



ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ - ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Θέμα:

***«Αξιοποίηση υποπροϊόντων βιομηχανικής τομάτας με έμφαση την ανάκτηση
αντιοξειδωτικών καροτενοειδών»***



Σπουδαστής/τρια:

Μόσχος Νικόλαος

(ΑΜ: 2620110)

Επιβλέπων Καθηγητής/τρια:

Παπαχατζής Αλέξανδρος

Λάρισα, 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω από καρδιάς τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους με στήριξαν σε αυτό το απαιτητικό αλλά και ιδιαίτερα δημιουργικό ταξίδι γνώσης.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Πρόεδρο του Τμήματος και επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αλέξανδρο Παπαχατζή, για τη συνεχή του στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε κάθε στάδιο αυτής της προσπάθειας. Η συμβολή του ήταν καταλυτική όχι μόνο για την εξέλιξη της παρούσας μελέτης, αλλά και για τη συνολική μου πορεία στο προπτυχιακό στάδιο αυτό.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά το Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην Καρδίτσα για τη φιλοξενία και τη δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω εκεί το πειραματικό μέρος της εργασίας μου. Ξεχωριστά λόγια αξίζουν για τον καθηγητή κ. Σταύρο Λαλά, ο οποίος με καθοδήγησε με συνέπεια και ενδιαφέρον καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Πολύτιμη ήταν επίσης η συμβολή του κ. Δημήτριου -Ραφαήλ Καλομπάτσιου, Χημικού και υποψήφιου διδάκτορα του Τμήματος, ο οποίος στάθηκε αρωγός σε κάθε πρακτικό βήμα. Έπειτα, η παρουσία και η εποικοδομητική συνεργασία με τον κ. Βασίλη Αθανασιάδη, Τεχνολόγο Τροφίμων, συνέβαλε καθοριστικά στην ομαλή υλοποίηση του πειράματος.

Ιδιαίτερη θέση στις ευχαριστίες μου έχουν και οι συμφοιτητές μου, με τους οποίους μοιράστηκα εμπειρίες, προβληματισμούς, αλλά και στιγμές χαλάρωσης και αλληλοϋποστήριξης. Το κλίμα συνεργασίας και φιλίας που δημιουργήσαμε αποτέλεσε στήριγμα σε κάθε δύσκολη στιγμή.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τους φίλους και τους συγγενείς μου για την ενθάρρυνση και τη θετική τους ενέργεια, που μου έδιναν δύναμη να συνεχίζω ακόμα και όταν οι απαιτήσεις του προγράμματος γίνονταν πειστικές.

Τέλος, ένα μεγάλο και ειλικρινές «ευχαριστώ» στην οικογένειά μου, που στάθηκε διαχρονικά στο πλευρό μου με αγάπη, κατανόηση και αδιάκοπη στήριξη. Χωρίς την παρουσία και την πίστη τους, τίποτα από όλα αυτά δεν θα ήταν εφικτό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη μελέτη της βιομηχανικής τομάτας, ενός από τα σημαντικότερα λαχανικά της παγκόσμιας αγροδιατροφικής αλυσίδας, δίνοντας έμφαση στα υποπροϊόντα που προκύπτουν από τη βιομηχανική της επεξεργασία. Τα υπολείμματα αυτά, που περιλαμβάνουν κυρίως φλοιοί και σπόροι, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε βιοδραστικές ενώσεις όπως τα καροτενοειδή και, ειδικότερα, το λυκοπένιο. Το λυκοπένιο αποτελεί μια ισχυρή αντιοξειδωτική ουσία, με αποδεδειγμένες ευεργετικές ιδιότητες για την ανθρώπινη υγεία, ιδίως ως προς την προστασία από χρόνιες παθήσεις και την καταπολέμηση του οξειδωτικού στρες.

Η εργασία εξετάζει επίσης τις πράσινες τεχνικές εκχύλισης, που αποτελούν έναν πιο φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο αξιοποίησης φυσικών ενώσεων. Στο πειραματικό μέρος, εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικοί διαλύτες, αιθανόλη, ακετόνη, εξαάνιο και οξικός αιθυλεστέρας, για την εκχύλιση των καροτενοειδών από αποξηραμένα δείγματα παραπροϊόντων τομάτας. Τα δείγματα προετοιμάστηκαν μέσω κατάψυξης και λυοφιλίωσης, κοσκινίστηκαν, και εκχυλίστηκαν σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και χρόνου.

Η αξιολόγηση των εκχυλισμάτων πραγματοποιήθηκε με τις μεθόδους FRAP και DPPH, οι οποίες εκτιμούν την αντιοξειδωτική ικανότητα κάθε δείγματος. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν την αιθανόλη ως τον πιο αποδοτικό διαλύτη, προσφέροντας υψηλότερα επίπεδα αντιοξειδωτικής δράσης, ενώ παράλληλα αποτελεί και διαλύτη ασφαλή για τρόφιμα (food-grade), προσδίδοντας επιπλέον αξία στην πράσινη προσέγγιση της μεθόδου.

Συνολικά, η προσπάθεια αυτή αναδεικνύει την αξία της αξιοποίησης των υποπροϊόντων της τομάτας ως πηγές πολύτιμων φυσικών ενώσεων, προτείνοντας παράλληλα μια βιώσιμη και περιβαλλοντικά αποδεκτή στρατηγική για τη βιομηχανία τροφίμων και τις επιστήμες υγείας. Τα πειραματικά αποτελέσματα ενισχύουν την προοπτική χρήσης φιλικών προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον μεθόδων για την παραγωγή φυσικών αντιοξειδωτικών με πιθανές εφαρμογές στη φαρμακευτική, κοσμετολογία και διατροφολογία.

Λέξεις – Κλειδιά: Βιομηχανική Τομάτα, Υποπροϊόντα, Καροτενοειδή, Λυκοπένιο, Αντιοξειδωτικά, Εκχύλιση, Πράσινοι Διαλύτες, Αιθανόλη, Κυκλική Οικονομία, Βιοδραστικές Ενώσεις.

ABSTRACT

This study focuses on the industrial tomato, one of the most important vegetables in the global agri-food chain, placing particular emphasis on the by-products resulting from its industrial processing. These residues, mainly consisting of peels and seeds, are of significant interest due to their high content of bioactive compounds such as carotenoids, especially lycopene. Lycopene is a powerful antioxidant with well-documented health benefits, particularly in protecting against chronic diseases and combating oxidative stress.

The study also explores green extraction techniques, which provide a more environmentally friendly approach to utilizing natural compounds. In the experimental section, four different solvents, ethanol, acetone, hexane, and ethyl acetate, were used to extract carotenoids from dried tomato by-product samples. The samples were prepared by freezing and lyophilization, followed by sieving and extraction under varying conditions of temperature and time.

The antioxidant capacity of the extracts was evaluated using the FRAP and DPPH assays. The results identified ethanol as the most effective solvent, offering the highest antioxidant activity while also being a food-grade and environmentally safe option. This enhances the value of the green approach applied in this methodology.

Overall, the study highlights the potential of tomato by-products as valuable sources of natural compounds and proposes a sustainable, eco-friendly strategy for the food industry and health sciences. The experimental findings support the potential application of human- and eco-safe methods for producing natural antioxidants, with possible uses in pharmaceuticals, cosmetics, and nutrition.

Keywords: Industrial Tomato, By-products, Carotenoids, Lycopene, Antioxidants, Extraction, Green Solvents, Ethanol, Circular Economy, Bioactive Compounds.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	13
ΒΟΤΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ	13
2.1 Ιστορική Αναδρομή και Εξάπλωση	13
2.2 Βοτανικά Χαρακτηριστικά.....	18
2.3 Καλλιεργητικές Τεχνικές.....	21
Προετοιμασία του Εδάφους.....	23
Σπορά	24
Φύτευση	25
Μεταφύτευση.....	26
Λίπανση	28
Άρδευση.....	29
Κλάδεμα και Άλλες Τεχνικές	30
Εχθροί και Ασθένειες.....	30
Ζιζανιοκτονία.....	32
Συγκομιδή και Επεξεργασία Καρπού.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	35
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΜΑΤΑ – ΥΠΟΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ..	35
3.1 Γενικά στοιχεία για την Βιομηχανική Τομάτα.....	35
3.2 Χημική Σύσταση και Διατροφική Αξία	36
3.3 Υποπροϊόντα Βιομηχανικής Επεξεργασίας Τομάτας	39
3.4 Ανάγκη Αξιοποίησης Υποπροϊόντων	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	44
ΤΑ ΚΑΡΟΤΕΝΟΕΙΔΗ ΣΤΗΝ ΤΟΜΑΤΑ.....	44
4.1 Δομή και Χημική Ταξινόμηση.....	45
4.2 Βιοσύνθεση και Λειτουργία.....	46
4.3 Περιεκτικότητα και Κατανομή στα μέρη του φυτού.....	50
4.4 Αντιοξειδωτικές Ιδιότητες και ο Ρόλος τους στην Υγεία.....	51
Αντικαρκινικές Ιδιότητες	52
Δράση κατά του Καρκίνου του Προστάτη	54
Καρδιοπροστατευτικές Ιδιότητες	56
Νευροεκφυλιστικές Παθήσεις και Ευεργετικές Επιδράσεις.....	58
Ρύθμιση του Σακχαρώδη Διαβήτη	59
Ενίσχυση της Υγείας του Δέρματος	61
Αποκατάσταση από τη Φυσική Άσκηση	62
Συμβολή στην Ολιστική Υγεία.....	64
4.5 Παρουσία Καροτενοειδών σε Επεξεργασμένα Προϊόντα Τομάτας.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	67
ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΚΑΡΟΤΕΝΟΕΙΔΩΝ.....	67
5.1 Κλασικές Μέθοδοι Εκχύλισης	68
5.1.1 Στατική Εκχύλιση (<i>Maceration</i>)	69
5.1.2 Εκχύλιση με την μέθοδο <i>Soxhlet</i>	70
5.1.3 Εκχύλιση με Οργανικούς Διαλύτες και Σαπωνοποίηση	71
5.2 Σύγχρονες Τεχνικές Εκχύλισης	73
5.2.1 Εκχύλιση με Μικροκύματα.....	73
5.2.2 Εκχύλιση με Υπερήχους	75
5.2.3 Εκχύλιση με Υπερκρίσιμα Ρευστά.....	77
5.2.4 Εκχύλιση με Υγρό υπό Πίεση	79
5.2.5 Εκχύλιση με Υψηλή Υδροστατική Πίεση	82
5.2.6 Εκχύλιση με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία (PEF).....	83
5.2.7 Ενζυμικά Υποβοηθούμενη Εκχύλιση	84
5.3 Καθαρισμός και Επεξεργασία Εκχυλισμάτων.....	86

5.4 Ενδεικτικό Πλάνο Εκχύλισης και Ανάλυσης Καροτενοειδών	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	91
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	91
6.1 Εισαγωγή	91
6.2 Υλικά και Μέθοδοι.....	91
6.3 Πειραματική Διαδικασία	92
6.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων	95
6.5 Συζήτηση	97
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	123
<i>Παράρτημα Α</i>	123
<i>Δομή Καροτενοειδών</i>	123
<i>Παράρτημα Β</i>	125
<i>Πειραματική Διαδικασία</i>	125
<i>Παράρτημα Γ</i>	128
<i>Αποτελέσματα Μελέτης</i>	128

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Παραγωγή Τομάτας και Υποπροϊόντων.		
Πηγή: https://fresher.gr/reports/αλματώδης-αύξηση-σε-εισαγωγές-ντομάτ/7058/	12	
Εικόνα 2. Καλλιέργεια και Μεταποίηση Τομάτας - Ελλάδα.		
Πηγή: https://fresher.gr/reports/αλματώδης-αύξηση-σε-εισαγωγές-ντομάτ/7058/	13	
Εικόνα 3. Παγκόσμια Κατανομή Παραγωγής Φρέσκιας και Μεταποιημένης Τομάτας.		
Πηγή: https://tvxs.gr/aporseis/arthra-gnomis/o-kapitalismos-tis-ntomatas/	17	
Εικόνα 4. Δομή του Φυτού της Τομάτας. Πηγή:		
https://in.pinterest.com/pin/890094313856667251/	18	
Εικόνα 5. Βλαστός και Φύλλα Τομάτας.	Πηγή:	
https://www.giantsakiplants.gr/fyta/laxan-kaliere-ntomatas-1/	19	
Εικόνα 6. Σπόροι, Άνθος και Καρπός Τομάτας.		
Πηγή: https://marlanti.blogspot.com/2018/06/blog-post_2.html#google_vignette	20	
Εικόνα 7. Θερμοκηπιακή Καλλιέργεια Τομάτας.	Πηγή:	
https://www.ypaithros.gr/ekdoseis/thermokiapiaki-ntomata-kalliergeia-praktkes/	21	
Εικόνα 8. Σωστά Ψιλοχωματισμένο Έδαφος. Πηγή:		
http://www.grassmarket.gr/λαχανόκηπος-λίπανση-χώμα-κοπριά-λαχανικά-έδαφος-προετοιμασία-λίπασμα-σπόροι-κηπευτικά	23	
Εικόνα 9. Τοποθέτηση Σπόρων Τομάτας. Πηγή: https://www.gemma.gr/gr/symvoules-arthra/leptomereies/12361/	24	
Εικόνα 10. Μεταφύτευση Φυταρίων στον αγρό. Πηγή: https://fresher.gr/reports/πληρώνει-30-λεπτά-πάνω-η-πρώτη-ποιότητα/5377/	26	
Εικόνα 11. Χειρωνακτική Λίπανση Τοματιάς.		
Πηγή: https://www.mistikakipou.gr/asvestio-lipasma-fita-kalliergeies/	28	
Εικόνα 12. Στάγδην Άρδευση. Πηγή: https://www.istockphoto.com/es/foto/sistema-de-riego-de-goteo-gm845918758-138454019	29	
Εικόνα 13. Μηχανική Συλλογή Τομάτας. Πηγή:		
https://www.agrotypos.gr/kalliergeies/viomichanika-fyta/ypsiloteres-times-sti-viomichaniki-ntomata-diekdikoun-oi-paragogoi	33	
Εικόνα 14. Διαλογή Καρπών.	Πηγή: https://www.ypaithros.gr/ksekina-syllogi-biomixanikis-tomatas-apo-thesto/	34
Εικόνα 15. Βιομηχανική Τομάτα. Πηγή: https://geoponiki.com/tomata_viomihaniki/	35	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην περίληψη αυτής της εργασίας, η τομάτα αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα και πολύτιμα τρόφιμα παγκοσμίως, τόσο για την πλούσια γεύση της όσο και για τα σημαντικά διατροφικά της οφέλη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι βιοδραστικές ενώσεις που περιέχει, όπως τα καροτενοειδή, και κυρίως το λυκοπένιο, το οποίο θεωρείται ένα από τα πιο ισχυρά φυσικά αντιοξειδωτικά. Παράλληλα, καθώς η βιομηχανική μεταποίηση της τομάτας δημιουργεί μεγάλα ποσά παραπροϊόντων, γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη να αξιοποιήσουμε αυτά τα υπολείμματα με έναν έξυπνο και βιώσιμο τρόπο (Αναγνωστόπουλος, 2021).

Τα τελευταία χρόνια, η ιδέα της επαναχρησιμοποίησης των παραπροϊόντων της τομάτας έχει κερδίσει έδαφος, ειδικά στο πλαίσιο της πράσινης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας. Πίσω από τον πολτό, τη φλούδα και τα σπόρια που απομένουν από τη βιομηχανική επεξεργασία, κρύβεται ένας θησαυρός βιοδραστικών ενώσεων που μπορούν να έχουν σημαντική εφαρμογή τόσο στη διατροφή όσο και στη φαρμακοβιομηχανία ή την κοσμετολογία. Για να επιτύχουμε την ανάκτηση αυτών των πολύτιμων συστατικών, χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές εκχύλισης, οι οποίες έχουν βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, προσφέροντας καλύτερη απόδοση με λιγότερη επιβάρυνση στο περιβάλλον (Μαυρογένης & Παναγιωτίδης, 2020).

Στα βήματα αυτής της προσπάθειας, η παρούσα εργασία συνδυάζει τη θεωρητική προσέγγιση με ένα πρακτικό πειραματικό μέρος, που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου σε παράρτημα της Καρδίτσας. Το θεωρητικό υπόβαθρο που προηγήθηκε βασίστηκε αποκλειστικά σε έγκυρες και επιστημονικά τεκμηριωμένες μελέτες, δημοσιευμένες σε αναγνωρισμένες πηγές και βάσεις δεδομένων, προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία των πληροφοριών (Πετροπουλάκης, 2018). Στο πρακτικό σκέλος, μελετήθηκε η αποδοτικότητα διαφορετικών διαλυτών στην εκχύλιση καροτενοειδών από παραπροϊόντα τομάτας, με τη βοήθεια φιλικών προς το περιβάλλον τεχνικών. Παράλληλα, αξιολογήθηκε η αντιοξειδωτική δράση των εκχυλισμάτων μέσω δύο διαδεδομένων μεθόδων (FRAP και

DPPH), επιτρέποντας μια πιο πλήρη κατανόηση του πλούτου που κρύβεται σε υλικά που μέχρι πρότινος θεωρούνταν απλώς «απόβλητα» (Κατσαρός & Μπερίκος, 2022).

Ο βασικός στόχος της εργασίας ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο αυτά τα παραπροϊόντα μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά, συμβάλλοντας τόσο στην προστασία του περιβάλλοντος όσο και στη δημιουργία νέων καινοτόμων εφαρμογών. Η επιλογή της αιθανόλης ως διαλύτης, που αναδείχθηκε ως ο πιο αποδοτικός αλλά και ασφαλής για τρόφιμα, φανερώνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης αυτής της μεθόδου ακόμα και σε παραγωγικές διαδικασίες που απευθύνονται στον τελικό καταναλωτή.

Η εργασία είναι δομημένη σε έξι βασικά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο εμφανίζεται μία εισαγωγή που μας προετοιμάζει για το κυρίως θέμα της διπλωματικής. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στο φυτό της τομάτας. Εκεί παρουσιάζονται στοιχεία όπως η ιστορική αναδρομή του φυτού, η εξάπλωσή της σε παγκόσμιο επίπεδο, σχετικές πληροφορίες με τα βοτανικά χαρακτηριστικά και τις απαιτούμενες καλλιεργητικές τεχνικές. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει, με την σειρά του, στα υποπροϊόντα που προκύπτουν από τη μεταποίηση της τομάτας και στη σημασία της αξιοποίησής τους, με αναφορά σε γενικότερα στοιχεία, χημική σύσταση, διατροφική αξία και αναγκαιότητα αξιοποίησης. Το τέταρτο και πιο σημαντικό κεφάλαιο αναφέρεται στα καροτενοειδή που εμπεριέχονται στο συγκεκριμένο φυτό, ξεκινώντας με μία σύντομη αναφορά στην δομή και την χημική ταξινόμηση αυτών, την βιοσύνθεση, την λειτουργία, συνεχίζει με λεπτομερή αναφορά στην περιεκτικότητα αυτών σε κάθε μέρος του φυτού και κλείνει με τον αναπόσπαστο ρόλο του στην ανθρώπινη υγεία. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες βασικές μέθοδοι ανάκτησης των καροτενοειδών, με διαχωρισμό σε κλασικές και σύγχρονες τεχνικές. Στο σημείο αυτό αποκτιέται γνώση και για τις πράσινες τεχνικές εκχύλισης και την προστασία του περιβάλλοντος. Το έκτο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει το πειραματικό μέρος της εργασίας αναφερόμενο σε μία κεντρική εισαγωγή, υλικά και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν και λεπτομερή αναφορά της πειραματικής διαδικασίας. Παρουσιάζονται ταυτόχρονα αναλυτικά τα αποτελέσματα της επικείμενης μελέτης και μία συνδυαστική συζήτηση που μας προτρέπει για περαιτέρω έρευνα και ερωτήματα. Τέλος, στο καταλυτικό μέρος της εργασίας παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα και προτάσεις που προέκυψαν από όλη αυτήν την διαδρομή που αναδεικνύουν πιθανή αναγκαιότητα για μελλοντική αξιοποίηση των ευρημάτων και περαιτέρω πειραματική διερεύνηση.

Όλα τα δεδομένα στηρίζονται σε έγκυρες, σύγχρονες επιστημονικές πηγές, ενώ το πείραμα εφαρμόστηκε με ακρίβεια και συνέπεια στο εργαστήριο, ώστε τα συμπεράσματα να έχουν ουσιαστική αξία και πρακτική εφαρμογή.

Αναγνωρίζοντας τη σύγχρονη ανάγκη για πιο βιώσιμες λύσεις στη βιομηχανία τροφίμων, η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να ενταχθεί σε ένα ευρύτερο πλαίσιο που προωθεί την οικολογική υπευθυνότητα και την καινοτομία. Με την ανάδειξη του πλούτου που κρύβεται σε φαινομενικά «ανεπιθύμητα» παραπροϊόντα, προβάλλεται η δυνατότητα μετατροπής τους σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η ανάκτηση φυσικών αντιοξειδωτικών μέσω φιλικών μεθόδων, όχι μόνο ευνοεί την υγεία του καταναλωτή, αλλά συμβάλλει ουσιαστικά και στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Μέσα από τη διασταύρωση θεωρητικής γνώσης και πειραματικής εφαρμογής, ο αναγνώστης καλείται να εξερευνήσει έναν νέο, εναλλακτικό τρόπο σκέψης απέναντι στα απόβλητα της αγροδιατροφικής αλυσίδας. Η εργασία αυτή δεν περιορίζεται στην απλή αποτύπωση αποτελεσμάτων, αλλά ανοίγει τη συζήτηση για μια νέα κατεύθυνση στη διαχείριση φυσικών πόρων. Με τον τρόπο αυτό, επιδιώκεται να εμπνεύσει τόσο την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και τον παραγωγικό τομέα να δουν στην αξιοποίηση των υποπροϊόντων όχι μια υποχρέωση, αλλά μια ευκαιρία.



Εικόνα 1. Παραγωγή Τομάτας και Υποπροϊόντων.

Πηγή: <https://fresher.gr/reports/αλματώδης-άυξηση-σε-εισαγωγές-ντομάτ/7058/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΟΤΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ

2.1 Ιστορική Αναδρομή και Εξάπλωση

Η τομάτα (*Solanum lycopersicum* L.), αν και σήμερα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της παγκόσμιας διατροφής, διένυσε μια μακρά και πολυτάραχη πορεία μέχρι να καθιερωθεί ως βασικό τρόφιμο. Η καταγωγή της εντοπίζεται στη Νότια Αμερική, με επίκεντρο τις περιοχές του σημερινού Περού και του Εκουαδόρ, όπου απαντώνται ακόμη και σήμερα άγριες μορφές του είδους, όπως το *Solanum pimpinellifolium*, πρόγονος της καλλιεργούμενης τομάτας (Smith, 1994). Η εξάπλωσή της προς την Κεντρική Αμερική οδήγησε στην καλλιέργειά της από τους Αζτέκους, οι οποίοι την αποκαλούσαν “xītomatl”, δηλαδή “σαρκώδες φρούτο”, και τη χρησιμοποιούσαν ευρέως στη διατροφή τους (Coe, 2015).



Εικόνα 2. Καλλιέργεια και Μεταποίηση Τομάτας - Ελλάδα.

Πηγή: <https://fresher.gr/reports/αλματώδης->

σκεπτικισμός μέχρι τα τέλη του 18ου αιώνα, όταν καταγράφηκαν τα πρώτα στοιχεία εμπορικής κυκλοφορίας τομάτας στη Μεσόγειο. Αντίστοιχα, στη Βόρεια Αμερική, η καλλιέργεια και η διατροφική χρήση ξεκίνησαν μετά τα μέσα του ίδιου αιώνα (López-Terrada, 2015).

Στην Ελλάδα, η τομάτα εισήχθη γύρω στο 1818 και σταδιακά ενσωματώθηκε στις καλλιεργητικές πρακτικές της εποχής. Η χρήση της στη μεταποίηση ξεκίνησε μετά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο, με επίκεντρο τα Δωδεκάνησα και περιοχές της νότιας Ελλάδας. Η βιομηχανική της καλλιέργεια άρχισε να αναπτύσσεται δυναμικά από τη δεκαετία του 1960, με

ιδιαίτερη άνθηση μετά το 1975, οπότε ιδρύθηκαν σύγχρονες μονάδες επεξεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού, χυμού, αποφλοιωμένων ντομάτων και άλλων προϊόντων (Αγγίδης, 1996).

Πριν καθιερωθεί ως βασικό λαχανικό στη διατροφή παγκοσμίως, η τομάτα πέρασε από στάδια άγνοιας, προκατάληψης και περιορισμένης χρήσης. Σε πολλές περιοχές του κόσμου παρέμενε είτε άγνωστη είτε θεωρούνταν ακατάλληλη για κατανάλωση, ενώ η χρήση της περιοριζόταν αποκλειστικά σε διακοσμητικούς σκοπούς. Η καταγωγή του είδους αποδίδεται στη Νότια Αμερική, με το Περού να θεωρείται πιθανότερος τόπος προέλευσης, όπως δείχνουν παλαιές ονομασίες όπως *Mala Peruviana* και *Pomi del Peru*. Παρά την ύπαρξη άγριων μορφών του φυτού σε αυτές τις περιοχές, δεν υπάρχουν ενδείξεις συστηματικής καλλιέργειας ή διατροφικής αξιοποίησης πριν την άφιξη των Ισπανών.

Οι περισσότεροι ερευνητές συμφωνούν ότι οι πρώτες ημέρες ποικιλίες αναπτύχθηκαν στο Μεξικό, πιθανώς από φυτά που μεταφέρθηκαν από το νότο ως ζιζάνια ανάμεσα σε σπόρους καλαμποκιού. Οι ιθαγενείς λαοί της Κεντρικής Αμερικής, κυρίως οι Αζτέκοι, ξεκίνησαν τη βελτίωση και καλλιέργεια του φυτού. Η λέξη “tomatl”, προερχόμενη από τη γλώσσα Νάουατλ, σημαίνει «σαρκώδες φρούτο» και αποτέλεσε τη ρίζα του σύγχρονου ονόματος της τομάτας. Οι ποικιλίες που καλλιεργούνταν εκείνη την εποχή παρουσίαζαν σημαντική ποικιλία σε μέγεθος και χρώμα, με επικρατέστερη μορφή τη μικρόκαρπη κερασσοτομάτα, η οποία θεωρείται ο άμεσος πρόγονος των σημερινών καλλιεργούμενων τύπων. Υπάρχει μάλιστα και η θεωρία ότι η τομάτα πρωτοεμφανίστηκε στο Μεξικό ανεξάρτητα, στηριζόμενη στην παρουσία παλαιών ποικιλιών που εξακολουθούν να φύονται εκεί. Άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η εξάπλωση ακολούθησε πορεία από το Περού προς τα βόρεια. Το πιθανότερο σενάριο είναι πως η καλλιέργεια του φυτού αναπτύχθηκε ταυτόχρονα και στις δύο περιοχές (Smith, 1994).

Η εξάπλωση της τομάτας στην Ασία πραγματοποιήθηκε μέσω των Φιλιππίνων, αποικίας των Ισπανών, και από εκεί διαδόθηκε στη Νοτιοανατολική και αργότερα στην υπόλοιπη Ασία. Η είσοδος της στην Ευρώπη πραγματοποιήθηκε από Ισπανούς εξερευνητές τον 16ο αιώνα και η καλλιέργειά της ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1540, κυρίως σε περιοχές με μεσογειακό κλίμα, όπου το φυτό προσαρμόστηκε εύκολα (López-Terrada, 2015).

