόμα, επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία μπορεί να έχουν και οι πουρίνες, οι οποίες προέρχονται από τα νουκλεϊκά οξέα RNA και DNA που μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση του ουρικού οξέος στο πλάσμα του αίματος. Σχετικά με τα βαρέα μέταλλα, ορισμένα από αυτά ανιχνεύονται στα φύκη, σε συγκεντρώσεις που ποικίλουν, ανάλογα με φυλογενετικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η αλατότητα, η θερμοκρασία, το pH, το οξυγόνο, το φως και οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών συστατικών. Συνήθως, υψηλότερα επίπεδα μετάλλων εμφανίζουν τα καφέ φύκη σε αντίθεση με τα κόκκινα και τα πράσινα φύκη.

Τα ανώτερα επίπεδα βαρέων μετάλλων (που ορίζονται σε επιτρεπτά πλαίσια), διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Ο ΕΚ 1881/2006 καθορίζει τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα για ουσίες που επιμολύνουν τα τρόφιμα. Στις ΗΠΑ, για ορισμένους τύπους τροφίμων, καθορίζονται επίπεδα μέσω κανονισμών που εκδίδει ο FDA. Στην Αυστραλία και στη Νέα Ζηλανδία, τα μέγιστα επίπεδα βαρέων μετάλλων καθορίζονται από τον κοινό κανονισμό FSANZ : 1.4.1 Contaminants and natural toxicants (μολυσματικά και φυσικά τοξικά), ο οποίος θεσπίζει τα ανώτατα επίπεδα για πέντε βαρέα μέταλλα σε συγκεκριμένα τρόφιμα. Όσον αφορά τρόφιμα που διακινούνται στο διεθνές εμπόριο, το ανώτατο επίπεδο για μέταλλα ορίζεται από το γενικό πρότυπο Codex Alimentarius CODEX STAN 193/1995 (που τροποποιήθηκε το 2015) για μολυσματικές ουσίες και τοξίνες σε τρόφιμα και ζωοτροφές. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζεται η περιεκτικότητα των τοξικών ανόργανων στοιχείων, σε διαφορετικές ομάδες φυκών, αλλά και τα μέγιστα επίπεδα (Maximum levels-MLs) βάσει των αρμόδιων φορέων.

Πίνακας 9. Ανώτερα όρια τοξικών ανόργανων στοιχείων και ιωδίου, που έχουν καθοριστεί σε διάφορες χώρες για προϊόντα διατροφής και η παρουσία των στοιχείων αυτών σε διαφορετικές ομάδες φυκών (Lozano Muñoz & Díaz , 2020).

προϊόντα - αρμόδιοι φορείς	μέγιστα επίπεδα τοξικών ανόργανων στοιχείων				
	I	Pb	Cd	ανόργανο As	Hg
Σιγκαπούρη[1]			2		0.05
EK- αποξηραμένα φύκη-συμπληρώματα διατροφής (mg/kg καθαρού βάρους)[2]			3		
EK- συμπληρώματα διατροφής (mg/kg καθαρού βάρους)[2]		3	1		0.1
Γαλλικός κανονισμός (mg/kg καθαρού βάρους)[3]	2000	5	0.5	3	0.1
FDA- μέγιστα επίπεδα σε επιλεγμένες τροφές (ppm)[4]		0.1	2	0.5	1
Αυστραλία & Νέα Ζηλανδία (mg/kg)[5]		2	2	1	0.5
Codex Alimentarius (mg/kg)[6]		0.3	2	0.2	0.5

ομάδες φυκών	περιεκτικότητα σε τοξικά ανόργανα στοιχεία				
	I	Pb	Cd	ανόργανο As	Hg
Chlorophyta (mg/g d.w.)	1540-7530	0.03-0.2	0.02	0.346	0.02
Rhodophyta (mg/g d.w.)	30-4260	0.2-1.52	0.31-3	0.18-0.59	0.01-0.44
Phaeophyceae (mg/g d.w.)	100-2110	0.10-0.8	0.02-6.5	0.25-75.54	0.01-0.4

