



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Επιστημών Τροφίμων
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η χρήση της Ασταξανθίνης στα συμπληρώματα διατροφής

MSc Thesis

Uses of Astaxanthin in food supplements



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ/NAME OF STUDENT

Αποστολοπούλου Βασιλική-Παναγιώτα
Apostolopoulou Vasiliki-Panagiota

ΟΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ/NAME OF THE SUPERVISOR

Κανέλλου Αναστασία
Kanellou Anastasia

ΑΙΓΑΛΕΩ/AIGALEO 2023



Faculty of Food Sciences
Department of Food Science and Technology

Master of Science
FOOD INNOVATION, QUALITY AND SAFETY

MSc THESIS

Uses of astaxanthin in food supplements

Apostolopoulou Vasiliki-Panagiota

Student ID: 21003

Apostolopoulou.valia@gmail.com

SUPERVISOR

Kanellou Anastasia

AIGALEO 2023

Έγινε δεκτή

Ο Διευθυντής του ΠΜΣ: ΣΙΝΑΝΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΑ

Οι υπογράφοντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία (master thesis) με τίτλο «Η χρήση της Ασταξανθίνης στα Συμπληρώματα Διατροφής» που παρουσιάσθηκε από τον ή την Αποστολοπούλου Βασιλική-Παναγιώτα, υποψηφίου για τον μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών στην ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

Ημερομηνία

ΚΑΝΕΛΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

Ημερομηνία

ΤΣΑΚΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Ημερομηνία

ΧΟΥΧΟΥΛΑ ΔΗΜΗΤΡΑ

Δήλωση περί λογοκλοπής/Copyright

Έχοντας πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικής ιδιοκτησίας, δηλώνω ότι είμαι αποκλειστική συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δηλώνω, επίσης, ότι αναλαμβάνω όλες τις συνέπειες, όπως αυτές νομίμως ορίζονται, στην περίπτωση που διαπιστωθεί διαχρονικά ότι η εργασία μου αυτή ή τμήμα αυτής αποτελεί προϊόν λογοκλοπής.

Αποστολοπούλου Βασιλική-Παναγιώτα

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής μου. Χωρίς την ενθάρρυνση και τη βοήθειά τους, δεν θα τα κατάφερνα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή αγάπη, ενθάρρυνση και πίστη στις ικανότητές μου. Είμαι ευγνώμων στους φίλους και τους συναδέλφους μου και το αγόρι μου, που μου παρείχαν συνεχή υποστήριξη και ενθάρρυνση. Που υπενθύμιζαν συνεχώς πως είμαι ικανή για όλα και μπορώ να τα καταφέρω.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την εργοδότη μου Κατερίνα Βασιλάτου, μέσω της υποστήριξης της, μου υπενθυμίζει καθημερινά πως έχω πετύχει και θα πετύχω πολλά και πως πρέπει να πιστεύω στον αυτό μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στην υπεύθυνη καθηγήτρια της εργασίας μου, Κανέλλου Αναστασία, για την αμέριστη και πολύτιμη βοήθεια της κατά την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους τους ερευνητές, μελετητές και συγγραφείς των οποίων το έργο αναφέρεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Περίληψη

Η ασταξανθίνη είναι μια ισχυρή αντιοξειδωτική καροτενοειδής χρωστική ουσία που προέρχεται από μικροφύκη. Έχει κερδίσει σημαντική προσοχή για τα πιθανά οφέλη για την υγεία όταν χρησιμοποιείται ως συμπλήρωμα διατροφής. Η παρακάτω εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των διαφόρων χρήσεων της ασταξανθίνης σε συμπληρώματα διατροφής, εστιάζοντας στις αντιοξειδωτικές, αντιφλεγμονώδεις και ευεργετικές για την υγεία ιδιότητές της. Τα διαθέσιμα επιστημονικά στοιχεία υποδηλώνουν ότι η συμπλήρωση της διατροφής με ασταξανθίνη, παρουσιάζει θετικά αποτελέσματα στην ανθρώπινη υγεία, καθιστώντας την ένα δημοφιλές καινοτόμο συστατικό σε συμπληρώματα διατροφής.

Ο κύριος μηχανισμός δράσης της ασταξανθίνης είναι η εξαιρετική αντιοξειδωτική της δράση. Επιδεικνύει ιδιαίτερη ικανότητα δέσμευσης ελεύθερων ριζών σε σύγκριση με άλλα αντιοξειδωτικά, συμπεριλαμβανομένης της βιταμίνης C και της βιταμίνης E. Αυτή η ισχυρή αντιοξειδωτική δράση επιτρέπει στην ασταξανθίνη να εξουδετερώνει το οξειδωτικό στρες, προστατεύοντας τα κύτταρα και τους ιστούς από βλάβες που προκαλούνται από τις ελεύθερες ρίζες, μειώνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης ασθενειών που σχετίζονται με το οξειδωτικό στρες.

Εκτός από τα αντιοξειδωτικά της οφέλη, η ασταξανθίνη παρουσιάζει και αντιφλεγμονώδεις ιδιότητες. Αναστέλλει την παραγωγή φλεγμονωδών μεσολαβητών και ρυθμίζει διάφορες οδούς σηματοδότησης που εμπλέκονται στη φλεγμονή. Αυτή η αντιφλεγμονώδης δράση καθιστά την ασταξανθίνη ένα πολλά υποσχόμενο συμπλήρωμα για άτομα με φλεγμονώδεις παθήσεις όπως η αρθρίτιδα.

Η αγορά ασταξανθίνης έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξανόμενης ευαισθητοποίησης των καταναλωτών για τα πιθανά οφέλη της για την υγεία και της αυξανόμενης ζήτησης για φυσικά συστατικά. Η βιομηχανία τροφίμων και ποτών έχει αναγνωρίσει την ασταξανθίνη ως ένα πολύτιμο λειτουργικό συστατικό, ενσωματώνοντας την σε διάφορα προϊόντα όπως ενεργειακά ποτά, συμπληρώματα και λειτουργικά τρόφιμα. Η βιομηχανία αισθητικής και περιποίησης δέρματος έχει επίσης εκτιμήσει την ασταξανθίνη για τα οφέλη της κατά της γήρανσης και της υγείας του δέρματος, οδηγώντας στην ανάπτυξη μιας ευρείας σειράς καλλυντικών προϊόντων που περιέχουν ασταξανθίνη.

Η αγορά ασταξανθίνης αναμένεται να συνεχίσει να επεκτείνεται λόγω των συνεχιζόμενων προσπαθειών έρευνας και ανάπτυξης. Οι επιστήμονες εξερευνούν νέες μεθόδους εκχύλισης, βελτιώνουν τις τεχνικές παραγωγής και διερευνούν νέες εφαρμογές για την ασταξανθίνη σε τομείς όπως η αθλητική διατροφή, η υγεία των ματιών και η νευροπροστασία.

Abstract

Astaxanthin is a potent antioxidant carotenoid pigment derived from microalgae. It has garnered considerable attention for its potential health benefits when used as a dietary supplement. This paper provides a comprehensive overview of the various uses of astaxanthin in dietary supplements, focusing on its antioxidant, anti-inflammatory, and health-promoting properties. Available scientific evidence suggests that supplementing the diet with astaxanthin has positive effects on human health, making it a popular and innovative ingredient in nutritional supplements.

The primary mechanism of action of astaxanthin is its excellent antioxidant activity. It exhibits superior free radical scavenging capacity compared to other antioxidants, including vitamin C and vitamin E. This potent antioxidant activity allows astaxanthin to neutralize oxidative stress, thereby protecting cells and tissues from damage caused by free radicals and reducing the risk of diseases related to oxidative stress.

In addition to its antioxidant benefits, astaxanthin also possesses anti-inflammatory properties. It inhibits the production of inflammatory mediators and regulates various signalling pathways involved in inflammation. This anti-inflammatory effect makes astaxanthin a promising supplement for individuals with inflammatory conditions such as arthritis.

The astaxanthin market has experienced significant growth in recent years due to the growing consumer awareness of its potential health benefits and the increasing demand for natural ingredients. The food and beverage industry has recognized astaxanthin as a valuable functional ingredient, incorporating it into various products such as energy drinks, supplements, and functional foods. The beauty and skincare industry has also acknowledged the value of astaxanthin for its anti-ageing and skin health benefits, leading to the development of a wide range of cosmetic products containing astaxanthin.

The astaxanthin market is expected to continue expanding due to ongoing research and development efforts. Scientists are exploring new extraction methods, improving production techniques, and investigating new applications for astaxanthin in areas such as sports nutrition, eye health, and neuroprotection.

Περιεχόμενα

Δήλωση περί λογοκλοπής/Copyright	iii
Ευχαριστίες.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κεφάλαιο 1. Συμπληρώματα διατροφής	1
1.1 Ορισμός Συμπληρωμάτων Διατροφής	1
1.2 Γενικές κατηγορίες συμπληρωμάτων διατροφής	1
1.3 Συμπληρώματα Διατροφής ταξινομημένα κατά Σύθεση και Δράση τους.....	2
1.4 Πληθυσμιακές Ομάδες στις οποίες απευθύνονται τα συμπληρώματα διατροφής	2
1.5 Διασφάλιση ποιότητας των Συμπληρωμάτων Διατροφής στην Ελλάδα	3
1.5.1 Κανονιστικό Πλαίσιο	3
1.5.2 Διαδικασία κοινοποίησης συμπληρώματος διατροφής.....	4
1.5.3 Παρακολούθηση ασφάλειας και αναφορά ανεπιθύμητων συμβάντων.....	4
1.5.4 Μέτρα ποιοτικού ελέγχου	4
1.6 Επισήμανση συμπληρωμάτων διατροφής.....	5
1.6.1 Νομικές απαιτήσεις για ετικέτες συμπληρωμάτων διατροφής στην Ελλάδα	5
1.7 Πωλήσεις Συμπληρωμάτων διατροφής	7
1.7.1 Μέγεθος και ανάπτυξη αγοράς	7
Κεφάλαιο 2. Ασταξανθίνη	9
2.1 Τι είναι η Ασταξανθίνη;	9
2.2 Βιοδιαθεσιμότητα και Βιοκινητική της Ασταξανθίνης.....	11
2.3 Βιοκινητική	12
2.4 Απορρόφηση	13
2.5 Μεταφορά	13
2.6 Μεταβολισμός.....	14
2.7 Απέκκριση.....	14
2.8 Πηγές Ασταξανθίνης.....	14
2.8.1 Συνθετική Ασταξανθίνη	14
2.8.2 Μικροφύκη	14

2.8.3 Μαγιά (Yeast)	15
2.8.4 Σολομός και άλλα ψάρια.....	15
2.8.5 Κριλ	15
2.8.6 Γαρίδες και άλλα καρκινοειδή	16
2.8.7 Υποπροϊόντα καρκινοειδών	16
2.8.8 Μύκητες.....	16
2.8.9 Μαγιά κόκκινου ρυζιού	16
2.8.10 Φυτά	17
2.9 Δομή Ασταξανθίνης	18
2.10 Ευρωπαϊκή και Ελληνική νομοθεσία για την Ασταξανθίνη	20
2.11 Παρενέργειες και ασφαλής δόση Ασταξανθίνης	21
2.12 Ιδιότητες της Ασταξανθίνης	22
2.12.1 Αντιοξειδωτική Ιδιότητα.....	22
2.12.2 Αντιφλεγμονώδης.....	24
2.12.3 Καρδιαγγειακή υγεία	25
2.12.4 Υγεία των ματιών.....	26
2.12.5 Υγεία του δέρματος.....	27
2.12.6 Υποστήριξη του ανοσοποιητικού συστήματος	28
2.12.7 Απόδοση άσκησης.....	28
2.12.8 Γνωστική λειτουργία	29
2.12.9 Υγεία των αρθρώσεων	30
2.12.10 Νευροεκφυλιστικές διαταραχές	30
2.12.11 Πρόληψη του καρκίνου	31
2.12.12 Διαβητικές επιπλοκές.....	31
2.12.13 Υγεία του ήπατος.....	31
Κεφάλαιο 3. Συμπεράσματα	32
Βιβλιογραφία.....	33

Κεφάλαιο 1. Συμπληρώματα διατροφής

1.1 Ορισμός Συμπληρωμάτων Διατροφής

Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία (Οδηγία 2002/46/ΕΚ), ως συμπλήρωμα διατροφής ορίζεται το τρόφιμο που προορίζεται να συμπληρώσει την καθημερινή διατροφή και είναι μια συμπυκνωμένη πηγή θρεπτικών ουσιών ή άλλων ουσιών με θρεπτική ή φυσιολογική επίδραση, και προορίζεται να καταναλωθεί μόνο του ή σε συνδυασμό. Τα συμπληρώματα διατροφής πωλούνται σε δοσολογικές μορφές όπως είναι οι κάψουλες, οι παστίλιες, τα δισκία, τα χάπια και άλλες παρόμοιες μορφές, καθώς και τα φακελάκια σκόνης, οι αμπούλες υγρών προϊόντων, τα σταγονομετρικά μπουκάλια και άλλες παρόμοιες μορφές υγρών και σκονών, που προορίζονται για λήψη σε προκαθορισμένες δόσεις. (eur-lex.europa.eu, 2002).

Σύμφωνα με τον FDA (Food and Drug Administration), τα συμπληρώματα διατροφής είναι προϊόντα που προορίζονται για κατάποση και περιέχουν «θρεπτικά συστατικά» που σκοπός τους είναι να συμπληρώσουν και να ενισχύσουν τη θρεπτική αξία μιας διαίτας. Αυτό το θρεπτικό συστατικό μπορεί να είναι ένα μόνο συστατικό ή ένας συνδυασμός των παρακάτω διαφορετικών συστατικών:

- βιταμίνες
- μέταλλα
- φυτικά εκχυλίσματα
- αμινοξέα
- βότανα
- Συμπυκνώματα ή μεταβολίτες

Γενικά, τα συμπληρώματα διατροφής ορίζονται τα διατροφικά προϊόντα αρμοδιότητας του ΕΟΦ, που διατίθενται στην αγορά με σκοπό τη συμπλήρωση της καθημερινής διατροφής και αποτελούν συμπυκνωμένες πηγές θρεπτικών συστατικών (π.χ. βιταμίνες και ιχνοστοιχεία) ή άλλες ουσίες με θρεπτικές ή φυσιολογικές επιδράσεις (π.χ. βρώσιμα φυτικά εκχυλίσματα και άλλα συστατικά φυσικής προέλευσης και θρεπτικά συστατικά όπως βιταμίνες, μέταλλα, αμινοξέα, πρωτεΐνες, αντιοξειδωτικά), μόνα τους ή σε συνδυασμό και διατίθενται στο εμπόριο σε δοσολογικές μορφές (κάψουλες, δισκία, φακελάκια σκόνης, υγρές αμπούλες), φιαλίδια με σταγονόμετρο κ.λπ.) και προορίζονται να ληφθούν σε προκαθορισμένες ποσότητες.

1.2 Γενικές κατηγορίες συμπληρωμάτων διατροφής

Σύμφωνα με τον ΕΟΦ, τα συμπληρώματα διατροφής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση τη χρήση για την οποία προορίζονται:

- Συμπληρώματα Διατροφής: Πρόκειται για προϊόντα διατροφής που προορίζονται να συμπληρώσουν την καθημερινή διατροφή.
- Τροφές για ειδικές δίαιτες: λόγω της ειδικής τους σύνθεσης, αυτά τα σκευάσματα έχουν σχεδιαστεί για ειδικές δίαιτες συγκεκριμένων ομάδων ανθρώπων, για παράδειγμα για υγιή βρέφη, ειδικές ομάδες ατόμων με μεταβολικές διαταραχές ή άτομα σε ειδικές φυσιολογικές καταστάσεις.

1.3 Συμπληρώματα Διατροφής ταξινομημένα κατά Σύσταση και Δράση τους

Η έννοια του συμπληρώματος διατροφής αποτελεί μια ευρεία έννοια και μπορεί να περιλαμβάνει πολλά είδη σκευασμάτων που περιέχουν περισσότερα από ένα είδη συστατικών. Σε γενικές γραμμές, θα μπορούσαν να διακριθούν οι ακόλουθες κατηγορίες συστατικών:

- Βιταμίνες και μέταλλα (μακροστοιχεία και ιχνοστοιχεία), μόνα τους ή σε διάφορους συνδυασμούς.
- Πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λίπη σε διάφορες μορφές (σκόνη, σε δισκίο ή σε υγρή μορφή), μόνα τους ή σε συνδυασμό μεταξύ τους και σε συνδυασμό με την παραπάνω κατηγορία.
- Μίγμα αμινοξέων.
- Μίγμα λιπαρών οξέων.
- Ένζυμα, μεταβολίτες και φυτικά εκχυλίσματα
- Συμπληρώματα υδατανθράκων (όπως αθλητικά ποτά) με ή χωρίς ηλεκτρολύτες και βιταμίνες.
- Διάφορες μορφές υποκατάστατων γευμάτων.
- Συστατικά τροφών ή τροφές, όπως βασιλικός πολτός, γύρη, μαγιά μύρας, φυτικές ίνες, σκόρδο, φύκια κ.α.
- Διάφορα αφεψήματα από βότανα
- Συμπληρώματα ρύθμισης του σωματικού βάρους
- Συστατικά όπως βασιλικός πολτός, φυτικές ίνες, γύρη, σκόρδο, φύκια κ.α.