Η πρώτη τεκμηριωμένη αναφορά της στην Ευρώπη εντοπίζεται πιθανότατα στη Σεβίλλη, έναν σημαντικό εμπορικό κόμβο της εποχής με ισχυρούς δεσμούς με την Ιταλία. Το 1544, ο Ιταλός

βοτανολόγος Pietro Andrea Mattioli αναφέρθηκε σε ποικιλίες με κίτρινους καρπούς, τις οποίες αποκάλεσε *mala aurea* («χρυσά μήλα»), ενώ το 1554 κατέγραψε και κόκκινους τύπους (Mattioli, 1544; Mattioli, 1554). Την ίδια χρονιά, ο Ολλανδός βοτανολόγος Rembert Dodoens δημοσίευσε την πρώτη πλήρη βοτανική περιγραφή της τομάτας, αποδίδοντάς της αφροδισιακές ιδιότητες — χαρακτηρισμός που συνέβαλε στη διάδοση ονομάτων όπως *pomme d'amour* και *love apple* σε γαλλικά και αγγλικά αντίστοιχα (Dodoens, 1554).

Η διατροφική χρήση της τομάτας ξεκίνησε στις αρχές του 17ου αιώνα στην Ισπανία και στη συνέχεια επεκτάθηκε στην Ιταλία και τη Γαλλία. Παρά την προοδευτική αποδοχή της στη Μεσόγειο, στη Βόρεια Ευρώπη οι επιφυλάξεις διατηρήθηκαν έως τα τέλη του 18ου αιώνα, κυρίως λόγω της συγγένειάς της με άλλα μέλη της οικογένειας Solanaceae, που περιέχουν τοξικές ουσίες όπως η σολανίνη. Η παρουσία αυτής της ένωσης στα φύλλα, σε συνδυασμό με την εξωτική προέλευση του φυτού, ενίσχυσε την καχυποψία για την κατανάλωσή του ως τρόφιμο (López-Terrada, 2015).

Ανάλογη ήταν η αντιμετώπιση και στη Βόρεια Αμερική, όπου η καλλιέργεια και η κατανάλωση της τομάτας εξαπλώθηκαν ευρέως μόνο μετά τα μέσα του 18ου αιώνα. Στην Ελλάδα, η τομάτα εισήχθη περίπου το 1818, ενώ η πρώτη γνωστή συνταγή που περιλάμβανε τομάτα δημοσιεύτηκε στη Νάπολη το 1692, πιθανότατα επηρεασμένη από παλαιότερες ισπανικές μαγειρικές παραδόσεις (Agius, 1996).

Η σταδιακή ένταξη της τομάτας στη διατροφή συνοδεύτηκε από ποικίλους μύθους και πολιτισμικές αντιλήψεις, εξαιτίας της συγγένειάς της με φυτά που θεωρούνταν τοξικά ή επικίνδυνα (Agius, 1996). Η φήμη της ως δηλητηριώδους φυτού συνδέεται κυρίως με τη συγγένειά της με το είδος *Atropa belladonna*, γνωστό από την αρχαιότητα για τις τοξικές και παραισθησιογόνες του ιδιότητες. Η ονομασία του γένους παραπέμπει στην Άτροπο, μία από τις τρεις Μοίρες της ελληνικής μυθολογίας, υποδηλώνοντας τον θανάσιμο χαρακτήρα της ουσίας. Συμπτώματα δηλητηρίασης από τη *belladonna* περιλαμβάνουν ξηροστομία, ερυθρότητα, ναυτία και νευρολογικές διαταραχές. Η σύγχυση αυτή ενισχύθηκε και από τη βοτανική ονοματοδοσία του 18ου αιώνα, καθώς ο Carl Linnaeus, επηρεασμένος από τη σχετική φημολογία, κατέταξε το φυτό ως *Lycopersicon esculentum*, όνομα που ερμηνεύεται ως «φαγώσιμο ροδάκινο του λύκου», αντανakλώντας τον σκεπτικισμό της εποχής (Smith, 1994).

Παρά τις προκαταλήψεις που συνόδευσαν την πορεία της, η εικόνα της τομάτας μεταβλήθηκε δραστικά κατά τις αρχές του 20ού αιώνα. Περίπου το 1920, στις ανεπτυγμένες χώρες της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής, άρχισε η συστηματική βιομηχανική επεξεργασία και κονσερβοποίηση του καρπού, γεγονός που οδήγησε σε σημαντική αύξηση τόσο της καλλιέργειας όσο και της εμπορικής αξίας της. Η ανάπτυξη νέων προϊόντων με βάση την τομάτα ενίσχυσε περαιτέρω τη ζήτηση και συνέβαλε στην καθιέρωσή της ως αναπόσπαστο στοιχείου της διατροφικής αλυσίδας κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα (Agius, 1996).

Η Ελλάδα και η Πορτογαλία κατατάσσονται επίσης μεταξύ των σημαντικότερων παραγωγών τομάτας στην Ευρώπη. Συγκεκριμένα, το 2002 η Ελλάδα παρήγαγε συνολικά 1,5 εκατομμύρια τόνους τομάτας, εκ των οποίων οι 860.000 τόνοι κατευθύνθηκαν για βιομηχανική επεξεργασία (Sekliziotis, 2003). Την ίδια χρονιά, η Πορτογαλία παρήγαγε 830.000 τόνους, με την προβλεπόμενη παραγωγή για την περίοδο 2003/04 να ανέρχεται σε 1,2 εκατομμύρια τόνους (Monte Gomes, 2003). Στην Πορτογαλία, οι περιοχές Ribatejo και Baixo Alentejo (νότια Πορτογαλία) αποτελούν τα βασικά κέντρα παραγωγής τομάτας για μεταποίηση, ενώ η περιοχή Algarve ξεχωρίζει για την καλλιέργεια φρέσκιας τομάτας σε θερμοκήπια, κυρίως κάτω από πλαστικό κάλυμμα. Το 2001, η παραγωγή φρέσκιας τομάτας στην Πορτογαλία ανήλθε σε 79.000 τόνους, καταλαμβάνοντας συνολική έκταση 1.450 εκταρίων, εκ των οποίων περίπου το 40–50% παράγεται σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις (Anuário Vegetal, 2002; Monteiro, 2003).

Η βιομηχανία της τομάτας στην Ελλάδα αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς της γεωργικής παραγωγής, κατατάσσοντας τη χώρα σε υψηλή θέση στην παγκόσμια κατάταξη βάσει της παραγόμενης ποσότητας. Παράλληλα, η ελληνική παραγωγή χαρακτηρίζεται από έντονο εξαγωγικό προσανατολισμό. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Διεθνούς Συμβουλίου Βιομηχανικής Τομάτας (WPTC), η Ελλάδα διαχρονικά καταλαμβάνει την τέταρτη θέση παγκοσμίως, μετά την Ιταλία, την Ισπανία και την Πορτογαλία, όσον αφορά τον όγκο επεξεργασίας νωπής τομάτας. Η παραγωγή βιομηχανικής τομάτας επηρεάζεται άμεσα από εξωγενείς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, ενώ σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι τιμές της νωπής τομάτας και οι νέες τεχνικές καλλιέργειας. Επιπλέον, η συνολική παραγωγή τελικών προϊόντων εξαρτάται και από το ύψος των αποθεμάτων που διατηρούν οι επιχειρήσεις κάθε έτος (WPTC, 2023).

Η εγχώρια παραγωγή εστιάζει κυρίως στην παραγωγή τοματοπολτού, καθώς και σε ολόκληρη ή ψιλοκομμένη τομάτα. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής τοματοπολτού και

αποφλοιωμένης τομάτας εξάγεται σε αγορές του εξωτερικού, ενώ προϊόντα όπως ο χυμός τομάτας, οι σάλτσες και η κέτσαπ διατίθενται κυρίως στην εγχώρια αγορά. Η κατανάλωση εντός της χώρας επικεντρώνεται κυρίως σε προϊόντα όπως η passata, οι ψιλοκομμένες αποφλοιωμένες ντομάτες και ο τοματοπολτός, συσκευασμένα σε μικρές μονάδες συσκευασίας για λιανική διάθεση (WPTC, 2023).

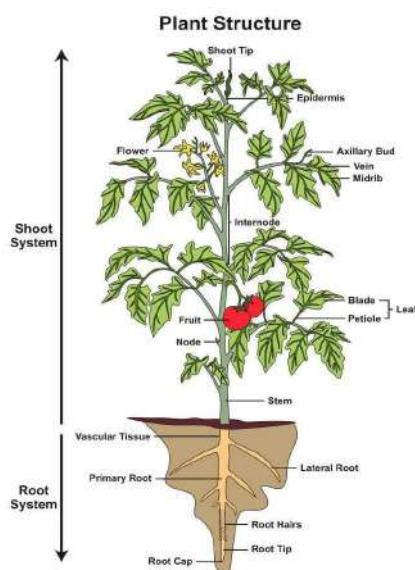
Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στην Ελλάδα η καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας ξεκίνησε τη δεκαετία του 1940, ενώ η πρώτη μονάδα μεταποίησης ιδρύθηκε στο Νομό Ηλείας, με σκοπό την κάλυψη των τότε αναγκών. Σήμερα, η καλλιέργεια εκτείνεται σε περίπου 192.000 στρέμματα, με ετήσια παραγωγή που κυμαίνεται μεταξύ 900.000 και 1.000.000 τόνων. Η βιομηχανική τομάτα εντάσσεται στα προϊόντα που λαμβάνουν κοινοτική ενίσχυση μέσω του Κανονισμού 2699/2000, ο οποίος παρέχει στήριξη μέσω των οργανωμένων ομάδων παραγωγών (Γεωργία - Κτηνοτροφία, 2002).

Τέλος, η εποχικότητα της αγροτικής παραγωγής, σε συνδυασμό με τις δυσκολίες διατήρησης των νωπών προϊόντων, όπως η βιομηχανική τομάτα, καθιστά επιτακτική τη μεταποίηση, ώστε να εξασφαλιστεί η διαθεσιμότητα των προϊόντων σε όλη τη διάρκεια του έτους. Η πρόοδος στην τεχνολογία τροφίμων και οι συνεχώς εξελισσόμενες διατροφικές τάσεις οδηγούν στην ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων, τα οποία ενισχύουν την κατανάλωση, αυξάνουν τη ζήτηση και την αξία του πρωτογενούς προϊόντος, βελτιώνουν το εισόδημα των παραγωγών, δημιουργούν θέσεις εργασίας και συμβάλλουν στην ενίσχυση της τοπικής οικονομίας μέσω της ανάπτυξης συναφών δραστηριοτήτων, όπως οι βιοτεχνίες και τα συσκευαστήρια (Σέμος, 2004).



Εικόνα 3. Παγκόσμια Κατανομή Παραγωγής Φρέσκιας και Μεταποιημένης Τομάτας.
Πηγή: <https://tvxs.gr/apopseis/arhra-qnomis/o-kapitalismos-tis-ntomatas/>

2.2 Βοτανικά Χαρακτηριστικά



Εικόνα 4. Δομή του Φυτού της Τομάτας.

Πηγή:

<https://in.pinterest.com/pin/890094313856>

Στο πλαίσιο της ταξινόμησής της, η τομάτα (*Solanum lycopersicum* L.), ως φυτικός οργανισμός ανήκει στην οικογένεια «*Solanaceae*», η οποία περιλαμβάνει περίπου 2.700 είδη, μεταξύ των οποίων σημαντικά καλλιεργούμενα φυτά όπως η πατάτα (*Solanum tuberosum*), η μελιτζάνα (*Solanum melongena*) και η πιπεριά (*Capsicum spp.*). Το γένος *Solanum* αποτελεί το μεγαλύτερο της οικογένειας, περιλαμβάνοντας 1.250 έως 1.700 είδη, τα οποία αναπτύσσονται σε ένα ευρύ φάσμα οικοσυστημάτων, από τα εύκρατα έως τα τροπικά κλίματα, παρουσιάζοντας αξιοσημείωτη μορφολογική ποικιλία (Bergougnoux, 2013).

Πιο συγκεκριμένα, το είδος «*lycopersicum*» περιλαμβάνει δώδεκα άγρια συγγενικά είδη, εκ των οποίων μόνο η καλλιεργούμενη μορφή (*S. lycopersicum*) έχει εξημερωθεί. Τα περισσότερα είδη του γένους «*Lycopersicum*» είναι θάμνοι μικρής διάρκειας ζωής, ολοκληρώνοντας τον βιολογικό τους κύκλο εντός πέντε μηνών ή και λιγότερο. Η διάκριση μεταξύ του γένους «*Lycopersicum*» και του ευρύτερου «*Solanum*» βασίζεται στη μορφολογία των ανθών και στον τρόπο απελευθέρωσης της γύρης (Peralta et al., 2006, Παρασκευόπουλος, 2009).

Όσον αφορά τις καλλιεργητικές συνθήκες, το συγκεκριμένο είδος έχει διαδοθεί ευρέως σε παγκόσμιο επίπεδο. Παρόλο που σε τροπικές περιοχές μπορεί να επιβιώσει ως πολυετές, στις περισσότερες γεωγραφικές ζώνες καλλιεργείται ως μονοετές. Σε περιοχές με εύκρατο κλίμα, όπως η Ευρώπη, η διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5–7 μηνών, ενώ σε τροπικά περιβάλλοντα μπορεί να συνεχίζεται για περισσότερους κύκλους καλλιέργειας (Tigchelaar, 1986, Rick, 1974, Ντόγρας, 2002).

Σχετικά με το ριζικό σύστημα, αυτό παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με τη μέθοδο εγκατάστασης της καλλιέργειας. Στην περίπτωση απευθείας σποράς, αναπτύσσεται ένας πασσαλώδης ριζικός άξονας, ο οποίος μπορεί να φτάσει σε βάθος έως και δύο μέτρων. Αντίθετα, κατά τη μεταφύτευση, η πρωτογενής ρίζα συνήθως τραυματίζεται, γεγονός που

οδηγεί στην ανάπτυξη δευτερευουσών πλευρικών ριζών, σχηματίζοντας τελικά ένα εκτεταμένο θυσσανώδες σύστημα (Atherton, 1986).



Εικόνα 5. Βλαστός και Φύλλα Τομάτας.

Πηγή: <https://www.giantsakiplants.gr/fyta/laxan->

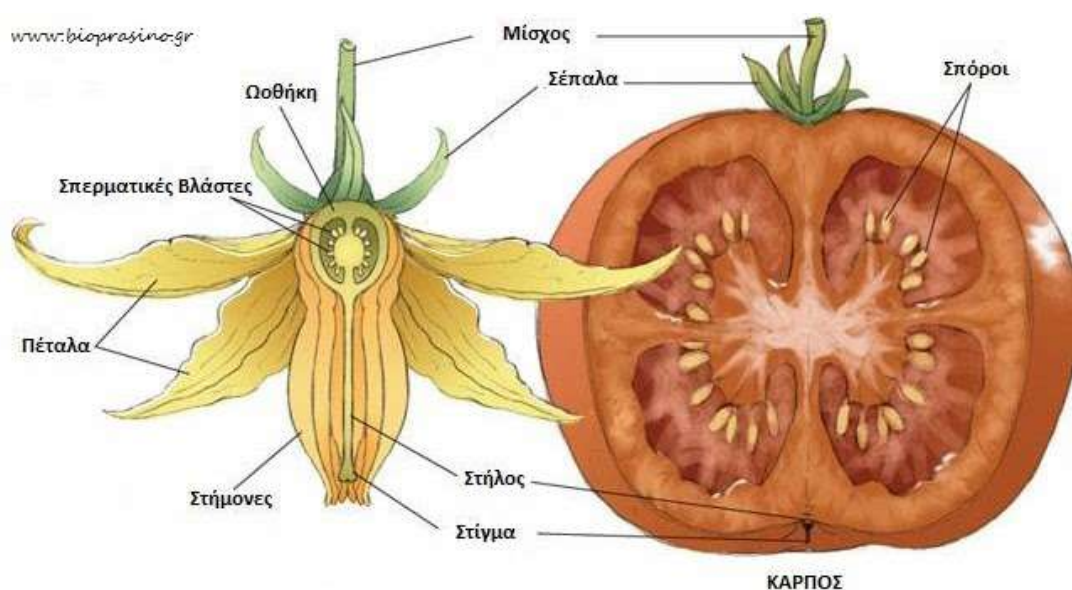
Αναφορικά με τον βλαστό, στα αρχικά στάδια ανάπτυξης είναι τρυφερός και εύθραυστος, αλλά σταδιακά αποκτά στιβαρή δομή και εξελίσσεται σε ισχυρό στέλεχος. Από τις μασχάλες των φύλλων εκπύσσονται πλάγιοι βλαστοί, οι οποίοι αναπτύσσονται από αξονικούς οφθαλμούς. Παρατηρείται ότι, κατά μέσο όρο, κάθε τρίτο φύλλο φέρει μια νέα ταξιανθία. Οι πλάγιες διακλαδώσεις συχνά θεωρούνται ανεπιθύμητες, καθώς ανταγωνίζονται τον κύριο άξονα για θρεπτικά στοιχεία, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την παραγωγή. Ο τύπος ανάπτυξης καθορίζεται κυρίως από γενετικούς παράγοντες, με αποτέλεσμα τη διάκριση μεταξύ ποικιλιών συνεχούς ανάπτυξης (indeterminate), οι οποίες αναπτύσσονται απεριόριστα, και ποικιλιών καθορισμένης ανάπτυξης (determinate), όπου η ανάπτυξη διακόπτεται με τον σχηματισμό τελικής ταξιανθίας. Στη σύγχρονη γεωργία, οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες βασίζονται κατά κύριο λόγο σε ποικιλίες συνεχούς ανάπτυξης, ενώ οι υπαίθριες εκμεταλλεύσεις προτιμούν ποικιλίες καθορισμένης ανάπτυξης (Kandel et al., 2020, Ολύμπιος, 2015).

Όσον αφορά το φύλλωμα του φυτού, τα φύλλα είναι σύνθετα και τοποθετούνται ελικοειδώς κατά μήκος του βλαστού, προσδίδοντας χαρακτηριστική μορφή στην κόμη. Κάθε φύλλο αποτελείται από ζεύγη φυλλαρίων και παράφυλλων, καταλήγοντας σε ένα τελικό ακριανό φυλλάριο. Ο αριθμός των φυλλαρίων κυμαίνεται από πέντε έως δεκατρία, ανάλογα με την ποικιλία και τη θέση κατά μήκος του βλαστού. Το σχήμα, το μέγεθος και ο χρωματισμός διαφοροποιούνται μεταξύ των ποικιλιών. Στην επιφάνεια των φύλλων και των βλαστών παρατηρούνται αδενώδεις τρίχες, οι οποίες εκκρίνουν αρωματικές ενώσεις που συμβάλλουν στη χαρακτηριστική οσμή του φυτού (Ντόγρας, 2002).

Η αναπαραγωγική δομή του φυτού σχηματίζεται σε κυματοειδείς ταξιανθίες, οι οποίες μπορεί να διαθέτουν απλό ή διακλαδισμένο κεντρικό άξονα. Κάθε ταξιανθία περιλαμβάνει συνήθως από 3 έως 20 άνθη σε μεγαλύτερες ποικιλίες, ενώ σε μικρόκαρπες μορφές τύπου *cherry*, ο αριθμός των ανθέων μπορεί να φτάσει έως και τα 50. Τα άνθη έχουν ακτινόμορφη διάταξη και αποτελούνται από πενταμερή κάλυκα, πενταμερή στεφάνη κίτρινου χρώματος και πέντε

στήμονες που σχηματίζουν έναν κοίλο κωνικό σχηματισμό, περιβάλλοντας τον στύλο και τον ύπερο. Η άνθηση ακολουθεί προοδευτική πορεία, ξεκινώντας από τα χαμηλότερα άνθη της ταξιανθίας και συνεχίζοντας προς τα ανώτερα. Το είδος χαρακτηρίζεται ως αυτογονιμοποιούμενο, λόγω του φαινομένου της υστερανδρίας, όπου ο ύπερος βρίσκεται εντός του κώνου των ανθών και ωριμάζει αργότερα από αυτούς. Ωστόσο, σε φυσικές συνθήκες μπορεί να παρατηρηθεί και σταυρογονιμοποίηση, με ποσοστά που κυμαίνονται από 0,5% έως 4% (Rick, 1978).

Η καρποφορία του φυτού εκφράζεται μέσω ραγών που σχηματίζονται από τη συγχώνευση των καρποφύλλων της ωοθήκης. Ο αριθμός των εσωτερικών κοιλοτήτων διαφέρει ανάλογα με τον αριθμό των καρποφύλλων στο άνθος, δημιουργώντας διαμερίσματα που περιέχουν ομάδες σπόρων, οι οποίοι περιβάλλονται από τον πλακούντα. Ο ώριμος καρπός αποτελείται κατά περίπου 95% από νερό, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό περιλαμβάνει σάκχαρα, οργανικά οξέα και συστατικά που καθορίζουν τη χαρακτηριστική γεύση και υφή. Η μορφή του καρπού μπορεί να διαφέρει σημαντικά, από σφαιρική ή πεπλατυσμένη έως απιοειδή ή κυλινδρική, ενώ το βάρος κυμαίνεται από 10–20 γραμμάρια στις μικρόκαρπες ποικιλίες έως και 300 γραμμάρια ή περισσότερο στις μεγαλόκαρπες. Κατά την πλήρη ωρίμανση, το χρώμα του καρπού είναι συνήθως έντονο κόκκινο, αν και υπάρχουν ποικιλίες με αποχρώσεις όπως κίτρινο, πορτοκαλί, πράσινο, σχεδόν μαύρο, δίχρωμο ή ακόμη και λευκό. Ο καρπός έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης ως προς τα αγρονομικά χαρακτηριστικά του, με στόχο τη γενετική βελτίωση και την εμπορική αξιολόγηση των ποικιλιών (Dorais et al., 2008, Heuvelink, 2005).



Εικόνα 6. Σπόροι, Άνθος και Καρπός Τομάτας.

Πηγή: https://marlanti.blogspot.com/2018/06/blog-post_2.html#google_vignette

Τέλος, οι σπόροι του φυτού έχουν πεπλατυσμένο σχήμα, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από στρογγυλό έως νεφροειδές, και καλύπτονται από μικροσκοπικές τριχοειδείς αποφύσεις. Το μέσο βάρος 1.000 σπόρων ανέρχεται σε 3,2 έως 3,4 γραμμάρια. Όταν φυλάσσονται υπό κατάλληλες συνθήκες, οι σπόροι διατηρούν υψηλή βλαστικότητα για διάστημα έως και τεσσάρων ετών μετά τη συγκομιδή. Ένα πλήρως αναπτυγμένο φυτό μπορεί να παράγει από 10.000 έως 25.000 σπόρους, γεγονός που υπογραμμίζει την υψηλή αναπαραγωγική δυναμική του είδους (Rick, 1974).

2.3 Καλλιεργητικές Τεχνικές

Η ανάπτυξη και η παραγωγικότητα της τομάτας επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις εφαρμοζόμενες καλλιεργητικές πρακτικές, οι οποίες διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο καλλιέργειας που επιλέγεται. Είτε πρόκειται για υπαίθρια καλλιέργεια, θερμοκηπιακή παραγωγή είτε για υδροπονικά συστήματα, οι τεχνικές που εφαρμόζονται πρέπει να προσαρμόζονται στις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε συστήματος, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών, η μεγιστοποίηση της απόδοσης και η επίτευξη υψηλής ποιότητας στους παραγόμενους καρπούς (Dorais et al., 2001). Η παραδοσιακή υπαίθρια καλλιέργεια παραμένει διαδεδομένη, καθώς προσφέρει χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και αξιοποιεί τους φυσικούς πόρους, ωστόσο είναι περισσότερο εκτεθειμένη σε ακραία καιρικά φαινόμενα και παθογόνα, γεγονός που περιορίζει την αποδοτικότητα σε σχέση με πιο ελεγχόμενα συστήματα (Jones, 2008).



Εικόνα 7. Θερμοκηπιακή Καλλιέργεια Τομάτας.
Πηγή: <https://www.ypaiithros.gr/ekdoseis/thermokipiaki-ntomata-kalliergeia-praktkes/>

Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η καλλιέργεια της τομάτας εντός θερμοκηπίων, η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του ελεγχόμενου περιβάλλοντος με την καλλιέργεια σε υπόστρωμα εδάφους ή μεικτό μέσο. Σε αυτήν την περίπτωση, οι παραγωγοί μπορούν να ελέγχουν κρίσιμες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και ο φωτισμός, επιτρέποντας την καλλιέργεια εκτός εποχής και την αύξηση της απόδοσης ανά μονάδα επιφάνειας (Gruda, 2005). Παράλληλα, η χρήση θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την πίεση από ζιζανικά φυτά και μειώνει την πιθανότητα προσβολών από εχθρούς και ασθένειες, επιτρέποντας τη μείωση της χρήσης

φυτοπροστατευτικών προϊόντων (Schwarz et al., 2014). Ωστόσο, η διαχείριση της θρέψης παραμένει πρόκληση, καθώς οι ανάγκες του φυτού ποικίλλουν ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης, τη θερμοκρασία και την ένταση της φωτοσύνθεσης, καθιστώντας απαραίτητη τη συνεχή παρακολούθηση των εδαφικών παραμέτρων και την εφαρμογή στοχευμένων πρακτικών λίπανσης (Gruda, 2005).

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται έντονο ερευνητικό και παραγωγικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστημάτων υδροπονικής καλλιέργειας της τομάτας. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των παραμέτρων που επηρεάζουν την ανάπτυξη του φυτού, όπως η θρέψη, η υγρασία, η θερμοκρασία και η έκθεση στο φως, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες και τις εδαφικές ασθένειες (Sonneveld & Voogt, 2009). Η υδροπονία καθιστά δυνατή την αύξηση της αποδοτικότητας της καλλιέργειας, τόσο σε επίπεδο ποσοτικής παραγωγής όσο και σε βελτίωση της ποιότητας των καρπών, καθώς και την εξοικονόμηση νερού και λιπασμάτων μέσω της ανακύκλωσης των θρεπτικών διαλυμάτων (Rouphael & Colla, 2005). Παράλληλα, η δυνατότητα καλλιέργειας σε θερμοκηπιακά περιβάλλοντα επιτρέπει τη διατήρηση σταθερών συνθηκών κατά τη διάρκεια του έτους, εξασφαλίζοντας παραγωγή εκτός εποχής και σταθερή προσφορά στην αγορά (Schwarz et al., 2014).

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος καλλιέργειας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής, η διαθεσιμότητα πόρων, οι τεχνικές δυνατότητες, το διαθέσιμο κεφάλαιο επένδυσης και οι επιδιωκόμενοι στόχοι παραγωγής (Gruda, 2005). Οι παραγωγοί καλούνται να αξιολογήσουν προσεκτικά τις επιλογές τους, ώστε να διαμορφώσουν ένα βιώσιμο και αποδοτικό παραγωγικό μοντέλο, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της σύγχρονης αγοράς, τις τάσεις της ζήτησης και τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της γεωργικής παραγωγής (Singh et al., 2017). Η συστηματική μελέτη και κατανόηση των παραμέτρων κάθε συστήματος καλλιέργειας αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για την επιτυχία της καλλιέργειας της τομάτας και τη διασφάλιση της μακροχρόνιας παραγωγικής βιωσιμότητας.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές πρακτικές που εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση, σύμφωνα με επιστημονικές μελέτες και κατευθυντήριες οδηγίες.

Προετοιμασία του Εδάφους

Η επιτυχής καλλιέργεια της τομάτας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάλληλη προετοιμασία του εδάφους, πριν την σπορά, η οποία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το σύστημα καλλιέργειας, είτε πρόκειται για υπαίθρια, θερμοκηπιακή ή και υδροπονική παραγωγή. Η προσεκτική διαχείριση του εδάφους και των θρεπτικών στοιχείων είναι κρίσιμη για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων και ποιοτικών καρπών.



Εικόνα 8. Σωστά Ψιλοχωματισμένο Έδαφος.