[1] Agri-Food & Veterinary Authority of Singapore legislation (Νομοθετική αρχή αγρο-τροφίμων και κτηνιατρικής της Σιγκαπούρης)
[2](ΕΚ) 1881/2006 για τον καθορισμό ανώτατων επιπέδων για ορισμένες μολυσματικές ουσίες στα τρόφιμα. Τροποποίηση του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1881/2006 για τον καθορισμό ανώτατων επιπέδων για ορισμένες μολυσματικές ουσίες στα τρόφιμα. Συμπληρώματα διατροφής που αποτελούνται αποκλειστικά ή κυρίως από αποξηραμένα φύκη ή από προϊόντα που προέρχονται από φύκη. Το μέγιστο επίπεδο ισχύει για τα συμπληρώματα διατροφής όπως πωλούνται.
[3]Γαλλικός κανονισμός για βρώσιμα φύκη- συντάχθηκε από το Κέντρο Μελέτης και Αξιολόγησης Αλγών (CEVA-Center d'Etude et de Valorization des Algues), 2014.
[4] ΗΠΑ-Οργανισμός Τροφίμων και Φαρμάκων (Food and Drug Administration-FDA). Ανόργανο As στα αυγά και στον μη μαγειρεμένο βρώσιμο ιστό κοτόπουλου και γαλοπούλας. As οστρακοειδών και προϊόντα αυτών. Cd για ψάρια, καβούρια και γαρίδες. Pb σε αποξηραμένα φρούτα συμπεριλαμβανομένων των σταφίδων (FDA 2013, 2015). Hg σε όλα τα ψάρια (FDA 2019).
[5]FSANZ: 1.4.1 μολυσματικά και φυσικά τοξικά. Ανόργανο As για φύκη. Cd για μαλάκια (εκτός από τα στρείδια και τα βασιλικά χτένια). Μέσο επίπεδο Hg για μαλάκια και ψάρια.
1[6]Codex Alimentarius CODEX STAN 193/1995 (που τροποποιήθηκε το 2015). Ανόργανο As για λευκό ρύζι, Cd δίθυρα, Pb και Hg για ψάρια.

4.1.1 Αρσενικό (As)

Το ανόργανο αρσενικό (iAs) κατατάσσεται στα καρκινογόνα στοιχεία από τον Διεθνή Οργανισμό για την Έρευνα του Καρκίνου (International Agency for Research on Cancer - IARC), ενώ οι βιολογικοί μεταβολίτες DMA (dimethylarsinic acid) και MMA monomethylarsonic acid θεωρούνται καρκινογόνοι για τον άνθρωπο. Εκτεταμένη έκθεση σε ανόργανο αρσενικό, έχει συσχετιστεί με εμφάνιση διαφόρων τύπων καρκίνου συμπεριλαμβανομένων του καρκίνου του δέρματος, των πνευμόνων και του ουροποιητικού συστήματος. Άλλες τοξικές επιδράσεις του αρσενικού είναι: Η αναστολή της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης (διακοπή της κύριας διαδικασίας παραγωγής ενέργειας μέσω της τριφωσφορικής αδενοσίνης ATP), ο σχηματισμός δραστικών μορφών οξυγόνου (ROS), η αναστολή παραγωγής ενζύμων όπως και οι γενετικές αλλαγές.

Η έκθεση σε iAs γίνεται μέσω του νερού από φυσικές γεωχημικές διεργασίες, ή κακές γεωργικές, μεταποιητικές, εξορυκτικές πρακτικές, αλλά και μέσω των τροφίμων που καλλιεργούνται σε μολυσμένα εδάφη όπως το ρύζι. Αρσενικό περιέχεται σε όλα τα θαλασσινά, το οποίο είτε απορροφάται απευθείας από το νερό (όπως συμβαίνει στα φύκη), είτε μέσω του διατροφικού κύκλου (στην θαλάσσια πανίδα). Παρ' όλο που στα φύκη προσδιορίζονται διάφορα είδη αρσενικού, η απόλυτη περιεκτικότητά τους σε αρσενικό δεν συνεπάγεται απαραίτητα σε κίνδυνο της υγείας, για το λόγο ότι το ανόργανο αρσενικό μετατρέπεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε οργανικές (μεθυλιωμένες) μορφές του.