Εικόνα 1: (Grebaw, 2023)

1.4 Πληθυσμιακές Ομάδες στις οποίες απευθύνονται τα συμπληρώματα διατροφής

Τα συμπληρώματα διατροφής θα μπορούσαν να ευνοήσουν κυρίως στις παρακάτω πληθυσμιακές ομάδες:

- Άτομα που ακολουθούν μια πολύ αυστηρή δίαιτα χαμηλής περιεκτικότητας σε λιπαρά μπορεί να έχουν έλλειψη σε ορισμένες λιποδιαλυτές βιταμίνες όπως είναι οι βιταμίνες A, D, E και K.
- Άτομα σε χρόνιες περιορισμένες δίαιτες, όπως είναι η χορτοφαγική διατροφή, μπορεί να χρειαστεί να λάβουν συμπληρώματα διατροφής (π.χ. πολυβιταμίνες).

- Οι καπνιστές χρειάζονται διπλάσια ποσότητα βιταμίνης C από τους μη καπνιστές και συχνά χρειάζεται να λαμβάνουν συμπληρώματα της συγκεκριμένης βιταμίνης.
- Γυναίκες κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης, και κατά την διάρκεια του θηλασμού, μπορεί να χρειαστεί να λαμβάνουν συγκεκριμένα συμπληρώματα διατροφής (π.χ. ασβέστιο, φολικό οξύ, σίδηρος).
- Άτομα με προβλήματα υγείας, όπως αλλεργίες.
- Άτομα που δεν μπορούν ή δεν θέλουν να τρώνε ορισμένα τρόφιμα, όπως για παράδειγμα γαλακτοκομικά προϊόντα.
- Οι ασθενείς που αναρρώνουν από ασθένεια ή χειρουργική επέμβαση, ενδέχεται να μην είναι σε θέση να λάβουν επαρκείς βιταμίνες ή ιχνοστοιχεία μέσω της διατροφής λόγω περιορισμένης πρόσληψης τροφής.
- Έλλειψη βιταμινών, κυρίως D, E και μετάλλων, κυρίως σεληνίου, ασβεστίου, ψευδαργύρου, παρατηρείται στους ηλικιωμένους, συνήθως λόγω περιορισμένης πρόσληψης τροφής.

Σε γενικές γραμμές παρακάτω εμφανίζονται οι κατηγορίες ατόμων που θα μπορούσε να ωφελήσει η κατανάλωση συμπληρωμάτων διατροφής:

- νεογέννητα
- χορτοφάγοι
- παιδιά και ενήλικες σε δίαιτα χαμηλών θερμίδων λόγω παχυσαρκίας
- άτομα που καταναλώνουν φάρμακα τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε θρεπτικές ελλείψεις
- ασθενείς με διατροφικές διαταραχές
- υποσιτισμένα άτομα
- γυναίκες σε ενδιαφέρουσα και γυναίκες που θηλάζουν
- άτομα με μειωμένη απορρόφηση θρεπτικών συστατικών λόγω χρόνιων παθήσεων
- άτομα που ασκούνται έντονα
- ηλικιωμένοι

1.5 Διασφάλιση ποιότητας των Συμπληρωμάτων Διατροφής στην Ελλάδα

Καθώς η δημοτικότητα αυτών των προϊόντων συνεχίζει να αυξάνεται, η διασφάλιση της ποιότητας και η κατανόηση της ελληνικής νομοθεσίας γύρω από αυτά είναι πρωταρχικής σημασίας (food.ec.europa.eu”).

1.5.1 Κανονιστικό Πλαίσιο

Η Ελλάδα έχει θεσπίσει ένα καθιερωμένο ρυθμιστικό πλαίσιο για να διέπει την ασφάλεια των συμπληρωμάτων διατροφής. Η πρωτογενής νομοθεσία που διέπει αυτά τα προϊόντα είναι ο Ελληνικός Κώδικας Τροφίμων, ο οποίος παρέχει οδηγίες για την επισήμανση, τη σύνθεση και τις απαιτήσεις ασφάλειας. Ο Κώδικας διασφαλίζει ότι τα συμπληρώματα διατροφής πληρούν συγκεκριμένα πρότυπα και φέρουν την κατάλληλη επισήμανση για να ενημερώνουν τους καταναλωτές σχετικά με το περιεχόμενό τους. Επιπλέον, ο Εθνικός Ορ-

γανισμός Φαρμάκων (ΕΟΦ) είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση και την εξουσιοδότηση της κυκλοφορίας των συμπληρωμάτων διατροφής, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς ασφαλείας (“ food.ec.europa.eu”).

1.5.2 Διαδικασία κοινοποίησης συμπληρώματος διατροφής

Για τη διασφάλιση της ποιότητας και της αποτελεσματικότητας των συμπληρωμάτων διατροφής στην Ελλάδα, εφαρμόζεται μια διαδικασία γνωστοποίησης. Οι εταιρείες που ζητούν άδεια κυκλοφορίας για τα προϊόντα τους πρέπει να υποβάλουν ολοκληρωμένο φάκελο στον ΕΟΦ, με πληροφορίες για τη σύνθεση, την ασφάλεια και την επισήμανση του προϊόντος. Ο ΕΟΦ αξιολογεί τα παρεχόμενα επιστημονικά δεδομένα, αξιολογώντας το προφίλ ασφαλείας του προϊόντος και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς.

1.5.3 Παρακολούθηση ασφαλείας και αναφορά ανεπιθύμητων συμβάντων

Η παρακολούθηση της ασφαλείας των συμπληρωμάτων διατροφής μετά την είσοδό τους στην αγορά είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό πιθανών κινδύνων και ανεπιθύμητων ενεργειών και τη λήψη κατάλληλων μέτρων. Στην Ελλάδα, υπάρχουν συστήματα επιτήρησης μετά την κυκλοφορία για τη συλλογή δεδομένων ασφαλείας και τον εντοπισμό ανεπιθύμητων ενεργειών που σχετίζονται με τα συμπληρώματα διατροφής. Επαγγελματίες υγείας, κατασκευαστές και καταναλωτές μπορούν να αναφέρουν τυχόν αρνητικές επιπτώσεις ή ύποπτα προβλήματα ποιότητας στον ΕΟΦ. Τα δεδομένα που συλλέγονται αναλύονται και έπειτα εφαρμόζονται κατάλληλα ρυθμιστικά μέτρα, συμπεριλαμβανομένων των ανακλήσεων προϊόντων, των αλλαγών στην επισήμανση ή ακόμη και της απόσυρσης από την αγορά, εάν είναι απαραίτητο (“Food supplements,” n.d.).

1.5.4 Μέτρα ποιοτικού ελέγχου

Η διατήρηση προτύπων υψηλής ποιότητας είναι επίσης πολύ σημαντική για τη διασφάλιση της διασφάλισης ποιότητας των συμπληρωμάτων διατροφής. Η Ελλάδα έχει θεσπίσει αυστηρά μέτρα ποιοτικού ελέγχου για την παρακολούθηση της κατασκευής, της συσκευασίας και της διανομής αυτών των προϊόντων. Οι κατευθυντήριες γραμμές για τις καλές πρακτικές παραγωγής (Good Manufacturing Practice, GMP) ακολουθούνται από τους κατασκευαστές, καλύπτοντας τομείς όπως η προμήθεια πρώτων υλών, οι διαδικασίες παραγωγής, τα πρότυπα υγιεινής και οι δοκιμές ποιοτικού ελέγχου. Οι τακτικοί έλεγχοι από τον ΕΟΦ και η τήρηση των προτύπων GMP συμβάλλουν στη διασφάλιση ποιότητας ότι τα συμπληρώματα διατροφής πληρούν τις απαραίτητες απαιτήσεις διασφάλισης ποιότητας.

Παρά το ρυθμιστικό πλαίσιο και τα μέτρα ποιοτικού ελέγχου, μπορεί να προκύψουν προκλήσεις για τη διασφάλιση της ασφαλείας των συμπληρωμάτων διατροφής στην Ελλάδα. Μια πρόκληση είναι η πιθανότητα εσφαλμένης επισήμανσης προϊόντων ή ισχυρισμών, που μπορεί να παραπλανήσουν τους καταναλωτές σχετικά με τα οφέλη ή τους κινδύνους του προϊόντος. Η νόθευση, η παρουσία μη εγκεκριμένων συστατικών και η πώληση παραποιημένων προϊόντων αποτελούν άλλες ανησυχίες. Οι αυστηρότερες κυρώσεις για τη μη συμμόρφωση και ο βελτιωμένος συντονισμός μεταξύ των ρυθμιστικών φορέων και των υπηρεσιών επιβολής του νόμου συμβάλλουν στον μετριασμό αυτών των προκλήσεων.

1.6 Επισήμανση συμπληρωμάτων διατροφής

Η επισήμανση των συμπληρωμάτων διατροφής πρέπει να συμμορφώνεται με την Οδηγία για τα τρόφιμα 2002/46/EK και τις επακόλουθες τροποποιήσεις της σχετικά με την επισήμανση, την παρουσίαση και τη διαφήμιση, καθώς και με τις νέες διατάξεις του κανονισμού για τα συμπληρώματα διατροφής.

Για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των καταναλωτών, οι ελληνικοί κανονισμοί επιβάλλουν την ακριβή σήμανση των συμπληρωμάτων διατροφής. Οι ετικέτες παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση του προϊόντος, τις οδηγίες δοσολογίας και τα πιθανά οφέλη για την υγεία ("Directive 2004/27/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004," 2009).

1.6.1 Νομικές απαιτήσεις για ετικέτες συμπληρωμάτων διατροφής στην Ελλάδα

Η επισήμανση των συμπληρωμάτων διατροφής στην Ελλάδα διέπεται από την εθνική νομοθεσία και τους κανονισμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Το πρωτογενές ρυθμιστικό πλαίσιο περιλαμβάνει την ελληνική νομοθεσία για τα τρόφιμα, η οποία ευθυγραμμίζεται με τις οδηγίες της ΕΕ, όπως η οδηγία για τα συμπληρώματα διατροφής (2002/46/EK). Οι κανονισμοί αυτοί καθορίζουν τις υποχρεωτικές πληροφορίες που πρέπει να υπάρχουν στις ετικέτες των συμπληρωμάτων διατροφής που πωλούνται στην Ελλάδα:

- a) Όνομα και κατηγορία προϊόντος: Η ετικέτα πρέπει να αναφέρει σαφώς το όνομα και την κατηγορία του προϊόντος, όπως "συμπλήρωμα διατροφής".
- b) Συστατικά: Όλα τα συστατικά, συμπεριλαμβανομένων των πρόσθετων, πρέπει να αναγράφονται, με κάθε συστατικό να παρουσιάζεται ανάλογα με την ποσότητα του σε φθίνουσα σειρά.
- c) Ποσοτικές πληροφορίες: Οι ποσότητες βιταμινών, μετάλλων ή άλλων θρεπτικών συστατικών που υπάρχουν στο προϊόν πρέπει να αναφέρονται, κατά προτίμηση ως ποσοστό της συνιστάμενης ημερήσιας πρόσληψης.
- d) Συνιστάμενη Ημερήσια Δοσολογία: Θα πρέπει να παρέχονται σαφείς οδηγίες σχετικά με τον τρόπο χρήσης του συμπληρώματος, συμπεριλαμβανομένης της συνιστάμενης ημερήσιας δόσης και τυχόν ειδικών συνθηκών ή περιορισμών.
- e) Οδηγίες αποθήκευσης: Οι οδηγίες σχετικά με τις κατάλληλες συνθήκες αποθήκευσης, όπως η θερμοκρασία και η έκθεση στο φως, διασφαλίζουν τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα του προϊόντος.
- f) Ημερομηνία λήξης: Η ετικέτα πρέπει να αναγράφει την ημερομηνία λήξης για να ενημερώνει τους καταναλωτές σχετικά με τη διάρκεια ζωής του προϊόντος.
- g) Πληροφορίες κατασκευαστή: Το όνομα και τα στοιχεία επικοινωνίας του κατασκευαστή ή του διανομέα, συμπεριλαμβανομένης της διεύθυνσης και του ιστότοπού τους, θα πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμα ("Directive 2004/27/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004," 2009).

- h) Προειδοποιήσεις για αλλεργιογόνα: Εάν το προϊόν περιέχει αλλεργιογόνα όπως γλουτένη, λακτόζη ή ξηρούς καρπούς, η ετικέτα πρέπει να αναφέρει σαφώς αυτές τις πληροφορίες για να βοηθήσει άτομα με συγκεκριμένες διατροφικές ανάγκες ή αλλεργίες.

Ενώ τα προαναφερθέντα στοιχεία είναι υποχρεωτικά, οι ετικέτες των συμπληρωμάτων διατροφής στην Ελλάδα συχνά περιέχουν πρόσθετες πληροφορίες για να βοηθήσουν τους καταναλωτές να κάνουν συνειδητές επιλογές. Αυτά τα πρόσθετα στοιχεία μπορεί να περιλαμβάνουν:

- a) Διατροφικές πληροφορίες: Ορισμένες ετικέτες παρέχουν λεπτομερή διατροφικά στοιχεία, αναφέροντας τις ποσότητες διαφόρων θρεπτικών συστατικών που υπάρχουν στο συμπλήρωμα.
- b) Ισχυρισμοί υγείας: Οι ετικέτες των συμπληρωμάτων διατροφής στην Ελλάδα πρέπει να συμμορφώνονται με αυστηρούς κανόνες σχετικά με τους ισχυρισμούς υγείας. Αυτοί οι ισχυρισμοί περιγράφουν τα πιθανά οφέλη για την υγεία του προϊόντος και θα πρέπει να τεκμηριώνονται επιστημονικά και να εγκρίνονται από τις αρμόδιες αρχές.
- c) Προφυλάξεις και αντενδείξεις: Οι ετικέτες μπορεί να περιλαμβάνουν προειδοποιήσεις ή προφυλάξεις για συγκεκριμένες ομάδες, όπως εγκυμονούσες ή θηλάζουσες γυναίκες, άτομα με υποκείμενες ιατρικές παθήσεις ή άτομα που λαμβάνουν ορισμένα φάρμακα.
- d) Αριθμός παρτίδας: Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν την ιχνηλασιμότητα σε περίπτωση ανακλήσεων προϊόντων ή ζητημάτων ποιοτικού ελέγχου.
- e) Γλώσσα: Στην Ελλάδα, η γλώσσα που χρησιμοποιείται στις ετικέτες των συμπληρωμάτων διατροφής είναι κυρίως η ελληνική. Ωστόσο, ορισμένα προϊόντα ενδέχεται να έχουν πολύγλωσσες ετικέτες για να εξυπηρετήσουν τους διεθνείς καταναλωτές.

Πιο συγκεκριμένα και λακωνικά, η επισήμανση των συμπληρωμάτων διατροφής θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- Την εμπορική ονομασία του προϊόντος
- Τον κατάλογο των συστατικών που περιέχονται σε αυτό, καθώς και πιθανά αλλεργιογόνα
- Την καθαρή ποσότητα σε μετρικές μονάδες
- Την ημερομηνία ελάχιστης διατηρησιμότητας
- Οδηγίες χρήσεως και τυχόν προφυλάξεις
- Τα πλήρη στοιχεία του υπεύθυνου κυκλοφορίας
- Την συνιστάμενη ημερήσια δόση του προϊόντος
- Δήλωση ότι τα συμπληρώματα δεν υποκαθιστούν μια ισορροπημένη διατροφή.

Σύμφωνα με τον κανονισμό 1925/2006/ΕΚ, η διατροφική επισήμανση έγινε υποχρεωτική κατά την προσθήκη βιταμινών και μετάλλων στα τρόφιμα. Επομένως, η επισήμανση πρέπει να περιέχει πληροφορίες για τα προστιθέμενα στοιχεία και το συνολικό ποσό τους εκφρασμένο ως ποσοστό της Συνιστάμενης Ημερήσιας Αποζημίωσης (ΣΗΔ).

Σημαντικότερη προσοχή πρέπει να δοθεί σε τυχών καταγραφή ισχυρισμών ή ενδείξεων στην επισήμανση, την διαφήμιση ή την ίδια την παρουσίαση των συμπληρωμάτων διατροφής που συνεπάγονται, άμεσα ή έμμεσα την πρόληψη, και την θεραπεία ανθρωπίνων νόσων, καθώς διαφορετικά δεν υπόκεινται στον ορισμό των συμπληρωμάτων διατροφής.

Γι' αυτό το λόγο οι επισημάνσεις και οι ετικέτες των συμπληρωμάτων διατροφής δεν θα πρέπει να περιλαμβάνουν οποιαδήποτε δήλωση, εικόνα ή ισχυρισμό που να παραπλανεί.

Η χρήση συμπληρωμάτων διατροφής έχει αυξηθεί πρόσφατα σε παγκόσμιο επίπεδο και αναμένεται να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Για αυτό το λόγο χρήζει η ανάγκη για μελέτη όλο και περισσότερων καινοτόμων συστατικών που μπορούν να ωφελήσουν την συνολική υγεία του ανθρώπου, τηρώντας παράλληλα τα κριτήρια ασφαλείας για την ανθρώπινη υγεία.

1.7 Πωλήσεις Συμπληρωμάτων διατροφής

Τα συμπληρώματα διατροφής έχουν κερδίσει σημαντική δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια, καθώς οι άνθρωποι γίνονται πιο ευαισθητοποιημένοι για την υγεία τους και επιδιώκουν να βελτιώσουν τη συνολική τους ευμέρια (“Precedence Research - Market Research Reports & Consulting Firm,” n.d.). Αυτά τα συμπληρώματα, παρέχουν βασικά θρεπτικά συστατικά που μπορεί να εξαιρούνται από μια διατροφή, προσφέροντας έναν βολικό και προσιτό τρόπο υποστήριξης των διατροφικών αναγκών ενός ατόμου.