Πηγή:

<http://www.grassmarket.gr/λαχανόκηπος-λίπανση-χώμα-κοπριά-λαχανικά-έδαφος-προετοιμασία-λίπασμα-σπόροι-κηπευτικά>

Στις υπαίθριες καλλιέργειες, η προετοιμασία του εδάφους ξεκινά με βαθιά άροση σε βάθος 30–40 cm, η οποία βοηθά στη διάσπαση των συμπαγών στρωμάτων και στη βελτίωση της αεροπερατότητας. Ακολουθεί η ενσωμάτωση οργανικής ύλης, όπως καλά χωνεμένη κοπριά ή κομπόστ, σε ποσότητες που κυμαίνονται από 20 έως 40 τόνους ανά εκτάριο. Η ενσωμάτωση γίνεται με δισκοσβάρνισμα ή φρέζα, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή στο έδαφος. Η οργανική ύλη βελτιώνει τη δομή του εδάφους, αυξάνει την ικανότητα συγκράτησης νερού και παρέχει βασικά θρεπτικά στοιχεία. Η ρύθμιση του pH του εδάφους είναι επίσης σημαντική, με ιδανικό εύρος μεταξύ 5,8 και 6,8. Σε περιπτώσεις όξινων εδαφών, συνιστάται η προσθήκη ασβεστίου ή γύψου για την εξισορρόπηση του pH (Ddamulira et al., 2022).

Στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, από την άλλη, η προετοιμασία του εδάφους περιλαμβάνει την απολύμανση μέσω ηλιοαπολύμανσης ή βιοαπολύμανσης, καθώς και την ενσωμάτωση ώριμου κομπόστ για τη βελτίωση της γονιμότητας. Η χρήση κομπόστ από υπολείμματα τομάτας έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη και βελτιώνει τη μικροβιακή δραστηριότητα, συμβάλλοντας στην υγιή ανάπτυξη των φυτών (Mauromicale et al., 2019).

Στην υδροπονική καλλιέργεια, αντιθέτως, η προετοιμασία αφορά την προετοιμασία του θρεπτικού διαλύματος και του συστήματος καλλιέργειας. Το θρεπτικό διάλυμα πρέπει να περιέχει όλα τα απαραίτητα μακρο- και μικροθρεπτικά στοιχεία σε κατάλληλες συγκεντρώσεις, με το pH να διατηρείται μεταξύ 5,5 και 6,5 και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) να προσαρμόζεται ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών. Η χρήση διαλυμάτων όπως το Hoagland είναι κοινή πρακτική, ενώ η συνεχής παρακολούθηση και ρύθμιση των

παραμέτρων είναι απαραίτητη για την αποφυγή ανισορροπιών και την εξασφάλιση της βέλτιστης ανάπτυξης των φυτών (Hoagland & Arnon, 1950).

Με λίγα λόγια, η προσεκτική προετοιμασία του εδάφους και η σωστή διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων, θα λέγαμε πως αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για την επιτυχία της καλλιέργειας της τομάτας, ανεξαρτήτως του τρόπου παραγωγής που επιλέγεται. Κάθε σύστημα καλλιέργειας (υπαίθρια, θερμοκηπιακή ή υδροπονική παραγωγή), παρουσιάζει τις δικές του ιδιαιτερότητες και απαιτεί προσεκτική προσαρμογή των καλλιεργητικών πρακτικών. Η βαθιά άροση, η ενσωμάτωση οργανικής ύλης, η ρύθμιση του pH και η ορθή προετοιμασία του υποστρώματος στις θερμοκηπιακές και υδροπονικές συνθήκες δημιουργούν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη ισχυρού ριζικού συστήματος και την εξασφάλιση επαρκούς πρόσληψης νερού και θρεπτικών στοιχείων. Η συνεχής παρακολούθηση των παραμέτρων και η έγκαιρη παρέμβαση όταν απαιτείται είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ισορροπίας στο ριζόστρωμα ή στο θρεπτικό διάλυμα. Τελικά, η επιτυχία της καλλιέργειας εξαρτάται από την ολιστική προσέγγιση του παραγωγού, που συνδυάζει γνώση, παρατήρηση και σωστή εφαρμογή των επιστημονικών αρχών, ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή και να διασφαλιστεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Σπορά



Εικόνα 9. Τοποθέτηση Σπόρων Τομάτας.
Πηγή: <https://www.gemma.gr/gr/symvoules->

Η σπορά της τομάτας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε απευθείας στο χωράφι είτε σε εσωτερικούς χώρους για μεταγενέστερη μεταφύτευση. Η απευθείας σπορά στο χωράφι εφαρμόζεται σε περιοχές με μακρά περίοδο καλλιέργειας και σταθερές θερμοκρασίες. Οι σπόροι τοπ οθετούνται σε βάθος περίπου 1,5 εκατοστών, με απόσταση 30-45 εκατοστά μετα ξύ των φυτών και 90-120 εκατοστά μεταξύ των γραμμών. Γενικότερα επιλέγεται να πραγματοποιείται όταν η θερμοκρασία του εδάφους υπερβαίνει τους 15°C, συνήθως μετά την τελευταία παγωνιά της άνοιξης. Απαιτείται διατήρηση της υγρασίας του εδάφους μέχρι την εμφάνιση των σπορόφυτων (Jankauskienė et al., 2013).

Αντιθέτως, η σπορά σε εσωτερικούς χώρους είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος, ιδιαίτερα σε περιοχές με μικρότερη περίοδο καλλιέργειας. Οι σπόροι σπέρνονται σε δίσκους σποράς ή μικρά γλαστράκια, 6-8 εβδομάδες πριν από την τελευταία αναμενόμενη παγωνιά. Το

υπόστρωμα πρέπει να είναι αποστειρωμένο και να διατηρείται υγρό αλλά όχι υπερβολικά υγρό. Η ιδανική θερμοκρασία για τη βλάστηση κυμαίνεται μεταξύ 24°C και 29°C. Μετά τη βλάστηση, τα σπορόφυτα απαιτούν έντονο φως για 14-16 ώρες ημερησίως, ώστε να αναπτυχθούν ισχυρά και υγιή. Η χρήση τεχνητού φωτισμού μπορεί να είναι απαραίτητη σε περιοχές με περιορισμένο φυσικό φως (Odell, 1992).

Στην περίπτωση της υδροπονικής καλλιέργειας, η σπορά πραγματοποιείται σε ελεγχόμενες συνθήκες, συνήθως σε δίσκους σποράς με υπόστρωμα όπως πετροβάμβακας ή περλίτης. Μετά τη βλάστηση, τα σπορόφυτα μεταφέρονται στο υδροπονικό σύστημα, όπου αναπτύσσονται σε θρεπτικό διάλυμα με ελεγχόμενες παραμέτρους pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η συνεχής παρακολούθηση και ρύθμιση των παραμέτρων είναι απαραίτητη για την αποφυγή ανισορροπιών και την εξασφάλιση της βέλτιστης ανάπτυξης των φυτών (Leskovar & Cantliffe, 1991).

Φύτευση

Η επιτυχής φύτευση των σπορόφυτων τομάτας, είτε σε υπαίθριες καλλιέργειες είτε σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις, απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών, προσαρμοσμένων στις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε περιβάλλοντος.

Στις υπαίθριες καλλιέργειες, η φύτευση των σπορόφυτων πραγματοποιείται όταν οι κλιματικές συνθήκες είναι ευνοϊκές, συνήθως μετά την τελευταία παγωνιά της άνοιξης. Η θερμοκρασία του εδάφους πρέπει να έχει σταθεροποιηθεί πάνω από τους 15°C για να εξασφαλιστεί η επιτυχής εγκατάσταση των φυτών. Τα σπορόφυτα πρέπει να έχουν ύψος περίπου 15-25 εκατοστά και να διαθέτουν τουλάχιστον δύο έως τρία πραγματικά φύλλα πριν τη μεταφύτευση. Η διαδικασία της σκλήρυνσης των φυτών, δηλαδή η σταδιακή έκθεσή τους σε εξωτερικές συνθήκες, είναι απαραίτητη για την αποφυγή του σοκ μεταφύτευσης. Οι αποστάσεις φύτευσης ποικίλλουν ανάλογα με την ποικιλία και το σύστημα υποστήριξης, αλλά γενικά κυμαίνονται από 45 έως 60 εκατοστά μεταξύ των φυτών και 90 έως 120 εκατοστά μεταξύ των γραμμών. Αυτές οι αποστάσεις εξασφαλίζουν επαρκή αερισμό και φωτισμό, μειώνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης ασθενειών και διευκολύνοντας τις καλλιεργητικές εργασίες (Savvy Gardening, 2022).

Στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, η φύτευση μπορεί να πραγματοποιηθεί νωρίτερα, καθώς οι συνθήκες είναι ελεγχόμενες. Τα σπορόφυτα τοποθετούνται σε υποστρώματα όπως περλίτης ή πετροβάμβακας, τα οποία παρέχουν καλή αποστράγγιση και αερισμό. Η φύτευση γίνεται σε

αποστάσεις 40-50 εκατοστά μεταξύ των φυτών και 100-120 εκατοστά μεταξύ των γραμμών, ανάλογα με την ποικιλία και το σύστημα υποστήριξης. Η χρήση κατάλληλων αποστάσεων φύτευσης είναι κρίσιμη για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων και την παραγωγή ποιοτικών καρπών (Hochmuth & Hochmuth, 2001).

Η σωστή επιλογή του χρόνου και της μεθόδου φύτευσης, καθώς και η τήρηση των κατάλληλων αποστάσεων, συμβάλλουν σημαντικά στην επιτυχία της καλλιέργειας του φυτού αυτού, όπως και οποιουδήποτε άλλου, ανεξαρτήτως του περιβάλλοντος καλλιέργειας.

Μεταφύτευση

Η επιλογή μεταξύ σποράς και μεταφύτευσης αποτελεί σημαντική απόφαση στη διαδικασία εγκατάστασης της καλλιέργειας της τομάτας, καθώς κάθε μέθοδος προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα και προσαρμόζεται σε συγκεκριμένες συνθήκες. Η απευθείας σπορά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, προτιμάται σε περιοχές με μακρά περίοδο καλλιέργειας και σταθερές θερμοκρασίες, καθώς επιτρέπει στα φυτά να αναπτυχθούν απρόσκοπτα από τον σπόρο έως την παραγωγή. Ωστόσο, η σπορά στο χωράφι παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, όπως τη μεγαλύτερη ευαισθησία των νεαρών φυτών σε περιβαλλοντικές πιέσεις και τη δυσκολία ελέγχου της πρώιμης ανάπτυξης. Σε αντίθεση, η μεταφύτευση, που αποτελεί την πιο διαδεδομένη πρακτική σε περιοχές με περιορισμένη καλλιεργητική περίοδο, προσφέρει μεγαλύτερο έλεγχο των συνθηκών ανάπτυξης κατά τα πρώτα στάδια ζωής των φυτών και αυξάνει τις πιθανότητες επιτυχούς εγκατάστασης στον αγρό (Peet & Welles, 2005).



Εικόνα 10. Μεταφύτευση Φυταρίων στον αγρό.

Πηγή: <https://fresher.gr/reports/πληρώνει-30-λεπτά-πάνω-η-πρώτη-ποιότητα/5377/>

Η διαδικασία μεταφοράς των νεαρών φυταρίων από τους δίσκους σποράς σε τελικές θέσεις καλλιέργειας πραγματοποιείται όταν τα φυτά έχουν αποκτήσει ύψος περίπου 10–15 εκατοστά και διαθέτουν τουλάχιστον δύο πραγματικά φύλλα. Πριν από τη μεταφορά τους, είναι αναγκαία η εφαρμογή σκλήρυνσης, διαδικασία που περιλαμβάνει τη σταδιακή προσαρμογή των φυτών σε εξωτερικές συνθήκες (θερμοκρασία, αέρα, ένταση φωτισμού) για χρονικό διάστημα 7–10 ημερών. Αυτό μειώνει το στρες της μετακίνησης και προάγει την ανθεκτικότητα στο νέο περιβάλλον (Schrader, 2020). Κατά την τοποθέτηση των φυταρίων στο χωράφι, αυτά φυτεύονται σε βάθος μεγαλύτερο από αυτό που αναπτύχθηκαν στα σπορεία, ώστε να ενισχυθεί

η ανάπτυξη επιπρόσθετων ριζών κατά μήκος του στελέχους και να βελτιωθεί η σταθερότητα του φυτού. Οι αποστάσεις φύτευσης ποικίλλουν ανάλογα με την ποικιλία και το σύστημα υποστήριξης, συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 30–45 εκατοστών επί της γραμμής και 90–120 εκατοστών μεταξύ των γραμμών, προσφέροντας επαρκή χώρο για αερισμό και πρόσβαση στο φως (Lazcano et al., 2009).

Στα θερμοκήπια, η μετακίνηση των φυταρίων σε τελικές θέσεις μπορεί να πραγματοποιηθεί νωρίτερα, καθώς οι ελεγχόμενες συνθήκες καλλιέργειας εξαλείφουν τους κινδύνους από τις καιρικές μεταβολές. Τα φυτά τοποθετούνται σε αποστειρωμένα υποστρώματα, όπως περλίτη, πετροβάμβακα ή μίγματα τύρφης, τα οποία εξασφαλίζουν άριστη αποστράγγιση και οξυγόνωση του ριζικού συστήματος. Οι αποστάσεις εγκατάστασης προσαρμόζονται συνήθως στα 40–50 εκατοστά επί της γραμμής και 100–120 εκατοστά μεταξύ των γραμμών, ώστε να διασφαλιστεί επαρκής χώρος ανάπτυξης και ευκολία διαχείρισης κατά την παραγωγική περίοδο (Kader, 2017).

Στην υδροπονική καλλιέργεια, αντίθετα, η διαδικασία εγκατάστασης των φυτών δεν περιλαμβάνει σπορά σε υπόστρωμα, αλλά απευθείας τοποθέτηση των φυταρίων σε θρεπτικά διαλύματα ή συστήματα καλλιέργειας χωρίς έδαφος. Τα φυτά μεταφέρονται σε συστήματα όπως NFT (Nutrient Film Technique), DWC (Deep Water Culture) ή σε γλάστρες με αδρανή υποστρώματα, όπου οι ρίζες έρχονται σε άμεση επαφή με το θρεπτικό διάλυμα. Η εγκατάσταση γίνεται όταν τα φυτά φτάσουν το κατάλληλο αναπτυξιακό στάδιο, δηλαδή ύψος 10–15 εκατοστών και παρουσία τουλάχιστον δύο πραγματικών φύλλων, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αποφυγή τραυματισμών του ριζικού συστήματος κατά τη μετακίνηση. Οι αποστάσεις ανάπτυξης είναι παρόμοιες με αυτές των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, αν και συχνά προσαρμόζονται αναλόγως του συστήματος υποστήριξης και των στόχων παραγωγής (Resh, 2022).

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εγκατάστασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες, τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, τις επιδιώξεις του παραγωγού και τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού. Η σπορά στο χωράφι προσφέρει απλοποίηση διαδικασιών αλλά συνοδεύεται από αυξημένο κίνδυνο αστοχιών, ενώ η μεταφύτευση, παρότι απαιτεί περισσότερη φροντίδα και εργασία στα πρώτα στάδια, εξασφαλίζει ανθεκτικά φυτά και υψηλότερες αποδόσεις. Τέλος, η υδροπονία αντιπροσωπεύει μια σύγχρονη εναλλακτική μέθοδο που απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και αυστηρό έλεγχο παραμέτρων, προσφέροντας όμως σταθερότητα παραγωγής και ποιοτικά πλεονεκτήματα.

Λίπανση

Μετά τη μεταφύτευση, η σωστή διαχείριση της λίπανσης καθίσταται κρίσιμη για την επιτυχή ανάπτυξη και παραγωγή της τομάτας. Η παροχή θρεπτικών στοιχείων πρέπει να είναι συνεχής και προσαρμοσμένη στις ανάγκες του φυτού, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης και τις συνθήκες καλλιέργειας.

Το άζωτο (N) είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη του φυλλώματος και του ριζικού συστήματος της τομάτας. Η εφαρμογή αζωτούχων λιπασμάτων σε κατάλληλες δόσεις ενισχύει την ανάπτυξη των φυτών, αυξάνει την απορρόφηση αζώτου και συμβάλλει στην αύξηση της απόδοσης. Ωστόσο, η υπερβολική εφαρμογή αζώτου μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική φυλλώδη ανάπτυξη εις βάρος της καρποφορίας και να αυξήσει τον κίνδυνο έκπλυσης νιτρικών στο υπέδαφος. Σύμφωνα με μελέτες, η εφαρμογή 90 kg N/ha ήταν επαρκής για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, ενώ η αύξηση στα 180 kg N/ha δεν παρείχε σημαντικά οφέλη και αύξησε τον κίνδυνο περιβαλλοντικής ρύπανσης (Sainju et al., 2005).

Ο φώσφορος (P), από την άλλη, εμφανίζεται επίσης σημαντικός για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και την άνθηση της τομάτας. Η επαρκής παροχή φωσφόρου ενισχύει την ανάπτυξη των ριζών, την ανθοφορία και την καρποφορία. Ωστόσο, η υπερβολική εφαρμογή φωσφόρου μπορεί να μειώσει την απορρόφηση άλλων θρεπτικών στοιχείων και να επηρεάσει αρνητικά τη συμβίωση με μυκορριζικούς μύκητες, οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων (Sainju et al., 2005).



Εικόνα 11. Χειρωνακτική Λίπανση Τοματιάς.

Πηγή: <https://www.mistikakipou.gr/asvestio-lipasma-fita-kalliergeies/>

Εξίσου σημαντική κρίνεται και η καλιούχος λίπανση, που φαίνεται να συμβάλει στην ρύθμιση της υδατικής ισορροπίας, τη σύνθεση πρωτεϊνών και την ανθεκτικότητα των φυτών σε ασθένειες. Η επαρκής παροχή καλίου βελτιώνει την ποιότητα των καρπών και την ανθεκτικότητα των φυτών σε περιβαλλοντικές πιέσεις. Η εφαρμογή καλίου πρέπει να βασίζεται στα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης και να προσαρμόζεται στις ανάγκες της καλλιέργειας (Sainju et al., 2005).

Στην περίπτωση μιας υδροπονικής καλλιέργειας, τα θρεπτικά στοιχεία παρέχονται μέσω διαλυμάτων με ακριβή έλεγχο της συγκέντρωσης και του pH. Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα μακρο- και μικροθρεπτικά στοιχεία σε κατάλληλες συγκεντρώσεις. Η συνεχής παρακολούθηση και ρύθμιση των παραμέτρων είναι απαραίτητη για την αποφυγή ανισορροπιών και την εξασφάλιση της βέλτιστης ανάπτυξης των φυτών (Sainju et al., 2005).

Σε γενικές γραμμές λοιπόν υποστηρίζεται πως η χρήση εδαφολογικών και φυλλοδιαγνωστικών αναλύσεων, η προσαρμογή των δόσεων λιπασμάτων στις ανάγκες της καλλιέργειας και η επιλογή κατάλληλων μεθόδων εφαρμογής συμβάλλουν στην επίτευξη υψηλών αποδόσεων και στην προστασία του περιβάλλοντος.

Άρδευση

Η παροχή νερού στη τομάτα πρέπει να είναι προσεκτικά ελεγχόμενη, καθώς τόσο η έλλειψη όσο και η υπερβολική υγρασία μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ανάπτυξη και την παραγωγή. Η στάγδην άρδευση είναι η προτιμώμενη μέθοδος, καθώς επιτρέπει την ακριβή παροχή νερού απευθείας στη ριζόσφαιρα, μειώνοντας τις απώλειες λόγω εξάτμισης και απορροής. Η συχνότητα και η ποσότητα της άρδευσης εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους, τις κλιματικές συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης του φυτού. Κατά την περίοδο της καρποφορίας, οι ανάγκες σε νερό αυξάνονται, ενώ κατά την ωρίμανση των καρπών, η άρδευση μειώνεται για να βελτιωθεί η ποιότητα των καρπών (Ngouajio et al., 2007).



Εικόνα 12. Στάγδην Άρδευση.

Πηγή:

<https://www.istockphoto.com/es/foto/sistema-de-riego-de-goteo-gm845918758-138454019>

Στην υδροπονική καλλιέργεια, η παροχή νερού και θρεπτικών στοιχείων γίνεται μέσω κλειστών κυκλωμάτων με συνεχή παρακολούθηση. Η διατήρηση της σωστής ηλεκτρικής

αγωγιμότητας (EC) και του pH είναι απαραίτητη για την αποφυγή ανισορροπιών και την εξασφάλιση της βέλτιστης ανάπτυξης των φυτών.

Κλάδεμα και Άλλες Τεχνικές

Το κλάδεμα των πλευρικών βλαστών και το κορυφολόγημα συμβάλλουν στον έλεγχο της ανάπτυξης του φυτού και στη βελτίωση της ποιότητας των καρπών. Η απομάκρυνση των πλευρικών βλαστών επιτρέπει στο φυτό να διοχετεύσει την ενέργειά του στην ανάπτυξη των καρπών, ενώ το κορυφολόγημα βοηθά στον περιορισμό της υπερβολικής ανάπτυξης και στην ενίσχυση της καρποφορίας.

Η υποστήριξη των φυτών με πλέγματα ή νήματα είναι απαραίτητη, ιδιαίτερα σε θερμοκηπιακές και υδροπονικές καλλιέργειες, για την αποφυγή ζημιών και την ευκολία στη συγκομιδή. Η σωστή υποστήριξη βοηθά επίσης στη βελτίωση της κυκλοφορίας του αέρα γύρω από τα φυτά, μειώνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης ασθενειών (Lhamo et al., 2022) .

Εχθροί και Ασθένειες

Μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας και την εφαρμογή πρακτικών όπως το κλάδεμα, η προσοχή στρέφεται στην προστασία των φυτών από παθογόνους οργανισμούς και επιβλαβή έντομα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές απώλειες στην παραγωγή.

Η πρόωμη ξηρή κηλίδωση, προκαλούμενη από τον μύκητα *Alternaria solani*, εμφανίζεται με τη μορφή μικρών, σκούρων κηλίδων στα φύλλα, οι οποίες συχνά παρουσιάζουν ομόκεντρους δακτυλίους. Η ασθένεια ξεκινά από τα κατώτερα φύλλα και μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένη αποφυλλοποίηση, μειώνοντας τη φωτοσυνθετική ικανότητα του φυτού και εκθέτοντας τους καρπούς σε ηλιακά εγκαύματα. Η διαχείριση περιλαμβάνει την απομάκρυνση των μολυσμένων φυτικών υπολειμμάτων, την εφαρμογή κατάλληλων μυκητοκτόνων και την επιλογή ανθεκτικών ποικιλιών (Chaerani & Voorrips, 2006).

Η φυτοφθόρα, γνωστή και ως όψιμη ξηρή κηλίδωση, προκαλείται από τον ωομύκητα *Phytophthora infestans* και είναι ιδιαίτερα καταστρεπτική, ειδικά σε συνθήκες υψηλής υγρασίας και μέτριων θερμοκρασιών. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν υδατώδεις, ακανόνιστες κηλίδες στα φύλλα, οι οποίες εξελίσσονται σε καφέ περιοχές με λευκή βαμβακώδη ανάπτυξη στην κάτω επιφάνεια. Η ασθένεια μπορεί να προκαλέσει ταχεία νέκρωση των φυτών. Η πρόληψη βασίζεται στη χρήση ανθεκτικών ποικιλιών και στην εφαρμογή προληπτικών μυκητοκτόνων (Nowicki et al., 2012).

Η κηλίδωση φύλλων από *Septoria lycopersici* εμφανίζεται ως μικρές, κυκλικές κηλίδες με λευκό κέντρο και σκούρο περίγραμμα στα κατώτερα φύλλα. Η ασθένεια μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη φυλλόπτωση και μείωση της απόδοσης. Η διαχείριση περιλαμβάνει την απομάκρυνση των μολυσμένων φύλλων, τη βελτίωση του αερισμού μέσω κατάλληλης φύτευσης και κλαδέματος, καθώς και την εφαρμογή κατάλληλων μυκητοκτόνων (University of Kentucky, 2024).

Η βακτηριακή κηλίδωση, προκαλούμενη από το βακτήριο *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*, εκδηλώνεται με υδατώδεις κηλίδες στα φύλλα και στους καρπούς, οι οποίες εξελίσσονται σε νεκρωτικές περιοχές. Η ασθένεια ευνοείται από υγρές συνθήκες και μπορεί να προκαλέσει σοβαρές απώλειες στην παραγωγή. Η διαχείριση περιλαμβάνει τη χρήση υγιούς σπόρου, την απομάκρυνση των μολυσμένων φυτών, την αποφυγή υπερβολικής υγρασίας και την εφαρμογή χαλκούχων βακτηριοκτόνων (Black et al., 2001).

Ο ιός του καρουλιάσματος των φύλλων της τομάτας (*Tomato yellow leaf curl virus*, TYLCV) προκαλεί σοβαρή νανισμό και κιτρίνισμα των φύλλων, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της παραγωγής. Ο ιός μεταδίδεται κυρίως από τον αλευρώδη *Bemisia tabaci*. Η πρόληψη περιλαμβάνει τη χρήση ανθεκτικών ποικιλιών, την καταπολέμηση των εντόμων-φορέων και την αποφυγή φύτευσης κοντά σε μολυσμένα φυτά (Moriones & Navas-Castillo, 2000).

Ο ιός του κηλιδωτού μαρασμού της τομάτας (*Tomato spotted wilt virus*, TSWV) προκαλεί νεκρωτικές κηλίδες στα φύλλα και τους καρπούς, καθώς και γενικευμένο μαρασμό. Ο ιός μεταδίδεται από θρίπες, κυρίως *Frankliniella occidentalis*. Η διαχείριση περιλαμβάνει την εξάλειψη των εντόμων-φορέων, την απομάκρυνση των μολυσμένων φυτών και τη χρήση ανθεκτικών ποικιλιών (Adkins, 2000).

Η *Tuta absoluta*, γνωστή και ως ντοματόψυλλα, είναι ένας από τους πιο καταστρεπτικούς εχθρούς της τομάτας. Οι προνύμφες της διατρύπουν φύλλα, βλαστούς και καρπούς, προκαλώντας σοβαρές ζημιές. Η καταπολέμηση περιλαμβάνει τη χρήση φερομονικών παγίδων, βιολογικών εχθρών και εντομοκτόνων (Desneux et al., 2010).

Ο αλευρώδης *Bemisia tabaci* προκαλεί άμεσες ζημιές μέσω της απομύζησης χυμών και έμμεσες μέσω της μετάδοσης ιών, όπως ο TYLCV. Η διαχείριση περιλαμβάνει την εφαρμογή εντομοκτόνων, την ενίσχυση των φυσικών εχθρών και την αποφυγή υπερβολικής χρήσης ευρέος φάσματος εντομοκτόνων που μπορεί να οδηγήσουν σε ανθεκτικότητα (Sasser & Freckman, 1987).

Οι νηματώδεις του γένους *Meloidogyne*, γνωστοί ως νηματώδεις των ριζικών κόμβων, προκαλούν διογκώσεις στις ρίζες, οδηγώντας σε μειωμένη απορρόφηση νερού και θρεπτικών στοιχείων. Η πρόληψη περιλαμβάνει την αμειψισπορά, τη χρήση ανθεκτικών ποικιλιών και την εφαρμογή βιολογικών ή χημικών νηματοκτόνων (Sasser & Freckman, 1987).

Η επιτυχής καλλιέργεια της τομάτας απαιτεί ολοκληρωμένη προσέγγιση για την πρόληψη και την αντιμετώπιση των εχθρών και των ασθενειών. Η καλή καλλιεργητική πρακτική, η χρήση ανθεκτικών ποικιλιών, η παρακολούθηση της καλλιέργειας και η έγκαιρη επέμβαση με κατάλληλα μέσα είναι βασικά στοιχεία για την επίτευξη υψηλής παραγωγής και ποιοτικών καρπών.