Στα φύκη, το μεγαλύτερο μέρος ανόργανου αρσενικού μετασχηματίζεται σε αρσενοσάκχαρα (υδρογονάνθρακες που περιέχουν αρσενικό). Όμως, σε ορισμένες περιπτώσεις το ανόργανο αρσενικό εντοπίζεται σε ασυνήθιστα υψηλά επίπεδα, όπως στην περίπτωση του είδους hijiki (*Sargassum fusiforme*) με 60 μg / g ξηρού βάρους και 0,4-2,8 μg / g μαγειρεμένου. Ωστόσο, προκειμένου να θίξουμε το ζήτημα της τοξικότητας για τον άνθρωπο, θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας, τη χημική μορφή του iAs, το ποσοστό που απομένει μετά το μαγείρεμα και τον μεταβολισμό του As στο άτομο. Στην περίπτωση του είδους hijiki το 88,7–91,5% απομακρύνεται κατά το μαγείρεμα. Ακόμα, πραγματοποιήθηκε μελέτη όπου προσδιορίστηκε το ανόργανο As (III+V) που απορροφήθηκε κατά τη διάρκεια προσομοίωσης της γαστρικής πέψης του μαγειρεμένου hijiki, λαμβάνοντας υπόψιν πληροφορίες σχετικά με την μηνιαία κατανάλωση. Εκτιμήθηκε πως πρόσληψη iAs 1,1 μg/kg βάρους την εβδομάδα, θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντική αύξηση καρκίνου του δέρματος. Ωστόσο, δεν έχει οριστεί ακόμη από τον ΠΟΥ η ανεκτή εβδομαδιαία πρόσληψη iAs, μετά την κατάργηση της προηγούμενης, που ήταν 15 μg/kg βάρους την εβδομάδα. Απαιτείται επομένως διενέργεια περισσότερων ερευνών, ως προς τους κινδύνους που προκύπτουν για την υγεία του καταναλωτή από την πρόσληψη χαμηλών δόσεων iAs, όπως με την κατανάλωση καφέ φυκών που αποθηκεύουν iAs.

4.1.2 Μόλυβδος (Pb) και αλουμίνιο (Al)

Ο μόλυβδος και το αλουμίνιο δεν αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για τον ανθρώπινο οργανισμό. Συνεπώς, η πρόσληψη τους σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να προκαλέσει βλάβες στο νευρικό, σκελετικό, κυκλοφορικό, ενζυμικό και ανοσοποιητικό του σύστημα. Οι ευπαθείς ομάδες (παιδιά, έγκυες και ηλικιωμένοι) είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην έκθεση σε μόλυβδο. Μάλιστα, έχει σημαντικές επιπτώσεις στο δείκτη νοημοσύνης και στη φυσική ανάπτυξη των παιδιών. Όσον αφορά το αλουμίνιο, η τοξικότητά του σχετίζεται με τις

ιδιαίτερες χημικές του ιδιότητες. Έχει την ικανότητα να συνδέεται με τις φωσφορικές ομάδες του DNA ή του RNA, επηρεάζοντας την τοπολογία του DNA αλλά και τη μεταγραφή των γονιδίων. Φαίνεται ότι το Al αναστέλλει πληθώρα σημαντικών βιολογικών λειτουργιών καθώς επίσης ότι σχετίζεται και με νευροεκφυλιστικά νοσήματα. Δεν έχουν καθοριστεί από τους αρμόδιους φορείς ανώτατα επίπεδα παρουσίας αλουμινίου στα τρόφιμα, όμως ο ΠΟΥ συνιστά η εβδομαδιαία πρόσληψη να μην ξεπερνά τα 7 mg/kg. Τα έως τώρα δεδομένα δείχνουν ότι η παρουσία Al στα βρώσιμα φύκη κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (mg/g ξηρού βάρους) που δεν υπερβαίνουν τις συστάσεις του ΠΟΥ.