1.7.1 Μέγεθος και ανάπτυξη αγοράς

Η παγκόσμια αγορά συμπληρωμάτων διατροφής έχει σημειώσει σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να συνεχίσει να επεκτείνεται. Σύμφωνα με την Precedence Research, το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς συμπληρωμάτων διατροφής εκτιμήθηκε στα 335,24 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2021 και αναμένεται να φτάσει τα 624,7 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2030, αυξάνοντας με αξιοσημείωτο CAGR 7,1% από το 2022 έως το 2030 (“Precedence Research - Market Research Reports & Consulting Firm,” n.d.).



Εικόνα 2. Μέγεθος αγοράς συμπληρωμάτων διατροφής από το 2020 έως το 2030 (σε Αμερικάνικα Δολάρια) ("Precedence Research - Market Research Reports & Consulting Firm").

Παράγοντες που οδηγούν σε αυτή την ανάπτυξη περιλαμβάνουν την αύξηση της ευαισθητοποίησης για την υγεία, την αύξηση του διαθέσιμου εισοδήματος, την αυξανόμενη γήρανση του πληθυσμού και το marketing.

Τα συμπληρώματα διατροφής περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων βιταμινών, μετάλλων, φυτικών εκχυλισμάτων, προβιοτικών και ω-μέγα-3 λιπαρών οξέων.

Ένας ακόμα πολύ σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην αύξηση πωλήσεων των συμπληρωμάτων διατροφής αποτελούν οι αυξημένοι τρόποι αγορά τους. Με άλλα λόγια τα συμπληρώματα διατροφής έχουν γίνει άμεσα διαθέσιμα προς αγορά σε φαρμακεία, καταστήματα βιολογικών προϊόντων, καταστήματα που σχετίζονται με την υγιεινή διατροφή, ιστοσελίδες ηλεκτρονικού εμπορίου, καταστήματα ομορφιάς ακόμα και σούπερ μάρκετ.

Κεφάλαιο 2. Ασταξανθίνη

2.1 Τι είναι η Ασταξανθίνη;

Η ασταξανθίνη αποτελεί μια χρωστική ουσία που ανήκει στην οικογένεια των ξανθοφύλλων, οι οποίες, είναι οξυγονωμένα παράγωγα καροτενοειδών που συντίθενται στα φυτά από το λυκοπένιο (Higuera-Ciarama et al., 2006). Βρίσκεται ευρέως στη φύση, ιδιαίτερα στο θαλάσσιο περιβάλλον, και είναι μια κόκκινη χρωστική ουσία κοινή σε πολλά θαλάσσια ζώα, όπως οι σολομοί, οι γαρίδες, οι αστακοί και οι καραβίδες, συμβάλλοντας στο ροζ-κόκκινο χρώμα της σάρκας τους. Η ασταξανθίνη βιοσυντίθεται από μικροφύκη ή φυτοπλαγκτόν, στο θαλάσσιο περιβάλλον. Έχει εντοπιστεί σε αρκετούς μικροοργανισμούς συμπεριλαμβανομένων των

- μικροφυκών *Haematococcus pluvialis*
- *Chlorella zofingiensis*
- *Chlorococcum* sp.
- της κόκκινης ζύμης *Phaffia rhodozyma*
- του θαλάσσιου βακτηρίου *Agrobacterium aurantiacum*



Εικόνα 3: *Haematococcus pluvialis* ((Mohiuddin, 2019)

Αν και η ασταξανθίνη μπορεί να συντεθεί από φυτά, βακτήρια, λίγους μύκητες και πράσινα φύκια, το πράσινο μικροφύκι *H. pluvialis* θεωρείται ότι έχει την υψηλότερη ικανότητα να συσσωρεύει ασταξανθίνη (Yuan et al., 2011).

Η ασταξανθίνη τείνει μεγάλης προσοχής τα τελευταία χρόνια λόγω των πολυάριθμων πιθανών πλεονεκτημάτων της για την υγεία. Είναι γνωστή για τις ισχυρές αντιοξειδωτικές της ιδιότητες, που έχει αναφερθεί ότι ξεπερνούν αυτές του β-καροτενίου και της α-τοκοφερόλης (Higuera-Ciarpaga et al., 2006). Θεωρείται ένα από τα πιο ισχυρά αντιοξειδωτικά, με αρκετά υψηλότερη αντιοξειδωτική ικανότητα σε σύγκριση με άλλα καροτενοειδή, όπως είναι η βήτα-καροτίνη και η λουτεΐνη.

Η ασταξανθίνη έχει σημαντικές δυνατότητες και πολλά υποσχόμενες εφαρμογές στην ανθρώπινη υγεία και διατροφή. Επίσης, έχει δοκιμαστεί και μελετηθεί για πολλές διαφορετικές ιδιότητες, όπως η προστασία του οργανισμού και ένα ευρύ φάσμα ασθενειών (Yuan et al., 2011). Έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζει μια σειρά από οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της βελτίωσης της υγείας των ματιών, της υγείας του δέρματος, της καρδιαγγειακής υγείας και της λειτουργίας του εγκεφάλου.

Η ασταξανθίνη έχει επίσης αποδειχθεί ότι παρουσιάζει αντιφλεγμονώδεις ιδιότητες, γεγονός που την καθιστά δημοφιλές συμπλήρωμα για άτομα με παθήσεις όπως αρθρίτιδα, πόνος στις αρθρώσεις και άλλες φλεγμονώδεις διαταραχές (Kohandel et al., 2022). Υπάρχουν επίσης έρευνες οι οποίες αποδεικνύουν ότι βελτιώνει την απόδοση και την αντοχή στην άσκηση, καθιστώντας το ένα δημοφιλές συμπλήρωμα για αθλητές και όσους φροντίζουν την φυσική τους κατάσταση (Brown et al., 2018).

Η ασταξανθίνη διατίθεται ως συμπλήρωμα διατροφής σε διάφορες μορφές, όπως κάψουλες, μαλακές κάψουλες και υγρά εκχυλίσματα. Η συνιστάμενη ημερήσια δόση ασταξανθίνης ποικίλλει ανάλογα με το άτομο και τον συγκεκριμένο στόχο υγείας που στοχεύει, αλλά οι περισσότερες έρευνες προτείνουν μια δόση από 4 έως 12 mg την ημέρα (Brendler and Williamson, 2019).

Η ασταξανθίνη είναι ένα σημαντικό καροτενοειδές με πιθανά οφέλη για διάφορες βιομηχανίες, ιδιαίτερα την υδατοκαλλιέργεια, τα τρόφιμα και τα θρεπτικά προϊόντα. Η ικανότητά του να παρέχει χρώμα, να προάγει την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή και να προστατεύει από διάφορες ασθένειες έχει προσελκύσει σημαντική ερευνητική προσοχή. Με την αυξανόμενη ζήτηση για φυσικές πηγές χρωστικών και αντιοξειδωτικών, η ασταξανθίνη είναι πιθανό να διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στο μέλλον (Higuera-Ciarpaga et al., 2006).

2.2 Βιοδιαθεσιμότητα και Βιοκινητική της Ασταξανθίνης

Η βιοδιαθεσιμότητα αναφέρεται στο βαθμό και τον ρυθμό με τον οποίο μια ουσία, όπως ένα θρεπτικό συστατικό ή ένα φάρμακο, απορροφάται στην κυκλοφορία του αίματος και καθίσταται διαθέσιμο για χρήση από τον οργανισμό. Με άλλα λόγια, η βιοδιαθεσιμότητα είναι ένα μέτρο της ποσότητας μιας ουσίας που φθάνει πραγματικά στους ιστούς ή τα όργανα-στόχους του σώματος μετά την κατάποση, την ένεση ή την τοπική εφαρμογή (Shargel and B. C. Yu, 2012).

Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη βιοδιαθεσιμότητα μιας ουσίας περιλαμβάνουν τη χημική της μορφή, τη διαλυτότητά της, την οδό χορήγησης και τις αλληλεπιδράσεις με άλλες ουσίες στο σώμα (Shargel and B. C. Yu, 2012). Για παράδειγμα, ένα θρεπτικό συστατικό που συνδέεται με άλλες ενώσεις στα τρόφιμα μπορεί να έχει χαμηλότερη βιοδιαθεσιμότητα από το ίδιο θρεπτικό συστατικό σε μορφή συμπληρώματος που απορροφάται πιο εύκολα από τον οργανισμό. Ομοίως, ένα φάρμακο που χορηγείται από το στόμα μπορεί να έχει χαμηλότερη βιοδιαθεσιμότητα από το ίδιο φάρμακο που χορηγείται ενδοφλεβίως επειδή πρέπει πρώτα να περάσει από το πεπτικό σύστημα και το ήπαρ πριν εισέλθει στην κυκλοφορία του αίματος.

Η αξιολόγηση της βιοδιαθεσιμότητας μιας ουσίας είναι σημαντική για την κατανόηση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειάς της, καθώς και για τον προσδιορισμό των κατάλληλων δόσεων για θεραπευτική χρήση. Αποτελεί επίσης βασικό στοιχείο για την ανάπτυξη και τη δοκιμή νέων φαρμακευτικών προϊόντων και συμπληρωμάτων διατροφής.

Τα καροτενοειδή είναι ενώσεις που είναι σημαντικές για την ανθρώπινη υγεία λόγω των αντιοξειδωτικών τους ιδιοτήτων. Ωστόσο, η απορρόφηση των καροτενοειδών και η βιοδιαθεσιμότητά τους επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες που δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητοί. Η δομή των καροτενοειδών παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στον προσδιορισμό της βιοδιαθεσιμότητάς τους. Τα πολικά καροτενοειδή όπως η ελεύθερη ασταξανθίνη είναι γενικά πιο βιοδιαθέσιμα από τα πολικά είδη όπως το β-καροτένιο και το λυκοπένιο (Yuan et al., 2011).

Η βιοδιαθεσιμότητα της ασταξανθίνης αναφέρεται στον βαθμό, στον οποίο, απορροφάται και χρησιμοποιείται από τον οργανισμό του ανθρώπου, μετά την κατάποσή της. Είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας της ασταξανθίνης ως συμπλήρωμα διατροφής ή λειτουργικό συστατικό τροφής.

Η ασταξανθίνη είναι μια υδρόφοβη ένωση, που σημαίνει ότι δεν είναι διαλυτή στο νερό και απορροφάται ελάχιστα στο λεπτό έντερο. Η παρουσία λιπών στη διατροφή μπορεί να βελτιώσει τη βιοδιαθεσιμότητα της ασταξανθίνης. Αυτό συμβαίνει επειδή η ασταξανθίνη είναι μια λιπόφιλη ένωση και απορροφάται καλύτερα όταν λαμβάνεται με λίπη. Έτσι η βιοδιαθεσιμότητα της μπορεί να βελτιωθεί με την ενσωμάτωσή της σε συστήματα χορήγησης με βάση τα λιπίδια, όπως γαλακτώματα ή κάψουλες με βάση τα λιπίδια. Με αυτό τον τρόπο, ενισχύεται η διαλυτότητα της και επιτρέπεται η αποτελεσματικότερη απορρόφησή της από τον οργανισμό (Liu et al., 2023).

Όταν καταναλώνεται με διαιτητικά έλαια, η ασταξανθίνη, μια λιποδιαλυτή ένωση, έχει αυξημένο ρυθμό απορρόφησης (Nair et al., 2023). Οι μεταβολίτες της ασταξανθίνης έχουν ανιχνευθεί σε διάφορους ιστούς αρουραίων, υποδεικνύοντας ότι υφίσταται μεταβολικό μετασχηματισμό πριν από την απέκκριση. Η βιοδιαθεσιμότητά του στο ανθρώπινο

πλάσμα έχει επιβεβαιωθεί και η συσσώρευσή του στον άνθρωπο έχει παρατηρηθεί μετά τη χορήγηση βιομάζας *Haematococcus*. Η χρήση σκευασμάτων με βάση τα λιπίδια μπορούν να ενισχύσουν τη βιοδιαθεσιμότητα της ασταξανθίνης, καθώς τα καροτένια διαλυτοποιούνται στην ελαιώδη φάση. Ερευνά έχει αποδείξει τη συσσώρευση ασταξανθίνης στο πλάσμα και στο ήπαρ αρουραίου μετά τη σίτιση με βιομάζα *Haematococcus* (Ambati et al., 2014).

Μελέτες έχουν αναφέρει ότι η ασταξανθίνη από το *H. pluvialis* έχει καλύτερη βιοδιαθεσιμότητα από τη β-καροτίνη από την *Spirulina platensis* και τη λουτεΐνη από τον *Botryococcus braunii* (Yuan et al., 2011). Η προτιμησιακή συσσώρευση cis-ασταξανθινών στο πλάσμα του αίματος σε σύγκριση με τη μορφή trans έχει επίσης παρατηρηθεί λόγω των φαινομενικών μικρότερων μηκών της αλυσίδας (Yuan et al., 2011).

Η βιοδιαθεσιμότητα της ασταξανθίνης εξαρτάται επίσης από τη μορφή με την οποία καταναλώνεται. Για παράδειγμα, η ασταξανθίνη από φυσικές πηγές, όπως ο σολομός, το κριλ και τα μικροφύκια, έχει υψηλότερη βιοδιαθεσιμότητα σε σύγκριση με τη συνθετική ασταξανθίνη (Yuan et al., 2011). Αυτό συμβαίνει, καθώς η φυσική ασταξανθίνη απορροφάται και χρησιμοποιείται πιο εύκολα από τον οργανισμό σε σύγκριση με τη συνθετική ασταξανθίνη.

Η απορρόφηση και η χρήση της ασταξανθίνης μπορεί ακόμα να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η ηλικία του ατόμου, η κατάσταση της υγείας του και η γενετική (Yuan et al., 2011). Για παράδειγμα, άτομα με υψηλότερα επίπεδα λιποπρωτεϊνών, όπως η λιποπρωτεΐνη υψηλής πυκνότητας (HDL), μπορεί να έχουν υψηλότερη βιοδιαθεσιμότητα ασταξανθίνης σε σύγκριση με άτομα με χαμηλότερα επίπεδα HDL (Johnson, 2002).

Συμπερασματικά, η βιοδιαθεσιμότητα της ασταξανθίνης μπορεί να βελτιωθεί μέσω της χρήσης συστημάτων χορήγησης με βάση τα λιπίδια και της κατανάλωσης λιπών στη διατροφή. Η μορφή με την οποία καταναλώνεται η ασταξανθίνη, όπως φυσική ή συνθετική, μπορεί επίσης να επηρεάσει τη βιοδιαθεσιμότητά της, καθώς και μεμονωμένους παράγοντες όπως η ηλικία, η κατάσταση της υγείας και η γενετική.

2.3 Βιοκινητική

Η βιοκινητική αναφέρεται στη μελέτη της κίνησης και του μετασχηματισμού ουσιών εντός των ζωντανών οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων. Είναι ένα πεδίο μελέτης που εστιάζει στη συμπεριφορά των χημικών ουσιών, των φαρμάκων και άλλων ουσιών στο σώμα, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου με τον οποίο απορροφώνται, διανέμονται, μεταβολίζονται και αποβάλλονται.

Η βιοκινητική περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών κλάδων, συμπεριλαμβανομένης της φαρμακοκινητικής, της τοξικοκινητικής και της περιβαλλοντικής τοξικολογίας. Χρησιμοποιείται για τη μελέτη της «τύχης» και των επιπτώσεων διαφόρων ουσιών στο σώμα, όπως φάρμακα, ρύπους και θρεπτικά συστατικά, και για να βοηθήσει στην λήψη αποφάσεων σχετικά με την ανάπτυξη φαρμάκων, τη χημική ασφάλεια και την εκτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων.

Η μελέτη της βιοκινητικής περιλαμβάνει τη μέτρηση της συγκέντρωσης μιας ουσίας σε διάφορους ιστούς και υγρά του σώματος με την πάροδο του χρόνου και τη χρήση αυτών των πληροφοριών για την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που μπορούν να βοη-

θήσουν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της. Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη βιοκινητική μιας ουσίας περιλαμβάνουν τις χημικές της ιδιότητες, την οδό και τη συχνότητα έκθεσης και τις μεμονωμένες διακυμάνσεις στο μεταβολισμό και την απέκκριση.

Η βιοκινητική διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση της αλληλεπίδρασης των ουσιών με τους ζωντανούς οργανισμούς και πώς αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορούν να επηρεάσουν την υγεία και το περιβάλλον.

Όπως τα λιπίδια, τα καροτενοειδή απορροφώνται από το σώμα και μεταφέρονται μέσω του λεμφικού συστήματος στο ήπαρ. Η απορρόφηση των καροτενοειδών επηρεάζεται από τα συνοδευτικά συστατικά που λαμβάνονται μέσω της τροφής. Για παράδειγμα, μια δίαιτα με υψηλή χοληστερόλη έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει την απορρόφηση καροτενοειδών, ενώ μια δίαιτα χαμηλή σε λιπαρά μπορεί να τη μειώσει (Donoso et al., 2021). Κατά την κατάποση, η ασταξανθίνη αναμιγνύεται με το χολικό οξύ και σχηματίζει μικκύλια στο λεπτό έντερο. Αυτά τα μικκύλια απορροφώνται εν μέρει από τα κύτταρα του εντερικού βλεννογόνου και ενσωματώνονται στα χυλομικρά, τα οποία στη συνέχεια χωνεύονται από τη λιποπρωτεϊνική λιπάση και απελευθερώνονται στη λέμφο εντός της συστηματικής κυκλοφορίας. Τα υπολείμματα χυλομικρών καθαρίζονται γρήγορα από το ήπαρ και άλλους ιστούς. Η ασταξανθίνη αφομοιώνεται με λιποπρωτεΐνες και μεταφέρεται στους ιστούς. Θεωρείται ένα από τα πιο αποτελεσματικά καροτενοειδή στην προστασία των κυττάρων, των λιπιδίων και των λιποπρωτεϊνών της μεμβράνης από την οξειδωτική βλάβη (Ambati et al., 2014).