Ζιζανιοκτονία

Η διαχείριση των ζιζανίων στην καλλιέργεια τομάτας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη βιώσιμη παραγωγή και την επίτευξη ποιοτικών αποδόσεων, καθώς τα ανεπιθύμητα φυτά ανταγωνίζονται το καλλιεργούμενο είδος για νερό, θρεπτικά στοιχεία και φως, ενώ λειτουργούν ως εν δυνάμει ξενιστές επιβλαβών εντόμων και παθογόνων. Η ολιστική στρατηγική καταπολέμησης των ζιζανίων απαιτεί την αρμονική συνδυαστική εφαρμογή πολιτιστικών, μηχανικών, χημικών και βιολογικών μεθόδων, οι οποίες πρέπει να προσαρμόζονται στις ιδιαίτερες ανάγκες της κάθε καλλιέργειας και στα τοπικά εδαφοκλιματικά χαρακτηριστικά. Πολιτιστικές πρακτικές όπως η αμειψισπορά με καλλιέργειες όπως το καλαμπόκι, η χρήση καλυπτικών φυτών όπως ο βίκος και η σίκαλη, καθώς και η εφαρμογή πλαστικών ή οργανικών καλυμμάτων εδάφους, συμβάλλουν στη διακοπή του βιολογικού κύκλου των ζιζανίων και στη μείωση του πληθυσμού τους, ενώ ενισχύουν τη δομή του εδάφους και μειώνουν την εξάτμιση του νερού (Monaco et al., 2002). Η χρήση πλαστικών καλυμμάτων εδαφοκάλυψης σε συνδυασμό με θερμοαπολύμανση έχει τεκμηριωθεί ως αποτελεσματική στρατηγική για τον περιορισμό των ζιζανίων και την αύξηση της παραγωγής τομάτας, ιδίως σε συστήματα θερμοκηπιακής καλλιέργειας (Candido et al., 2020).

Η χημική ζιζανιοκτονία εξακολουθεί να αποτελεί βασικό εργαλείο για τον έλεγχο δύσκολων πληθυσμών ζιζανίων, ωστόσο απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες φυτοτοξικές επιδράσεις και η ανάπτυξη ανθεκτικών βιοτύπων. Η επιλογή κατάλληλων ζιζανιοκτόνων γίνεται με βάση το φάσμα δράσης τους, το στάδιο ανάπτυξης των ζιζανίων και τις συνθήκες του χωραφιού. Προφυτρωτικά ζιζανιοκτόνα όπως το *pendimethalin*

και το *metribuzin* εφαρμόζονται πριν από τη φύτευση ή αμέσως μετά, προσφέροντας υπολειμματική δράση, ενώ μεταφυτρωτικά σκευάσματα όπως το rimsulfuron και το clethodim στοχεύουν συγκεκριμένα είδη και εφαρμόζονται αφού εμφανιστούν τα ζιζάνια (Boydston & Williams, 2015). Ερευνητικά δεδομένα δείχνουν ότι η συνδυαστική εφαρμογή ζιζανιοκτόνων με λιπάσματα μπορεί να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα στον έλεγχο δυσμενών ειδών, όπως το *Cyperus spp.*, ενώ παράλληλα ενισχύεται η ανάπτυξη της καλλιέργειας (Ferreira & Teixeira, 2019).

Η διαχείριση των ζιζανιοκτόνων πρέπει να εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο ορθής γεωργικής πρακτικής, που περιλαμβάνει την εναλλαγή δραστικών ουσιών διαφορετικών μηχανισμών δράσης και την αποφυγή μονομερών στρατηγικών, ώστε να περιορίζεται η εμφάνιση ανθεκτικών πληθυσμών. Παράλληλα, η διερεύνηση και εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων, όπως η χρήση φυσικών εκχυλισμάτων (π.χ. εκχυλίσματα *Pongamia pinnata*), έχουν αναδειχθεί ως υποσχόμενες τεχνικές που μπορούν να μειώσουν τις αρνητικές επιπτώσεις των χημικών σκευασμάτων στη φυσιολογία της τομάτας, διατηρώντας την αποτελεσματικότητα του ζιζανιοκτόνου ελέγχου (Nikam et al., 2022).

Τελικά, η επιτυχής καταπολέμηση των ζιζανίων στην τομάτα προϋποθέτει συνεχή παρακολούθηση της καλλιέργειας, ευελιξία στην προσαρμογή των στρατηγικών και εφαρμογή ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης, τα οποία θα διασφαλίζουν υψηλές αποδόσεις, περιορίζοντας τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία των καταναλωτών.

Συγκομιδή και Επεξεργασία Καρπού

Η συγκομιδή των καρπών αποτελεί το τελευταίο κρίσιμο στάδιο της καλλιέργειας και καθορίζει την τελική ποιότητα και εμπορική αξία της παραγωγής. Ο χρόνος συλλογής εξαρτάται άμεσα από το στάδιο ωρίμανσης, το οποίο αξιολογείται με βάση την ανάπτυξη του χρώματος, τη σκληρότητα της σάρκας και τη μεταβολή των χημικών χαρακτηριστικών, όπως η περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά. Κατά την περίοδο συγκομιδής, δίνεται έμφαση στη σωστή διαχείριση, ώστε να αποφεύγονται μηχανικές βλάβες που μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της εμπορικής αξίας και της μετασυλλεκτικής ζωής των καρπών (Dorais et al., 2008).



Εικόνα 13. Μηχανική Συλλογή Τομάτας. Πηγή: <https://www.agrotypos.gr/kalliergeies/viomichani-ka-fyta/ypsiloteres-times-sti-viomichaniki>

Η διαδικασία συλλογής προσαρμόζεται ανάλογα με το είδος και τον τελικό προορισμό των προϊόντων. Στις υπαίθριες καλλιέργειες για νωπή κατανάλωση, η συγκομιδή πραγματοποιείται χειρωνακτικά σε πολλαπλά στάδια, ώστε να εξασφαλιστεί η συλλογή καρπών στο βέλτιστο στάδιο ωρίμανσης. Αντίθετα, στις καλλιέργειες για βιομηχανική επεξεργασία, όπως η παραγωγή τοματοπολτού, η συλλογή μπορεί να γίνει μηχανικά, με χρήση θεριζοαλωνιστικών μηχανών που εξασφαλίζουν αυξημένη απόδοση σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η επιλογή του κατάλληλου τρόπου συγκομιδής λαμβάνει υπόψη την ευαισθησία των καρπών σε μηχανικές καταπονήσεις, την ανθεκτικότητα των ποικιλιών και τις απαιτήσεις της βιομηχανικής επεξεργασίας (Sablani et al., 2006).



Εικόνα 14. Διαλογή Καρπών.
Πηγή: <https://www.ypaithros.gr/ksekina-syllogi-biomixanikis-tomatas-apo-thesto/>

Η μετασυλλεκτική διαχείριση περιλαμβάνει διαδικασίες όπως η ταξινόμηση, ο καθαρισμός, η συσκευασία και η ψύξη των καρπών. Ο διαχωρισμός με βάση το μέγεθος, το χρώμα και την ποιότητα είναι απαραίτητος για τη διασφάλιση ομοιομορφίας στο τελικό προϊόν. Η απομάκρυνση ακατάλληλων καρπών μειώνει τον κίνδυνο αλλοιώσεων κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση. Η εφαρμογή τεχνικών ψύξης, όπως η ψυχρή αποθήκευση σε θερμοκρασίες 12–15 °C και σχετική υγρασία 85–90%, συντελεί στη μείωση του ρυθμού αναπνοής και καθυστερεί την αλλοίωση της ποιότητας. Επιπλέον, η χρήση τροποποιημένης ατμόσφαιρας με ελεγχόμενα επίπεδα οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των καρπών, διατηρώντας τη φρεσκάδα και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τους (Saltveit, 2005).

Η επεξεργασία των καρπών σε βιομηχανική κλίμακα περιλαμβάνει στάδια όπως το πλύσιμο, η θερμική επεξεργασία για αδρανοποίηση ενζύμων και η απομάκρυνση φλοιών και σπόρων μέσω μηχανικών διεργασιών. Η συγκεκριμένη διαδικασία στοχεύει στην παραγωγή προϊόντων όπως τοματοπολτός, χυμός, σάλτσες και αποξηραμένα προϊόντα, που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της αγοράς και προσφέρουν αυξημένη διάρκεια ζωής. Κατά την παραγωγική διαδικασία εφαρμόζονται αυστηρά πρότυπα υγιεινής και ποιοτικού ελέγχου, με στόχο τη διασφάλιση της ασφάλειας των τελικών προϊόντων και την ικανοποίηση των καταναλωτικών προτύπων (Anthon & Barrett, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΜΑΤΑ – ΥΠΟΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Γενικά στοιχεία για την Βιομηχανική Τομάτα

Η βιομηχανική τομάτα, συγκριτικά με την κοινή τομάτα που μελετήθηκε παραπάνω, αναφέρεται σε εξειδικευμένες ποικιλίες του είδους *Solanum lycopersicum*, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί και επιλεγεί ειδικά για τις ανάγκες της μεταποίησης σε προϊόντα όπως τοματοπολτός, σάλτσες, χυμοί και κονσερβοποιημένα προϊόντα τομάτας. Ορισμένοι μελετητές, όπως οι Dorais και οι συνεργάτες του (2008), ορίζουν ως βιομηχανική τομάτα εκείνες τις ποικιλίες που διακρίνονται για τον καθορισμένο κύκλο ανάπτυξής τους, την υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά ($^{\circ}\text{Brix}$) και την ανθεκτικότητά τους σε μηχανική συγκομιδή, χαρακτηριστικά τα οποία επιτρέπουν την αποδοτική καλλιέργεια και την αποτελεσματική επεξεργασία σε βιομηχανική κλίμακα.

Η διάδοση της βιομηχανικής τομάτας συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη της βιομηχανικής επεξεργασίας, η οποία ξεκίνησε δυναμικά κατά τις αρχές του 20ού αιώνα στις ανεπτυγμένες χώρες της Ευρώπης και της Αμερικής. Ήδη από τη δεκαετία του 1920, η αυξανόμενη ζήτηση για επεξεργασμένα προϊόντα τομάτας, όπως οι πολτοί και οι σάλτσες, οδήγησε στην καθιέρωση ειδικών ποικιλιών που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της βιομηχανίας τροφίμων. Αυτή η εξέλιξη συνέβαλε καθοριστικά στη ραγδαία αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων και στην ενίσχυση της εμπορικής σημασίας της τομάτας σε παγκόσμιο επίπεδο (Jones, 2007).



Εικόνα 15. Βιομηχανική Τομάτα. Πηγή:
<https://geoponiki.com/tomata-viomihani-ki/>

Οι ποικιλίες που επιλέγονται για βιομηχανική χρήση διακρίνονται σαφώς από εκείνες που προορίζονται για φρέσκια κατανάλωση. Συνήθως, οι βιομηχανικές ποικιλίες είναι καθορισμένης ανάπτυξης (*determinate*), γεγονός που επιτρέπει την ομοιόμορφη ωρίμανση των

καρπών σε σύντομο χρονικό διάστημα, διευκολύνοντας έτσι τη μηχανική συγκομιδή και την αποδοτική επεξεργασία. Οι καρποί έχουν συνήθως παχύ περικάρπιο, μειωμένη περιεκτικότητα σε υγρά και σπόρους, καθώς και υψηλή συγκέντρωση σε διαλυτά στερεά, εξασφαλίζοντας σταθερή ποιότητα και μέγιστη απόδοση σε προϊόντα όπως τοματοπολτός και χυμοί (Leonardi et al., 2013).

Η παραγωγή βιομηχανικής τομάτας στην Ελλάδα ξεκίνησε τη δεκαετία του 1940, με τις πρώτες μεταποιητικές μονάδες να εγκαθίστανται στον Νομό Ηλείας, καλύπτοντας τις αυξημένες ανάγκες της εποχής. Σήμερα, η βιομηχανική τομάτα καταλαμβάνει περίπου 192.000 στρέμματα, με ετήσια παραγωγή που κυμαίνεται από 900.000 έως 1.000.000 τόνους, καθιστώντας την έναν από τους σημαντικότερους τομείς της ελληνικής αγροτικής παραγωγής. Η συγκεκριμένη καλλιέργεια υποστηρίζεται από κοινοτικές ενισχύσεις, σύμφωνα με τον Κανονισμό 2699/2000, ενισχύοντας τις ομάδες παραγωγών που δραστηριοποιούνται στον κλάδο (Anastasiadis et al., 2020).

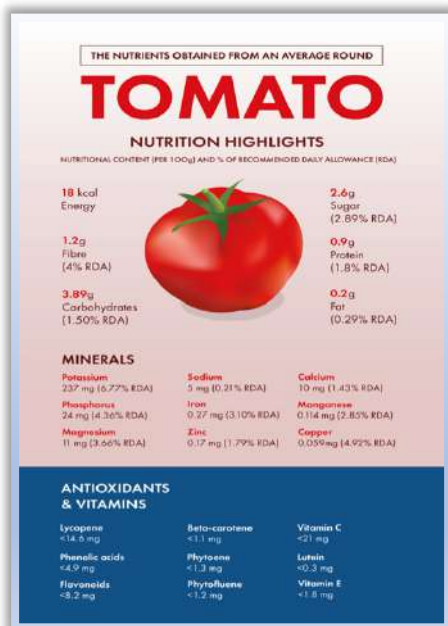
Όσον αφορά τις ποιοτικές προδιαγραφές, οι καρποί της βιομηχανικής τομάτας πρέπει να είναι φρέσκοι, πρόσφατης συγκομιδής και να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια, όπως ελάχιστη περιεκτικότητα σε *Brix* τουλάχιστον 4%. Επιπλέον, τα φορτία δεν πρέπει να περιέχουν πάνω από 10% σε αθροιστικό ποσοστό ξένα σώματα, σάπιους καρπούς, προσβεβλημένα δείγματα από ασθένειες ή έντομα, καθώς και πράσινους, ανώριμους καρπούς. Τα χαρακτηριστικά αυτά διασφαλίζουν την καταλληλότητα του προϊόντος για βιομηχανική χρήση, διατηρώντας υψηλά επίπεδα ποιότητας κατά την επεξεργασία (Leonardi et al., 2013).

Η στρατηγική επιλογή καλλιέργειας βιομηχανικής τομάτας βασίζεται σε τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, όπως η ανθεκτικότητα σε ασθένειες, η δυνατότητα μηχανικής συγκομιδής, η συγκέντρωση σε λυκοπένιο και η δυνατότητα αξιοποίησης σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η έρευνα στον τομέα συνεχίζεται με σκοπό τη δημιουργία νέων ποικιλιών που θα ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, υψηλότερες αποδόσεις και ποιοτικότερα προϊόντα.

3.2 Χημική Σύσταση και Διατροφική Αξία

Η τομάτα αποτελεί έναν από τους πιο δημοφιλείς καρπούς που καταναλώνονται παγκοσμίως, όχι μόνο για τη γευστική της αξία αλλά και για τα πολύτιμα θρεπτικά συστατικά που παρέχει. Παρά το γεγονός ότι δεν θεωρείται ιδιαίτερα πλούσια πηγή θρεπτικών στοιχείων σε σύγκριση με άλλα τρόφιμα, η εκτεταμένη κατανάλωσή της, είτε ως νωπό προϊόν είτε ως επεξεργασμένο

τρόφιμο, της προσδίδει σημαντικό ρόλο στη διατροφή του ανθρώπου. Ο καρπός της αποτελείται κατά κύριο λόγο από νερό, το οποίο καταλαμβάνει περίπου το 94–95% του βάρους του, ενώ το υπόλοιπο περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα διατροφικών συστατικών όπως βιταμίνες, μέταλλα, οργανικά οξέα και φυτικές ίνες. Μία μέτρια τομάτα, βάρους 150 γραμμαρίων, αποδίδει μόλις 35 θερμίδες, γεγονός που την καθιστά ιδανική επιλογή για χαμηλοθερμιδικές δίαιτες (Bachau, 1981, Gould, 1974). Παράλληλα, ο καρπός περιέχει βιταμίνες όπως η C, η E, το φολικό οξύ, καθώς και τις βιταμίνες του συμπλέγματος B, οι οποίες παίζουν κρίσιμο ρόλο



Εικόνα 16. Περιεκτικότητα Καρπού σε Θρεπτικά. Πηγή:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8869745/pdf/biology-11-00239.pdf>

στην υποστήριξη του μεταβολισμού και του νευρικού συστήματος (Kwak & Jukes, 2001). Τα ανόργανα στοιχεία που εντοπίζονται σε αξιόλογες συγκεντρώσεις περιλαμβάνουν κάλιο, μαγνήσιο, ασβέστιο, φώσφορο, σίδηρο, μαγγάνιο και σελήνιο, ενώ αξιοσημείωτη είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε νάτριο, κορεσμένα λιπαρά και χοληστερόλη, στοιχεία που την καθιστούν σύμμαχο της καρδιαγγειακής υγείας (Gould, 1974). Οι φυτικές ίνες που περιέχονται στον καρπό, ιδίως όταν καταναλώνεται με τη φλούδα και τους σπόρους, υποστηρίζουν τη ρύθμιση της πεπτικής λειτουργίας και βοηθούν στη μείωση των επιπέδων χοληστερόλης στο αίμα, ενώ η απουσία χοληστερόλης, νατρίου και κορεσμένων λιπαρών ενισχύει τον ρόλο της τομάτας σε δίαιτες με στόχο τη μείωση καρδιαγγειακού κινδύνου (Bachau, 1981).

Η παρουσία κιτρικών και οξαλικών οξέων προσδίδει χαρακτηριστική γεύση στον καρπό και συμβάλλει στη ρύθμιση της οξεοβασικής ισορροπίας του οργανισμού, ενώ το σελήνιο, ως συστατικό των σεληνοπρωτεϊνών, λειτουργεί ως αντιοξειδωτικό, προλαμβάνοντας την οξειδωτική καταστροφή των κυττάρων και ενισχύοντας την άμυνα του ανοσοποιητικού συστήματος (Gould, 1974). Το κάλιο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση της αρτηριακής πίεσης και στη λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος, ενώ το μαγνήσιο δρα ευεργετικά στην ανακούφιση συμπτωμάτων στρες και μυϊκών κράμπων. Οι βιταμίνες του συμπλέγματος B είναι απαραίτητες για τη φυσιολογική λειτουργία του νευρικού συστήματος και τον ενεργειακό μεταβολισμό, ενώ το φολικό οξύ, σε συνδυασμό με το μαγγάνιο και τον φώσφορο, συμβάλλει στην υγεία των οστών και στη διατήρηση της σωστής λειτουργίας των ενζυμικών συστημάτων (Kwak & Jukes, 2001).

Ξεχωριστή θέση στη διατροφική αξία της τομάτας κατέχει το λυκοπένιο, μια λιποδιαλυτή καροτενοειδής χρωστική που προσδίδει στον καρπό το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα. Το λυκοπένιο ανήκει στην οικογένεια των καροτενοειδών και θεωρείται ισχυρό αντιοξειδωτικό, προστατεύοντας τα κύτταρα από την οξειδωτική βλάβη που προκαλούν οι ελεύθερες ρίζες (Gioannucci, 1999). Εκτεταμένες μελέτες έχουν συνδέσει την υψηλή κατανάλωση λυκοπενίου με μείωση του κινδύνου εμφάνισης χρόνιων νοσημάτων, όπως οι καρδιαγγειακές παθήσεις και ορισμένες μορφές καρκίνου, ιδίως του προστάτη (Rao & Agarwal, 2000). Αξιοσημείωτο είναι ότι η συγκέντρωση λυκοπενίου μπορεί να είναι υψηλότερη σε μεταποιημένα προϊόντα τομάτας, καθώς η θερμική επεξεργασία που υφίστανται αυξάνει τη βιοδιαθεσιμότητά του μέσω της μετατροπής της δομής του σε μορφές που απορροφώνται πιο εύκολα από τον ανθρώπινο οργανισμό (Shi & Le Maguer, 2000). Το λυκοπένιο αποτελεί το κύριο καροτενοειδές της τομάτας, καλύπτοντας περίπου το 80-90% του συνόλου των καροτενοειδών που περιέχονται στον καρπό (Canene-Adams et al., 2005).

Πέρα από το λυκοπένιο, η τομάτα περιέχει και άλλα σημαντικά καροτενοειδή, όπως β-καροτένιο, λουτεΐνη και ζεαξανθίνη, τα οποία ενισχύουν τις αντιοξειδωτικές ιδιότητές της και συμβάλλουν στην προστασία της υγείας. Το β-καροτένιο, ως πρόδρομος της βιταμίνης Α, παίζει καθοριστικό ρόλο στην καλή όραση, την υγεία του δέρματος και την ενίσχυση του ανοσοποιητικού συστήματος (Fraser & Bramley, 2004). Η λουτεΐνη και η ζεαξανθίνη έχουν συσχετιστεί με την προστασία της ωχράς κηλίδας και τη μείωση του κινδύνου εμφάνισης εκφυλιστικών παθήσεων της όρασης (Johnson, 2002). Η συνολική περιεκτικότητα των καροτενοειδών διαφέρει ανάλογα με την ποικιλία, τον βαθμό ωρίμανσης και τις συνθήκες καλλιέργειας, με ορισμένες ποικιλίες βιομηχανικής τομάτας να επιλέγονται ακριβώς λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε λυκοπένιο και άλλες βιοδραστικές ενώσεις (Dumas et al., 2003). Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι τα καροτενοειδή της τομάτας εμφανίζουν υψηλότερη σταθερότητα σε θερμοκρασίες επεξεργασίας σε σύγκριση με εκείνα άλλων φυτικών ειδών, καθιστώντας τα προϊόντα τομάτας αξιόπιστες πηγές αυτών των ενώσεων στη διατροφή (Shi & Le Maguer, 2000).

Η κατανάλωση τομάτας και των παραγώγων της έχει συνδεθεί με την πρόληψη καρδιαγγειακών παθήσεων, τη μείωση των επιπέδων *LDL* χοληστερόλης, την ενίσχυση της ανοσοποιητικής απόκρισης, την προστασία του δέρματος από την υπεριώδη ακτινοβολία και την καθυστέρηση της γήρανσης των κυττάρων. Παράλληλα, η παρουσία φυτικών ινών, μικροθρεπτικών συστατικών και αντιοξειδωτικών στο σύνολο της σύνθεσης της τομάτας,

ενισχύει τη συνολική διατροφική της αξία, καθιστώντας την ένα σημαντικό στοιχείο της σύγχρονης διατροφής. Η συνεχής επιστημονική έρευνα υποστηρίζει τη δυναμική της ως λειτουργικό τρόφιμο, με την ανάπτυξη νέων προϊόντων και την ενσωμάτωσή της σε ευρύτερες διατροφικές στρατηγικές πρόληψης και προαγωγής της υγείας (Gould, 1974, Kwak & Jukes, 2001, Giovannucci, 1999, Rao & Rao, 2007).

3.3 Υποπροϊόντα Βιομηχανικής Επεξεργασίας Τομάτας

Η βιομηχανική τομάτα αποτελεί έναν σημαντικό πυλώνα της παγκόσμιας αγροδιατροφικής αλυσίδας, με πολυδιάστατη χρήση που εκτείνεται πέρα από την παραγωγή τοματοπολτού. Κατά τη διαδικασία επεξεργασίας της, προκύπτουν διάφορα υποπροϊόντα τα οποία αξιοποιούνται για διαφορετικούς σκοπούς, προσφέροντας προστιθέμενη αξία στον αγροδιατροφικό τομέα και μειώνοντας παράλληλα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της βιομηχανικής παραγωγής. Ένα από τα βασικότερα παραγόμενα προϊόντα είναι ο τοματοπολτός, ο οποίος παράγεται μέσω συμπύκνωσης του χυμού της τομάτας, μετά από διεργασίες πολτοποίησης, διήθησης και εξάτμισης του νερού. Η ποιότητα του τοματοπολτού εξαρτάται από παράγοντες όπως η συγκέντρωση σε στερεά συστατικά, το χρώμα, η οξύτητα, το ιξώδες και η παρουσία ξένων σωμάτων, ενώ διατίθεται σε διάφορες μορφές, όπως απλής, διπλής ή τριπλής συμπύκνωσης. Ο τοματοπολτός χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων, ως βασικό συστατικό σε σάλτσες, σούπες, σνακς και άλλα επεξεργασμένα προϊόντα (Eslami et al., 2023).



Εικόνα 17. Τοματοπολτός (Αριστερά) vs. Τοματοχυμός (Δεξιά).

Πηγή: <https://www.biosophy.gr/Groceries/Natural-Juices-Smoothies/Tomato-Juice-Pressed-%28750ml%29-Biona>

Πέρα από τον πολτό, σημαντικό υποπροϊόν αποτελεί ο φυσικός χυμός τομάτας, ο οποίος προέρχεται από τον χυμό των ώριμων καρπών χωρίς φλούδες και σπόρους, διατηρώντας τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης. Ο χυμός διατίθεται τόσο για άμεση κατανάλωση όσο και ως βάση για την παρασκευή άλλων προϊόντων, όπως σάλτσες και σούπες. Η επεξεργασία του περιλαμβάνει στάδια όπως πλύσιμο, πολτοποίηση, διήθηση, απαέρωση για την απομάκρυνση οξυγόνου και αποφυγή οξειδώσεων, καθώς και ομογενοποίηση για τη σταθεροποίηση της υφής. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η θερμική επεξεργασία μέσω παστερίωσης ή αποστείρωσης, ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η διάρκεια ζωής του προϊόντος, πριν αυτό συσκευαστεί σε κατάλληλα δοχεία, όπως μεταλλικά κουτιά, γυάλινα βάζα ή χάρτινες συσκευασίες (Eslami et al., 2023).

Ένα ακόμα προϊόν που προκύπτει από την επεξεργασία της τομάτας είναι η αποφλοιωμένη ολόκληρη τομάτα, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στη μαγειρική ως βάση για σάλτσες και συνταγές που απαιτούν σταθερό σχήμα και υφή του καρπού. Η παραγωγή της περιλαμβάνει τη διαλογή κατάλληλων καρπών, τη θερμική ή μηχανική απομάκρυνση του φλοιού, την απαέρωση και τη συσκευασία σε δοχεία με την προσθήκη χυμού τομάτας και διαλύματος χλωριούχου ασβεστίου, ώστε να διατηρείται η συνοχή του καρπού κατά τη διάρκεια αποθήκευσης και χρήσης. Ομοίως, η κομματιασμένη αποφλοιωμένη τομάτα, γνωστή ως κονκασέ, αποτελεί παραπροϊόν της αποφλοιωμένης και χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιομηχανία εστίασης, ιδιαίτερα σε πίτσες και μαγειρευτά (Eslami et al., 2023).

Μεγάλη σημασία έχει επίσης η παραγωγή σκόνης τομάτας, η οποία προκύπτει μέσω αφυδάτωσης του χυμού ή του πολτού σε ειδικά στεγνωτήρια, μειώνοντας έτσι την υγρασία και αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Η σκόνη τομάτας χρησιμοποιείται ως συστατικό σε σούπες, σνακς, σάλτσες, ενώ η υγροσκοπικότητά της απαιτεί αυστηρούς όρους αποθήκευσης ώστε να διατηρείται αναλλοίωτη η ποιότητα. Παρόμοια είναι και η παραγωγή νιφάδων αφυδατωμένης τομάτας, που παράγονται από σαρκώδεις και συνεκτικούς καρπούς υψηλής ποιότητας. Αφού οι καρποί πλυθούν, τεμαχιστούν και απομακρυνθούν οι μη επιθυμητές ουσίες, υποβάλλονται σε αφυδάτωση σε ειδικά στεγνωτήρια, δημιουργώντας ένα προϊόν με ευρεία χρήση στην ευρωπαϊκή αγορά, κυρίως στη βιομηχανία τροφίμων (González-Montelongo et al., 2022).



Εικόνα 18. Τομάτα σε σκόνη.

Πηγή: <https://doxas-spices.gr/katastima/karikeyma->



Εικόνα 19. Κέτσαπ ως συνοδευτικό. Πηγή:

<https://www.healthview.gr/ketsap-poia-einai-ta-simantika-ofeli-stin->

έως μεταλλικά δοχεία για επαγγελματικές εφαρμογές. Η διαφοροποίηση στη σύνθεση των μπαχαρικών και των αρωματικών ουσιών δημιουργεί μοναδικές γευστικές ταυτότητες για κάθε προϊόν, ενώ η ποιότητα ελέγχεται αυστηρά μέσω παραμέτρων όπως η οξύτητα, το ιξώδες, το χρώμα και η ομοιομορφία της υφής (Eslami et al., 2023).