4.1.3 Υδράργυρος (Hg), Ιώδιο (I), Κάδμιο (Cd)

Μεταξύ άλλων, τα τοξικά μέταλλα έχουν συνδεθεί με ασθένειες όπως η νόσος Alzheimer και Parkinson. Συγκεκριμένα, ο υδράργυρος θεωρείται υπεύθυνος παράγοντας διάφορων διαταραχών όπως νευρολογικών, ανοσολογικών, καρδιακών, αναπαραγωγικών και γενετικών. Ο ΕΚ 396/2005 ορίζει ως ανώτατο όριο κατάλοιπων (ΑΟΚ) υδραργύρου για τα φύκη την τιμή των 0,01 mg/kg. Αναφορικά με το ιώδιο, έχει αναφερθεί ότι η κατανάλωση φυκών πλούσιων σε ιώδιο μπορεί να ενέχει κινδύνους εάν η περιεκτικότητά του ξεπερνά τα 20 μg ιωδίου/g ξηράς ουσίας. Η υπερβολική ποσότητα ιωδίου μπορεί να οδηγήσει σε υπερθυρεοειδισμό. Σε χώρες όπου τα φύκη αποτελούν παραδοσιακά μέρος της διατροφής, η εκτεταμένη κατανάλωση τους βρέθηκε να σχετίζεται με υπερθυρεοειδισμό και θυρεοειδίτιδα Hashimoto. Για αυτό, η Επιστημονική Επιτροπή Τροφίμων όρισε ως ανώτατο όριο για την πρόσληψη ιωδίου τα 600 μg ημερησίως για τους ενήλικες και τα 200 μg για παιδιά ηλικίας 1-3 ετών. Επίσης και το κάδμιο παρουσιάζει τοξικότητα. Ο μηχανισμός της τοξικής του δράσης στα φύκη και τα κυανοβακτήρια, είναι η ανασταλτική δράση των ενζύμων. Μερικά από τα ένζυμα που παρεμποδίζει, είναι η αλκαλική φωσφατάση (ALP), οι αφυδρογονάσες της αλκοόλης (καταβολίζουν την περίσσεια ισοπροπυλικής αλκοόλης), οι ανθρακικές ανυδράσεις (CAs) (καταλύουν τον μετασχηματισμό H₂O και CO₂ σε διττανθρακικά και ιόντα υδρογόνου). Ο ρόλος των ενζύμων, είναι σημαντικός στη διατήρηση της ισορροπίας οξέων-βάσεων των ιστών και των βιολογικών υγρών, η πεπτιδάση που εντοπίζεται στο υγρό του παγκρέατος και παρατείνει τη δράση της πεψίνης και της θρυψίνης κατά τη διάρκεια της πέψης και η αλδολάση που είναι σημαντική για το μεταβολισμό της φρουκτόζης.

Τα φύκη, στο πέρασμα των χρόνων, αποτελούν όλο και περισσότερο, μέρος της διατροφής των καταναλωτών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επειδή σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, τα φύκη φαίνεται να περιέχουν σημαντικές συγκεντρώσεις τοξικών ανόργανων αλάτων όπως αρσενικό, κάδμιο, ιώδιο, μόλυβδο και υδράργυρο, είναι αναγκαίο να εξετασθεί και να ποσοτικοποιηθεί η συμβολή τους στη συνολική έκθεση των καταναλωτών στις ουσίες αυτές. Για αυτό τον λόγο, θα πρέπει να καθοριστούν ανώτατα επιτρεπτά όρια ή να τροποποιηθούν τα ήδη υπάρχοντα και να ληφθούν μέτρα σχετικά με την κατανάλωση τέτοιων προϊόντων.

4.2 Προληπτική διαχείριση σε επίπεδο ασφάλειας

Τα βρώσιμα φύκη στις Η.Π.Α καλύπτονται από τον κανονισμό FSMA (Final Rule for Preventive Controls for Human Food) του FDA που περιλαμβάνει την Ορθή Βιομηχανική Πρακτική (Good Manufacturing Practice), την Ανάλυση Κινδύνου (Hazard Analysis) και στους προληπτικούς ελέγχους με βάση τον κίνδυνο (Risk-based Preventive Controls for Human