Η βιοκινητική της ασταξανθίνης αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο η καροτενοειδής ουσία απορροφάται, μεταφέρεται, μεταβολίζεται και εκκρίνεται μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Η κατανόηση της βιοκινητικής της ασταξανθίνης είναι σημαντική προκειμένου να εκτιμηθούν πλήρως τα οφέλη για την υγεία και να καθοριστεί το πιο αποτελεσματικό δοσολογικό σχήμα.

2.4 Απορρόφηση

Η ασταξανθίνη απορροφάται στο λεπτό έντερο μαζί με τα διαιτητικά λίπη και μεταφέρεται στο ήπαρ μέσω του λεμφικού συστήματος. Αναμιγνύεται με το χολικό οξύ και σχηματίζει μικκύλια, τα οποία απορροφώνται, εν μέρει, από τα κύτταρα του εντερικού βλεννογόνου και στη συνέχεια ενσωματώνονται στα χυλομικρά για να μεταφερθούν στο ήπαρ (Donoso et al., 2021). Η βιοδιαθεσιμότητα της ασταξανθίνης από διατροφικές πηγές, όπως μικροφύκη, μαγιά, σολομός και κριλ, ποικίλλει ανάλογα με τη μορφή του συμπληρώματος και τις διατροφικές συνήθειες του ατόμου. Ωστόσο, οι μορφές συμπληρωμάτων που περιέχουν εστέρες ασταξανθίνης, όπως το πλούσιο σε ασταξανθίνη έλαιο, τείνουν να έχουν υψηλότερη βιοδιαθεσιμότητα σε σύγκριση με άλλες μορφές.

2.5 Μεταφορά

Μόλις απορροφηθεί, η ασταξανθίνη μεταφέρεται μέσω του αίματος σε διάφορους ιστούς, συμπεριλαμβανομένων των ματιών, του δέρματος, του εγκεφάλου και της καρδιάς, όπου

παρέχει αντιοξειδωτική προστασία. Έρευνες έχουν δείξει ότι η ασταξανθίνη προσλαμβάνεται επιλεκτικά από αυτούς τους ιστούς, παρέχοντας στοχευμένη αντιοξειδωτική προστασία και μειώνοντας το οξειδωτικό στρες.

2.6 Μεταβολισμός

Η ασταξανθίνη δεν μεταβολίζεται στο ανθρώπινο σώμα, αλλά απεκκρίνεται στην αρχική της μορφή μέσω των κοπράνων. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με άλλα καροτενοειδή, όπως το β-καροτένιο, το οποίο μπορεί να μετατραπεί σε βιταμίνη Α στο σώμα.

2.7 Απόκκριση

Η απέκκριση της ασταξανθίνης από το σώμα είναι αργή και σταθερή, με χρόνο ημιζωής περίπου 3-5 ημέρες. Αυτός ο παρατεταμένος χρόνος απέκκρισης είναι σύμφωνος με τη μακροχρόνια αντιοξειδωτική προστασία που παρέχει η ασταξανθίνη στον οργανισμό.

Η βιοκινητική της ασταξανθίνης χαρακτηρίζεται από την αποτελεσματική απορρόφηση της, την επιλεκτική πρόσληψη από τους ιστούς και την αργή απέκκρισή της, καθιστώντας την ιδανικό αντιοξειδωτικό συμπλήρωμα για την προστασία από το οξειδωτικό στρες και τη μείωση του κινδύνου χρόνιων ασθενειών.

Απαιτείται περισσότερη έρευνα για την πλήρη κατανόηση της απορρόφησης, του μεταβολισμού και των βιολογικών λειτουργιών των καροτενοειδών. Ωστόσο, με βάση τα τρέχοντα στοιχεία, η ασταξανθίνη από το *H. pluvialis* φαίνεται να έχει εξαιρετική βιοδιαθεσιμότητα και καμία επιβλαβή επίδραση σε υψηλότερες δόσεις (Yuan et al., 2011).

2.8 Πηγές Ασταξανθίνης

Οι πηγές από τις οποίες μπορεί να ληφθεί η ασταξανθίνη είναι αρκετές, με πιο διάσημη από αυτές, τα μικροφύκη.

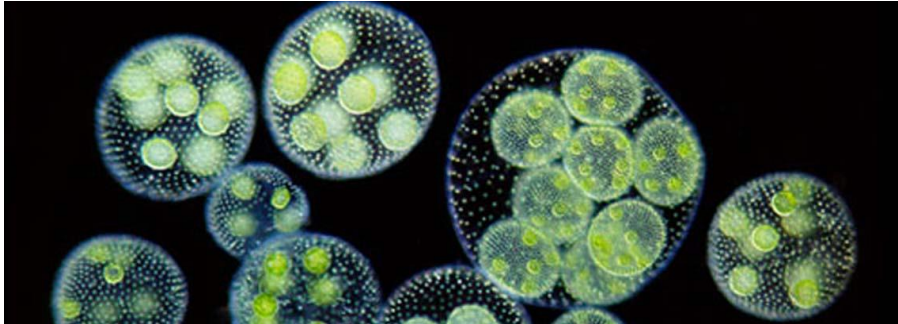
2.8.1 Συνθετική Ασταξανθίνη

Η συνθετική ασταξανθίνη είναι ένα μείγμα ισομερών και είναι το κύριο καροτενοειδές που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία υδατοκαλλιέργειας, καλύπτοντας την παγκόσμια αγορά για τη χρωστική ουσία. Ωστόσο, λόγω της ζήτησης για φυσικά τρόφιμα και του υψηλού κόστους των συνθετικών χρωστικών, οι εταιρείες, πλέον, αναζητούν φυσικές πηγές ασταξανθίνης (Higuera-Ciarpaga et al., 2006).

2.8.2 Μικροφύκη

Τα μικροφύκη είναι μια από τις πιο άφθονες πηγές ασταξανθίνης στο φυσικό περιβάλλον. Πολλά είδη μικροφυκών, συμπεριλαμβανομένων των *Haematococcus pluvialis*, *Chlorella zofingiensis* και *Chlorococcum sp.*, παράγουν ασταξανθίνη ως προστατευτικό μηχανισμό έναντι περιβαλλοντικών στρεσογόνων παραγόντων όπως η υπεριώδης ακτινοβολία και η στέρση θρεπτικών ουσιών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυκών ως προς την παραγωγή ασταξανθίνης έχουν αξιολογηθεί και η τεχνολογία φωτοβιοαντιδρα-

στήρα επέτρεψε την ανάπτυξη εμπορικών μεθόδων παραγωγής με συγκεντρώσεις ασταξανθίνης που κυμαίνονται από 1,5% έως 3% σε βάση ξηρού βάρους (Higuera-Ciarpaga et al., 2006). Τα μικροφύκη χρησιμοποιούνται συχνά ως πηγή ασταξανθίνης για συμπληρώματα διατροφής και ζωοτροφές.



Εικόνα 4: Μικροφύκη (Barcelona Institute for Global Health (ISGlobal) 2015).

2.8.3 Μαγιά (Yeast)

Ορισμένα στελέχη ζυμών, όπως είναι το *Phaffia rhodozyma* και το *Xanthophyllomyces dendrorhous*, παράγουν ασταξανθίνη. Η ασταξανθίνη που προέρχεται από μαγιά χρησιμοποιείται συχνά ως φυσική χρωστική σε τρόφιμα όπως ο σολομός και οι γαρίδες.

2.8.4 Σολομός και άλλα ψάρια

Η ασταξανθίνη υπάρχει φυσικά στη σάρκα του σολομού και άλλων ψαριών, τα οποία αποκτούν τη χρωστική ουσία μέσω της διατροφής τους με φύκια και άλλους οργανισμούς. Ο άγριος σολομός έχει υψηλότερα επίπεδα ασταξανθίνης από τον σολομό εκτροφής, καθώς η διατροφή του άγριου σολομού είναι πιο ποικίλη και περιλαμβάνει ένα ευρύτερο φάσμα πηγών ασταξανθίνης.

2.8.5 Κριλ

Τα κριλ είναι μικρά καρκινοειδή που μοιάζουν με γαρίδες που βρίσκονται στους ωκεανούς. Τα κριλ τρέφονται με φύκια και άλλους οργανισμούς που περιέχουν ασταξανθίνη και ως εκ τούτου αποτελούν πλούσια πηγή της χρωστικής. Τα συμπληρώματα ελαίου κριλ είναι μια δημοφιλής πηγή ασταξανθίνης και άλλων ωμέγα-3 λιπαρών οξέων.



Εικόνα 5: Krill (Nutraonly (Ξιάν) Διατροφές Inc.)

2.8.6 Γαρίδες και άλλα καρκινοειδή

Οι γαρίδες και άλλα καρκινοειδή περιέχουν μικρές ποσότητες ασταξανθίνης, την οποία αποκτούν μέσω της διατροφής τους με φύκη και άλλους οργανισμούς. Τα επίπεδα ασταξανθίνης στις γαρίδες και σε άλλα καρκινοειδή είναι συνήθως χαμηλότερα από ό,τι στον σολομό και το κριλ, αλλά μπορούν ακόμα να συμβάλλουν στη συνολική διατροφική πρόσληψη της χρωστικής.

2.8.7 Υποπροϊόντα καρκινοειδών

Τα υποπροϊόντα καρκινοειδών παράγονται κατά τη διάρκεια εργασιών επεξεργασίας καβουριών, γαρίδων και αστακού. Αυτά τα υποπροϊόντα αποτελούνται από μεταλλικά άλατα, πρωτεΐνες, χιτίνη, λιπίδια και χρωστικές, συμπεριλαμβανομένων των καροτενοειδών χρωστικών. Η περιεκτικότητα σε καροτενοειδή στα υποπροϊόντα γαρίδας και καβουριού κυμαίνεται μεταξύ 119 και 148 $\mu\text{g/g}$. Η ασταξανθίνη βρίσκεται κυρίως ελεύθερη ή δεσμευμένη με λιπαρά οξέα. Η πιθανή χρήση αυτών των υποπροϊόντων για την πρόκληση μελάγχρωσης των καλλιεργημένων ψαριών έχει δοκιμαστεί, αλλά γενικά περιέχουν λιγότερο από 1000 $\mu\text{g/g}$ ασταξανθίνης (Higuera-Ciarpaga et al., 2006).

2.8.8 Μύκητες

Ορισμένα είδη μυκήτων, όπως το *Cordyceps militaris* και το *Ganoderma lucidum*, είναι γνωστό ότι παράγουν ασταξανθίνη. Η ασταξανθίνη που προέρχεται από μύκητες είναι μια σχετικά νέα πηγή της χρωστικής και μελετάται για τα πιθανά οφέλη της για την υγεία.

2.8.9 Μαγιά κόκκινου ρυζιού

Η μαγιά κόκκινου ρυζιού είναι ένα προϊόν ρυζιού που έχει υποστεί ζύμωση και χρησιμοποιείται ως συμπλήρωμα διατροφής για τις επιδράσεις του στη μείωση της χοληστερόλης. Ορισμένα στελέχη κόκκινου ρυζιού μαγιάς παράγουν μικρές ποσότητες ασταξανθίνης, η οποία μπορεί να συμβάλει στα οφέλη για την υγεία που προσφέρει το συμπλήρωμα διατροφής.



Εικόνα 6: Μαγιά κόκκινου ρυζιού (Nutraonly (Ξιάν) Διατροφές Inc.)

2.8.10 Φυτά

Ενώ η ασταξανθίνη δεν βρίσκεται συνήθως στα φυτά, ορισμένα είδη φυτών έχουν βρεθεί ότι παράγουν μικρές ποσότητες της χρωστικής. Παραδείγματα αποτελούν το κόκκινο φύκι *Porphyra yezoensis* και το ανθοφόρο φυτό *Adonis aestivalis*.

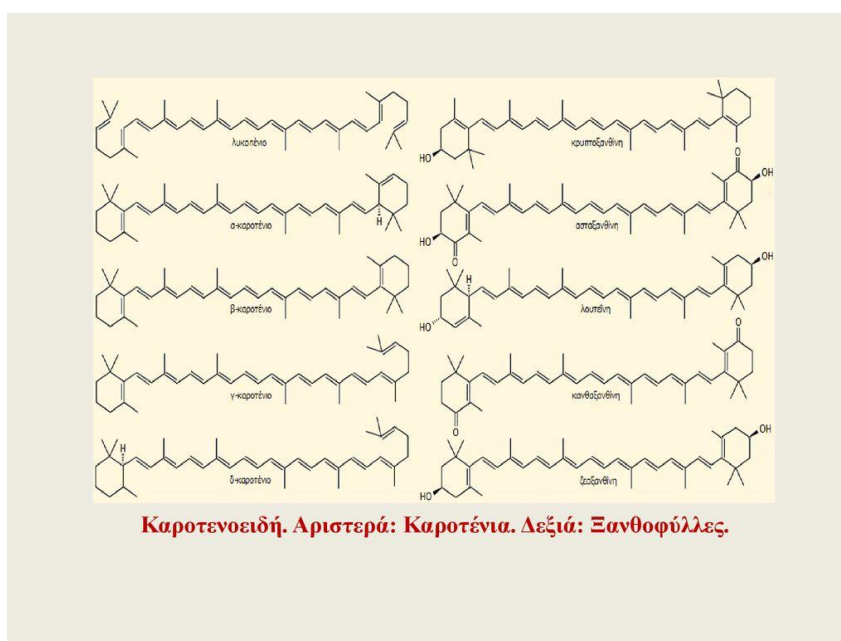


Εικόνα 7: *Adonis aestivalis* (Chiltern Seeds).

Συμπερασματικά, η ασταξανθίνη είναι μια φυσική χρωστική ουσία που βρίσκεται σε μια ποικιλία πηγών στον φυσικό κόσμο, συμπεριλαμβανομένων των μικροφυκών, της μαγιάς, του σολομού, του κριλ, των γαρίδων, των μυκήτων, του ρυζιού κόκκινης μαγιάς και ορισμένων φυτών. Ενώ τα μικροφύκη και η μαγιά είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πηγές ασταξανθίνης για συμπληρώματα διατροφής και λειτουργικά τρόφιμα, άλλες πηγές όπως ο σολομός και το κριλ μπορούν επίσης να συμβάλουν στη συνολική διατροφική πρόσληψη της χρωστικής.

2.9 Δομή Ασταξανθίνης

Τα καροτενοειδή είναι μια μεγάλη κατηγορία με περισσότερες από 600 χρωστικές ουσίες που συντίθενται σε διάφορους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των φυτών, των φυκιών, των βακτηρίων και των μυκήτων. Η δομή των καροτενοειδών προέρχεται από το λυκοπένιο, με τα περισσότερα καροτενοειδή να είναι υδρογονάνθρακες που περιέχουν δύο συστήματα τερματικών δακτυλίων που ενώνονται με μια αλυσίδα συζευγμένων διπλών δεσμών. Οι δύο πιο σημαντικές ομάδες είναι τα καροτένια, που αποτελούνται μόνο από άνθρακα και υδρογόνο, και οι ξανθοφύλλες, που είναι οξυγονωμένα παράγωγα (Higuera-Ciarama et al., 2006).



Εικόνα 8: Δομή καροτενίων και ξανθοφυλλών (SlidePlayer.gr Inc. 2023).

Η ασταξανθίνη έχει μια μοναδική μοριακή δομή που συμβάλλει στην ισχυρή αντιοξειδωτική της δράση και σε πολυάριθμα οφέλη για την υγεία. Έχει μοναδικές χημικές ιδιότητες με βάση τη μοριακή της δομή. Το σύστημα πολυενίου δίνει στην ασταξανθίνη τη χαρακτηριστική της μοριακή δομή, τις χημικές της ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά απορρόφησης του φωτός (Yuan et al., 2011).

Η ασταξανθίνη μπορεί να βρεθεί σε συνδυασμό με άλλες ενώσεις, συμπεριλαμβανομένων διάφορων λιπαρών οξέων ή του σχηματισμού ενός χημικού συμπλέγματος με πρωτεΐνες ή λιποπρωτεΐνες.