Η παραγωγή αυτών των υποπροϊόντων δεν περιορίζεται στην κάλυψη της εγχώριας ζήτησης αλλά επεκτείνεται και σε εξαγωγές, με σημαντική εμπορική αξία. Στην Ευρώπη, η βιομηχανία τοματοπαραγωγής κατέχει στρατηγική θέση, με χώρες όπως η Ιταλία, η Ισπανία και η Πορτογαλία να πρωτοστατούν στην παραγωγή και εξαγωγή, ενώ η Ελλάδα κατατάσσεται σε σημαντική θέση, κυρίως μέσω της παραγωγής τοματοπολτού και αποφλοιωμένων τοματών. Οι τιμές των προϊόντων μεταποίησης διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο και την επεξεργασία, με τον τοματοπολτό να έχει μέση τιμή εξαγωγής περίπου 700-1000 €/τόνο στην ευρωπαϊκή αγορά, ενώ τα ειδικά προϊόντα, όπως η σκόνη τομάτας ή οι νιφάδες, φτάνουν σε υψηλότερες τιμές λόγω της ειδικής επεξεργασίας και της μικρότερης διαθεσιμότητας. Στην Ελλάδα, η παραγωγή επικεντρώνεται σε προϊόντα όπως ο πολτός και οι αποφλοιωμένες τομάτες, με την τιμή παραγωγού να κυμαίνεται γύρω στα 90-120 €/τόνο για την πρώτη ύλη, ενώ η τιμή των τελικών προϊόντων εξαρτάται από τον βαθμό επεξεργασίας και τις απαιτήσεις της αγοράς. Συνολικά, η εκμετάλλευση όλων των υποπροϊόντων της βιομηχανικής τομάτας συμβάλλει στη βιωσιμότητα της παραγωγής, προσφέροντας πολλαπλές δυνατότητες ανάπτυξης τόσο στην εγχώρια όσο και στη διεθνή αγορά, ενώ η συνεχιζόμενη τεχνολογική πρόοδος υπόσχεται νέες εφαρμογές και εμπορικές προοπτικές για τα προϊόντα αυτά (Stajić et al., 2024).

Συνοψίζοντας, θα λέγαμε πως η εκμετάλλευση όλων των υποπροϊόντων της βιομηχανικής τομάτας συμβάλλει στη βιωσιμότητα της παραγωγής, προσφέροντας πολλαπλές δυνατότητες ανάπτυξης τόσο στην εγχώρια όσο και στη διεθνή αγορά, ενώ η συνεχιζόμενη τεχνολογική πρόοδος υπόσχεται νέες εφαρμογές και εμπορικές προοπτικές για τα προϊόντα αυτά.

3.4 Ανάγκη Αξιοποίησης Υποπροϊόντων

Η βιομηχανική παραγωγή τομάτας συνιστά έναν από τους πιο σημαντικούς πυλώνες της αγροδιατροφικής αλυσίδας παγκοσμίως, παρέχοντας πολλαπλές δυνατότητες αξιοποίησης τόσο μέσω των κύριων προϊόντων όσο και των παραγόμενων υποπροϊόντων της. Η ανάγκη για πλήρη αξιοποίηση αυτών των υποπροϊόντων καθίσταται επιτακτική, καθώς συνδέεται άρρηκτα με τη βιωσιμότητα του πρωτογενούς τομέα, τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την ενίσχυση της οικονομικής αποδοτικότητας σε επίπεδο παραγωγικής διαδικασίας (Barros et al., 2011). Κατά τη μεταποίηση της τομάτας σε προϊόντα όπως ο τοματοπολτός, ο φυσικός χυμός, η σάλτσα και το κέτσαπ, παράγονται σημαντικές ποσότητες παραπροϊόντων, κυρίως φλούδες, σπόροι, ίνες και υγρά κατάλοιπα. Τα υλικά αυτά, αν και συχνά αντιμετωπίζονται ως υπολείμματα, αποτελούν πολύτιμες πηγές βιοδραστικών ενώσεων όπως το λυκοπένιο, τα καροτενοειδή, οι φαινολικές ενώσεις, οι φυτικές ίνες και έλαια, με σημαντικές εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων, τα καλλυντικά, τα φαρμακευτικά προϊόντα και τη ζωοτροφή (Calvo et al., 2021).

Η διαχείριση αυτών των παραπροϊόντων εντάσσεται στη λογική της κυκλικής οικονομίας, καθώς μέσω σύγχρονων τεχνολογιών εκχύλισης, όπως η υπερκρίσιμη εκχύλιση με διοξείδιο του άνθρακα ή η χρήση πράσινων διαλυτών, επιτυγχάνεται η ανάκτηση φυσικών χρωστικών, αντιοξειδωτικών και λειτουργικών συστατικών, τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν σε νέα προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας (Silva et al., 2021). Χαρακτηριστικό είναι ότι ποσοστό άνω του 70% του λυκοπενίου της τομάτας εντοπίζεται στις φλούδες και στους σπόρους, στοιχείο που αναδεικνύει τη δυναμική των υποπροϊόντων ως εναλλακτικών πηγών βιοδραστικών ενώσεων (Bhandari & Kumar, 2021). Παράλληλα, η χρήση των παραπροϊόντων της τομάτας σε ζωοτροφές, κυρίως ως πηγή φυτικών ινών και ενέργειας, έχει αποδειχθεί ευεργετική, καθώς βελτιώνει τη σύνθεση του γάλακτος και του κρέατος, υποστηρίζοντας τη διατροφική αξία των ζωικών προϊόντων (Sahin et al., 2023). Επιπλέον, η αξιοποίηση των ελαίων που προκύπτουν από τους σπόρους προσφέρει πρώτες ύλες για βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή βιοκαυσίμων, λιπαντικών και καλλυντικών (Borguini & Ferraz da Silva Torres, 2009).

Η αξιοποίηση των παραγόμενων παραπροϊόντων συνδέεται επίσης με την προσπάθεια μείωσης των απορριμμάτων και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της βιομηχανικής γεωργίας. Η δυνατότητα μετατροπής τους σε σκόνη τομάτας, νιφάδες, εκχυλίσματα, βιολιπάσματα και οργανικά πρόσθετα ενισχύει την αειφορία της παραγωγής,

ενώ η ζήτηση για προϊόντα φυσικής προέλευσης οδηγεί σε συνεχή αύξηση της εμπορικής τους αξίας (Raiola et al., 2014). Στην ευρωπαϊκή αγορά, οι τιμές εξαγωγής προϊόντων όπως η σκόνη τομάτας κυμαίνονται από 1500 έως 1800 ευρώ ανά τόνο, ενώ τα εξειδικευμένα έλαια μπορούν να υπερβούν τα 4000 ευρώ ανά τόνο, αναλόγως της καθαρότητας και της μεθόδου εκχύλισης (Calvo et al., 2021). Αντίθετα, στην Ελλάδα, η αγορά παραπροϊόντων τομάτας παραμένει σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, με περιορισμένη αξιοποίηση πέρα από την παραγωγή τοματοπολτού, κυρίως λόγω της έλλειψης υποδομών, επενδύσεων και εξειδικευμένης τεχνογνωσίας. Παρόλα αυτά, οι τάσεις της αγοράς και η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση των καταναλωτών για ζητήματα βιωσιμότητας δημιουργούν πρόσφορο έδαφος για την ενίσχυση της βιομηχανίας παραπροϊόντων τομάτας, ενισχύοντας τη συνολική αξία της αγροτικής παραγωγής (Silva et al., 2021).

Η μεταποίηση των αγροτικών προϊόντων, όπως η τομάτα, δεν αφορά μόνο τη διατήρηση της πρώτης ύλης, αλλά και την ενίσχυση της αγροτικής οικονομίας συνολικά. Η δυνατότητα μετατροπής ευπαθών προϊόντων σε σταθερές μορφές μεγάλης διάρκειας, όπως ο τοματοπολτός, ο χυμός και τα συμπυκνώματα, εξασφαλίζει την επάρκεια προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και συμβάλλει στην καλύτερη κατανομή των πόρων (Σέμος, 2004). Παράλληλα, η ανάπτυξη της μεταποίησης υποστηρίζει την αύξηση των τιμών παραγωγού, οδηγώντας σε βελτίωση των εισοδημάτων και προσφέροντας θέσεις εργασίας σε αγροτικές περιοχές, ενισχύοντας την τοπική απασχόληση και ενδυναμώνοντας τις τοπικές κοινότητες. Η ύπαρξη υποστηρικτικών επιχειρήσεων, όπως βιοτεχνίες παραγωγής συσκευασιών και προμηθευτές πρώτων υλών, ενισχύει το οικοσύστημα της μεταποίησης και δημιουργεί αλυσιδωτά οφέλη στην τοπική οικονομία (Κιτσοπανίδης & Καμενίδης, 2003).

Η συνολική εκμετάλλευση των παραγόμενων υποπροϊόντων τομάτας αποτελεί ουσιώδη συνιστώσα της αειφόρου αγροτικής ανάπτυξης, προσφέροντας λύσεις σε προβλήματα επισιτιστικής ασφάλειας, μείωσης απορριμμάτων και προστασίας του περιβάλλοντος. Η συστηματική ενσωμάτωση των παραπροϊόντων στις παραγωγικές διαδικασίες ανοίγει νέους δρόμους για την ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, ενισχύοντας τον ανταγωνισμό της βιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η αξιοποίηση αυτών των δυνατοτήτων απαιτεί επενδύσεις σε τεχνολογίες αιχμής, ανάπτυξη νέων ερευνητικών πεδίων και συνεργασίες μεταξύ βιομηχανίας, ερευνητικών ιδρυμάτων και παραγωγών, ώστε να επιτευχθεί μια πραγματικά βιώσιμη και αποδοτική αλυσίδα αξίας για την τομάτα και τα υποπροϊόντά της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΑ ΚΑΡΟΤΕΝΟΕΙΔΗ ΣΤΗΝ ΤΟΜΑΤΑ

Η τομάτα, πέρα από τη σημασία της ως βασικό αγροτικό προϊόν και τη συμβολή της στη διατροφική ασφάλεια, αποτελεί έναν μοναδικό φυτικό οργανισμό με σημαντική βιοχημική αξία, λόγω της πλούσιας σύνθεσής της σε ενώσεις με ισχυρή βιολογική δράση (Raiola et al., 2014). Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διαδικασία επεξεργασίας της βιομηχανικής τομάτας και η αξιοποίηση των υποπροϊόντων της, όπως οι φλούδες και οι σπόροι, αναδεικνύουν νέες προοπτικές στη μείωση των απορριμμάτων, την κυκλική οικονομία και την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (Calvo et al., 2021). Σε αυτή την κατεύθυνση, οι βιοδραστικές ενώσεις που περιέχονται στην τομάτα και τα υποπροϊόντα της, όπως τα καροτενοειδή, αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς αποτελούν βασικούς παράγοντες που συνδέονται με τη διατροφική αξία του φυτού και τις πολυάριθμες ευεργετικές του ιδιότητες (Bhandari & Kumar, 2021).

Το νέο κεφάλαιο εστιάζει στην κατηγορία των καροτενοειδών, τα οποία αποτελούν λιποδιαλυτές χρωστικές με ισχυρή αντιοξειδωτική δράση και καθοριστικό ρόλο στη φυσιολογία της τομάτας, καθώς και στη διατροφή του ανθρώπου (Silva et al., 2021). Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στο λυκοπένιο, το καροτενοειδές που προσδίδει στην τομάτα το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα της και έχει μελετηθεί εκτενώς για τις αντικαρκινικές, καρδιοπροστατευτικές και αντιφλεγμονώδεις του ιδιότητες (Giovannucci, 1999). Παράλληλα, θα εξεταστούν και άλλα καροτενοειδή όπως το β-καροτένιο, η λουτεΐνη και η ζεαξανθίνη, που συνεισφέρουν στην προστασία της όρασης και στη γενικότερη αντιοξειδωτική θωράκιση του οργανισμού (Fraser & Bramley, 2004).

Η ανάλυση θα περιλαμβάνει τη χημική φύση, τη βιοσύνθεση, τη βιοδιαθεσιμότητα, τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητά τους κατά την επεξεργασία, καθώς και τις τεχνολογικές εφαρμογές τους σε τρόφιμα, φαρμακευτικά και καλλυντικά προϊόντα (Silva et al., 2021). Στόχος του κεφαλαίου είναι να αναδείξει τη σημασία των καροτενοειδών της τομάτας, όχι μόνο ως σημαντικά φυτοχημικά συστατικά με ευεργετική επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, αλλά και ως κρίσιμο παράγοντα για την προστιθέμενη αξία των παραγώγων της τομάτας στη βιομηχανία τροφίμων και άλλους τομείς της οικονομίας (Calvo et al., 2021).

Μέσα από την ανάλυση αυτή, θα καταστεί σαφές πως η τομάτα αποτελεί πολύτιμο βιολογικό απόθεμα, του οποίου η πλήρης αξιοποίηση συνδέεται με τις σύγχρονες ανάγκες για βιωσιμότητα, καινοτομία και ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας (Borguini & Ferraz da Silva Torres, 2009).

4.1 Δομή και Χημική Ταξινόμηση

Τα καροτενοειδή αποτελούν μια εκτενή κατηγορία λιποδιαλυτών ενώσεων της οικογένειας των ισοπρενιοειδών, με θεμελιώδη ρόλο τόσο στη βιολογία των φυτών όσο και στη διατροφή του ανθρώπου. Αυτές οι ενώσεις χαρακτηρίζονται από έναν πολυενικό σκελετό, ο οποίος σχηματίζεται μέσω της σύνδεσης οκτώ μονάδων ισοπρενίου (C5) σε μια δομή τετρατερπενίου (C40). Το βασικό πολυενικό μόριο, το λυκοπένιο (C40H56), αποτελεί τον πρόδρομο για τη σύνθεση πολλών άλλων μορίων μέσω πολύπλοκων χημικών τροποποιήσεων, συμπεριλαμβανομένων της εισαγωγής κυκλικών δομών και οξυγονούχων ομάδων (Britton, 1995). Ο τρόπος αρίθμησης των ατόμων άνθρακα στο μόριο ακολουθεί συγκεκριμένη λογική, ενώ η ονοματολογία τους βασίζεται στην έννοια του «καροτένιου», με γράμματα όπως β-, γ-, ε- να υποδηλώνουν δομικές παραλλαγές στα άκρα της αλυσίδας (Fraser & Bramley, 2004).

Μεταξύ των πιο γνωστών μορίων που συναντώνται στη τομάτα, ξεχωρίζουν το λυκοπένιο και το β-καροτένιο, τα οποία φέρουν αξιοσημείωτες ιδιότητες, όπως αντιοξειδωτική ικανότητα και συμβολή στη διατήρηση της κυτταρικής ομοιόστασης (Britton, 1995). Τα μόρια αυτά διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: στα καθαρά υδρογονάνθρακες, τα λεγόμενα διαφορετικά καροτένια, και στις οξυγονωμένες μορφές τους, γνωστές ως ξανθοφύλλες. Οι τελευταίες περιλαμβάνουν χαρακτηριστικές ομάδες, όπως η υδροξυλομάδα στη θέση C-3 του β- ή ε-δακτυλίου (Gross, 1991), που ενισχύει τον ρόλο τους στην προστασία από οξειδωτικό στρες, κυρίως μέσω της εξουδετέρωσης διεγερμένων μορίων χλωροφύλλης στα φωτοσυνθετικά συστήματα (Muller et al., 2001, Robert et al., 2004) (βλ. Εικόνες Πα.Α1 – Πα.Α.5 του Παραρτήματος Α).

Η σύνθεση των εν λόγω ενώσεων λαμβάνει χώρα στα πλαστίδια των φυτικών κυττάρων, μέσω του μεβαλονικού μονοπατιού και της οδού της 1-δεοξυ-D-ξυλουλόξης-5-φωσφορικής (DOXP). Το ισοπεντενυλοδιφωσφορικό (IPP) και το ισομερές του, το διμεθυλαλλυλοδιφωσφορικό (DMAPP), αποτελούν πρόδρομα μόρια για τη δημιουργία του γερανυλογερανυλοδιφωσφορικού (GGPP). Η συμπύκνωση δύο μορίων GGPP οδηγεί στο φυτοένιο, το πρώτο C40 καροτενοειδές, από το οποίο, μέσω διαδοχικών ενζυμικών εισαγωγών

διπλών δεσμών, σχηματίζονται ενώσεις όπως το φυτοφλουένιο, το ζ-καροτένιο και το λυκοπένιο (Bramley, 2002). Το λυκοπένιο αποτελεί πρόδρομο μόριο για περαιτέρω μετατροπές, οι οποίες περιλαμβάνουν κυκλοποίηση για τη δημιουργία ενώσεων με β- ή ε-δακτυλίου, όπως το β-καροτένιο, η ζεαξανθίνη και η λουτεΐνη (Fraser & Bramley, 2004).

Οι ενώσεις αυτές συμμετέχουν ενεργά σε διάφορες λειτουργίες του φυτικού οργανισμού, συμβάλλοντας στον χρωματισμό των καρπών, στην προσέλκυση επικονιαστών, καθώς και στη φωτοπροστασία μέσω της απορρόφησης και διαχείρισης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η συσσώρευσή τους στους χρωμοπλάστες διαμορφώνει τον έντονο χρωματισμό των ώριμων καρπών, καθορίζοντας το εμπορικό τους ενδιαφέρον (Ronen et al., 2000). Παράλληλα, οι ξανθοφύλλες παρέχουν σημαντική αντιοξειδωτική ασπίδα, εξουδετερώνοντας ενεργοποιημένα μόρια χλωροφύλλης και προλαμβάνοντας το φωτοοξειδωτικό στρες (Muller et al., 2001).

Από διατροφική σκοπιά, οι ενώσεις αυτές αποτελούν πρόδρομους της βιταμίνης Α, σημαντικής για την όραση, την ανάπτυξη και τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος (Krinsky & Johnson, 2005). Παράλληλα, μέσω της οξειδωτικής αποδόμησής τους, παράγονται πτητικές ενώσεις που συνεισφέρουν στο άρωμα και τη γεύση των καρπών, καθώς και φυτορμόνες, όπως το αβσισικό οξύ (*ABA*) και οι στριγολακτόνες, οι οποίες διαδραματίζουν ρόλο στην απόκριση σε περιβαλλοντικό στρες (Rolland et al., 2012). Το ενδιαφέρον για την παραγωγή φυσικών καροτενοειδών έχει ενισχυθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, λόγω της ισχυρής αντιοξειδωτικής τους δράσης και της συνεισφοράς τους στην πρόληψη χρόνιων ασθενειών, όπως καρκίνοι και καρδιαγγειακά νοσήματα (Sandmann et al., 2006, Ford & Erdman, 2012).

Η έρευνα στον τομέα αυτό έχει επεκταθεί, ενσωματώνοντας σύγχρονες προσεγγίσεις, όπως η γονιδιωματική, η μεταγραφωμική, η μεταβολωμική και η φαινομική, για την κατανόηση της ρύθμισης της βιοσύνθεσης των ενώσεων αυτών (Moreno et al., 2021). Περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η φωτεινότητα και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, έχουνδειχθεί ικανοί να επηρεάσουν τη συσσώρευσή τους, ενώ η χρήση φυτοορμονών μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την αύξηση των επιπέδων τους στους καρπούς (Diretto et al., 2007). Η γνώση αυτή είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη ποικιλιών με υψηλή θρεπτική αξία και εμπορικό δυναμικό, ενισχύοντας τη βιομηχανική εκμετάλλευση της τομάτας.

4.2 Βιοσύνθεση και Λειτουργία

Η τομάτα θεωρείται ένα από τα πλέον σημαντικά φυτικά είδη στην ανθρώπινη διατροφή, κυρίως λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε βιοδραστικές ενώσεις, με κυριότερους

εκπροσώπους τα καροτενοειδή, όπως το λυκοπένιο, το β-καροτένιο και η λουτεΐνη. Η σύνθεση αυτών των χρωστικών αποτελεί το αποτέλεσμα πολύπλοκων μεταβολικών διεργασιών, οι οποίες ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης και της ωρίμανσης του καρπού. Το γονιδίωμα της τομάτας, το οποίο περιλαμβάνει περίπου 35.000 γονίδια, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τη ρύθμιση του καροτενοειδούς μεταβολισμού, επιτρέποντας την ανάλυση του ρόλου μεταγραφικών παραγόντων, φυτορμονικών σημάτων και ενζυματικών συστημάτων που συμμετέχουν στη σύνθεση και αποθήκευση αυτών των ενώσεων (The Tomato Genome Consortium, 2012). Η ανάπτυξη γενετικά τροποποιημένων γραμμών, είτε μέσω στοχευμένων μεταλλάξεων είτε μέσω σίγασης γονιδίων, έχει αναδείξει την τομάτα σε πρότυπο οργανισμό για τη μελέτη της βιοσύνθεσης, του καταβολισμού και της δυναμικής των καροτενοειδών (Klee & Giovannoni, 2011).

Συνεχίζοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι η βιοσύνθεση των καροτενοειδών ξεκινά σε διάφορους φυτικούς ιστούς, όπως τα φύλλα, τα άνθη και οι καρποί. Στους φυλλικούς ιστούς, τα καροτενοειδή όπως η λουτεΐνη δρουν ως βασικά φωτοπροστατευτικά συστατικά, περιορίζοντας την επίδραση της υπερϊώδους ακτινοβολίας και μειώνοντας το οξειδωτικό στρες. Αντίστοιχα, οι ξανθοφύλλες βιολαξανθίνη και νεοξανθίνη ευθύνονται για τον χρωματισμό των ανθών, ενώ στους ώριμους καρπούς, το λυκοπένιο επικρατεί ως η κυρίαρχη χρωστική που χαρίζει το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα (Tiwari & Cummings, 2009).

Η συγκέντρωση των καροτενοειδών στους διάφορους φυτικούς ιστούς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως ο γενετικός τύπος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και τα στάδια ανάπτυξης. Ενδεικτικά, στις συνήθεις εμπορικές ποικιλίες, το λυκοπένιο κυμαίνεται μεταξύ 7,8 και 18,1 mg/100 g νωπού βάρους, ενώ άχρωμα ενδιάμεσα προϊόντα όπως το φυτοένιο και το φυτοφλουένιο ανιχνεύονται σε επίπεδα 2,9 mg και 1,6 mg/100 g αντίστοιχα. Το β-καροτένιο, υπεύθυνο για τις πορτοκαλί αποχρώσεις, εμφανίζεται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις (έως 1,2 mg/100 g), ενώ σε μικρότερες ποσότητες συναντώνται ενώσεις όπως το γ-καροτένιο, το δ-καροτένιο, η νευροσπορίνη και η λουτεΐνη (Tiwari & Cummings, 2009). Ειδικότερα, η ποικιλιακή διαφοροποίηση της τομάτας επηρεάζει έντονα το προφίλ των καροτενοειδών, με τις παραδοσιακές ποικιλίες να εμφανίζουν μεγαλύτερη γενετική ετερογένεια και, κατ' επέκταση, μεταβλητότητα στις συγκεντρώσεις αυτών των ενώσεων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι οι τομάτες που καλλιεργούνται σε υπαίθριες συνθήκες παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα λυκοπενίου (5,2–23,6 mg/100 g νωπού βάρους) σε σύγκριση με εκείνες που αναπτύσσονται σε θερμοκήπια (0,1–10,8 mg/100 g νωπού βάρους) (Shi & Le

Maguer, 2000). Το λυκοπένιο αποτελεί έναν πολυακόρεστο υδρογονάνθρακα με 13 συζευγμένους διπλούς δεσμούς, οι οποίοι ευθύνονται για τη χαρακτηριστική χρωστική και αντιοξειδωτική του δράση. Στη φυσική του μορφή, εντοπίζεται κυρίως ως all-trans, ωστόσο κατά την επεξεργασία, την αποθήκευση ή την επίδραση θερμικών παραγόντων, μετατρέπεται σε διάφορα cis-ισομερή (*5-cis*, *9-cis*, *13-cis*, *15-cis*), τα οποία εμφανίζουν αυξημένη βιοδιαθεσιμότητα λόγω της μεγαλύτερης διαλυτότητας στα λιπίδια (Lin & Chen, 2005a, Rajendran et al., 2005, Schierle et al., 1997, Boileau et al., 1999).

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να διευκρινιστεί η έννοια της ισομέρειας των καροτενοειδών. Όπως και άλλες ενώσεις με πολλαπλούς διπλούς δεσμούς, τα καροτενοειδή μπορούν να εμφανίζονται σε διαφορετικές διαμορφώσεις στο χώρο, γνωστές ως *cis* και *trans*. Στη μορφή *trans*, τα άτομα ή οι ομάδες που συνδέονται με τον διπλό δεσμό βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές, προσδίδοντας στο μόριο ευθύγραμμη και σταθερή διαμόρφωση. Αντίθετα, η μορφή *cis* χαρακτηρίζεται από την παρουσία των ομάδων στην ίδια πλευρά του δεσμού, με αποτέλεσμα την κάμψη του μορίου, γεγονός που το καθιστά λιγότερο σταθερό. Κατά την επεξεργασία τροφίμων, όπως η θερμική επεξεργασία της τομάτας, παρατηρείται μετατροπή των *trans*-ισομερών σε *cis*, με αποτέλεσμα την αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας αυτών των ενώσεων στον ανθρώπινο οργανισμό και τη βελτίωση της απορρόφησής τους.

Προχωρώντας, η β-καροτίνη, αν και σε μικρότερες ποσότητες σε σχέση με το λυκοπένιο, παραμένει σημαντική καθώς λειτουργεί ως πρόδρομη ένωση για τη σύνθεση της βιταμίνης Α. Η διάσπαση της β-καροτίνης πραγματοποιείται μέσω της δράσης της β-καροτίνη 15,15'-μονοοξυγενάσης, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία δύο μορίων ρετινόλης (Rodriguez-Amaya, 2016). Σε ποσοτικό επίπεδο, η β-καροτίνη αντιστοιχεί περίπου στο 1/10 της συγκέντρωσης του λυκοπενίου, με τις ποικιλίες τύπου κεράσι να παρουσιάζουν επίπεδα έως 1,26 mg/100 g νωπού βάρους (Fraser et al., 2009).

Η λουτεΐνη, αν και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις (έως 338 μg/100 g νωπού βάρους, με ορισμένες κεράσι ποικιλίες να φτάνουν έως 800 μg/100 g), αποτελεί ένα σημαντικό αντιοξειδωτικό που συμβάλλει στην υγεία των ματιών και την προστασία της όρασης (Ilahy et al., 2011). Παράλληλα, πρόδρομες μορφές όπως το φυτοένιο και το φυτοφλουένιο, αν και άχρωμες, έχουν κρίσιμο ρόλο στη βιοσύνθεση των καροτενοειδών, λειτουργώντας ως μεταβατικά στάδια στην παραγωγή των τελικών έγχρωμων μορίων όπως το λυκοπένιο και το β-καροτένιο (Rao & Rao, 2007).

Η αντιοξειδωτική δράση των καροτενοειδών συνδέεται άμεσα με τη δομή των συζευγμένων διπλών δεσμών, οι οποίοι επιτρέπουν την εξουδετέρωση των ελεύθερων ριζών και του μονοκατοχικού οξυγόνου μέσω μηχανισμών όπως η πρόσθεση ριζών, η μεταφορά ηλεκτρονίων και η αφαίρεση υδρογόνου (Krinsky & Yeum, 2003). Το λυκοπένιο, συγκεκριμένα, παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή ικανότητα εξουδετέρωσης μονοκατοχικού οξυγόνου, συγκρινόμενο με άλλα καροτενοειδή (Miller et al., 1996, Stahl & Sies, 1996). Τα κυκλικά καροτενοειδή, όπως το β-καροτένιο, αντλούν μέρος της αντιοξειδωτικής τους δράσης από τους κυκλικούς δακτυλίους, ενώ η κύρια δραστηριότητα εστιάζεται στους συζευγμένους δεσμούς της ανθρακικής αλυσίδας (Mortensen et al., 2001). Αξίζει να σημειωθεί ότι η προβιταμινική δραστηριότητα περιορίζεται στα καροτενοειδή με β-ιονονικούς δακτυλίους, όπως το β-καροτένιο, καθώς το λυκοπένιο δεν παρουσιάζει αυτή τη δυνατότητα (Gross, 1991).