Food regulation). Αυτός ο κανονισμός αποσκοπεί στην διασφάλιση ασφαλούς παραγωγής, επεξεργασίας, συσκευασίας και αποθήκευσης τροφίμων για ανθρώπινη κατανάλωση στις Ηνωμένες Πολιτείες. Τα προγράμματα προληπτικών ελέγχων είναι δομημένα ώστε να λειτουργούν συνδυαστικά και να υποστηρίζονται από άλλα σχετικά όπως η ορθή γεωργική πρακτική, η ορθή πρακτική διακίνησης κ.λπ.), με στόχο τη διαχείριση της ασφάλειας των τροφίμων. Δεν περιλαμβάνουν μόνο ελέγχους στο πλαίσιο HACCP, αλλά και ελέγχους που σχετίζονται με αλλεργιογόνα, διαχείριση αποβλήτων, προμηθευτές και άλλους τομείς, που απαιτούν προληπτικό έλεγχο. Ορισμένα τρόφιμα που υπόκεινται στο HACCP όπως τα θαλασσινά (παράρτημα 123) και οι χυμοί (παράρτημα 120), σε κανονισμούς για κονσερβοποιημένα τρόφιμα χαμηλής οξύτητας όπως οι μικροβιολογικοί κίνδυνοι που εντάσσονται στο (παράρτημα 113), τα διατροφικά συμπληρώματα και τα αλκοολούχα ποτά στο (παράρτημα 111) , εξαιρούνται των προληπτικών ελέγχων. Ωστόσο, οι κανονισμοί του HACCP για τα θαλασσινά δεν συμπεριλαμβάνουν τα φύκη.

Η κατανάλωση φυκών σχετίζεται με μια σειρά από παράγοντες, οι οποίοι μπορεί εν δυνάμει να εμπεριέχουν κάποιους κινδύνους. Τέτοιοι παράγοντες είναι η απρόβλεπτη επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων στον βαθμό πρόσληψης τοξικών ανόργανων αλάτων (π.χ. η θερμοκρασία, η εποχή του έτους κ.λπ.), οι ομοιότητες μεταξύ των ειδών (όπου είναι δύσκολη η διάκριση εκείνων με υψηλά επίπεδα τοξικών αλάτων από εκείνα με χαμηλή περιεκτικότητα) και η χρήση γενικών όρων (π.χ. kelp ή seaweed) στη λίστα συστατικών των προϊόντων αντί για το επιστημονικό όνομα.

Ο κίνδυνος που μπορεί να προκύψει από την κατανάλωση φυκών, είναι η πρόσληψη απαραίτητων ή τοξικών ανόργανων αλάτων σε επίπεδα που ξεπερνούν τα ασφαλή όρια. Αυτοί οι κίνδυνοι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη ενός σχεδίου ασφάλειας για τα φύκη που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση. Η βάση του σχεδίου πρέπει να είναι οι προληπτικοί έλεγχοι, καθώς υπάρχει πιθανότητα μη ασφαλούς περιεκτικότητας, η παρουσία απαραίτητων ή τοξικών στοιχείων, όπως και η μη εξάλειψη ή μείωση της παρουσίας τους κατά την επεξεργασία τους, πριν την κατανάλωση. Στρατηγικές ελέγχου για τον συγκεκριμένο κίνδυνο, είναι ο προληπτικός έλεγχος της περιοχής, όπου πρόκειται να αναπτυχθούν τα φύκη, η χρήση εγκεκριμένων χημικών μεθόδων, για την ανίχνευση ανόργανων στοιχείων στα τρόφιμα (που θα εξασφαλίζουν την παρουσία ασφαλών επιπέδων τους) και τέλος η σωστή επισήμανση των προϊόντων φυκών, ή των προϊόντων που θα περιέχουν φύκη σαν συστατικό.

Βιβλιογραφία

Ξένη

Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25(2), 207–210.

Biological value, from Wikipedia, the free encyclopedia.

Campos, A. M., Matos, J., Afonso, C., Gomes, R., Bandarra, N. M., & Cardoso, C. (2018). Azorean macroalgae (*Petalonia binghamiae*, *Halopteris scoparia* and *Osmundea pinnatifida*) bioprospection: a study of fatty acid profiles and bioactivity. *International Journal of Food Science & Technology*.

Choudhary, A., Naughton, L., Montánchez, I., Dobson, A., & Rai, D. (2017). Current Status and Future Prospects of Marine Natural Products (MNPs) as Antimicrobials. *Marine Drugs*, 15(9), 272.

Devina Lobine, Kannan R. R. Rengasamy & Mohamad Fawzi Mahomoodally (2021). Functional foods and bioactive ingredients harnessed from the ocean: current status and future perspectives.