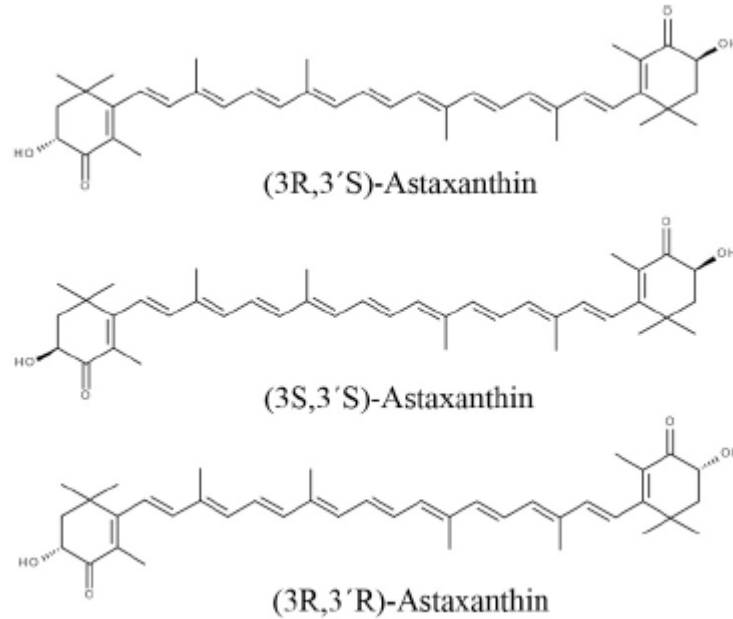
Έχει μοριακό τύπο $C_{40}H_{52}O_4$ και μοριακό βάρος 596,85 g/mol. Είναι ένα τετρατερπενοειδές με μακρά, εύκαμπτη ανθρακική αλυσίδα που αποτελείται από 40 άτομα άνθρακα και μια κυκλική τελική ομάδα που αποτελείται από τέσσερα άτομα οξυγόνου (C=O) και ένα συζευγμένο σύστημα διπλών δεσμών. Το μόριο περιέχει έντεκα διπλούς δεσμούς και δύο λειτουργικές ομάδες, μια ομάδα κετόνης στο ένα άκρο και μια ομάδα υδροξυλίου στο άλλο.

Η χημική δομή της ασταξανθίνης μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες περιοχές: την αλυσίδα πολυενίου και τις κυκλικές ακραίες ομάδες. Η αλυσίδα πολυενίου αποτελείται από μια σειρά συζευγμένων διπλών δεσμών που εκτείνονται από την ομάδα κετόνης στην ομάδα υδροξυλίου. Οι κυκλικές ακραίες ομάδες αποτελούνται από τέσσερα άτομα οξυγόνου διατεταγμένα σε μια δομή δακτυλίου, γνωστή ως δακτύλιος κυκλοεξενίου. Οι δύο ακραίες ομάδες συνδέονται με μια αλυσίδα πολυενίου, η οποία δίνει στην ασταξανθίνη τη χαρακτηριστική μακρά, εύκαμπτη δομή της (Higuera-Ciara et al., 2006).

Η αλυσίδα πολυενίου της ασταξανθίνης περιέχει 11 συζευγμένους διπλούς δεσμούς που είναι υπεύθυνοι για το χρώμα και τις αντιοξειδωτικές ιδιότητες του μορίου. Οι συζευγμένοι διπλοί δεσμοί δίνουν στην ασταξανθίνη το έντονο κόκκινο-πορτοκαλί χρώμα της και επίσης της επιτρέπουν να λειτουργεί ως ισχυρό αντιοξειδωτικό απορροφώντας και εξουδετερώνοντας τις ελεύθερες ρίζες.

Οι κυκλικές ακραίες ομάδες της ασταξανθίνης είναι γνωστές ως δακτύλιοι ιονόνης και είναι υπεύθυνοι για τις μοναδικές ιδιότητες του μορίου. Οι δακτύλιοι ιονόνης περιέχουν τέσσερα άτομα οξυγόνου διατεταγμένα σε δομή δακτυλίου, η οποία δίνει στην ασταξανθίνη την κυκλική της δομή (Higuera-Ciara et al., 2006). Οι δακτύλιοι είναι επίσης υπεύθυνοι για την ικανότητα του μορίου να σχηματίζει σταθερά σύμπλοκα με πρωτεΐνες και λιπίδια, γεγονός που συμβάλλει στη βιοδιαθεσιμότητα και την αποτελεσματικότητά της στον οργανισμό.

Η ασταξανθίνη υπάρχει σε διάφορες στερεοϊσομερείς μορφές, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη χωρική διάταξη των ατόμων γύρω από τους διπλούς δεσμούς. Η πιο κοινή μορφή ασταξανθίνης είναι το all-E στερεοϊσομερές, το οποίο έχει όλους τους διπλούς δεσμούς σε μια trans διαμόρφωση. Άλλα στερεοϊσομερή περιλαμβάνουν τις μορφές cis-trans, cis-cis και all-Z, οι οποίες έχουν διαφορετικές χωρικές διατάξεις των διπλών δεσμών. Η διαμόρφωση των διπλών δεσμών στην ασταξανθίνη είναι σημαντική για τη βιολογική της δραστηριότητα και σταθερότητα. Η trans διαμόρφωση των διπλών δεσμών είναι απαραίτητη για τις αντιοξειδωτικές ιδιότητες του μορίου, καθώς του επιτρέπει να απορροφά και να εξουδετερώνει τις ελεύθερες ρίζες. Η cis διαμόρφωση των διπλών δεσμών είναι λιγότερο σταθερή και μπορεί να οδηγήσει σε οξειδωτική βλάβη στο μόριο (Higuera-Ciara et al., 2006).



Εικόνα 9: Στερεοισομερή της Ασταξανθίνης (Donoso et al., 2021).

Η ασταξανθίνη είναι επίσης ικανή να σχηματίζει σύμπλοκα με άλλα μόρια, όπως πρωτεΐνες και λιπίδια, γεγονός που ενισχύει τη βιοδιαθεσιμότητα και την αποτελεσματικότητά της στον οργανισμό. Οι κυκλικές ακραίες ομάδες της ασταξανθίνης είναι υπεύθυνες για την ικανότητά της να σχηματίζει σταθερά σύμπλοκα με πρωτεΐνες, γεγονός που της επιτρέπει να μεταφέρεται σε όλο το σώμα και να παρέχεται σε συγκεκριμένους ιστούς και όργανα.

Η δομή της ασταξανθίνης είναι ένα μοναδικό και πολύπλοκο τετρατερπενοειδές μόριο με μακρά, εύκαμπτη αλυσίδα πολυενίου και κυκλικές ακραίες ομάδες. Το μόριο περιέχει έντεκα συζευγμένους διπλούς δεσμούς, που του δίνουν το έντονο κόκκινο-πορτοκαλί χρώμα και τις ισχυρές αντιοξειδωτικές του ιδιότητες. Οι δακτύλιοι κυκλοξενίου στα άκρα του μορίου είναι υπεύθυνοι για την ικανότητά του να σχηματίζει σταθερά σύμπλοκα με πρωτεΐνες και λιπίδια, γεγονός που συμβάλλει στη βιοδιαθεσιμότητα και την αποτελεσματικότητά του στον οργανισμό. Η διαμόρφωση των διπλών δεσμών στην ασταξανθίνη είναι σημαντική για τη βιολογική και την αντιοξειδωτική της δράση.

2.10 Ευρωπαϊκή και Ελληνική νομοθεσία για την Ασταξανθίνη

Στην Ευρώπη, η ασταξανθίνη ελέγχεται ως συστατικό συμπληρώματος διατροφής και έχει εγκριθεί για χρήση σε συμπληρώματα διατροφής σύμφωνα με την οδηγία της ΕΕ για τα συμπληρώματα διατροφής (2002/46/ΕΚ).

Η ασταξανθίνη θεωρείται επίσης συστατικό novel food στην Ευρώπη και υπόκειται στους κανονισμούς του κανονισμού της ΕΕ για τα novel foods (2015/2283). Αυτός ο κανονισμός απαιτεί όλα τα συστατικά των novel foods, συμπεριλαμβανομένης της ασταξανθίνης, να υποβάλλονται σε αξιολόγηση ασφάλειας προτού διατεθούν στην αγορά στην ΕΕ.

Η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) είναι υπεύθυνη για τη διεξαγωγή αξιολογήσεων ασφάλειας των νέων συστατικών τροφίμων και έχει καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η ασταξανθίνη είναι ασφαλής για κατανάλωση στις προτεινόμενες

δόσεις. Η EFSA έχει καθορίσει μέγιστη δόση 12 χιλιοστόγραμμα την ημέρα για συμπληρώματα ασταξανθίνης (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA), 2009).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι κανονισμοί για τα συμπληρώματα διατροφής, συμπεριλαμβανομένης της ασταξανθίνης, ενδέχεται να διαφέρουν από χώρα σε χώρα εντός της ΕΕ, που σημαίνει πως, ανά χώρα κυκλοφορίας του συμπληρώματος διατροφής θα πρέπει να υπάρχει ενδεδειγμένος έλεγχος για τις πιο ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με τους κανονισμούς και τους περιορισμούς για τα συμπληρώματα διατροφής στην εκάστοτε περιοχή.

Στην Ελλάδα, η ασταξανθίνη υπόκειται στην νομοθεσία των συμπληρωμάτων διατροφής και υπόκειται στους ίδιους κανονισμούς με τα υπόλοιπα συμπληρώματα διατροφής (2002/46/ΕΚ).

2.11 Παρενέργειες και ασφαλής δόση Ασταξανθίνης

Η ασταξανθίνη θεωρείται γενικά ασφαλής όταν λαμβάνεται σύμφωνα με τις οδηγίες και τα μέγιστα συνιστάμενα ποσοστά κατανάλωσης. Η EFSA έχει καθορίσει μέγιστη δόση 12 χιλιοστόγραμμα την ημέρα για συμπληρώματα ασταξανθίνης (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA), 2009). Σε κλινικές μελέτες, η ασταξανθίνη έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζει καλό προφίλ ασφάλειας και λίγες παρενέργειες. Οι πιο συχνά αναφερόμενες ανεπιθύμητες ενέργειες περιλαμβάνουν ήπια γαστρεντερικά συμπτώματα, όπως διάρροια και ναυτία, καθώς και κιτρίνισμα του δέρματος. Οι συγκεκριμένες ανεπιθύμητες ενέργειες θεωρούνται ήπιες και προσωρινές και τείνουν να υποχωρούν από μόνες τους με το πέρασμα ορισμένου χρονικού διαστήματος χωρίς θεραπεία.

Παρά τη σημασία των καροτενοειδών για την ανθρώπινη υγεία, υπάρχει έλλειψη στοιχείων σχετικά με τις πιθανές τοξικές ή επιβλαβείς επιδράσεις της ασταξανθίνης. Ωστόσο, μια πρόσφατη κλινική μελέτη έδειξε ότι μια υψηλότερη δόση ασταξανθίνης (40 mg ημερησίως) από το *H. pluvialis* κατά τη διάρκεια μιας περιόδου θεραπείας 4 εβδομάδων δεν αποκάλυψε καμία επιβλαβή επίδραση (Yuan et al., 2011).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ασταξανθίνη μπορεί να αλληλοεπιδράσει με ορισμένα φάρμακα, συμπεριλαμβανομένων των αραιωτικών του αίματος και των φαρμάκων για την αρτηριακή πίεση. Επίσης θα μπορούσε να επηρεάσει την πήξη του αίματος.

Επιπλέον, η ασταξανθίνη συνιστάται να μην λαμβάνεται από γυναίκες που είναι εγκυμονούσες ή βρίσκονται σε περίοδο θηλασμού, καθώς δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες ή μελέτες για την ασφάλειά της, για αυτούς τους πληθυσμούς.

Γενικά η ασταξανθίνη είναι ασφαλής για τους περισσότερους ανθρώπους όταν λαμβάνεται σύμφωνα με τις οδηγίες και στην συνιστάμενη ημερήσια δόση.

Έχει αποδειχθεί ότι έχει χαμηλή τοξικότητα και καμία ανεπιθύμητη ενέργεια σε κλινικές δοκιμές, ακόμη και σε υψηλότερες δόσεις.

Η ακριβής ασφαλής δόση ασταξανθίνης μπορεί να εξαρτάται από παράγοντες όπως η ηλικία, το φύλο και η συνολική κατάσταση της υγείας. Ωστόσο, γενικά, οι ακόλουθες δόσεις έχουν κριθεί ασφαλείς για τα περισσότερα άτομα (Brendler and Williamson, 2019).

:

- ✓ Για γενική υγεία και αντιοξειδωτικά οφέλη: 2-12 mg την ημέρα
- ✓ Για την υγεία των αρθρώσεων και την ανακούφιση από τον πόνο: 4-12 mg την ημέρα

- ✓ Για την υγεία του δέρματος και την προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία: 4-6 mg την ημέρα
- ✓ Για αθλητικές επιδόσεις και αύξηση της αντοχής: 4-12 mg την ημέρα

Παρά το γεγονός ότι η ασταξανθίνη θεωρείται γενικά ασφαλής, η υπέρβαση των συνιστάμενων δόσεων ασφαλείας μπορεί να οδηγήσει σε ορισμένες παρενέργειες.

Οι παρενέργειες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν:

- Στομαχική διαταραχή
- Διάρροια
- Πονοκέφαλο
- Ζάλη
- Αλλαγές στην αρτηριακή πίεση
- Αλλαγές στα επίπεδα ορμονών
- Αλλαγές στο χρώμα του δέρματος

2.12 Ιδιότητες της Ασταξανθίνης

Η ασταξανθίνη έχει μελετηθεί πάρα πολύ ανά τα χρόνια και γενικά έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζει μια σειρά από σημαντικές για την υγεία ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων αντιοξειδωτικών, αντικαρκινικών, αντιδιαβητικών και αντιφλεγμονωδών ιδιοτήτων, καθώς και προστατευτική επίδραση στο στομάχι, το συκώτι, την καρδιά, τα αιμοφόρα αγγεία, το νευρικό σύστημα, τα μάτια και το δέρμα (Yuan et al., 2011).

Μια μελέτη που διεξήχθη από τους Hussein et al. έδειξε ότι η ασταξανθίνη έχει σημαντική αντιοξειδωτική δράση και ανασταλτική δράση στην υπεροξειδωση των λιπιδίων, η οποία σχετίζεται με την παθογένεση αρκετών ασθενειών όπως η αθηροσκλήρωση, η νόσος Alzheimer και η νόσος του Parkinson. Η μελέτη έδειξε επίσης ότι η ασταξανθίνη μπορεί να μειώσει την οξειδωτική βλάβη στο DNA και τις πρωτεΐνες (Hussein et al., 2006).

2.12.1 Αντιοξειδωτική Ιδιότητα

Η αντιοξειδωτική δράση είναι μια φυσική διαδικασία που ρυθμίζει τη διαδικασία οξείδωσης και με αυτό τον τρόπο μειώνει την πιθανότητα σχηματισμού ελεύθερων ριζών. Αυτή η ικανότητα μπορεί να είναι φυσική ή συνθετική και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως το φύλο, η ηλικία, η διατροφή, ο τρόπος ζωής και η γενετική προδιάθεση. Η δέσμευση των ελεύθερων ριζών είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την προστασία του οργανισμού από την οξείδωση.

Οι ελεύθερες ρίζες ή Reactive Oxygen Species (ROS) είναι ατομικά ή μοριακά είδη που έχουν μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο και μπορούν να προκαλέσουν οξείδωση σε κύτταρα και μοριακά συστήματα του σώματος. Τα ROS περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία ειδών, όπως ανιόν υπεροξειδίου, υπεροξείδιο του υδρογόνου, ρίζα υδροξυλίου και μονό οξυγόνο. Τα ROS είναι ένα φυσικό υποπροϊόν της κυτταρικής αναπνοής και των μεταβολικών διεργασιών, αλλά μπορούν επίσης να παραχθούν ως απόκριση σε περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, η ατμοσφαιρική ρύπανση και ο καπνός του τσιγάρου.

Όταν η παραγωγή ROS υπερβαίνει τη φυσική αντιοξειδωτική άμυνα του σώματος, μπορεί να εμφανιστεί οξειδωτικό στρες. Το οξειδωτικό στρες είναι μια κατάσταση όπου το επίπεδο των ROS στο σώμα είναι αυξημένο, προκαλώντας βλάβες σε κύτταρα, ιστούς και όργανα. Το οξειδωτικό στρες έχει συνδεθεί με μια ποικιλία καταστάσεων υγείας, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου, των καρδιαγγειακών παθήσεων και των νευροεκφυλιστικών διαταραχών.

Η αντιοξειδωτική δράση είναι η ικανότητα των ενώσεων να μειώνουν το επίπεδο των ROS στο σώμα και να αποτρέπουν την οξειδωτική βλάβη. Τα αντιοξειδωτικά δρουν δωρίζοντας ένα ηλεκτρόνιο στο ROS, το οποίο τα εξουδετερώνει και τα εμποδίζει να προκαλέσουν βλάβη στα κύτταρα και τους ιστούς. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι αντιοξειδωτικών, συμπεριλαμβανομένων των βιταμινών C και E, της βήτα-καροτίνης και των πολυφαινολών που βρίσκονται στα φρούτα, τα λαχανικά και άλλα τρόφιμα φυτικής προέλευσης.

Ο πρωταρχικός μηχανισμός δράσης της ασταξανθίνης είναι η ισχυρή αντιοξειδωτική της δράση. Ενεργεί ως συλλέκτης ελεύθερων ριζών, εξουδετερώνοντας τα ROS και άλλα επιβλαβή μόρια που παράγονται κατά τον κανονικό κυτταρικό μεταβολισμό ή ως απόκριση σε περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες. Η ικανότητα της ασταξανθίνης να σβήνει πολλαπλούς τύπους ελεύθερων ριζών, όπως οι ρίζες υδροξυλίου και οι ρίζες υπεροξυλίου, την κάνει να ξεχωρίζει από άλλα αντιοξειδωτικά (Ekré et al., 2018).

Η αντιοξειδωτική ικανότητα της ασταξανθίνης πηγάζει από τη μοναδική δομή της, η οποία της επιτρέπει να δίνει ηλεκτρόνια ή άτομα υδρογόνου σε ασταθείς ελεύθερες ρίζες, καθιστώντας τις σταθερές και λιγότερο επιζήμιες για τα κυτταρικά συστατικά.