Συστατικό	Περιεκτικότητα σε αντιοξειδωτική ουσία (mg/100g)
Βιταμίνη C	15-48
Καροτενοειδή (συνολικά)	4-24
B- καροτένιο	0,4-1
Λυκοπένιο	3-18
Φυτοένιο	1-3
Φυτοφλουένιο	~1
Φαινολικά οξέα	16-29
Καφεϊκό οξύ	0,2-10
Χλωρογενικό οξύ	1,3-3,8
Κουμαρικό οξύ	0,1-1,6
Φερουλικό οξύ	0,1-0,7
Ναριγκενίνη	0,4-4,2
Γλυκοζίτες της κερκετίνης	0,3-4,3
Γλυκοζίτες της καμφερόλης	0,02-0,10
Βιταμίνη E	0,04-1,2

The icon shows a document with a magnifying glass over it, indicating a PDF file.

4.3 Περιεκτικότητα και Κατανομή στα μέρη του φυτού

Η κατανόηση της βιοσύνθεσης και των βιοχημικών ιδιοτήτων των καροτενοειδών που αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελεί σημαντικό βήμα για τη μελέτη της διατροφικής αξίας της τομάτας. Ωστόσο, εξίσου ουσιαστική είναι η διερεύνηση της περιεκτικότητας και της κατανομής αυτών των ενώσεων στα διάφορα μέρη του φυτού. Η ανάλυση της συγκέντρωσης καροτενοειδών σε διαφορετικούς ιστούς, όπως οι καρποί, οι σπόροι, τα άνθη και τα φύλλα, επιτρέπει την κατανόηση της βιολογικής τους λειτουργίας, της ποικιλιακής διαφοροποίησης και των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα των προϊόντων τομάτας.

Η κατανομή των καροτενοειδών στους ιστούς του συγκεκριμένου φυτού εμφανίζει έντονη ετερογένεια, γεγονός που συνδέεται άμεσα με το γενετικό υπόβαθρο, το στάδιο ωρίμανσης, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις εφαρμοζόμενες καλλιεργητικές πρακτικές. Οι καρποί της τομάτας αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή καροτενοειδών, με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις να ανιχνεύονται στην εξωτερική επιδερμίδα (περικόρπιο), όπου συγκεντρώνεται περίπου το 80–90% της συνολικής ποσότητας, προσδίδοντας το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα και επηρεάζοντας καθοριστικά την ποιότητα και την εμπορική αξία του καρπού (Shi & Le Maguer, 2000). Οι εσωτερικοί θύλακες του καρπού, όπως ο πολτός, παρουσιάζουν διαφοροποιημένο προφίλ καροτενοειδών, με αυξημένες συγκεντρώσεις συγκεκριμένων μορφών, όπως διαπιστώθηκε από τους Fraser και τους συνεργάτες του το 2000. Σε μελέτη του Sharma και Le Maguer (1996b), παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση λυκοπενίου στον εξωτερικό περικόρπιο έφθανε τα 53,9 mg/100 g, ποσότητα 3 έως 6 φορές υψηλότερη από εκείνη που καταγράφηκε στον πολτό (11 mg/100 g), υπογραμμίζοντας τη χωρική διαφοροποίηση στην κατανομή των καροτενοειδών.

Η συνολική περιεκτικότητα των προαναφερθέντων ενώσεων στον καρπό του φυτού κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 7 και 19 mg/100 g νωπού βάρους, όπως αναφέρεται από τον Gross (1991). Σε έρευνα των Hart και Scott (1995) στον Καναδά, καταγράφηκε ότι σε έντονα κόκκινες ποικιλίες τομάτας, η συγκέντρωση λυκοπενίου έφθανε τα 15 mg/100 g, ενώ σε κίτρινες ποικιλίες περιοριζόταν σημαντικά, μόλις στα 0,5 mg/100 g. Παράλληλα, σε μελέτη των Kutí και Konuru (2005) στις Ηνωμένες Πολιτείες, επιβεβαιώθηκε η μεγάλη διακύμανση των επιπέδων λυκοπενίου μεταξύ ποικιλιών, με τις κόκκινες ποικιλίες να υπερτερούν σημαντικά σε σύγκριση με τις κίτρινες. Σύμφωνα με τους Tonucci και τους συνεργάτες του (1995), η μέση περιεκτικότητα λυκοπενίου στον καρπό ανέρχεται σε περίπου 9,27 mg/100 g νωπού βάρους, ενώ το β-καροτένιο εμφανίζεται σε συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν περίπου

στο 10% αυτών του λυκοπενίου, επιβεβαιώνοντας τη δευτερεύουσα συμβολή του στο συνολικό προφίλ των καροτενοειδών.

Πέραν του καρπού, τα καροτενοειδή κατανέμονται και σε άλλα μέρη του φυτού, όπου διαδραματίζουν εξίσου σημαντικούς ρόλους. Στα φύλλα, η λουτεΐνη αποτελεί το κυρίαρχο καροτενοειδές, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 70% του συνολικού περιεχομένου, ενώ οι ξανθοφύλλες, όπως η βιολαξανθίνη και η νεοξανθίνη, καταλαμβάνουν το 90% της περιεκτικότητας στα άνθη, προσδίδοντας το χαρακτηριστικό κίτρινο χρώμα και συμμετέχοντας στη φωτοπροστασία των ιστών (Britton, 1995, Rao & Rao, 2007). Χαμηλότερα ποσοστά άλλων καροτενοειδών, όπως η νεοξανθίνη (14%), το νευροσπορένιο (10%) και τα α- και β-καροτένια (10%), παρατηρούνται επίσης στα φύλλα και τα άνθη, όπως αναφέρουν οι Bramley και οι συνεργάτες του (1992).

Όσον αφορά τους σπόρους, η κατανομή διαφοροποιείται σημαντικά από τον περικάρπιο. Σε μελέτη των Rymal και Nakayama (1974) σε δύο κόκκινες ποικιλίες τομάτας και μία τύπου μανταρινιού, διαπιστώθηκε ότι η λουτεΐνη κυριαρχεί στους σπόρους με ποσοστά 64,4% έως 90,2%, ακολουθούμενη από το β-καροτένιο (21,5% και 5,3%) και το λυκοπένιο (14,1% και 4,5%). Αντίστοιχα, στους σπόρους ντοματίνι, η έρευνα των Rodriguez και των συνεργατών του το 1975, έδειξε ότι το β-καροτένιο αποτελεί το κυρίαρχο καροτενοειδές με ποσοστό 54,4%, ενώ ακολουθούν το λυκοπένιο (34,6%), το γ-καροτένιο (3,4%), το α-καροτένιο (2,5%), το φυτοφλουένιο (1,7%) και το β-ζεακαροτένιο (1,3%).

Η συνολική ποικιλία των καροτενοειδών στη τομάτα αναδεικνύει την πολυπλοκότητα του μεταβολικού της προφίλ και την εξαιρετική σημασία αυτών των ενώσεων, όχι μόνο για την ανάπτυξη και την προστασία του φυτού, αλλά και για τη διατροφή και την υγεία του ανθρώπου.

4.4 Αντιοξειδωτικές Ιδιότητες και ο Ρόλος τους στην Υγεία

Η καλλιέργεια της τομάτας (*Solanum lycopersicum* L.) αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της παγκόσμιας γεωργικής παραγωγής και της ανθρώπινης διατροφής, καθώς το φυτό αυτό κατέχει εξέχουσα θέση στις προτιμήσεις των καταναλωτών τόσο λόγω της γευστικής του αξίας όσο και της πολυδιάστατης θρεπτικής του συνεισφοράς (Vaughan & Geissler, 1997, Rančić et al., 2010). Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η χημική της σύσταση χαρακτηρίζεται από μια πληθώρα βιοδραστικών ενώσεων, με κυρίαρχες τις ομάδες των καροτενοειδών, οι οποίες προσδίδουν στους καρπούς το χαρακτηριστικό τους χρώμα και συνδέονται άμεσα με τη διατροφική τους αξία. Η κατανομή των καροτενοειδών στα

διαφορετικά μέρη του φυτού, όπως το περικάρπιο, οι σπόροι, τα άνθη και τα φύλλα, καθώς και η ποικιλιακή διαφοροποίηση, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τη συγκέντρωσή τους και κατ' επέκταση για τις επιδράσεις τους στην υγεία του ανθρώπου (Moretti et al., 1998, Yeats et al., 2012).

Ωστόσο, η σημασία των καροτενοειδών δεν περιορίζεται μόνο στη συμβολή τους στη μορφολογία και το χρώμα της τομάτας. Οι ενώσεις αυτές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της υγείας του ανθρώπινου οργανισμού, μέσω της ισχυρής αντιοξειδωτικής τους δράσης, η οποία συνδέεται με την εξουδετέρωση των ελεύθερων ριζών οξυγόνου και άλλων αντιδραστικών ειδών που προκαλούν οξειδωτικές βλάβες σε κυτταρικό επίπεδο (Tonucci et al., 1995, Hunt, 1980). Το λυκοπένιο, ως το κυρίαρχο καροτενοειδές της τομάτας, συνοδευόμενο από άλλες ενώσεις όπως το β-καροτένιο, η λουτεΐνη, το φυτοένιο και το φυτοφλουένιο, έχει μελετηθεί εκτενώς για την πιθανή προστατευτική του δράση έναντι χρόνιων ασθενειών, όπως τα καρδιαγγειακά νοσήματα, διάφορες μορφές καρκίνου, ο σακχαρώδης διαβήτης τύπου 2, καθώς και για τη συμβολή του στη διατήρηση της υγείας του δέρματος και στη γνωστική λειτουργία (Rao & Rao, 2007, Stahl & Sies, 2005).

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα επιχειρηθεί μια εκτενής και αναλυτική παρουσίαση των αντιοξειδωτικών ιδιοτήτων των καροτενοειδών της τομάτας και των μηχανισμών μέσω των οποίων επηρεάζουν την υγεία του ανθρώπινου οργανισμού. Η ανασκόπηση αυτή βασίζεται σε σύγχρονες επιστημονικές μελέτες, δίνοντας έμφαση τόσο στα ευρήματα από *in vitro* και *in vivo* πειράματα όσο και στα δεδομένα από κλινικές και επιδημιολογικές έρευνες (Przybylska, 2020, Sharma & Le Maguer, 1996b). Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στη συσχέτιση της πρόσληψης λυκοπενίου και άλλων καροτενοειδών με τη μείωση του κινδύνου εμφάνισης ασθενειών, αναδεικνύοντας τη σημασία της τακτικής κατανάλωσης προϊόντων τομάτας στο πλαίσιο μιας ισορροπημένης και υγιεινής διατροφής (Schwingshackl et al., 2020, Kim et al., 2010).

Αντικαρκινικές Ιδιότητες

Ο καρκίνος αποτελεί μία από τις κυριότερες αιτίες θανάτου σε παγκόσμιο επίπεδο, με περίπου 10 εκατομμύρια θανάτους να αποδίδονται στη νόσο κατά το έτος 2020. Η διατροφή φαίνεται να διαδραματίζει ουσιώδη ρόλο στην πρόληψη της καρκινογένεσης, με τη μεσογειακή δίαιτα, στην οποία η τομάτα καταλαμβάνει κεντρική θέση, να έχει συνδεθεί με σημαντική μείωση του σχετικού κινδύνου. Συγκεκριμένα, μελέτες δείχνουν ότι η υιοθέτηση της συγκεκριμένης διατροφής μπορεί να μειώσει τη συνολική επίπτωση καρκίνου κατά 61%, ενώ γενικά, μια

ισορροπημένη διαίτα μπορεί να προλάβει περίπου το 30% των καρκινικών περιστατικών (Schwingshackl et al., 2020, Farinetti et al., 2020).

Οι βιοδραστικές ενώσεις της τομάτας, με κυριότερο το λυκοπένιο, προσφέρουν ιδιαίτερα σημαντικές αντικαρκινικές ιδιότητες. Το λυκοπένιο είναι ένα καροτενοειδές με ισχυρή αντιοξειδωτική δράση, το οποίο καταστέλλει τις ελεύθερες ρίζες και θεωρείται από τα πιο αποτελεσματικά φυσικά μόρια στην απενεργοποίηση του μονόπλευρου οξυγόνου. Το 23–24% του λυκοπενίου που καταναλώνεται απορροφάται από τον ανθρώπινο οργανισμό και συσσωρεύεται στο πλάσμα, το ήπαρ και άλλους ιστούς, με χρόνο ημιζωής από 12 έως 33 ημέρες (Rao & Rao, 2007, Stahl & Sies, 2005, Fordham et al., 2001).

Η αντικαρκινική δράση του λυκοπενίου περιλαμβάνει ποικίλους μοριακούς μηχανισμούς, όπως η ρύθμιση γονιδιακής έκφρασης, η πρόκληση απόπτωσης, η αύξηση της ενδοκυτταρικής επικοινωνίας μέσω *gap junctions* και η αναστολή της αγγειογένεσης. Επιπλέον, παρουσιάζει ισχυρές αντιφλεγμονώδεις και αντιλιπιδαιμικές ιδιότητες (Arab & Steck, 2000, Agarwal & Rao, 2000).

Η δράση του λυκοπενίου φαίνεται επίσης να οφείλεται εν μέρει στα προϊόντα οξείδωσής του, τα οποία, όπως έχει αποδειχθεί, μπορούν να επάγουν απόπτωση σε καρκινικά κύτταρα. Οι μελέτες *in vitro* καταδεικνύουν ότι οι μεταβολίτες του λυκοπενίου έχουν κυτταροτοξική δράση και επηρεάζουν την πορεία του κυτταρικού κύκλου, εμποδίζοντας έτσι την πολλαπλασιαστική ικανότητα των κακοηθών κυττάρων (Zhang et al., 2009, Arathi et al., 2010).

Ειδικότερα, στην περίπτωση του καρκίνου του προστάτη και του μαστού, η κατανάλωση λυκοπενίου έχει συσχετιστεί με μείωση των επιπέδων του *IGF-I*, παράγοντα που συνδέεται με την ανάπτυξη καρκινικών κυττάρων, ιδίως σε προεμμηνοπαυσιακές γυναίκες. Ο λυκοπενικός μεταβολισμός αναστέλλει επίσης την ενεργοποίηση γονιδίων που ελέγχουν τον κυτταρικό κύκλο και την ανάπτυξη όγκων (Przybylska, 2020, Saini et al., 2020).

Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην αλληλεπίδραση του λυκοπενίου με το μονοπάτι *PI3K/AKT*, το οποίο αποτελεί κρίσιμο ρυθμιστή της επιβίωσης και της αγγειογένεσης των καρκινικών κυττάρων. Ο λυκοπενικός αναστολέας του μονοπατιού αυτού έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την κυτταρική ανάπτυξη μέσω αναστολής της *VEGF*-μεσολαβούμενης αγγειογένεσης (Tang et al., 2018, Kim et al., 2019).

Πέρα από το μονοπάτι *PI3K/AKT*, ο λυκοπένιος φαίνεται να επηρεάζει επίσης αρνητικά τις αντικαρκινικές οδούς *NF-κB* και *Wnt/β-κατενίνης*. Οι παράγοντες αυτοί σχετίζονται με τη φλεγμονή και την κυτταρική ανάπτυξη και αποτελούν βασικούς ρυθμιστές σε πολλούς τύπους καρκίνου. Πειράματα σε κυτταρικές σειρές έδειξαν ότι ο λυκοπένιος αναστέλλει τη δραστηριότητά τους, οδηγώντας σε μείωση της κυτταρικής βιωσιμότητας και επαγωγή απόπτωσης (Assar et al., 2016, Preet et al., 2015).

Παρότι το λυκοπένιο αποτελεί το κύριο καροτενοειδές της τομάτας, το β-καροτένιο συμβάλλει επίσης στις αντικαρκινικές ιδιότητες του καρπού. Είναι πρόδρομος της βιταμίνης *A* και σχετίζεται με την αναστολή του πολλαπλασιασμού των καρκινικών κυττάρων και την ενεργοποίηση αποπτωτικών μηχανισμών (Tanaka et al., 2012, Rao & Rao, 2007). Επιπλέον, η τομάτα περιέχει και σημαντικές ποσότητες σε βιταμίνη *C*, η οποία συμβάλλει στη μείωση του οξειδωτικού στρες, περιορίζοντας τη βλάβη του *DNA* και αναστέλλοντας τη δημιουργία νιτροζαμινών. Σε υψηλές συγκεντρώσεις στο πλάσμα, η βιταμίνη αυτή επιδρά κυτταροτοξικά στα καρκινικά κύτταρα (Padayatty et al., 2003, Carr & Frei, 1999).

Σημαντική δράση παρουσιάζει και το φερουλικό οξύ, φαινολικό συστατικό της τομάτας, το οποίο αποδείχθηκε ότι επηρεάζει εκατοντάδες γονίδια, οδηγώντας σε επιβράδυνση του κυτταρικού κύκλου και ενίσχυση των ελέγχων ποιότητας του *DNA* στα καρκινικά κύτταρα του παχέος εντέρου (Bourassa et al., 2013).

Τέλος, οι ίνες που περιέχονται στον φλοιό και στους σπόρους της τομάτας (60%) διασπώνται σε λιπαρά οξέα μικρής αλυσίδας, τα οποία αναστέλλουν την αποακετυλίωση ιστονών και επάγουν επιγενετικές αλλαγές που καταστέλλουν την ανάπτυξη καρκινικών κυττάρων στο κόλον (Louis et al., 2014, Donohoe et al., 2012). Σε συνδυασμό, τα δεδομένα αυτά τεκμηριώνουν τον σημαντικό ρόλο της τομάτας ως λειτουργικού τροφίμου, με πληθώρα βιοδραστικών συστατικών που ενδέχεται να δρουν συνεργιστικά στην πρόληψη της καρκινογένεσης (Saini et al., 2020, Przybylska, 2020).

Δράση κατά του Καρκίνου του Προστάτη

Ο καρκίνος του προστάτη κατατάσσεται ανάμεσα στις συχνότερες μορφές κακοήθειας στον ανδρικό πληθυσμό παγκοσμίως, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για αναγνώριση προληπτικών παραγόντων μέσα από τη διατροφή (Rowles et al., 2018, Giovannucci et al., 2002). Στο πλαίσιο αυτό, αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στις βιοδραστικές ενώσεις της τομάτας, και κυρίως στην ομάδα των καροτενοειδών, τα οποία περιλαμβάνουν,

πέραν του λυκοπενίου, και το β-καροτένιο, τη λουτεΐνη, το φυτοένιο και το φυτοφλουένιο. Η αντιοξειδωτική τους δράση, σε συνδυασμό με την ικανότητα ρύθμισης σημαντικών κυτταρικών μονοπατιών, υποδηλώνει τον πιθανό ρόλο τους στην πρόληψη της καρκινογένεσης.

Επιδημιολογικές μελέτες κατέδειξαν πως η τακτική κατανάλωση προϊόντων πλούσιων σε καροτενοειδή, όπως σάλτσες τομάτας, νωπές τομάτες και πιάτα που περιέχουν θερμικά επεξεργασμένα τομάτα, συνδέεται με σημαντική μείωση του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου του προστάτη (Giovannucci et al., 2002). Η συσχέτιση αυτή έχει αποδοθεί σε μεγάλο βαθμό στο λυκοπένιο, ωστόσο νεότερες ανασκοπήσεις επισημαίνουν τη συνεργιστική δράση και άλλων καροτενοειδών, τα οποία δρουν συλλογικά στην αναστολή φλεγμονωδών και οξειδωτικών μηχανισμών (Rowles et al., 2018, Saini et al., 2020).

Η βιοδιαθεσιμότητα των καροτενοειδών της τομάτας, ιδιαίτερα μετά από θερμική επεξεργασία, επιτρέπει τη συσσώρευσή τους στο πλάσμα και σε ιστούς-στόχους, όπως ο προστάτης και το ήπαρ. Το λυκοπένιο εμφανίζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, όμως ταυτόχρονα ανιχνεύονται σημαντικές ποσότητες β-καροτενίου και φυτοενίων, οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοιες αντιοξειδωτικές ιδιότητες (Rao & Agarwal, 1999, Stahl & Sies, 2005). Σε κλινική μελέτη, διατροφή εμπλουτισμένη με προϊόντα τομάτας οδήγησε σε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των καροτενοειδών στον προστάτη, υποδεικνύοντας την ικανότητά τους να διεισδύουν και να αποθηκεύονται σε συγκεκριμένους ιστούς (Chen et al., 2002).

Επιπλέον, έχει καταδειχθεί ότι η παρουσία των καροτενοειδών σχετίζεται με τη μείωση των επιπέδων του *IGF-I*, ενός αυξητικού παράγοντα που εμπλέκεται σε μιτογόνες και αντικαρκινικές διεργασίες στον προστατικό ιστό (Norat et al., 2002). Παρότι ορισμένες μελέτες αμφισβητούν την άμεση επίδραση του λυκοπενίου στα επίπεδα του *IGF-I*, φαίνεται ότι η συνολική κατανάλωση καροτενοειδών και φυτικών ενώσεων από τομάτα συνδέεται με έναν πιο ευνοϊκό ορμονικό προφίλ (Chan et al., 2005, Graydon et al., 2006).

Στο πεδίο της μοριακής βιολογίας, παρατηρήθηκε ότι η πρόσληψη καροτενοειδών οδηγεί σε καταστολή της έκφρασης της κυκλίνης *D1*, μιας πρωτεΐνης κρίσιμης για την πρόοδο του κυτταρικού κύκλου, με αποτέλεσμα την παύση της κυτταρικής διαίρεσης και την αναστολή της κακοήθους ανάπτυξης (Obermüller-Jevic et al., 2003, Wertz et al., 2004). Παράλληλα, η έκφραση της πρωτεΐνης κοννεξίνη 43 ενισχύεται, γεγονός που προάγει την επικοινωνία μέσω

gap junctions μεταξύ των κυττάρων, καθιστώντας δυσκολότερη την εξέλιξη καρκινικών φαινοτύπων (Zhang et al., 2006, Wertz et al., 2004).

Η συνολική αντικαρκινική δράση των καροτενοειδών της τομάτας φαίνεται να προκύπτει από έναν συνδυασμό μηχανισμών, όπως η αναστολή της οξειδωτικής βλάβης, η ρύθμιση κυτταρικών πρωτεϊνών, η ορμονική εξισορρόπηση και η ενίσχυση της διακυτταρικής επικοινωνίας. Παρόλο που το λυκοπένιο κατέχει κεντρική θέση στις περισσότερες μελέτες, δεν πρέπει να αγνοείται ο συνεργιστικός ρόλος και των υπολοίπων καροτενοειδών, καθώς και των συνοδευτικών ενώσεων όπως η βιταμίνη C, οι πολυφαινόλες και οι διατροφικές ίνες (Saini et al., 2020, Przybylska, 2020).

Καρδιοπροστατευτικές Ιδιότητες

Η συστηματική κατανάλωση καρπών πλούσιων σε καροτενοειδή, όπως το συγκεκριμένο είδος φυτικού καρπού, έχει συσχετιστεί με σημαντική μείωση του κινδύνου εμφάνισης καρδιαγγειακών παθήσεων. Σε μία ανασκόπηση 14 επιλεγμένων μελετών, η πρόσληψη λυκοπενίου, ενός από τα κύρια καροτενοειδή που συναντώνται στο φυτό, συσχετίστηκε αντιστρόφως με τη στεφανιαία νόσο (Song et al., 2017). Μια δεύτερη μετα-ανάλυση 25 μελετών επιβεβαίωσε ότι η αυξημένη συγκέντρωση του συγκεκριμένου μορίου στον ορό του αίματος μπορεί να μειώσει συνολικά τη θνησιμότητα κατά 37%, τα καρδιαγγειακά επεισόδια κατά 14% και τα εγκεφαλικά επεισόδια κατά 23% (Li et al., 2014).

Σε πειραματικό πρωτόκολλο διασταυρούμενου τύπου σε υγιείς εθελοντές, διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών μορφών πρόσληψης καρποφοριών του φυτού (νωπός πολτός, θερμικά επεξεργασμένη σάλτσα και σάλτσα με προσθήκη ελαιολάδου) σε δείκτες λιπιδαιμίας. Και οι τρεις μορφές κατανάλωσης οδήγησαν σε μείωση της ολικής και των τριγλυκεριδίων, αύξηση της *HDL* χοληστερόλης και βελτίωση της αντιφλεγμονώδους κυτοκίνης *IL-10*, με τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα να παρατηρείται όταν το προϊόν είχε συνδυαστεί με έλαιο, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη βιοδιαθεσιμότητα των λιποδιαλυτών καροτενοειδών (Valero-Muñoz et al., 2014).

Η θερμική κατεργασία διασπά τις πρωτεϊνικές δομές των φυτικών τοιχωμάτων, απελευθερώνοντας έτσι καροτενοειδή όπως το λυκοπένιο, γεγονός που εξηγεί την αυξημένη απορρόφηση από το γαστρεντερικό σωλήνα. Μελέτες σε ενήλικες καταδεικνύουν ότι η ημερήσια πρόσληψη πολτοποιημένων ή μαγειρεμένων προϊόντων οδηγεί σε στατιστικά σημαντική μείωση της *LDL* χοληστερόλης (Gartner et al., 1997).

Η υπέρταση και αθηροσκλήρωση, από την άλλη, ως βασικές εκφάνσεις της καρδιαγγειακής δυσλειτουργίας, μπορούν να επηρεαστούν θετικά από ενώσεις του φυτού όπως το λυκοπένιο, το β-καροτένιο και το *GABA*. Το τελευταίο, αν και ευρύτερα γνωστό ως νευροδιαβιβαστής, εντοπίζεται σε υψηλές συγκεντρώσεις στον φυτικό ιστό και έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την αρτηριακή πίεση σε υπερτασικά άτομα χωρίς να επηρεάζει τα φυσιολογικά επίπεδα πίεσης (Engelhard et al., 2006, Okada et al., 2008).

Τα αντιοξειδωτικά καροτενοειδή, όπως το β-καροτένιο και το λυκοπένιο, προστατεύουν τα αγγειακά ενδοθηλιακά κύτταρα και τις λιποπρωτεΐνες από την οξείδωση, παρεμποδίζοντας έτσι τη δημιουργία αθηρωματικών πλακών. Η οξείδωση της *LDL* αποτελεί κρίσιμο παράγοντα έναρξης και εξέλιξης της αθηροσκλήρωσης, μέσω της ενεργοποίησης προφλεγμονωδών κυτοκινών και της μετατροπής των μονοκυττάρων σε μακροφάγα (Naroli et al., 1999, Chopra et al., 2000).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι φλαβονοειδή και άλλα υδατοδιαλυτά μόρια που βρίσκονται κυρίως στο ζελέ που περιβάλλει τους σπόρους του καρπού, φαίνεται να έχουν ισχυρή αντιαιμοπεταλιακή δράση. Σε μελέτη με υγιείς ενήλικες 40–70 ετών, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στη συγκόλληση των αιμοπεταλίων μετά από χορήγηση εκχυλίσματος, ανεξάρτητα από την παρουσία καροτενοειδών (O’Kennedy et al., 2006). Παρόμοια δράση παρατηρήθηκε και σε ζωικά μοντέλα, επιβεβαιώνοντας την αναστολή της ενεργοποίησης του συμπλέγματος *GPIIb/IIIa* και επομένως τον περιορισμό του σχηματισμού θρόμβων (Zhang et al., 2014).