García-Garibay, M., Gómez-Ruiz, L., Cruz-Guerrero, A. E., & Bárzana, E. (2014). SINGLE CELL PROTEIN | The Algae. *Encyclopedia of Food Microbiology*, 425–430.

Gomez-Gutierrez, C. M., Guerra-Rivas, G., Soria-Mercado, I. E., & Ayala-Sánchez, N. E. (2011). Marine Edible Algae as Disease Preventers. *Advances in Food and Nutrition Research*, 29–39.

Kim, S.-K., & Pangestuti, R. (2011). Potential Role of Marine Algae on Female Health, Beauty, and Longevity. *Advances in Food and Nutrition Research*, 41–55.

Lafarga, T., Ación-Fernández, F. G., & Garcia-Vaquero, M. (2020). Bioactive peptides and carbohydrates from seaweed for food applications: Natural occurrence, isolation, purification, and identification. *Algal Research*, 48, 101909.

Lozano Muñoz, I., & Díaz, N. F. (2020). Minerals in edible seaweed: health benefits and food safety issues. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–16.

Mišurcová, L., Ambrožová, J., & Samek, D. (2011). Seaweed Lipids as Nutraceuticals. *Advances in Food and Nutrition Research*, 339–355.

Miyashita, K., Mikami, N., & Hosokawa, M. (2013). Chemical and nutritional characteristics of brown seaweed lipids: A review. *Journal of Functional Foods*, 5(4), 1507–1517.

Peinado, I., Girón, J., Koutsidis, G., & Ames, J. M. (2014). Chemical composition, antioxidant activity and sensory evaluation of five different species of brown edible seaweeds. *Food Research International*, 66, 36–44.

Pérez-Lloréns, J. L. (2020). Microalgae: from staple foodstuff to avant-garde cuisine. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 100221.

Rajauria G., Cornish L., Ometto F., Msuya F. E., & Villa R. (2015). Identification and selection of algae for food, feed, and fuel applications. *Seaweed Sustainability*, 315–345.

Rioux, L.-E., & Turgeon, S. L. (2015). Seaweed carbohydrates. *Seaweed Sustainability*, 141–192.

Vymazal, J. (1987). Toxicity and accumulation of cadmium with respect to algae and cyanobacteria: A review. *Environmental Toxicology & Water Quality*, 2(4), 387–415.

Wells, M. L., Potin, P., Craigie, J. S., Raven, J. A., Merchant, S. S., Helliwell, K. E., ... Brawley, S. H. (2016). Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *Journal of Applied Phycology*, 29(2), 949–982.

Yaich, H., Garna, H., Besbes, S., Paquot, M., Blecker, C., & Attia, H. (2011). Chemical composition and functional properties of *Ulva lactuca* seaweed collected in Tunisia. *Food Chemistry*, 128(4), 895–901.

Ελληνική

Βουλτσιάδου, Ε., Αμπατζόπουλος, Θ., Αντωνοπούλου, Ε., Γκάνιας, Κ., Γκέλης, Σ., Στάικου, Α., Τριανταφυλλίδης, Α., 2015. Υδατοκαλλιέργειες. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/5083>.

Γεωργούλα Γ. (2013). Απομόνωση πολυσακχαριτών από καφέ μακροφύκη Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τμήμα Χημικών Μηχανικών. Τομέας Σύνθεσης & Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διαδικασιών. Εργαστήριο Βιοτεχνολογίας.

Γιγή Β. (2009). Μελέτη επιλεγμένων μακροφυκών ως βιοδεικτών οικολογικής ποιότητας (WFD 2000/60): μια οικο-φυσιολογική προσέγγιση. Μεταπτυχιακή Εργασία. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Τμήμα Επιστήμης της Θάλασσας.

Ελληνική Φυκολογική Εταιρία (ΕΛ.Φ.Ε.), 2008. Μια βουτιά, μια ματιά στους κήπους του νερού γνωρίζοντας τα φύκη. Εκδόσεις Σταμούλη.

Ζάχου Δ. (2007). Τα φύκια στον τομέα της αισθητικής, κοσμετολογίας και διατροφής. Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης. Σχολή επαγγελματιών υγείας και πρόνοιας. Τμήμα Αισθητικής-Κοσμητολογίας.