Η διαδικασία αυτή διακόπτει την αλυσιδωτή αντίδραση της οξείδωσης, αποτρέποντας την οξειδωτική βλάβη στα λιπίδια, τις πρωτεΐνες και το DNA. Η θέση της ασταξανθίνης εντός των κυτταρικών μεμβρανών ενισχύει περαιτέρω την αποτελεσματικότητά της στην προστασία των κυττάρων.

Ένα αντιοξειδωτικό είναι ένα μόριο που αποτρέπει την οξείδωση, η οποία ξεκινά από τις ελεύθερες ρίζες και τα ROS που παράγονται κατά τον κανονικό αερόβιο μεταβολισμό στους οργανισμούς. Η υπερβολική παραγωγή αυτών των μορίων μπορεί να οδηγήσει σε οξειδωτική βλάβη, προκαλώντας οξείδωση πρωτεϊνών και λιπιδίων, βλάβη του DNA και διάφορες διαταραχές. Ενδογενή και εξωγενή αντιοξειδωτικά, όπως τα καροτενοειδή, μπορούν να αναστείλουν αυτές τις βλαβερές επιδράσεις. Τα καροτενοειδή περιέχουν μια αλυσίδα πολυενίου με μακρούς συζευγμένους διπλούς δεσμούς που εκτελούν αντιοξειδωτικές δραστηριότητες σβήνοντας το μονό οξυγόνο και σαρώνοντας τις ρίζες για να σταματήσουν τις αλυσιδωτές αντιδράσεις. Τα καροτενοειδή μπορεί να έχουν βιολογικά οφέλη λόγω των φυσικών και χημικών αλληλεπιδράσεων τους με τις κυτταρικές μεμβράνες. Η ασταξανθίνη, με τη μοναδική της μοριακή δομή, παρουσιάζει ανώτερες αντιοξειδωτικές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλα καροτενοειδή όπως η λουτεΐνη, το λυκοπένιο, το α-καροτένιο και το β-καροτένιο. Η λειτουργική ομάδα στα καροτενοειδή έχει υψηλότερη αντιοξειδωτική δράση χωρίς προοξειδωτική συμβολή. Η ασταξανθίνη έχει δέκα φορές μεγαλύτερη αντιοξειδωτική δράση από τη ζεαξανθίνη, τη λουτεΐνη, την κανθαξανθίνη, τη β-καροτίνη και 100 φορές μεγαλύτερη από την α-τοκοφερόλη. Η αλυσίδα πολυενίου της ασταξανθίνης παγιδεύει τις ρίζες στην κυτταρική μεμβράνη και οι ρίζες του τερματικού της δα-

κυτλίου καθαρίζουν τις ρίζες στο εξωτερικό και το εσωτερικό μέρος της κυτταρικής μεμβράνης. Η ασταξανθίνη ενισχύει τη δραστηριότητα αντιοξειδωτικών ενζύμων όπως η υπεροξειδική δισμουτάση και η αναγωγή της θειορεδοξίνης και αυξάνει τα επίπεδα τους όταν συμπληρώνεται στη διατροφή. (Ambati et al., 2014).

Έρευνες έχουν δείξει ότι η κατανάλωση μιας διατροφής πλούσιας σε αντιοξειδωτικά μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του κινδύνου χρόνιων ασθενειών που σχετίζονται με το οξειδωτικό στρες.

Η ασταξανθίνη είναι ένα ισχυρό αντιοξειδωτικό που μπορεί να προστατεύσει τα κύτταρα και άλλες δομές του σώματος από το οξειδωτικό στρες και τις βλάβες που προκαλούνται από τις ελεύθερες ρίζες. Η ασταξανθίνη μπορεί να δράσει ως ισχυρό αντιοξειδωτικό δωρίζοντας τα ηλεκτρόνια και αντιδρώντας με ελεύθερες ρίζες για να τις μετατρέψει σε πιο σταθερά προϊόντα και να τερματίσει την αλυσιδωτή αντίδραση ελεύθερων ριζών σε μια μεγάλη ποικιλία ζωντανών οργανισμών (Yuan et al., 2011).

Το οξειδωτικό στρες είναι μια κατάσταση όπου υπάρχει ανισορροπία μεταξύ της παραγωγής ROS και των φυσικών αντιοξειδωτικών αμυντικών μηχανισμών του σώματος. Τα ROS είναι μόρια που μπορούν να προκαλέσουν βλάβη σε κύτταρα, ιστούς και όργανα. Αυτή η βλάβη μπορεί να οδηγήσει σε χρόνιες ασθένειες όπως ο καρκίνος, οι καρδιαγγειακές παθήσεις και οι νευροεκφυλιστικές διαταραχές.

Η ασταξανθίνη παρουσιάζει ανώτερες αντιοξειδωτικές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλα καροτενοειδή όπως η βήτα-καροτίνη και το λυκοπένιο. Η μοναδική μοριακή δομή της ασταξανθίνης της επιτρέπει να εξουδετερώνει πολλαπλά ROS ταυτόχρονα, εμποδίζοντας τα να προκαλέσουν βλάβη στα κύτταρα και τους ιστούς.

Οξειδωτικά μόρια όπως οι ελεύθερες ρίζες και τα δραστικά είδη οξυγόνου παράγονται φυσικά κατά τον αερόβιο μεταβολισμό στους οργανισμούς, αλλά υπερβολικές ποσότητες μπορούν να βλάψουν κυτταρικά συστατικά όπως πρωτεΐνες, λιπίδια και DNA, οδηγώντας σε διάφορες ασθένειες. Οι ενδογενείς αντιοξειδάσες και τα εξωγενή αντιοξειδωτικά του σώματος, όπως τα καροτενοειδή, μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση αυτής της βλάβης. Τα καροτενοειδή έχουν ένα μακροχρόνιο συζευγμένο σύστημα διπλού δεσμού που ονομάζεται αλυσίδα πολυενίου, υπεύθυνη για τις αντιοξειδωτικές τους δραστηριότητες. Οι διαφορετικές χημικές δομές των καροτενοειδών έχουν ως αποτέλεσμα ποικίλες αντιοξειδωτικές και προοξειδωτικές συμπεριφορές. Τα καροτενοειδή αλληλεπιδρούν με τις μεμβράνες με συγκεκριμένους φυσικοχημικούς τρόπους και η ισχύς τους ως αντιοξειδωτικών μπορεί να αποδοθεί σε αυτές τις αλληλεπιδράσεις.

2.12.2 Αντιφλεγμονώδης

Η ασταξανθίνη έχει βρεθεί ότι διαθέτει ισχυρές αντιφλεγμονώδεις ιδιότητες. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ασταξανθίνη είναι αποτελεσματική στη μείωση της φλεγμονής που προκαλείται από βακτηριακές λοιμώξεις και γαστρικά έλκη σε ζωικά μοντέλα. Επιπλέον, η ασταξανθίνη έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την οξειδωτική βλάβη του DNA και ενισχύει την ανοσολογική απόκριση στους ανθρώπους. Στους ιστούς των πνευμόνων, η ασταξανθίνη έχει αναφερθεί ότι μειώνει τη φλεγμονή και αυξάνει τα επίπεδα cAMP και cGMP. Η ασταξανθίνη ασκεί επίσης μια γαστροπροστατευτική δράση σε οξείες γαστρικές βλάβες και προστατεύει από το οξειδωτικό στρες που προκαλείται από υψηλή γλυκόζη, τη φλεγμονή και την απόπτωση στα εγγύς επιθηλιακά κύτταρα. Το μόριο δείχνει πολλά υποσχόμενο για

τη θεραπεία της οφθαλμικής φλεγμονής και μπορεί επίσης να αποτρέψει την πάχυνση του δέρματος και να μειώσει τη μείωση του κολλαγόνου έναντι της δερματικής βλάβης που προκαλείται από την υπεριώδη ακτινοβολία (Ambati et al., 2014).

Η ασταξανθίνη παρουσιάζει αντιφλεγμονώδης ιδιότητες, οι οποίες είναι ευεργετικές για τη μείωση της φλεγμονής σε όλο το σώμα. Επίσης, αναστέλλει την παραγωγή φλεγμονωδών μεσολαβητών και κυτοκινών σε κύτταρα που διεγείρονται από λιποπολυσακχαρίτες (LPS) καταστέλλοντας την ενεργοποίηση του πυρηνικού παράγοντα-κΒ, ενός σημαντικού παράγοντα μεταγραφής για επαγωγίμη συνθάση νιτρικού οξειδίου (Lee et al., 2003). Επιπλέον, η ασταξανθίνη μπορεί να καθарίσει τα ενδοκυτταρικά αντιδραστικά είδη οξυγόνου, γεγονός που συμβάλλει περαιτέρω στην αντιφλεγμονώδη δράση της (Choi et al., 2008). Οι Choi et al. έδειξαν ότι η ασταξανθίνη μπορεί επίσης να αναστείλει την έκφραση της επαγωγίμη συνθάσης του μονοξειδίου του αζώτου και της κυκλοοξυγενάσης-2, και την παραγωγή μονοξειδίου του αζώτου σε μικρογλοιακά κύτταρα που διεγείρονται από LPS. Αυτή η ανασταλτική επίδραση της ασταξανθίνης στην παραγωγή νιτρικού οξειδίου έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη αντιφλεγμονωδών φαρμάκων για χρόνιες φλεγμονώδεις ασθένειες όπως η σήψη, η ρευματοειδής αρθρίτιδα, η αθηροσκλήρωση, η φλεγμονώδης νόσος του εντέρου και οι φλεγμονώδεις ασθένειες του εγκεφάλου (Choi et al., 2008; Lee et al., 2003).

2.12.3 Καρδιαγγειακή υγεία

Η ασταξανθίνη μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της καρδιαγγειακής υγείας μειώνοντας το οξειδωτικό στρες, μειώνοντας τη φλεγμονή και βελτιώνοντας τα επίπεδα χοληστερόλης.

Οι καρδιαγγειακές παθήσεις (CVD) περιλαμβάνουν διάφορες διαταραχές που σχετίζονται με την καρδιά και τα αιμοφόρα αγγεία, όπως η στεφανιαία νόσος, η καρδιακή ανεπάρκεια και το εγκεφαλικό επεισόδιο. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, η καρδιαγγειακή νόσος είναι η κύρια αιτία θανάτου παγκοσμίως και προβλέπεται να προκαλέσει 23,3 εκατομμύρια θανάτους έως το 2030. Οι ROS διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παθοφυσιολογία της καρδιαγγειακής νόσου, προκαλώντας οξειδωτική βλάβη σε χαμηλή λιποπρωτεΐνη πυκνότητας (LDL) και προάγουν την αθηροσκλήρωση, την υπερτροφία και τη μυοκαρδιοπάθεια. Ωστόσο, ορισμένα διατροφικά αντιοξειδωτικά, όπως οι πολυφαινόλες, τα καροτενοειδή, η βιταμίνη E και το ασκορβικό οξύ, έχουν βρεθεί ότι είναι αποτελεσματικά στην πρόληψη και τη θεραπεία της καρδιαγγειακής νόσου. Τα καροτενοειδή έχουν συνδεθεί με τη μείωση του καρδιαγγειακού κινδύνου προάγοντας τη μείωση της αρτηριακής πίεσης, τη μείωση της φλεγμονής και τη βελτίωση της ευαισθησίας στην ινσουλίνη στο ήπαρ, τους μύς και τους λιπώδεις ιστούς. Όπως και άλλα καροτενοειδή, έτσι και η ασταξανθίνη, έχει μελετηθεί εκτενώς για τη δυνατότητά της να προλαμβάνει και να θεραπεύει την καρδιαγγειακή νόσο. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ασταξανθίνη βελτιώνει τα λιπιδικά προφίλ του αίματος και αυξάνει τον χρόνο υστέρησης οξείδωσης της LDL, υποδηλώνοντας τις δυνατότητές της ως θεραπεία για την καρδιαγγειακή νόσο (Ekré et al., 2018). Κλινικές μελέτες για την ασταξανθίνη έχουν δείξει ότι μειώνει την οξείδωση των λιπαρών οξέων, αυξάνει την HDL-χοληστερόλη και την αδιπονεκτίνη και μειώνει τα επίπεδα τριγλυκεριδίων, την LDL χοληστερόλη και την απολιποπρωτεΐνη Β. Η ασταξανθίνη

βελτιώνει επίσης τους βιοδείκτες του οξειδωτικού στρες όπως η μηλονοδιαλδεΐδη, η υπεροξειδάση και η υπεροξειδάση. Αν και η ασταξανθίνη έχει δοκιμαστεί σε διάφορα ζωικά μοντέλα, έχουν διεξαχθεί μόνο λίγες κλινικές δοκιμές σε ανθρώπους για να διερευνηθούν οι επιπτώσεις της στην καρδιαγγειακή υγεία (Donoso et al., 2021).

2.12.4 Υγεία των ματιών

Στις ευεργετικές ιδιότητες της ασταξανθίνης συγκαταλέγεται και η προστασία των ματιών από το οξειδωτικό στρες. Επίσης, η ασταξανθίνη είναι ευεργετική για οφθαλμικές παθήσεις που σχετίζονται με την ηλικία, όπως η εκφύλιση της ωχράς κηλίδας.

Οφθαλμικές παθήσεις όπως η ηλικιακή εκφύλιση της ωχράς κηλίδας, ο καταρράκτης, η ραγοειδίτιδα, η αμφιβληστροειδοπάθεια της προωρότητας, η φλεγμονή του κερατοειδούς και η κερατίτιδα έχει βρεθεί ότι σχετίζονται με οξειδωτική βλάβη. Η οξείδωση μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση των μεμβρανών και των κυττάρων φωτοϋποδοχέων στην ωχρά κηλίδα, η οποία είναι υπεύθυνη για την οπτική οξύτητα. Ωστόσο, ορισμένα καροτενοειδή όπως η λουτεΐνη, η ζεαξανθίνη και η ασταξανθίνη έχουν δείξει θετικές ενδείξεις ότι προστατεύουν τον αμφιβληστροειδή και το χρωστικό επιθήλιο του αμφιβληστροειδούς από οξειδωτική βλάβη, επιβραδύνοντας έτσι τον εκφυλισμό της ωχράς κηλίδας (Ekpe et al., 2018).

Η ασταξανθίνη, ειδικότερα, έχει μελετηθεί εκτενώς για τα οφέλη της στην προαγωγή της υγείας των ματιών. Μελέτες που διεξήχθησαν σε μοντέλα ζώων και σε ανθρώπους, έχουν δείξει θετικές επιδράσεις στη ροή του αίματος στον αμφιβληστροειδή, στην οξύτητα της όρασης, στην ραγοειδίτιδα και στη ρεολογία του αίματος. Σε μια διπλά τυφλή, τυχαιοποιημένη, ελεγχόμενη με εικονικό φάρμακο μελέτη που διεξήχθη από τους Nagaki et al., σε 36 υγιείς εθελοντές χορηγήθηκε είτε ασταξανθίνη από το στόμα είτε εικονικό φάρμακο για τέσσερις εβδομάδες. Η ομάδα που κατανάλωσε το συμπλήρωμα διατροφής με ασταξανθίνη, έδειξε σημαντική αύξηση της τριχοειδούς ροής του αμφιβληστροειδούς αίματος και στα δύο μάτια χωρίς μείωση της ενδοφθάλμιας πίεσης, ενώ η ομάδα εικονικού φαρμάκου παρέμεινε αμετάβλητη μετά τη θεραπεία. Οι συγκεκριμένες ενδείξεις είναι σημαντικές καθώς η κυκλοφορική ανεπάρκεια στην οπτική θηλή έχει συσχετιστεί με διαταραχές του οπτικού νεύρου του γλαυκώματος, υποδηλώνοντας ότι η ασταξανθίνη θα μπορούσε να είναι ευεργετική για τη θεραπεία της.

Άλλες μελέτες ανέφεραν επίσης βελτίωση στην ταχύτητα ροής του χοριοειδούς αίματος και στην οπτική οξύτητα μετά την κατανάλωση συμπλήρωματος διατροφής με ασταξανθίνης. Το 2008 οι Miyawaki et al. μελέτησαν 18 άρρενες εθελοντές και βρήκαν σημαντική βελτίωση στην αντίληψη του βάθους και στην κρίσιμη σύντηξη, στην ομάδα που έλαβε ασταξανθίνη σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου. Ωστόσο, στην ίδια μελέτη βρέθηκαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα κατά την αξιολόγηση της προσαρμογής των ματιών, η οποία αντιστοιχούσε στην ικανότητα του ματιού να αλλάζει την εστίασή του από μακρινά σε κοντινά αντικείμενα και αντίστροφα (Miyawaki et al., 2008). Μετά την κατάποση, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στο εύρος της προσαρμογής στην ομάδα δοκιμής σε σύγκριση με την ομάδα εικονικού φαρμάκου.

Συνοπτικά, η βιβλιογραφία υποστηρίζει την ιδέα ότι η ασταξανθίνη παίζει ευεργετικό ρόλο στην προαγωγή της υγείας των ματιών. Τα προστατευτικά της αποτελέσματα έναντι της οξειδωτικής βλάβης, η βελτίωση της ροής του αίματος στον αμφιβληστροειδή

και η οξύτητα της όρασης το καθιστούν ένα πολλά υποσχόμενο συμπλήρωμα για την πρόληψη και τη θεραπεία οφθαλμικών παθήσεων (Donoso et al., 2021).