Η φλεγμονή αποτελεί βασικό παθογενετικό μηχανισμό της αθηροσκλήρωσης, με τον μεταγραφικό παράγοντα *NF-κB* να εμπλέκεται άμεσα τόσο στη φλεγμονώδη αντίδραση όσο και στη ρύθμιση της λιπιδαιμίας μέσω της ηπατικής λειτουργίας. Πειραματικές μελέτες με χρήση σκόνης καρπού σε διατροφικά πρωτόκολλα σε αρουραίους έδειξαν αναστολή της ενεργοποίησης του *NF-κB* και προστασία του ηπατικού ιστού από φθορά σχετιζόμενη με το οξειδωτικό στρες (Sahin et al., 2009).

Επιπλέον, αναγνωρίζεται ότι η ενδοθηλιακή λειτουργία του αγγειακού συστήματος, ως πρώιμος δείκτης καρδιαγγειακής υγείας, επηρεάζεται από τη διατροφή. Ωστόσο, σε κλινικές μελέτες όπου χρησιμοποιήθηκαν υψηλές ποσότητες πολτού ή πολτοποιημένων προϊόντων για διάστημα μίας εβδομάδας, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στην αγγειοδιαστολή

εξαρτώμενη από το ενδοθήλιο, αν και καταγράφηκαν βελτιώσεις σε αιμοδυναμικές παραμέτρους (Blum et al., 2007).

Συνολικά, η συμβολή των καροτενοειδών και των λοιπών βιοδραστικών ενώσεων του συγκεκριμένου καρπού στην καρδιοπροστασία συνδέεται με πολλαπλούς μηχανισμούς: ρύθμιση της αρτηριακής πίεσης, αντιοξειδωτική και αντιφλεγμονώδη δράση, βελτίωση του λιπιδαιμικού προφίλ, ενίσχυση της αντισταμοπεταλιακής λειτουργίας και αναστολή της οξείδωσης της *LDL*. Η ενσωμάτωση των ενώσεων αυτών στο ευρύτερο διατροφικό πλαίσιο, ιδίως στα πρότυπα της μεσογειακής διατροφής, φαίνεται να προσφέρει σημαντική προστασία έναντι της καρδιαγγειακής νόσου, κυρίως όταν συνδυάζεται με άλλα ευεργετικά τρόφιμα όπως τα όσπρια, τα φρούτα, οι ξηροί καρποί και το ελαιόλαδο (Rosato et al., 2019).

Νευροεκφυλιστικές Παθήσεις και Ευεργετικές Επιδράσεις

Η πρόοδος των νευροεκφυλιστικών νοσημάτων, όπως η νόσος του Alzheimer, η νόσος του Parkinson και τα ισχαιμικά εγκεφαλικά επεισόδια, συνδέεται στενά με μηχανισμούς όπως το οξειδωτικό στρες, η φλεγμονή του νευρικού ιστού και η απόπτωση των νευρικών κυττάρων. Οι βιοδραστικές ενώσεις της τομάτας, και κυρίως τα καροτενοειδή της, με έμφαση στο λυκοπένιο, φαίνεται να επιδεικνύουν αξιοσημείωτη νευροπροστατευτική δράση μέσω της αντιοξειδωτικής τους ικανότητας και της ρύθμισης νευροκυτταρικών μονοπατιών. Επιδημιολογικές μελέτες έχουν καταδείξει αντίστροφη συσχέτιση μεταξύ της πρόσληψης τομάτας ή και λυκοπενίου και της επίπτωσης εγκεφαλικών επεισοδίων, ενώ σε πειραματικά μοντέλα ισχαιμίας, η χορήγηση εκχυλίσματος ή σκόνης υποπροϊόντων τομάτας οδήγησε σε σημαντική προστασία εγκεφαλικών περιοχών όπως ο ιππόκαμπος και ο φλοιός μέσω αύξησης της δραστηριότητας ενζύμων όπως η υπεροξειδική δισμουτάση και η γλουταθειονική υπεροξειδάση (Zhao et al., 2021).

Σε κυτταρικά μοντέλα της νόσου *Alzheimer*, το λυκοπένιο εμφάνισε ισχυρή αντικαταπτωτική δράση έναντι της τοξικότητας που προκαλείται από το β-αμυλοειδές, ρυθμίζοντας δυσμενή μονοπάτια όπως αυτά που περιλαμβάνουν τις πρωτεΐνες *Bax*, *Bcl-2* και κασπάση-3, ενώ παράλληλα ανέστειλε την ενεργοποίηση του μεταγραφικού παράγοντα *NF-κB* και ενίσχυσε την παραγωγή του εγκεφαλικού νευροτροφικού παράγοντα (*BDNF*), συμβάλλοντας στην επιβίωση και την αναγέννηση των νευρώνων. Παρόμοιες δράσεις παρατηρήθηκαν και σε πειράματα σε αρουραίους με προκλητή νόσο *Alzheimer*, όπου η συστηματική χορήγηση

λυκοπενίου μείωσε τη νευροφλεγμονή, βελτίωσε τη μνήμη και αποκατέστησε τη λειτουργία των μιτοχονδρίων (Yu et al., 2020).

Στην περίπτωση της νόσου Parkinson, όπου κυριαρχεί η εκφύλιση των ντοπαμινεργικών νευρώνων του ραβδωτού σώματος, η διατροφική ενίσχυση με λυκοπένιο ή αποξηραμένη σκόνη τομάτας προ της έκθεσης σε νευροτοξίνες (όπως το *MPTP*) απέτρεψε τη μείωση των επιπέδων ντοπαμίνης και περιορίσε την οξειδωτική βλάβη στους ιστούς του εγκεφάλου. Επιπλέον, η παράλληλη χορήγηση βιταμίνης *C* επιβεβαίωσε τη συνεργιστική δράση των αντιοξειδωτικών ουσιών της τομάτας στην προστασία του εγκεφάλου από τη νευροεκφύλιση (Wang et al., 2021).

Παρά το πλήθος πειραματικών δεδομένων που τεκμηριώνουν την προστατευτική επίδραση των καροτενοειδών της τομάτας έναντι νευροεκφυλιστικών παθήσεων, τα αποτελέσματα σε ανθρώπινες μελέτες παραμένουν ασυνεπή. Σε επιδημιολογικές έρευνες, έχει καταγραφεί ότι υψηλά επίπεδα λυκοπενίου στο πλάσμα σχετίζονται με βραδύτερη έκπτωση της γνωστικής λειτουργίας, ειδικά σε άτομα ηλικίας άνω των 70 ετών, ενώ δεν παρατηρήθηκε ανάλογη σχέση για άλλα αντιοξειδωτικά όπως η βιταμίνη *C* ή η βιταμίνη *E*. Ωστόσο, ο χρονισμός της παρέμβασης πιθανώς επηρεάζει την αποτελεσματικότητα, καθώς η έναρξη των νευροεκφυλιστικών διεργασιών μπορεί να έχει ήδη συντελεστεί στα άτομα που συμμετείχαν (Tully et al., 2022).

Δεδομένης της ευαισθησίας του εγκεφάλου σε οξειδωτικούς παράγοντες λόγω της υψηλής μεταβολικής δραστηριότητας, της παρουσίας πολυακόρεστων λιπαρών οξέων και της αφθονίας μεταλλικών ιόντων, η ύπαρξη αντιοξειδωτικών καροτενοειδών –όπως το λυκοπένιο, το β-καροτένιο και η λουτεΐνη– καθιστά την τομάτα ένα πολλά υποσχόμενο λειτουργικό τρόφιμο για την πρόληψη και επιβράδυνση της εξέλιξης νευροεκφυλιστικών νοσημάτων. Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να στοχεύσουν σε νεότερους πληθυσμούς υψηλού κινδύνου (60–65 ετών), προκειμένου να αξιολογηθεί με ακρίβεια η συμβολή της τακτικής κατανάλωσης τομάτας και των καροτενοειδών της στη διατήρηση της νευρογνωστικής υγείας κατά τη γήρανση.

Ρύθμιση του Σακχαρώδη Διαβήτη

Η νόσος του σακχαρώδους διαβήτη τύπου 2, η οποία συνδέεται με έναν συνδυασμό μεταβολικών διαταραχών, όπως η ινσουλινοαντίσταση, η χρόνια υπεργλυκαιμία και η διαταραχή του λιπιδαιμικού προφίλ, αποτελεί πλέον ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα

δημόσιας υγείας. Η σύνδεσή της με την οξειδωτική καταπόνηση και τη χρόνια φλεγμονή καθιστά επιτακτική την αναζήτηση διατροφικών παρεμβάσεων που να ενισχύουν τη μεταβολική ομοιόσταση. Τα καροτενοειδή που περιέχονται στους καρπούς της τομάτας έχουν αναδειχθεί ως ισχυροί βιοδραστικοί παράγοντες, με έντονη αντιοξειδωτική και αντιφλεγμονώδη δράση, συμβάλλοντας στην πρόληψη ή μείωση των δυσμενών επιδράσεων της υπεργλυκαιμίας (Zhu et al., 2022).

Ερευνητικά δεδομένα από επιδημιολογικές μελέτες αναδεικνύουν μία αντίστροφη σχέση ανάμεσα στα επίπεδα καροτενοειδών στο πλάσμα, όπως το β-καροτένιο και το λυκοπένιο, και τη δυσανεξία στη γλυκόζη ή την αύξηση της γλυκοζυλιωμένης αιμοσφαιρίνης, ενδείξεις που συνηγορούν υπέρ της προληπτικής τους δράσης έναντι του διαβήτη (Bose & Agarwal, 2007, Zhu et al., 2022). Σε πειραματικά πρότυπα διαβήτη, η χορήγηση λυκοπενίου είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των επιπέδων γλυκόζης νηστείας, την ομαλοποίηση των δεικτών λιπιδίων, καθώς και τη βελτίωση της αντιοξειδωτικής άμυνας, επιβεβαιώνοντας τη μεταβολική του δραστηριότητα (Sajilata et al., 2022).

Σε ορισμένες μελέτες όπου συνδυάστηκε η χορήγηση καροτενοειδών με υπογλυκαιμικά φάρμακα, όπως η μετφορμίνη, καταγράφηκαν ενισχυμένα αποτελέσματα στον γλυκαιμικό έλεγχο και στην αντιοξειδωτική ισορροπία, γεγονός που υποδηλώνει συνέργεια μεταξύ φυσικών και φαρμακολογικών παραγόντων (Figueriredo et al., 2022). Ωστόσο, οι μελέτες σε ανθρώπους παραμένουν λιγότερο ξεκάθαρες, καθώς ορισμένες έδειξαν θετικές επιδράσεις σε δευτερογενείς μεταβολικούς δείκτες, όπως η αρτηριακή πίεση και η *ApoA-1*, χωρίς ωστόσο να παρατηρηθούν σημαντικές μεταβολές στα επίπεδα γλυκόζης ή *HbA1c* (Shidfar et al., 2011, Bose & Agarwal, 2007).

Εκτός από το λυκοπένιο, και άλλα βιοδραστικά συστατικά της τομάτας, όπως η εσκουλεοσίδη Α, φαίνεται να παίζουν προστατευτικό ρόλο στη ρύθμιση της γλυκαιμίας. Σε πρόσφατη προκλινική μελέτη, η χορήγηση της συγκεκριμένης ένωσης οδήγησε σε αισθητή μείωση της γλυκόζης νηστείας και βελτιωμένη ανοχή στη γλυκόζη σε πειραματικά μοντέλα, υπογραμμίζοντας τη σημασία των σύνθετων τοματικών συστατικών στη διατροφολογία του διαβήτη (Yang et al., 2022).

Σε ό,τι αφορά τον διαβήτη κύησης, τα διαθέσιμα στοιχεία είναι ακόμη περιορισμένα, ωστόσο οι χαμηλοί γλυκαιμικοί δείκτες της τομάτας και η υψηλή περιεκτικότητά της σε αντιοξειδωτικές ενώσεις υποδηλώνουν ότι θα μπορούσε να αποτελέσει ασφαλή και ευεργετική

επιλογή για τις εγκύους. Ορισμένες μελέτες επισημαίνουν συσχέτιση μεταξύ υψηλής πρόσληψης καροτενοειδών και μείωσης της υπεργλυκαιμίας σε γυναίκες με διαβήτη κύησης (Zhu et al., 2022).

Συμπερασματικά, η κατανάλωση τροφών πλούσιων σε καροτενοειδή, και κυρίως η ενσωμάτωση προϊόντων τομάτας στο καθημερινό διαιτολόγιο, φαίνεται να έχει προληπτικό και ενισχυτικό ρόλο έναντι του σακχαρώδους διαβήτη. Παρότι τα πειραματικά δεδομένα είναι ισχυρά, η ανάγκη για ευρείας κλίμακας και μεθοδολογικά ισχυρές κλινικές μελέτες παραμένει επιτακτική, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η διατροφική σημασία αυτών των ενώσεων στον ανθρώπινο πληθυσμό.

Ενίσχυση της Υγείας του Δέρματος

Η κατανάλωση προϊόντων τομάτας, είτε στη νωπή τους μορφή είτε ως επεξεργασμένα εκχυλίσματα, έχει συσχετιστεί με σημαντικά οφέλη για την υγεία του δέρματος. Πολλές μελέτες επιβεβαιώνουν ότι τα καροτενοειδή, και ιδιαίτερα το λυκοπένιο, συμβάλλουν στην ενίσχυση της φωτοπροστασίας του δέρματος έναντι της υπεριώδους ακτινοβολίας (*UV*), μιας από τις κυριότερες αιτίες φωτογήρανσης, φλεγμονών, μεταλλάξεων και ανάπτυξης κακοηθών δερματικών νεοπλασιών. Οι ακτίνες *UVA* και *UVB* διεισδύουν σε διαφορετικά στρώματα του δέρματος, προκαλώντας παραγωγή ενεργών μορφών οξυγόνου (*ROS*), που καταστρέφουν το *DNA* και προκαλούν οξειδωτικό στρες και φλεγμονώδεις αποκρίσεις. Συμπληρώματα διατροφής που περιέχουν εκχυλίσματα τομάτας και υψηλές συγκεντρώσεις καροτενοειδών, όπως το *Tomato Nutrient Complex (TNC)*, έχει αποδειχθεί ότι μειώνουν την έκφραση γονιδίων που εμπλέκονται στη φωτογήρανση και τις φλεγμονές (όπως τα *HO-1*, *MMP-1*, *ICAM-1*), υποδηλώνοντας προστατευτική δράση σε μοριακό επίπεδο (Grether-Beck et al., 2017).

Επιπλέον, ο συνδυασμός καροτενοειδών με άλλες βιοδραστικές ενώσεις όπως οι πολυφαινόλες έχει ενισχυμένη δράση κατά της *UV*-προκαλούμενης βλάβης, όπως καταδείχθηκε από μελέτες που αξιολόγησαν την αλληλεπίδραση εκχυλισμάτων τομάτας με δενδρολίβανο (Calniquer et al., 2022). Εκτός από την εσωτερική λήψη, το λυκοπένιο και η βιταμίνη *C* που περιέχονται στην τομάτα είναι δραστικά και σε τοπική εφαρμογή μέσω καλλυντικών προϊόντων με εκχύλισμα ή έλαιο σπόρων τομάτας. Η βιταμίνη *C* συμμετέχει στη σύνθεση κολλαγόνου, προάγοντας την ελαστικότητα και την ανθεκτικότητα του δέρματος, ενώ το έλαιο σπόρων τομάτας χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της αντιοξειδωτικής, αντιφλεγμονώδους και

φωτοπροστατευτικής του δράσης σε προϊόντα περιποίησης, όπως οροί αντιγήρανσης, αντηλιακά και κρέμες λεύκανσης (Baswan et al., 2016).

Παράλληλα, η κατανάλωση αντιοξειδωτικών μέσω της διατροφής φαίνεται να επηρεάζει θετικά χρόνιες δερματοπάθειες όπως η ατοπική δερματίτιδα, η ακμή και η ψωρίαση. Πειραματικές μελέτες σε ζωικά μοντέλα και ανθρώπινα κύτταρα έχουν καταδείξει ότι ενώσεις της τομάτας όπως οι πολυφαινόλες, το λυκοπένιο και τα λυκοπεροσεΐδια μπορούν να μειώσουν τη φλεγμονώδη απάντηση και την οξειδωτική βλάβη, με πιθανά οφέλη στη θεραπευτική διαχείριση της ατοπικής δερματίτιδας (Takeda et al., 2021). Επιπλέον, τα συστατικά της τομάτας παρουσιάζουν και άλλες ευεργετικές δράσεις στο δέρμα, όπως προστασία από τις βλαβερές επιδράσεις βαρέων μετάλλων και χρήση ως φυσικό απωθητικό εντόμων. Εκχυλίσματα βλαστικών κυττάρων τομάτας φάνηκε να προστατεύουν την ακεραιότητα του DNA και να ενισχύουν τη σύνθεση κολλαγόνου, προσφέροντας αναγεννητικές ιδιότητες έναντι περιβαλλοντικών επιθετικών παραγόντων (Tito et al., 2022).

Τέλος, σε κλινικές μελέτες έχει καταγραφεί σημαντική βελτίωση στην υφή, την ενυδάτωση και την ελαστικότητα του δέρματος μετά από λήψη διατροφικών συμπληρωμάτων που περιέχουν εκχυλίσματα τομάτας σε συνδυασμό με κολλαγόνο και άλλα αντιοξειδωτικά, υποδηλώνοντας την ευρεία καλλυντική και θεραπευτική αξιοποίηση του φυτού στον τομέα της δερματολογίας (Nutrova study, 2021). Συνεπώς, η τομάτα αποτελεί έναν φυσικό διατροφικό και κοσμετολογικό σύμμαχο, προσφέροντας μια ολιστική προσέγγιση στη φροντίδα και προστασία της επιδερμίδας.

Αποκατάσταση από τη Φυσική Άσκηση

Η έντονη μυϊκή δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της άσκησης συνοδεύεται από αυξημένη παραγωγή δραστικών μορφών οξυγόνου (*ROS*), αποτέλεσμα της ενισχυμένης κατανάλωσης οξυγόνου και της επιτάχυνσης του μεταβολισμού της *ATP*. Οι *ROS*, όπως το υπεροξειδίο του υδρογόνου και τα υπεروπεροξειδία, είναι ιδιαίτερα ασταθή μόρια που μπορούν να επιδράσουν αρνητικά σε βασικά συστατικά του κυττάρου, προκαλώντας βλάβες σε πρωτεΐνες, λιπίδια και νουκλεϊκά οξέα. Παρότι η τακτική φυσική άσκηση ενισχύει την ενδογενή αντιοξειδωτική άμυνα του οργανισμού μέσω ενεργοποίησης γονιδίων που κωδικοποιούν αντιοξειδωτικά ένζυμα όπως η υπεροξειδική δισμουτάση, η έντονη ή παρατεταμένη καταπόνηση ενδέχεται να οδηγήσει σε συσσώρευση ελευθέρων ριζών πέρα από τα φυσιολογικά επίπεδα (Tsitsimpikou et al., 2009).

Η διατροφική πρόσληψη φυσικών αντιοξειδωτικών έχει αναδειχθεί ως αποτελεσματικός μηχανισμός περιορισμού της οξειδωτικής καταπόνησης. Συστατικά που περιέχονται στους καρπούς της τομάτας, όπως οι βιταμίνες, οι πολυφαινόλες και κυρίως τα καροτενοειδή, έχουν αποδειχθεί ότι συμβάλλουν στην εξουδετέρωση των *ROS*. Ο λυκοπένιος, μεταξύ όλων των καροτενοειδών, ξεχωρίζει για την εξαιρετική ικανότητά του να απενεργοποιεί το μονοταξικό οξυγόνο, εμφανίζοντας ταχύτερους ρυθμούς εξουδετέρωσης σε σύγκριση με άλλες ενώσεις της ίδιας κατηγορίας (Nieman et al., 2022).

Η θετική επίδραση της τομάτας και των παραγώγων της στην αποκατάσταση από σωματική άσκηση τεκμηριώνεται από μελέτες που παρακολούθησαν βιοδείκτες μυϊκής φθοράς όπως η κρεατινική φωσφοκινάση (*CPK*) και η αφυδρογονάση του γαλακτικού οξέος (*LDH*). Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε αθλητές αναερόβιας προπόνησης, η κατανάλωση 100 g φυσικού χυμού τομάτας για διάστημα δύο μηνών οδήγησε σε στατιστικά σημαντική μείωση των επιπέδων των παραπάνω ενζύμων, συγκριτικά με την ομάδα ελέγχου που λάμβανε συμπλήρωμα υδατανθράκων (Tsitsimpikou et al., 2009). Παρόμοια ευρήματα παρουσίασε και η ομάδα του Nieman, χορηγώντας σε δρομείς αντοχής ένα συμπλήρωμα εμπλουτισμένο με λυκοπένιο, φυτοένιο και φυτοφλουένιο, γνωστό ως «τοματοσύμπλεγμα». Η μελέτη κατέγραψε αύξηση της συγκέντρωσης των καροτενοειδών στο πλάσμα και μείωση των επιπέδων της μυοσφαιρίνης, ένδειξη μειωμένης μυϊκής καταστροφής έπειτα από δίωρη έντονη άσκηση (Nieman et al., 2022).

Επιπλέον, πειραματική μελέτη με υγιείς εθελοντές επιβεβαίωσε τη συσχέτιση μεταξύ τακτικής κατανάλωσης χυμού τομάτας και μείωσης των βλαβών που προκαλούνται από το οξειδωτικό στρες κατά τη διάρκεια αερόβιας δραστηριότητας. Οι συμμετέχοντες ακολούθησαν πρωτόκολλο πρόσληψης 150 mL χυμού για πέντε εβδομάδες πριν και μετά από την περίοδο άσκησης, ενώ στο ενδιάμεσο ακολούθησε φάση αποχής. Οι αναλύσεις έδειξαν σαφή μείωση του 8-οξο-2'-δεοξυγουανωσίνης (*8-oxodG*), βιοδείκτη οξειδωτικής βλάβης στο *DNA*, καθιστώντας τα προϊόντα τομάτας ένα αξιόλογο διατροφικό μέσο υποστήριξης της αποκατάστασης (Harms-Ringdahl et al., 2012).

Τα παραπάνω δεδομένα επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι η ένταξη προϊόντων τομάτας ή συμπληρωμάτων πλούσιων σε καροτενοειδή στο διατροφολόγιο ατόμων που αθλούνται συστηματικά μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση της μυϊκής βλάβης και της οξειδωτικής επιβάρυνσης που προκαλείται από τη φυσική κόπωση.

Συμβολή στην Ολιστική Υγεία

Η κατανάλωση τομάτας και των παραγώγων της έχει αναδειχθεί ως σημαντικός διατροφικός παράγοντας που επηρεάζει θετικά κρίσιμες φυσιολογικές λειτουργίες, όπως η εντερική υγεία, η φλεγμονώδης απόκριση, το ανοσοποιητικό σύστημα και η γονιμότητα. Η σύνδεση μεταξύ της τομάτας και του μικροβιώματος του εντέρου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πτυχές των νέων ευρημάτων, καθώς το μικροβίωμα επηρεάζει ποικίλες μεταβολικές και ανοσολογικές διεργασίες του ανθρώπινου οργανισμού. Έχει διαπιστωθεί ότι η κατανάλωση σκόνης τομάτας, πλούσιας σε λυκοπένιο, αυξάνει τη μικροβιακή ποικιλομορφία στο έντερο ποντικών και μειώνει την παρουσία Gram-αρνητικών βακτηρίων που παράγουν λιποπολυσακχαρίτες (*LPS*), ουσίες που σχετίζονται με ηπατοτοξικότητα και ηπατική φλεγμονή (Xia et al., 2018). Παράλληλα, η ενσωμάτωση αποξηραμένων και κονιοποιημένων τοματών πλούσιων σε φλαβονόλες και ανθοκυανίνες σε ζωικά μοντέλα χρόνιας κολίτιδας βρέθηκε να ρυθμίζει ευνοϊκά τη σύσταση του μικροβιώματος και να μειώνει τις φλεγμονώδεις αντιδράσεις, υποδεικνύοντας μια πιθανή προστατευτική επίδραση στην υγεία του εντέρου (Scarano et al., 2018).

Η συμβολή της τομάτας στην ενίσχυση της ανοσολογικής απόκρισης είναι επίσης αξιοσημείωτη. Στοιχεία από μελέτες σε ανθρώπους δείχνουν ότι η κατανάλωση προϊόντων τομάτας αυξάνει τα επίπεδα λυκοπενίου και βιταμίνης C στα λεμφοκύτταρα και μειώνει την οξειδωτική βλάβη στο *DNA* τους (Watzl et al., 2003). Ταυτόχρονα, η β-καροτίνη και η βιταμίνη C, καθώς και το φλαβονοειδές ναριγγενίνη, έχουν αποδειχθεί ότι ενισχύουν την πολλαπλασιαστική ικανότητα των T-λεμφοκυττάρων και τη λυτική δράση των φυσικών φονικών κυττάρων (*NK cells*), ενδυναμώνοντας έτσι τις κυτταροτοξικές και προσαρμοστικές ανοσολογικές αποκρίσεις (Niu et al., 2018). Επιπλέον, πειραματικά δεδομένα σε ποντίκια δείχνουν ότι η χορήγηση λυκοπενίου αυξάνει τον αριθμό των λεμφοκυττάρων, στοιχείο που συνδέεται με την ενίσχυση της ανοσίας μέσω ενεργοποίησης της προσαρμοστικής απόκρισης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ερευνητική κατεύθυνση που αφορά τη χρήση της τομάτας ως φορέα εδωδιμων εμβολίων. Χρησιμοποιώντας γενετικά τροποποιημένα φυτά, έχουν αναπτυχθεί πρωτότυπα εμβόλια για νοσήματα όπως η ηπατίτιδα B και ο *HIV*, με τα πειραματικά αποτελέσματα να καταδεικνύουν σημαντική παραγωγή ειδικών αντισωμάτων σε ζωικά μοντέλα. Ωστόσο, η μεταφορά αυτών των αποτελεσμάτων στην ανθρώπινη εφαρμογή παραμένει πρόκληση, λόγω θεμάτων σταθερότητας των αντιγόνων και αποτελεσματικότητας από του στόματος χορήγησης.

Όσον αφορά τη γονιμότητα, οι αντιοξειδωτικές ιδιότητες της τομάτας φαίνεται να διαδραματίζουν προστατευτικό ρόλο έναντι της οξειδωτικής καταπόνησης, μιας κατάστασης που σχετίζεται τόσο με την ανδρική όσο και με τη γυναικεία υπογονιμότητα. Στους άνδρες, η πρόσληψη προϊόντων τομάτας, όπως ο χυμός ή η σούπα τομάτας, έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τα επίπεδα λυκοπενίου στο σπερματικό πλάσμα και βελτιώνει την κινητικότητα και τη μορφολογία των σπερματοζωαρίων (Williams et al., 2019, Yamamoto et al., 2021). Επιπλέον, συστατικά της τομάτας όπως το β-καροτένιο, η βιταμίνη C και η ναριγγενίνη έχουν σχετιστεί με προστασία των σπερματοζωαρίων από τη λιπιδική υπεροξείδωση, συμβάλλοντας στη διατήρηση της ζωτικότητάς τους (Moretti et al., 2012). Στις γυναίκες, αν και δεν υπάρχουν άμεσες μελέτες που να εξετάζουν τη συμβολή της τομάτας στη γονιμότητα, έχει παρατηρηθεί ότι αντιοξειδωτικά συστατικά όπως το φολικό οξύ, το οποίο υπάρχει σε σημαντικές ποσότητες στην ώριμη τομάτα, ενδέχεται να βελτιώνουν τα ποσοστά σύλληψης και να προστατεύουν από παθήσεις όπως η προεκλαμψία ή η ενδομητρίωση.

Με λίγα λόγια θα λέγαμε πως οι υπάρχουσες μελέτες, αν και κατά κύριο λόγο σε ζωικά πρότυπα και *in vitro*, υποδεικνύουν ότι η συστηματική κατανάλωση προϊόντων τομάτας επηρεάζει θετικά τη σύσταση του εντερικού μικροβιώματος, ενισχύει τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος και συμβάλλει στη βελτίωση παραμέτρων της γονιμότητας, κυρίως μέσω των αντιοξειδωτικών μηχανισμών και της ρύθμισης της φλεγμονής. Ωστόσο, απαιτούνται περισσότερες παρεμβατικές μελέτες σε ανθρώπους για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων αυτών και την ακριβή αποσαφήνιση των μηχανισμών δράσης και των απαιτούμενων δόσεων για την επίτευξη των ευεργετικών επιδράσεων.