Ιντζέ Σ. (2020). Διπλωματική εργασία. Βιβλιογραφική ανασκόπηση της χρήσης μακροφυκών για τον καθαρισμό του θαλασσινού νερού. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Διαχείρισης Αποβλήτων.

Καρακαλπάκης Ε., Σταγάκη Μ., Τύρου Λ.-Α (2020). Πτυχιακή εργασία. Συγκριτική με άλλα μικροφύκη καλλιέργεια του αλοανθεκτικού χλωροφύκου *Asteromonas gracilis* και χρήση του ως θρεπτικό υπόστρωμα ηθμοφάγων οργανισμών. Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Ζωικής Παραγωγής Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών.

Κοκκίνης Γ., 2012. Μεταπτυχιακή διατριβή. Προσδιορισμός ενώσεων αρσενικού σε θαλάσσια μακροάλη από το Θερμαϊκό κόλπο χρησιμοποιώντας υγρή χρωματογραφία με φασματομετρία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος. Πανεπιστήμιο Κρήτης, τμήμα χημείας, μεταπτυχιακό δίπλωμα ειδίκευσης, Π.Μ.Σ επιστήμες & μηχανική περιβάλλοντος.

Κολιοπάνος Φ. (2015). Πτυχιακή εργασία. Η χρήση των φυκιών στην διατροφή των παραγωγικών ζώων. Α.Τ.Ε.Ι. Ηπείρου, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Τμήμα Ζωικής Παραγωγής.

Μάρκου, Γ., Τζοβενής, Ι., Νερατζής, Η. (2013). Μικροφύκη: Καλλιέργεια και Βιομηχανικές Εφαρμογές. e-Περιοδικό Επιστήμης και Τεχνολογίας. 8: 9-22.

Μεσολόγγι, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, τμήμα τεχνολογίας αλιείας- υδατοκαλλιεργειών, εργαστήριο καλλιέργειας πλαγκτού. (ηλεκτρονικές σημειώσεις/ διαφάνειες).

Τζανής Θ. Κ. (2018). Μεταπτυχιακή Εργασία. Μελέτη Νέων Μεθόδων Καλλιεργειών Για Την Παραγωγή Βιομάζας Μικροφυκών. Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών “ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ”. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Χώτος, 2018. Βιολογία των φυκών. Μεσολόγγι, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, τμήμα τεχνολογίας αλιείας- υδατοκαλλιεργειών, εργαστήριο καλλιέργειας πλαγκτού. (ηλεκτρονικές σημειώσεις/ διαφάνειες).

Χώτος, 2018. Φυκολογία- Αναπαραγωγή των Φυκών. Βλαστητική, αγενής και εγγενής αναπαραγωγή των φυκών.

Διαδίκτυο

https://www.seaweed.ie/irish_seaweed_contacts/doc/Filieres_12p_UK.pdf.

Nori - Wikipedia

πηγές πινάκων

πίνακας 1	Χώτος Ν. Γεώργιος, 2018. Βιολογία των φυκών.
πίνακας 2	Mišurcová, L., Ambrožová, J., & Samek, D., 2011
πίνακας 3	Becker E. W., 2007
πίνακας 4	Becker E. W., 2007
πίνακας 5	Rioux, L.-E. & Turgeon, S. L., 2015
πίνακας 6	Lozano Muñoz I., & Díaz N. F., 2020
πίνακας 7	Gomez-Gutierrez et al., 2011
πίνακας 8	Kini, S., Divyashree, M., Mani, M. K., & Mamatha, B. S., 2020
πίνακας 9	Lozano Muñoz, I., & Díaz, N. F., 2020

πηγές εικόνων

εικόνα 1	Χώτος Ν. Γεώργιος, 2018. Βιολογία των φυκών.
εικόνα 2	https://en.wikipedia.org/wiki/Microalgae#Characteristics_and_uses
εικόνα 3	Χώτος Ν. Γεώργιος, 2018. Βιολογία των φυκών.
εικόνα 4	Rioux, L.-E. & Turgeon, S. L., 2015
εικόνα 5	Rioux, L.-E. & Turgeon, S. L., 2015