2.12.5 Υγεία του δέρματος

Μια από τις σημαντικότερες ευεργετικές ιδιότητες της ασταξανθίνης αποτελεί το γεγονός ότι προστατεύει το δέρμα από την υπεριώδη ακτινοβολία και μπορεί να είναι ευεργετική για τη βελτίωση της υγείας του δέρματος και τη μείωση της εμφάνισης λεπτών γραμμών και ρυτίδων (Tomimaga et al., 2012). Το δέρμα είναι η πρώτη γραμμή άμυνας του σώματός μας έναντι των εξωτερικών στρεσογόνων παραγόντων, καθιστώντας το ευαίσθητο στο άμεσο οξειδωτικό στρες από την υπεριώδη ακτινοβολία (UV) (Pittayarguek et al., 2016; Steinbrenner et al., 2003). Η υγεία του δέρματος κατά τη διάρκεια της γήρανσης επηρεάζεται κυρίως από το οξειδωτικό στρες, οδηγώντας σε επιταχυνόμενη εξωτερική γήρανση του δέρματος ή «φωτογήρανση» (Pandel et al., 2013). Οι κύριοι μηχανισμοί μέσω των οποίων η ασταξανθίνη προστατεύει το δέρμα περιλαμβάνουν τις αντιοξειδωτικές της ιδιότητες, τις αντιφλεγμονώδεις ιδιότητες, τα ανοσοενισχυτικά αποτελέσματα, την επιδιόρθωση του DNA και την καταστολή της βλάβης του δέρματος που προκαλείται από μεταλλοπρωτεϊνάσες μήτρας (MMPs) (Davinelli et al., 2018; Freitas-Rodríguez et al., 2017; Pittayarguek et al., 2016). Οι MMPs είναι υπεύθυνες για την αποικοδόμηση διαφόρων συστατικών των πρωτεϊνών της εξωκυτταρικής μήτρας, συμπεριλαμβανομένου του κολλαγόνου και της ελαστίνης, που σχετίζονται με τις ρυτίδες και την αποικοδόμηση του δέρματος, συμβάλλοντας στη φωτοκαρκινογένεση και την αγγειογένεση (Freitas-Rodríguez et al., 2017).

Έχουν διεξαχθεί αρκετές κλινικές δοκιμές σε ανθρώπους σχετικά με την υγεία του δέρματος που επικεντρώνονται σε καλλυντικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων των ρυτίδων του δέρματος, του μεγέθους των κηλίδων γήρατος, της ελαστικότητας, της υφής του δέρματος, της περιεκτικότητας σε υγρασία, της μείωσης της κατάστασης των κερατοκυττάρων και της περιεκτικότητας σε σμήγμα (Tomimaga et al., 2017, 2012; Yamagishi and Aihara, 2014).

Το δέρμα είναι ένα σημαντικό όργανο που χρησιμεύει ως προστατευτικός φραγμός έναντι περιβαλλοντικών στρεσογόνων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της υπεριώδους ακτινοβολίας. Ωστόσο, η έκθεση στο οξειδωτικό στρες και την υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο δέρμα, με αποτέλεσμα τη φωτογήρανση. Η διαδικασία της φωτογήρανσης χαρακτηρίζεται από βλάβη του DNA, μειωμένη παραγωγή αντιοξειδωτικών, φλεγμονώδεις αποκρίσεις και παρουσία μεταλλοπρωτεϊνών μήτρας (MMPs). Η ασταξανθίνη, ως ισχυρό αντιοξειδωτικό, προστατεύει από τη βλάβη του δέρματος που προκαλείται από την επαγωγή MMP. Σε μια μελέτη των Yoon et al. (2014), η συμπλήρωση ασταξανθίνης σε συνδυασμό με υδρόλυμα κολλαγόνου μείωσε σημαντικά την έκφραση των γονιδίων MMP-1 και MMP-12 σε φωτογηρασμένο δέρμα. Η μελέτη ανέφερε επίσης βελτιωμένη ελαστικότητα του δέρματος και ακεραιότητα του φραγμού στην ομάδα που λάμβανε συμπληρώματα διατροφής που περιείχαν ασταξανθίνη σε σύγκριση με την ομάδα του εικονικού φαρμάκου. Ομοίως, μια μελέτη απέδειξε ότι η από του στόματος χορήγηση ασταξανθίνης, βελτίωσε την περιεκτικότητα σε υγρασία του δέρματος και μείωσε τις παραμέτρους του βάθους των ρυτίδων σε υγιείς γυναίκες που συμμετείχαν στην μελέτη. Επιπλέον, η τοπική εφαρμογή ασταξανθίνης μειώνει την ερυθρότητα του δέρματος

ή το ερύθημα μετά από έκθεση σε UV-B σε υγιή άτομα (Ito et al., 2018). Αυτά τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι η ασταξανθίνη μπορεί να έχει ευεργετικά αποτελέσματα στην υγεία του δέρματος και θα μπορούσε να είναι ένας πιθανός θεραπευτικός παράγοντας για την πρόληψη και τη θεραπεία της φωτογήρανσης (Tominaga et al., 2012).

2.12.6 Υποστήριξη του ανοσοποιητικού συστήματος

Υπάρχουν ενδείξεις πως η ασταξανθίνη, υποστηρίζει το ανοσοποιητικό σύστημα μειώνοντας το οξειδωτικό στρες και τη φλεγμονή. Η ασταξανθίνη, ενισχύει και ρυθμίζει το ανοσολογικό σύστημα, αυξάνοντας την παραγωγή αντισώματος T-βοηθών κυττάρων και αυξάνοντας τον αριθμό των εκκριτικών κυττάρων αντισωμάτων (Higuera-Ciara et al., 2006).

Ενώ υπάρχει περιορισμένη έρευνα σχετικά με τις επιδράσεις της ασταξανθίνης στο ανθρώπινο ανοσοποιητικό σύστημα, έχουν αναφερθεί πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Μια μελέτη που διεξήχθη το 2010 σε υγιείς νεαρές γυναίκες διαπίστωσε ότι η κατανάλωση συμπληρώματος διατροφής με ασταξανθίνη, αύξησε τον λεμφοπλασματοκύτταρο, τη δραστηριότητα των φυσικών φονικών κυττάρων και τους συνολικούς υποπληθυσμούς T και B κυττάρων, υποδηλώνοντας μια επίδραση ενίσχυσης του ανοσοποιητικού. Μια άλλη μελέτη σε άνδρες ποδοσφαιριστές έδειξε ότι η συμπλήρωση ασταξανθίνης αύξησε τα επίπεδα IgA του σάλιου, υποδεικνύοντας ένα πιθανό όφελος για άτομα με μειωμένη την ανοσία του βλεννογόνου. Σε μια μελέτη σε ασθενείς με γαστρική φλεγμονή και λειτουργική δυσπεψία που προκαλείται από ελικοβακτηρίδιο του πυλωρού, η συμπλήρωση ασταξανθίνης οδήγησε σε ανοδική ρύθμιση των CD4 T-λεμφοκυττάρων και σε μείωση των CD8 T-λεμφοκυττάρων, υποδηλώνοντας μια πιο ακριβή ανοσοαπόκριση στο *H. pylori*. Ενώ αυτές οι μελέτες παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να κατανοηθούν πλήρως τα πιθανά οφέλη της ασταξανθίνης στο ανθρώπινο ανοσοποιητικό σύστημα. (Park et al., Baralic et al., Andersen et al.)

2.12.7 Απόδοση άσκησης

Η ασταξανθίνη έχει δείξει θετικά αποτελέσματα στην βελτίωση της άσκησης και στην μείωση της μυϊκής βλάβης που προκαλείται από την άσκηση. Η απόδοση της άσκησης προκύπτει λόγω των παρακάτω ευεργετικών δραστηριοτήτων της.

Ενίσχυση της μιτοχονδριακής λειτουργίας

Τα μιτοχόνδρια είναι οι μονάδες παραγωγής ενέργειας των κυττάρων, υπεύθυνα για την παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της άσκησης. Η ασταξανθίνη ενισχύει τη μιτοχονδριακή λειτουργία αυξάνοντας τη βιογένεση των μιτοχονδρίων, βελτιώνοντας το δυναμικό της μιτοχονδριακής μεμβράνης και ενισχύοντας την οξειδωτική φωσφορυλίωση. Αυτές οι επιδράσεις ενίσχυσης των μιτοχονδρίων μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη παραγωγή ATP, βελτιωμένη χρήση ενέργειας και καθυστερημένη εμφάνιση κόπωσης, βελτιώνοντας τελικά την αθλητική απόδοση και την αντοχή.

Βελτίωση της μυϊκής λειτουργίας

Η ασταξανθίνη έχει αναφερθεί ότι βελτιώνει τη μυϊκή δύναμη και τη λειτουργία σε αθλητές. Επίσης μπορεί να προωθήσει τη σύνθεση πρωτεϊνών στους μύες και να μειώσει την υποβάθμιση της μυϊκής πρωτεΐνης, οδηγώντας σε βελτιωμένη ανάκτηση και ανάπτυξη των μυών. Αυτά τα αποτελέσματα μυϊκής ενίσχυσης μπορούν να μεταφραστούν σε βελτιωμένη αθλητική απόδοση (Djordjevic et al., 2012).

Μείωση της μυϊκής βλάβης που προκαλείται από την άσκηση

Η παρατεταμένη ή έντονη άσκηση μπορεί να προκαλέσει μυϊκή βλάβη, οδηγώντας σε καθυστερημένη αποκατάσταση και μείωση της απόδοσης (Clarkson and Thompson, 2000). Η ασταξανθίνη μπορεί να μετριάσει τη μυϊκή βλάβη που προκαλείται από την άσκηση μειώνοντας τους δείκτες μυϊκού τραυματισμού, όπως η κινάση της κρεατίνης (CK), η γαλακτική αφυδρογονάση (LDH) και η μυοσφαιρίνη (Djordjevic et al., 2012). Οι αντιφλεγμονώδεις και αντιοξειδωτικές ιδιότητες της ασταξανθίνης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον μετριασμό της μυϊκής βλάβης που προκαλείται από την άσκηση και στη διευκόλυνση της επιδιόρθωσης και αναγέννησης των μυών.

Ενίσχυση της αντοχής και μείωση της κόπωσης

Το συμπλήρωμα ασταξανθίνης δείχνουν να βελτιώνουν την αντοχή και να μειώνουν την κόπωση στους αθλητές. Μελέτες σε ζώα, που έχουν πραγματοποιηθεί, έχουν δείξει ότι η ασταξανθίνη αυξάνει την αντοχή στην άσκηση, πιθανότατα μέσω των αντιοξειδωτικών και των μιτοχονδριακών επιδράσεων της (Djordjevic et al., 2012). Επιπλέον, η ασταξανθίνη έχει βρεθεί ότι ενισχύει τον μεταβολισμό των λιπιδίων, οδηγώντας σε βελτιωμένη οξείδωση λίπους κατά τη διάρκεια της άσκησης. Αυτά τα αποτελέσματα συμβάλλουν σε αυξημένη διαθεσιμότητα ενέργειας, καθυστερημένη κόπωση και βελτιωμένη απόδοση.

2.12.8 Γνωστική λειτουργία

Η ασταξανθίνη, μέσω όλων των παρακάτω ευεργετικών ιδιοτήτων, μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της γνωστικής λειτουργίας μειώνοντας το οξειδωτικό στρες και τη φλεγμονή.

Αντιοξειδωτικές και Αντιφλεγμονώδεις Επιδράσεις

Η ασταξανθίνη λόγω ισχυρών αντιοξειδωτικών της ιδιοτήτων, εξουδετερώνει τις ελεύθερες ρίζες και μειώνει το οξειδωτικό στρες στον εγκέφαλο. Το οξειδωτικό στρες συνδέεται στενά με τη γνωστική μείωση και τις νευροεκφυλιστικές ασθένειες. Μειώνοντας την οξειδωτική βλάβη και τη φλεγμονή, η ασταξανθίνη προστατεύει τους νευρώνες και υποστηρίζει τη γνωστική λειτουργία.

Νευροπροστατευτικές επιδράσεις

Η ασταξανθίνη επιδεικνύει νευροπροστατευτικά αποτελέσματα ρυθμίζοντας διάφορους μηχανισμούς που εμπλέκονται στην υγεία του εγκεφάλου. Ενισχύει τη νευροπλαστικότητα, προάγει την ανάπτυξη νέων νευρώνων και αυξάνει την επιβίωση των υπαρχόντων νευρώνων. Αυτά τα αποτελέσματα συμβάλλουν στη βελτίωση της γνωστικής λειτουργίας και του σχηματισμού μνήμης (Yamagishi and Aihara, 2014).

Αύξηση συγκέντρωσης

Η ασταξανθίνη μπορεί επίσης να ενισχύσει την προσοχή και την εστίαση. Μελέτες σε ζώα έχουν δείξει ότι η ασταξανθίνη, βελτιώνει την απόδοση της προσοχής και μειώνει την απόσπαση της προσοχής. Αυτά τα αποτελέσματα μπορεί να αποδοθούν στην ικανότητα της ασταξανθίνης να ρυθμίζει τα συστήματα νευροδιαβιβαστών που εμπλέκονται σε διαδικασίες προσοχή (Yamagishi and Aihara, 2014).

Γνωστική Γήρανση και Νευροεκφυλιστικές Ασθένειες

Οι αντιοξειδωτικές και νευροπροστατευτικές ιδιότητες της ασταξανθίνης μπορεί να έχουν συνέπειες για τη γνωστική γήρανση και τις νευροεκφυλιστικές ασθένειες όπως το Άλτσχάιμερ και το Πάρκινσον. Τα προκαταρκτικά στοιχεία δείχνουν ότι η συμπλήρωση ασταξανθίνης μπορεί να επιβραδύνει τη γνωστική έκπτωση και να μειώσει τον κίνδυνο νευροεκφυλιστικών ασθενειών (Yamagishi and Aihara, 2014). Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την πλήρη κατανόηση των δυνατοτήτων του σε αυτόν τον τομέα.

2.12.9 Υγεία των αρθρώσεων

Η ασταξανθίνη έχει βρεθεί ότι είναι ευεργετική για την υγεία των αρθρώσεων μειώνοντας το οξειδωτικό στρες και τη φλεγμονή. Η υποβάθμιση του χόνδρου είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα διαταραχών των αρθρώσεων όπως η οστεοαρθρίτιδα. Η ασταξανθίνη προστατεύει τον χόνδρο από την αποικοδόμηση αναστέλλοντας την παραγωγή μεταλλοπρωτεϊνών μήτρας (MMPs), ενζύμων που συμβάλλουν στη διάσπαση του χόνδρου. Επιπλέον, η ασταξανθίνη μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή κολλαγόνου, ένα κύριο συστατικό του υγιούς χόνδρου. Αυτά τα αποτελέσματα συμβάλλουν στη διατήρηση της ακεραιότητας του χόνδρου και της υγείας των αρθρώσεων.

2.12.10 Νευροεκφυλιστικές διαταραχές

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος είναι πολύ ευαίσθητος στο οξειδωτικό στρες, το οποίο συμβάλλει σε νευροεκφυλιστικές ασθένειες όπως το Άλτσχάιμερ, το Πάρκινσον, η αμυοτροφική πλευρική σκλήρυνση και το Χάντινγκτον. Οι αντιοξειδωτικές θεραπείες διερευνώνται για τη δυνατότητά τους να προστατεύουν από νευρωνικές διαταραχές (Barros et al., 2014). Τα καρτενοειδή, συμπεριλαμβανομένης της ασταξανθίνης, έχουν εμφανίζονται πολλά υποσχόμενα ως θεραπευτικοί παράγοντες λόγω των προληπτικών και επιβραδυντικών τους επιδράσεων. Μελέτες σε ζώα και *in vitro* έχουν συσχετίσει την ασταξανθίνη με αντιοξειδωτικούς, αντιφλεγμονώδεις και αντι-αποπτωτικούς μηχανισμούς. Κλινικές δοκιμές που διερευνούν το νευροπροστατευτικό δυναμικό της ασταξανθίνης έχουν αναφέρει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα στη βελτίωση των γνωστικών λειτουργιών και στη μείωση της πνευματικής και σωματικής κόπωσης. Μελέτες δείχνουν επίσης ότι η ασταξανθίνη μπορεί να μειώσει τα επίπεδα των υδροϋπεροξειδίων των φωσφολιπιδίων, τα οποία συσσωρεύονται ανώμαλα στα ερυθροκύτταρα ασθενών με Άλτσχάιμερ και άνοια. Αν και τα αποτελέσματα είναι πολλά υποσχόμενα, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την πλήρη κατανόηση της αποτελεσματικότητας της ασταξανθίνης ως θεραπείας για νευροεκφυλιστικές διαταραχές (Zhang et al., 2021).

2.12.11 Πρόληψη του καρκίνου

Η ασταξανθίνη μπορεί να παρουσιάζει την δυνατότητα πρόληψης ορισμένων τύπων καρκίνου μειώνοντας το οξειδωτικό στρες και τη φλεγμονή. Μια μελέτη που διεξήχθη από τους Zhang et al. έδειξε ότι η ασταξανθίνη μπορεί να αναστείλει τον πολλαπλασιασμό των ανθρώπινων κυττάρων ηπατοκυτταρικού καρκινώματος προκαλώντας απόπτωση και καταστέλλοντας την έκφραση γονιδίων που προάγουν τον όγκο (Zhang and Wang, 2015). Μια άλλη μελέτη των Yuan et al. έδειξε ότι η ασταξανθίνη μπορεί να αναστείλει την ανάπτυξη και τη μετάσταση των ανθρώπινων καρκινικών κυττάρων του μαστού ρυθμίζοντας την έκφραση των γονιδίων που εμπλέκονται στον κυτταρικό πολλαπλασιασμό, την εισβολή και τη μετανάστευση (Yuan et al., 2011).

2.12.12 Διαβητικές επιπλοκές

Η ασταξανθίνη έχει βρεθεί ότι είναι ευεργετική για τη μείωση του κινδύνου διαβητικών επιπλοκών, όπως η διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια, μειώνοντας το οξειδωτικό στρες και τη φλεγμονή. Άλλες μελέτες καταδεικνύουν ότι η ασταξανθίνη μπορεί να βελτιώσει το μεταβολισμό της γλυκόζης και των λιπιδίων σε διαβητικούς αρουραίους ρυθμίζοντας την έκφραση των γονιδίων που εμπλέκονται στη σηματοδότηση της ινσουλίνης και στο μεταβολισμό των λιπιδίων. Η μελέτη έδειξε επίσης ότι η ασταξανθίνη μπορεί να μειώσει το οξειδωτικό στρες και τη φλεγμονή, που σχετίζονται με την ανάπτυξη διαβητικών επιπλοκών όπως η νευροπάθεια, η αμφιβληστροειδοπάθεια και η νεφροπάθεια (Yuan et al., 2011).

Οι ασθενείς με σακχαρώδη διαβήτη τυπικά βιώνουν υψηλά επίπεδα οξειδωτικού στρες λόγω βλάβης που προκαλείται από την υπεργλυκαιμία στα β-κύτταρα και στους ι-στούς του παγκρέατος. Ωστόσο, η ασταξανθίνη έχει δείξει ενδείξεις, ότι ανακουφίζει το οξειδωτικό στρες που προκαλείται από την υπεργλυκαιμία στα β-κύτταρα του παγκρέατος και βελτιώνει τα επίπεδα γλυκόζης και ινσουλίνης. Η ασταξανθίνη προσφέρει επίσης ανοσολογικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της αποκατάστασης δυσλειτουργιών λεμφοκυττάρων που σχετίζονται με διαβητικούς αρουραίους. Ο συνδυασμός ασταξανθίνης με ατοκοφερόλη μπορεί να αναστείλει το οξειδωτικό στρες σε αρουραίους με στρεπτοζοτοκίνη-διαβήτη, καθώς και να αποτρέψει την οξείδωση λιπιδίων/πρωτεΐνης και την κυτταροτοξικότητα που προκαλείται από τη γλυκοζυλίωση και τη γλυκοζυλιωμένη πρωτεΐνη σε ενδοθηλιακά κύτταρα ανθρώπινης ομφαλικής φλέβας. Επιπλέον, η ασταξανθίνη βελτιώνει την ευαισθησία στην ινσουλίνη τόσο σε αυθόρμητα υπερτασικούς σωματώδεις αρουραίους όσο και σε ποντίκια που ακολουθούν δίαιτες υψηλής περιεκτικότητας σε λιπαρά και υψηλής φρουκτόζης. Η ασταξανθίνη επίσης, μειώνει τα επίπεδα λευκωματίνης στα ούρα σε διαβητικά ποντίκια και προλαμβάνει τη διαβητική νεφροπάθεια μειώνοντας το οξειδωτικό στρες και τη βλάβη των νεφρικών κυττάρων σε αρκετές μελέτες (Ambati et al., 2014).

2.12.13 Υγεία του ήπατος

Η ασταξανθίνη μπορεί να ενισχύσει τη δραστηριότητα των αντιοξειδωτικών ενζύμων και να αυξήσει τα επίπεδα ενδογενών αντιοξειδωτικών, όπως η γλουταθειόνη, στο

ήπαρ. Αυτές οι αντιοξειδωτικές ιδιότητες συμβάλλουν στη συνολική ηπατοπροστατευτική δράση της ασταξανθίνης (Donoso et al., 2021).

Η χρόνια φλεγμονή παίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη και την εξέλιξη των ηπατικών παθήσεων. Η ασταξανθίνη έχει αντιφλεγμονώδεις ιδιότητες, ρυθμίζοντας τους φλεγμονώδεις μεσολαβητές και τις οδούς σηματοδότησης στο ήπαρ. Αναστέλλει την παραγωγή προφλεγμονωδών κυτοκινών και μειώνει την ενεργοποίηση του πυρηνικού παράγοντα-κάπα Β (NF-κΒ), ενός βασικού ρυθμιστή της φλεγμονής (Donoso et al., 2021). Τα αντιφλεγμονώδη αποτελέσματα της ασταξανθίνης βοηθούν στην άμβλυση της φλεγμονής του ήπατος και προστατεύουν από την ηπατική βλάβη.

Επίσης, η ασταξανθίνη έχει επιδείξει ηπατοπροστατευτική δράση έναντι διαφόρων ηπατικών προσβολών. Μελέτες σε ζώα έχουν δείξει ότι η συμπλήρωση της διατροφής με ασταξανθίνη μπορεί να βελτιώσει τη βλάβη του ήπατος που προκαλείται από παράγοντες όπως το αλκοόλ, τα φάρμακα, οι τοξίνες και οι ιογενείς λοιμώξεις (Park et al., 2010). Η ασταξανθίνη προστατεύει τα ηπατικά κύτταρα μειώνοντας το οξειδωτικό στρες, τη φλεγμονή και την απόπτωση. Προωθεί επίσης την αναγέννηση του ήπατος και ενισχύει την έκφραση των βασικών παραγόντων που εμπλέκονται στην ανάπτυξη και επισκευή των ηπατικών κυττάρων.

Κεφάλαιο 3. Συμπεράσματα

Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει τα πιθανά οφέλη για την υγεία της ασταξανθίνης, ιδιαίτερα στην πρόληψη ή τη συν-θεραπεία ασθενειών που σχετίζονται με το οξειδωτικό στρες και τη γήρανση. Ως αποτέλεσμα, η ασταξανθίνη έχει γίνει ένα αντιοξειδωτικό με μεγάλη ζήτηση με μέγεθος παγκόσμιας αγοράς που αναμένεται να αυξηθεί από 600 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2018 σε 880 εκατομμύρια δολάρια έως το 2024. Τα φυσικά προϊόντα ασταξανθίνης είναι διαθέσιμα σε διάφορες μορφές και η κατανάλωσή της δεν έχει συσχετιστεί με οποιεσδήποτε ανησυχίες για την ασφάλεια. Ωστόσο, τα κλινικά οφέλη της ασταξανθίνης μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με την πηγή, την ισομερή παραλλαγή, ακόμη και τη διατροφή του καταναλωτή. Μία από τις προκλήσεις είναι η χαμηλή και μεταβλητή βιοδιαθεσιμότητα της ασταξανθίνης στον άνθρωπο, η οποία μπορεί να ενισχυθεί όταν λαμβάνεται με διαιτητικά λιπίδια. Επομένως, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν καλύτερα συστήματα χορήγησης ασταξανθίνης για τη βελτίωση της βιοδιαθεσιμότητάς της. Αν και αρκετές κλινικές δοκιμές έχουν δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα, πολυάριθμα οφέλη έχουν αποδειχθεί μόνο σε ζωικά ή *in vitro* μοντέλα.

Βιβλιογραφία

- Ambati, R.R., Phang, S.M., Ravi, S., Aswathanarayana, R.G., 2014. Astaxanthin: sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications--a review. *Mar Drugs* 12, 128–152. <https://doi.org/10.3390/md12010128>
- Barros, M.P., Poppe, S.C., Bondan, E.F., 2014. Neuroprotective Properties of the Marine Carotenoid Astaxanthin and Omega-3 Fatty Acids, and Perspectives for the Natural Combination of Both in Krill Oil. *Nutrients* 6, 1293–1317. <https://doi.org/10.3390/nu6031293>
- Brendler, T., Williamson, E.M., 2019. Astaxanthin: How much is too much? A safety review. *Phytother Res* 33, 3090–3111. <https://doi.org/10.1002/ptr.6514>
- Brown, D.R., Gough, L.A., Deb, S.K., Sparks, S.A., McNaughton, L.R., 2018. Astaxanthin in Exercise Metabolism, Performance and Recovery: A Review. *Front Nutr* 4, 76. <https://doi.org/10.3389/fnut.2017.00076>
- Choi, S.-K., Park, Y.-S., Choi, D.-K., Chang, H.-I., 2008. Effects of astaxanthin on the production of NO and the expression of COX-2 and iNOS in LPS-stimulated BV2 microglial cells. *J Microbiol Biotechnol* 18, 1990–1996.
- Clarkson, P.M., Thompson, H.S., 2000. Antioxidants: what role do they play in physical activity and health? *Am J Clin Nutr* 72, 637S–46S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/72.2.637S>

- Davinelli, S., Nielsen, M.E., Scapagnini, G., 2018. Astaxanthin in Skin Health, Repair, and Disease: A Comprehensive Review. *Nutrients* 10, 522. <https://doi.org/10.3390/nu10040522>
- Directive 2004/27/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004, 2009. *Pharmaceuticals, Policy and Law* 11, 523–557. <https://doi.org/10.3233/PPL-2009-0236>
- Djordjevic, B., Baralic, I., Kotur-Stevuljevic, J., Stefanovic, A., Ivanisevic, J., Radivojevic, N., Andjelkovic, M., Dikic, N., 2012. Effect of astaxanthin supplementation on muscle damage and oxidative stress markers in elite young soccer players. *J Sports Med Phys Fitness* 52, 382–392.
- Donoso, A., González-Durán, J., Muñoz, A.A., González, P.A., Agurto-Muñoz, C., 2021. Therapeutic uses of natural astaxanthin: An evidence-based review focused on human clinical trials. *Pharmacol Res* 166, 105479. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2021.105479>
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA), 2009. Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to astaxanthin and maintenance of joints, tendons, and connective tissue (ID 1918, 1978, 3142), protection of DNA, proteins and lipids from oxidative damage (ID 1449, 3141), maintenance of visual acuity (ID 1448), maintenance of blood cholesterol concentrations and maintenance of low plasma concentrations of C-reactive protein (ID 1450) pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal* 7, 1253. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.1253>
- Ekpe, L., Inaku, K., Ekpe, V., 2018. Antioxidant effects of astaxanthin in various diseases: a review. *J Mol Pathophysiol* 7, 1. <https://doi.org/10.5455/jmp.20180627120817>
- Food supplements [WWW Document], n.d. URL https://food.ec.europa.eu/safety/labelling-and-nutrition/food-supplements_en (accessed 5.31.23).
- Freitas-Rodríguez, S., Folgueras, A.R., López-Otín, C., 2017. The role of matrix metalloproteinases in aging: Tissue remodeling and beyond. *Biochim Biophys Acta Mol Cell Res* 1864, 2015–2025. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2017.05.007>
- Grebow, J., 2023. Is immune-plus-sleep the next trend in immune health products? *Nutritional Outlook, Nutritional Outlook Vol. 26 No. 3* 25.
- Higuera-Ciapara, I., Félix-Valenzuela, L., Goycoolea, F.M., 2006. Astaxanthin: a review of its chemistry and applications. *Crit Rev Food Sci Nutr* 46, 185–196. <https://doi.org/10.1080/10408690590957188>
- Hussein, G., Sankawa, U., Goto, H., Matsumoto, K., Watanabe, H., 2006. Astaxanthin, a Carotenoid with Potential in Human Health and Nutrition. *J. Nat. Prod.* 69, 443–449. <https://doi.org/10.1021/np050354+>
- Ito, N., Seki, S., Ueda, F., 2018. The Protective Role of Astaxanthin for UV-Induced Skin Deterioration in Healthy People—A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Trial. *Nutrients* 10, 817. <https://doi.org/10.3390/nu10070817>
- Johnson, E.J., 2002. The role of carotenoids in human health. *Nutr Clin Care* 5, 56–65. <https://doi.org/10.1046/j.1523-5408.2002.00004.x>
- Kohandel, Z., Farkhondeh, T., Aschner, M., Pourbagher-Shahri, A.M., Samarghandian, S., 2022. Anti-inflammatory action of astaxanthin and its use in the treatment of various diseases. *Biomed Pharmacother* 145, 112179. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112179>

- Lee, S.-J., Bai, S.-K., Lee, K.-S., Namkoong, S., Na, H.-J., Ha, K.-S., Han, J.-A., Yim, S.-V., Chang, K., Kwon, Y.-G., Lee, S.K., Kim, Y.-M., 2003. Astaxanthin inhibits nitric oxide production and inflammatory gene expression by suppressing I(kappa)B kinase-dependent NF-kappaB activation. *Mol Cells* 16, 97–105.
- Liu, X., Xie, J., Zhou, L., Zhang, J., Chen, Z., Xiao, J., Cao, Y., Xiao, H., 2023. Recent advances in health benefits and bioavailability of dietary astaxanthin and its isomers. *Food Chem* 404, 134605. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134605>
- Miyawaki, H., Takahashi, J., Tsukahara, H., Takehara, I., 2008. Effects of Astaxanthin on Human Blood Rheology. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition* 43, 69–74. <https://doi.org/10.3164/jcfn.2008048>
- Mohiuddin, A.K., 2019. Seaweeds: A Comprehensive Review of Pharmacological Interests. *International Journal of Clinical Pharmacology & Toxicology*. <https://doi.org/10.19070/2167-910X-1900050>
- Nair, A., Ahirwar, A., Singh, S., Lodhi, R., Lodhi, A., Rai, A., Jadhav, D.A., Harish, Varjani, S., Singh, G., Marchand, J., Schoefs, B., Vinayak, V., 2023. Astaxanthin as a King of Ketocarotenoids: Structure, Synthesis, Accumulation, Bioavailability and Antioxidant Properties. *Marine Drugs* 21, 176. <https://doi.org/10.3390/md21030176>
- Pandel, R., Poljšak, B., Godic, A., Dahmane, R., 2013. Skin photoaging and the role of antioxidants in its prevention. *ISRN Dermatol* 2013, 930164. <https://doi.org/10.1155/2013/930164>
- Park, J.S., Chyun, J.H., Kim, Y.K., Line, L.L., Chew, B.P., 2010. Astaxanthin decreased oxidative stress and inflammation and enhanced immune response in humans. *Nutrition & Metabolism* 7, 18. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-7-18>
- Pittayapruerk, P., Meehansan, J., Prapapan, O., Komine, M., Ohtsuki, M., 2016. Role of Matrix Metalloproteinases in Photoaging and Photocarcinogenesis. *Int J Mol Sci* 17, 868. <https://doi.org/10.3390/ijms17060868>
- Precedence Research - Market Research Reports & Consulting Firm [WWW Document], n.d. URL <https://www.precedenceresearch.com/> (accessed 5.31.23).
- Shargel, L.P., B. C. Yu, A.P., 2012. *Applied Biopharmaceutics & Pharmacokinetics*.
- Steinbrenner, H., Ramos, M.C., Stuhlmann, D., Sies, H., Brenneisen, P., 2003. UVA-mediated downregulation of MMP-2 and MMP-9 in human epidermal keratinocytes. *Biochem Biophys Res Commun* 308, 486–491. [https://doi.org/10.1016/s0006-291x\(03\)01430-x](https://doi.org/10.1016/s0006-291x(03)01430-x)
- Tominaga, K., Hongo, N., Fujishita, M., Takahashi, Y., Adachi, Y., 2017. Protective effects of astaxanthin on skin deterioration. *J Clin Biochem Nutr* 61, 33–39. <https://doi.org/10.3164/jcfn.17-35>
- Tominaga, K., Hongo, N., Karato, M., Yamashita, E., 2012. Cosmetic benefits of astaxanthin on humans subjects. *Acta Biochim Pol* 59, 43–47.
- Yamagishi, R., Aihara, M., 2014. Neuroprotective effect of astaxanthin against rat retinal ganglion cell death under various stresses that induce apoptosis and necrosis. *Mol Vis* 20, 1796–1805.
- Yuan, J.-P., Peng, J., Yin, K., Wang, J.-H., 2011. Potential health-promoting effects of astaxanthin: a high-value carotenoid mostly from microalgae. *Mol Nutr Food Res* 55, 150–165. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201000414>
- Zhang, L., Wang, H., 2015. Multiple Mechanisms of Anti-Cancer Effects Exerted by Astaxanthin. *Mar Drugs* 13, 4310–4330. <https://doi.org/10.3390/md13074310>

Zhang, X., Hou, Y., Li, J., Wang, J., 2021. The Role of Astaxanthin on Chronic Diseases. *Crystals* 11, 505. <https://doi.org/10.3390/cryst11050505>

Barcelona Institute for Global Health (ISGlobal) 2015, *About Microalgae-NoMorFilm*, viewed 27 June 2023, <<http://www.nomorfilm.eu/about-microalgae>>.

NaturaNRG, *Η εξόντωση των Κριλ απειλεί την Ανταρκτική.*, viewed 27 June 2023, <<https://www.naturanrg.gr/h-exontosi-ton-krill-apili-tin-antarktiki/>>.

Nutraonly (Ξιάν) Διατροφές Inc, *Functional Red Yeast Rice, Monacolin K Suppliers & Manufacturers*, viewed 27 June 2023, <<https://gr.nutraonlynutritions.com/organic-phytoextraction-powder/phytoextraction-powder/functional-red-yeast-rice-monacolin-k.html>>.

Chiltern Seeds, *Adonis aestivalis £1.95 from Chiltern Seeds*, viewed 27 June 2023, <<https://www.chilternseeds.co.uk/item/48-adonis-aestivalis-seeds>>.

SlidePlayer.gr Inc. 2023, *Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων Τμήμα Χημείας Καθηγητής Ιωάννης Ρούσσης ΒΙΟΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΒΙΟΔΡΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ 1.*, viewed 27 June 2023, <<https://slideplayer.gr/slide/14007683/>>.