4.5 Παρουσία Καροτενοειδών σε Επεξεργασμένα Προϊόντα Τομάτας

Αν και η τομάτα καταναλώνεται και φρέσκια, πάνω από το 80% της συνολικής της κατανάλωσης αφορά επεξεργασμένα προϊόντα όπως ο χυμός, ο πολτός, η σάλτσα και το κέτσαπ (Rao & Rao, 2007). Η διαδικασία της θερμικής και μηχανικής επεξεργασίας μπορεί να τροποποιήσει τη χημική δομή των καροτενοειδών μέσω παραγόντων όπως η θέρμανση, η παρουσία οξέων, το φως και η έκθεση σε οξυγόνο. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι η θερμική κατεργασία αυξάνει την περιεκτικότητα σε καροτενοειδή και την αντιοξειδωτική ικανότητα των προϊόντων τομάτας κατά 30% και 15% αντίστοιχα (Dewanto et al., 2002).

Τα καροτενοειδή, και ειδικότερα το λυκοπένιο, εμφανίζουν μεγαλύτερη βιοδιαθεσιμότητα όταν καταναλώνονται από επεξεργασμένα προϊόντα τομάτας σε σύγκριση με τις ωμές μορφές

του καρπού (Gärtner et al., 1997). Η θερμική ή μηχανική επεξεργασία προκαλεί αποδόμηση της κυτταρικής μήτρας της τομάτας, διευκολύνοντας την απελευθέρωση των καροτενοειδών και συνεπώς ενισχύοντας τη βιοδιαθεσιμότητά τους.

Ιδιαίτερα, έχει αναφερθεί ότι ο συνδυασμός ομογενοποίησης και θερμικής επεξεργασίας συμβάλλει στην αύξηση της απορρόφησης των καροτενοειδών από τον ανθρώπινο οργανισμό (van het Hof et al., 2000). Επίσης, η ισομερείωση του λυκοπενίου παίζει ρόλο στην απορρόφησή του: τα *cis*-ισομερή είναι σημαντικά πιο βιοδιαθέσιμα από την *all-trans* μορφή (Boileau et al., 2002). Παρότι το λυκοπένιο στις ντομάτες και τα προϊόντα τους βρίσκεται κυρίως στη *trans* μορφή, στο ανθρώπινο πλάσμα και τους ιστούς επικρατούν τα *cis*-ισομερή, τα οποία αποτελούν πάνω από το 50% του συνολικού λυκοπενίου (Clinton et al., 1996).

Η μεγαλύτερη βιοδιαθεσιμότητα των *cis*-μορφών φαίνεται να σχετίζεται με την αυξημένη διαλυτότητά τους σε μικκύλια χολικών οξέων και την προτιμώμενη ενσωμάτωσή τους σε χυλομικρά. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι τα *cis*-ισομερή έχουν μικρότερη τάση να σχηματίζουν κρυστάλλους ή να συσσωρεύονται σε δομές που περιορίζουν την απορρόφησή τους (Boileau et al., 1999).

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, οι τεχνικές της παστερίωσης και ομογενοποίησης διευκολύνουν την αποδέσμευση των χρωστικών από τους ιστούς του καρπού, ενώ η χρήση ώριμων ντοματών με υψηλό λυκοπένιο ενισχύει την τελική συγκέντρωση (Gärtner et al., 1997). Επιπλέον, η θέρμανση μπορεί να ενεργοποιήσει ένζυμα όπως η ϵ - και η β -καροτενοειδής κυκλάση, που προάγουν τη σύνθεση της β - και της α -καροτίνης (Shi & Le Maguer, 2000).

Αναφέρεται επίσης ότι η περιεκτικότητα σε λυκοπένιο αυξάνεται σημαντικά μετά από επεξεργασία στους 42–45°C λόγω της απελευθέρωσής του από τις κυτταρικές δομές. Ωστόσο, σε υψηλότερες θερμοκρασίες (55–110°C), παρατηρείται μείωση λόγω πιθανής αποδόμησης ή ισομερισμού (Takeoka et al., 2001). Αντίθετα, η περιεκτικότητα σε β -καροτίνη τείνει να παραμένει σταθερή ή να μειώνεται ελαφρώς, ανάλογα με την ποικιλία και τη μέθοδο ξήρανσης. Σε κάθε περίπτωση, η επεξεργασία ενδέχεται είτε να ενισχύσει είτε να έχει ελάχιστη επίδραση στη βιοδιαθεσιμότητα και δραστηριότητα των καροτενοειδών, αναλόγως της θερμικής έντασης και του τύπου του προϊόντος (Zanfini et al., 2010).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΚΑΡΟΤΕΝΟΕΙΔΩΝ

Καθώς έγινε εκτενής αναφορά στις ευεργετικές επιδράσεις των καροτενοειδών της τομάτας στην ανθρώπινη υγεία, είναι εύλογο το επιστημονικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον να επικεντρώνεται πλέον στον αποτελεσματικότερο τρόπο ανάκτησης αυτών των ενώσεων από τον φυτικό ιστό. Η αξιοποίηση των καροτενοειδών, τόσο για τη διατροφική ενίσχυση όσο και για φαρμακευτικούς και καλλυντικούς σκοπούς, προϋποθέτει την ύπαρξη αποδοτικών μεθόδων εκχύλισης και απομόνωσης, οι οποίες να διασφαλίζουν τη μέγιστη απόδοση, τη σταθερότητα των μορίων και τη διατήρηση της βιοδραστικότητάς τους.

Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζονται οι κυριότερες μέθοδοι ανάκτησης καροτενοειδών από την τομάτα και τα παραπροϊόντα της, δίνοντας έμφαση τόσο στις κλασικές προσεγγίσεις, όπως η εκχύλιση με οργανικούς διαλύτες, όσο και σε σύγχρονες, πράσινες τεχνολογίες, όπως η εκχύλιση με υπερήχους, η μικροκυματική επεξεργασία, η χρήση υπερκρίσιμου CO_2 και οι τεχνικές ενζυμικής υποβοήθησης. Η αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών αυτών θα αναδείξει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε μεθόδου, με απώτερο στόχο την ανάδειξη των πλέον αποδοτικών, φιλικών προς το περιβάλλον και οικονομικά βιώσιμων λύσεων για την ανάκτηση των πολύτιμων αυτών ενώσεων από τον φυτικό ιστό της τομάτας.

Η στροφή προς βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες ανάκτησης αποτελεί πλέον επιτακτική ανάγκη στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της πράσινης χημείας. Η χρήση πράσινων μεθόδων εκχύλισης, όπως η χρήση υπερκρίσιμων υγρών, φυσικών διαλυτών, καινοτόμων τεχνικών ενεργειακής υποβοήθησης (π.χ. υπέρηχοι και μικροκύματα), καθώς και η ενζυμική υδρόλυση, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι τεχνικές αυτές συμβάλλουν στον περιορισμό της χρήσης τοξικών διαλυτών, στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και στη διατήρηση της βιοδραστικότητας των καροτενοειδών, με αποτέλεσμα την παραγωγή εκχυλισμάτων υψηλής καθαρότητας και δραστηριότητας. Η αναγκαιότητα εφαρμογής αυτών των μεθόδων δεν περιορίζεται μόνο στην περιβαλλοντική διάσταση, αλλά ανταποκρίνεται και στις αυξημένες απαιτήσεις των βιομηχανιών τροφίμων, φαρμάκων και καλλυντικών για ασφαλή, αποτελεσματικά και ρυθμιστικά συμβατά φυσικά συστατικά. Ως εκ τούτου, η διερεύνηση, σύγκριση και αξιολόγηση των πράσινων μεθόδων αποκτά καίρια σημασία για τη

μελλοντική αξιοποίηση των καροτενοειδών της τομάτας με όρους ποιότητας, ασφάλειας και αειφορίας.

5.1 Κλασικές Μέθοδοι Εκχύλισης

Η εκχύλιση των καροτενοειδών από την τομάτα, και ειδικά του λυκοπενίου, αποτελεί ένα βασικό στάδιο όταν θέλουμε να αξιοποιήσουμε αυτά τα πολύτιμα συστατικά. Ο τρόπος που θα επιλέξουμε να γίνει αυτή η διαδικασία έχει μεγάλη σημασία, γιατί μπορεί να επηρεάσει τόσο την ποσότητα όσο και την ποιότητα των ενώσεων που τελικά θα πάρουμε (Μουντζούρης, 2024). Οι πιο παλιές και κλασικές μέθοδοι, παρόλο που έχουν δεχτεί κριτική επειδή κάποιες φορές δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον ή καταναλώνουν πολύ ενέργεια, συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται ευρέως, κυρίως γιατί είναι απλές, γνωστές και αποδεδειγμένα αποτελεσματικές (Κουτρούμπας & Χατζηευσταθίου, 2018).

Ανάμεσα σε αυτές τις μεθόδους βρίσκουμε την εκχύλιση με οργανικούς διαλύτες, τη μέθοδο Soxhlet, αλλά και πιο απλές τεχνικές, όπως η στατική εκχύλιση με εμποτισμό (*maceration*) και η απόσταξη με υδρατμούς, που αξιοποιούνται ευρέως στη βιομηχανική πράξη. Αυτές οι τεχνικές, παρόλο που μοιάζουν απλές, χρειάζονται σωστό σχεδιασμό, για παράδειγμα πρέπει να επιλέγουμε τον κατάλληλο διαλύτη, να ρυθμίζουμε τη θερμοκρασία ή να υπολογίζουμε το χρόνο εκχύλισης, ώστε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα χωρίς να καταστρέψουμε τα καροτενοειδή (Αντωνιάδης & Ράμμος, 2020). Για πιο υδρόφιλες ενώσεις, προτιμώνται διαλύτες όπως η αιθανόλη ή η μεθανόλη, ενώ για τα υδρόφοβα καροτενοειδή, όπως το λυκοπένιο, χρησιμοποιούνται πιο λιπόφιλοι διαλύτες, όπως η ακετόνη ή το εξάνιο (Ζήκος, 2017).

Αυτό που κάνει την εκχύλιση ακόμα πιο απαιτητική είναι ότι τα καροτενοειδή είναι ευαίσθητα: καταστρέφονται εύκολα από το φως, τη θερμότητα ή το οξυγόνο. Έτσι, μέθοδοι όπως η Soxhlet, που περιλαμβάνουν υψηλή θερμοκρασία και διαρκούν πολλές ώρες, χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή, γιατί μπορεί τελικά να μειώσουν την ποιότητα των εκχυλισμάτων (Λεοντίου & Παπανικολάου, 2019). Για να βελτιωθούν τα αποτελέσματα, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται μοντέρνες προσεγγίσεις, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, που βοηθούν να προβλέψουμε ποια είναι η καλύτερη συνθήκη για κάθε μέθοδο, κάνοντας προσομοιώσεις και μειώνοντας τα λάθη (Ζαχαριάς & Παπαδόπουλος, 2021).

Τελικά, οι κλασικές μέθοδοι εξακολουθούν να έχουν αξία, ιδίως όταν εφαρμόζονται σωστά και με σύγχρονες βελτιώσεις. Παρ' όλα αυτά, η ανάγκη για πιο «καθαρές», φιλικές προς το περιβάλλον και αποδοτικές λύσεις έχει οδηγήσει τους ερευνητές στην αναζήτηση νέων, πράσινων τεχνικών, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

5.1.1 Στατική Εκχύλιση (*Maceration*)

Μία από τις πιο παλαιές αλλά και αποδοτικές τεχνικές για την απομόνωση βιοδραστικών φυτικών ενώσεων είναι η εκχύλιση με οργανικούς διαλύτες, μέσω εμποτισμού, η λεγόμενη εκχύλιση με εμβάπτιση ή στατική εκχύλιση (*maceration*). Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της συγγένειας πολικότητας, σύμφωνα με την οποία οι ουσίες που έχουν παρόμοια χημική φύση με τον διαλύτη μεταφέρονται πιο εύκολα στο υγρό μέσο (Καραμήτσου & Παπαδόπουλος, 2016). Αυτή η αρχή της «χημικής συγγένειας» είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις λιπόφιλες ενώσεις, όπως τα καροτενοειδή, οι οποίες απαιτούν μη πολικούς διαλύτες για να απελευθερωθούν πλήρως από τον φυτικό ιστό.

Σε εφαρμογές μικρής ή μεσαίας κλίμακας, η διαδικασία περιλαμβάνει τον αρχικό τεμαχισμό ή πολτοποίηση του φυτικού δείγματος, με στόχο την αύξηση της επιφάνειας επαφής και την ευκολότερη διάχυση των ενώσεων στον διαλύτη. Ο επιλεγμένος διαλύτης, όπως η ακετόνη, το εξάνιο, η μεθανόλη ή η αιθανόλη, εισάγεται σε γυάλινο ή ανοξείδωτο δοχείο, στο οποίο το δείγμα παραμένει σταθερό για 3 έως 7 ημέρες σε θερμοκρασία δωματίου (Σταθόπουλος & Γρηγοριάδης, 2020). Η διάρκεια επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα της εκχύλισης, ενώ η θερμοκρασία πρέπει να διατηρείται σταθερή για να αποφευχθεί η θερμική αποικοδόμηση ευαίσθητων ενώσεων.

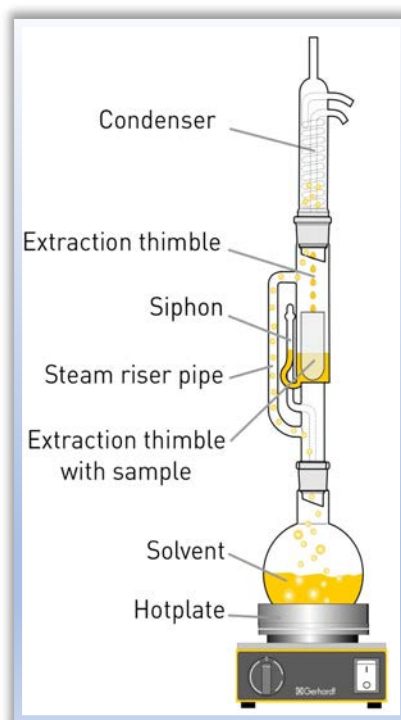
Συχνά εφαρμόζεται και ήπια μηχανική ανάδευση κατά τη διάρκεια του εμποτισμού, με στόχο την αύξηση της διάχυσης των μορίων του διαλύτη μέσα στο δείγμα και την αποτροπή δημιουργίας συσσωματωμάτων, τα οποία θα μπορούσαν να περιορίσουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας (Ρήγας & Κοντογεώργης, 2019). Αφού ολοκληρωθεί η φάση εμποτισμού, το μίγμα διηθείται, με χρήση χαρτιού ή φίλτρου κενού και ο διαλύτης αφαιρείται με εξάτμιση υπό κενό, συνήθως με περιστροφικό εξάτμιστή (*rotary evaporator*), ώστε να ληφθεί το καθαρό εκχύλισμα. Το τελικό προϊόν περιλαμβάνει τις λιπόφιλες κυρίως ενώσεις, όπως τα καροτενοειδή, μεταξύ των οποίων και το λυκοπένιο, εφόσον έχει χρησιμοποιηθεί μη πολικός ή ασθενώς πολικός διαλύτης (Βαρλάμης & Τριανταφυλλίδης, 2018).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή, παρά την απλότητά της, είναι ευαίσθητη σε εξωτερικούς παράγοντες. Η παρατεταμένη έκθεση του δείγματος σε φως, θερμότητα ή οξυγόνο μπορεί να προκαλέσει την οξείδωση ή ισομερίωση των καροτενοειδών, μειώνοντας την τελική τους βιοδραστικότητα (Καραγεωργίου & Σταυριανός, 2017). Γι' αυτό και απαιτείται ιδιαίτερη μέριμνα, όπως χρήση κεχριμπαρένιων δοχείων, αδρανής ατμόσφαιρα (π.χ. άζωτο) ή ψύξη, προκειμένου να προστατευτούν οι στόχοι ενώσεις.

Παρά τους περιορισμούς της, η στατική εκχύλιση παραμένει μια προσιτή και αρκετά αξιόπιστη μέθοδος, κυρίως όταν εφαρμόζεται με σωστό σχεδιασμό και μελέτη των παραμέτρων. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εργαστηριακές αναλύσεις, σε φυτοχημικές μελέτες αλλά και σε βιομηχανικές εφαρμογές όταν δεν απαιτούνται ταχύτατοι χρόνοι παραγωγής.

5.1.2 Εκχύλιση με την μέθοδο *Soxhlet*

Σε σχέση με τη μέθοδο maceration, η τεχνική *Soxhlet* προσφέρει ένα πιο αυτοματοποιημένο και δυναμικό σύστημα εκχύλισης, ιδανικό για περιπτώσεις όπου επιδιώκεται υψηλότερη απόδοση. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου Soxhlet βασίζεται στην κυκλική και συνεχόμενη χρήση ενός οργανικού διαλύτη, ο οποίος αξιοποιείται για την απομόνωση συγκεκριμένων ενώσεων από ένα στερεό φυτικό υπόστρωμα. Η διαδικασία ξεκινά με την προσθήκη του διαλύτη σε σφαιρική φιάλη, η οποία θερμαίνεται προκειμένου να εξατμιστεί το υγρό. Οι ατμοί του διαλύτη ανέρχονται μέσω ενός πλευρικού σωλήνα και φτάνουν στον κατακόρυφο ψυκτήρα, όπου συμπυκνώνονται ξανά σε υγρή μορφή λόγω της επαφής τους με μια ψυχόμενη επιφάνεια. Το υγρό αυτό στη συνέχεια κατεβαίνει στάγδην στον θάλαμο εκχύλισης, ο οποίος περιέχει το στερεό δείγμα (συνήθως φυτική πρώτη ύλη, τεμαχισμένη ή αλεσμένη).



Εικόνα 21. Συσκευή Soxhlet. Πηγή: <https://www.gerhardt.de/en/know-how/analytical-methods/extraction-methods-in-fat-analysis/>

Καθώς ο θερμός διαλύτης διαβρέχει το δείγμα, διαλύει σταδιακά τις ενώσεις που έχουν παρόμοια πολικότητα με αυτόν. Όταν ο θάλαμος εκχύλισης γεμίσει, το μίγμα διαλύτη-εκχυλίσματος υπερχειλίζει μέσω του ειδικού σιφωνίου και επιστρέφει στη φιάλη θέρμανσης. Το εκχύλισμα παραμένει εκεί, ενώ ο διαλύτης εξατμίζεται εκ νέου, επανεκκινώντας αυτόματα

τον κύκλο. Η συνεχής επαφή του δείγματος με φρέσκο και θερμό διαλύτη καθιστά τη διαδικασία ιδιαίτερα αποτελεσματική, αυξάνοντας την απόδοση της εκχύλισης και μειώνοντας τον συνολικό χρόνο παραμονής. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η ανάγκη συνεχούς προσθήκης νέου διαλύτη και διασφαλίζεται η πλήρης ανάκτηση των επιθυμητών συστατικών (Κουτρούμπας & Χατζηγευσταθίου, 2018). Σύμφωνα, επιπλέον, με τις αρχές της διάχυσης (νόμος του *Fick*), όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά συγκέντρωσης μεταξύ του δείγματος και του διαλύτη, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η μεταφορά των ενώσεων από το στερεό στο υγρό μέσο (Λεοντίου & Παπανικολάου, 2019). Επομένως, η *Soxhlet* προσφέρει πλεονέκτημα ως προς τη μείωση του συνολικού χρόνου εκχύλισης, διατηρώντας υψηλή αποδοτικότητα.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η επιλογή του διαλύτη, η οποία πρέπει να βασίζεται στη συμβατότητά του με τις υπό εκχύλιση ενώσεις. Για λιπόφιλες ενώσεις, όπως το λυκοπένιο, προτιμώνται διαλύτες με χαμηλό σημείο βρασμού και επιλεκτικότητα στη διαλυτότητα, όπως το εξάνιο ή η αιθανόλη (Ζήκος, 2017). Ταυτόχρονα, η τοξικότητα και η δυνατότητα απομάκρυνσης του διαλύτη αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους, ιδίως όταν το εκχύλισμα προορίζεται για χρήση σε τρόφιμα ή φαρμακευτικά προϊόντα.

Η μέθοδος *Soxhlet*, αν και αρχικά σχεδιάστηκε για την απομόνωση λιπιδίων, έχει βρει ευρεία εφαρμογή και στην ανάκτηση άλλων πολύτιμων ενώσεων από φυτικά υλικά, όπως φαινόλες, οργανικά οξέα, τερπένια και καροτενοειδή από υποπροϊόντα της αγροτοβιομηχανίας, για παράδειγμα, λυκοπένιο από ντομάτες, λιμονένιο από φλούδες εσπεριδοειδών, ή φαινολικά από φύλλα ελιάς και κατσίγαρο (Μουντζούρης, 2024). Επιπλέον, η δυνατότητα ανακύκλωσης του διαλύτη ενισχύει τη βιωσιμότητα της μεθόδου, μειώνοντας τα λειτουργικά κόστη και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Παρά τις αρετές της ωστόσο η μέθοδος αυτή απαιτεί προσοχή στην εφαρμογή της, κυρίως λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας και της μακράς διάρκειας κάθε κύκλου. Σε ευαίσθητες ενώσεις, όπως τα καροτενοειδή, ενδέχεται να υπάρξει θερμική αποικοδόμηση, επομένως είναι κρίσιμος ο έλεγχος των συνθηκών (Ζαχαριάς & Παπαδόπουλος, 2021). Ωστόσο, όταν εφαρμόζεται σωστά, η μέθοδος αυτή εξακολουθεί να αποτελεί σημείο αναφοράς στην κλασική εκχύλιση φυτικών πρώτων υλών.

5.1.3 Εκχύλιση με Οργανικούς Διαλύτες και Σαπωνοποίηση

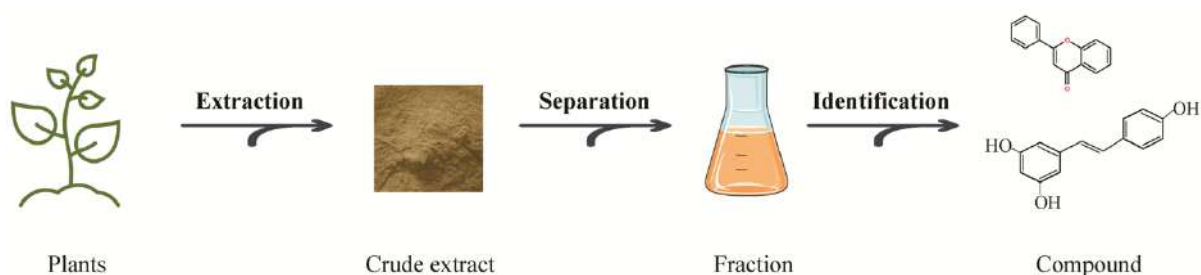
Μια ιδιαίτερα διαδεδομένη προσέγγιση για την απομόνωση και τον καθαρισμό καροτενοειδών από φυτικές μήτρες αποτελεί ο συνδυασμός εκχύλισης με οργανικούς διαλύτες και

σαπωνοποίησης. Οι διαλύτες που χρησιμοποιούνται επιλέγονται με βάση τη λιποδιαλυτή φύση των καροτενοειδών, με πλέον συνήθη την ακετόνη, την αιθανόλη, το εξάνιο και τον πετρελαϊκό αιθέρα, είτε μεμονωμένα είτε ως μίγματα (Παπαδοπούλου & Μπαλάσκας, 2016). Η προετοιμασία του δείγματος περιλαμβάνει την ομογενοποίηση σε μορφή πάστας, ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια επαφής με τον διαλύτη. Σε περιπτώσεις αποξηραμένων υλικών, συνιστάται η ενυδάτωση με υδατοδιαλυτό διαλύτη πριν την προσθήκη του λιποδιαλυτού μέσου, ώστε να ενισχυθεί η διείσδυση και η αποδοτικότητα της εκχύλισης (Αθανασίου & Χριστοδούλου, 2019).

Η σαπωνοποίηση, που συχνά ακολουθεί την αρχική εκχύλιση, στοχεύει στην απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών, όπως λιπίδια, χλωροφύλλες και υδατοδιαλυτές ακαθαρσίες, τα οποία μπορεί να αλλοιώσουν τον προσδιορισμό των καροτενοειδών. Η διαδικασία περιλαμβάνει την προσθήκη αλκαλικού διαλύματος KOH σε αιθανόλη στο εκχύλισμα και την παραμονή του μίγματος σε σκοτεινό περιβάλλον, υπό αδρανή ατμόσφαιρα (συνήθως άζωτο), για χρονικό διάστημα 12–16 ωρών, προκειμένου να αποτραπεί η οξείδωση των καροτενοειδών (Νικολαΐδης & Κανελλόπουλος, 2020).

Κατά τη μέθοδο αυτή, τα τριγλυκερίδια και οι χλωροφυλλικοί εστέρες μετατρέπονται σε σαπούνια που είναι υδατοδιαλυτά και απομακρύνονται μέσω διαχωρισμού φάσεων. Το οργανικό εκχύλισμα, που περιέχει πλέον μόνο τις λιποδιαλυτές ενώσεις στόχου, εκπλένεται επανειλημμένα με απεσταγμένο νερό μέχρι ουδετεροποίησης και στη συνέχεια ξηραίνεται με άνυδρο θειικό νάτριο ή υπό κενό, ώστε να προετοιμαστεί για ανάλυση (Μιχαηλίδης, 2017).

Η συνολική διαδικασία συγκεντρώνει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένη καθαρότητα του εκχυλίσματος, περιορισμό παρεμβολών κατά την ανάλυση και τεχνική απλότητα. Αποτελεί, συνεπώς, μια αξιόπιστη και οικονομική προσέγγιση για την απομόνωση του λυκοπενίου από νωπή ή αφυδατωμένη τομάτα, καθώς και από υποπροϊόντα της μεταποίησης, όπως φλούδες ή πολτό.



Εικόνα 22. Εκχύλιση με Οργανικούς Διαλύτες σε Φυτικό Υλικό.
Πηγή: <https://www.mdpi.com/2297-8739/10/12/598>

5.2 Σύγχρονες Τεχνικές Εκχύλισης

Καθώς οι κλασικές μέθοδοι εκχύλισης, όπως η *Soxhlet* ή η απλή εκχύλιση με οργανικούς διαλύτες, παρουσιάζουν αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά τον χρόνο, την κατανάλωση διαλυτών και την ενεργειακή τους απαίτηση, η επιστημονική κοινότητα στρέφεται όλο και περισσότερο προς σύγχρονες, πιο αποδοτικές και οικολογικά αποδεκτές τεχνικές. Οι μέθοδοι αυτές αναπτύχθηκαν με στόχο να ξεπεράσουν τα μειονεκτήματα των παραδοσιακών προσεγγίσεων, προσφέροντας υψηλότερες αποδόσεις, ταχύτερους χρόνους επεξεργασίας και μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Παράλληλα, ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις για ασφάλεια των εκχυλισμάτων όταν αυτά προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση, είτε ως συστατικά τροφίμων είτε ως πρώτες ύλες φαρμακευτικών και κοσμετολογικών προϊόντων.

Μεταξύ των πιο πολλά υποσχόμενων τεχνολογιών περιλαμβάνονται η εκχύλιση με υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα ($SC\text{-}CO_2$), η υπερηχητική εκχύλιση (*UAE*), η εκχύλιση με μικροκύματα (*MAE*), καθώς και η επιταχυνόμενη εκχύλιση με διαλύτες υπό πίεση (*ASE* ή *PLE*). Αυτές οι μέθοδοι, μεμονωμένα ή σε συνδυασμό, έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους στην απομόνωση ευαίσθητων λιποδιαλυτών ενώσεων, όπως το λυκοπένιο, διατηρώντας υψηλή βιολογική δραστηριότητα και σταθερότητα.

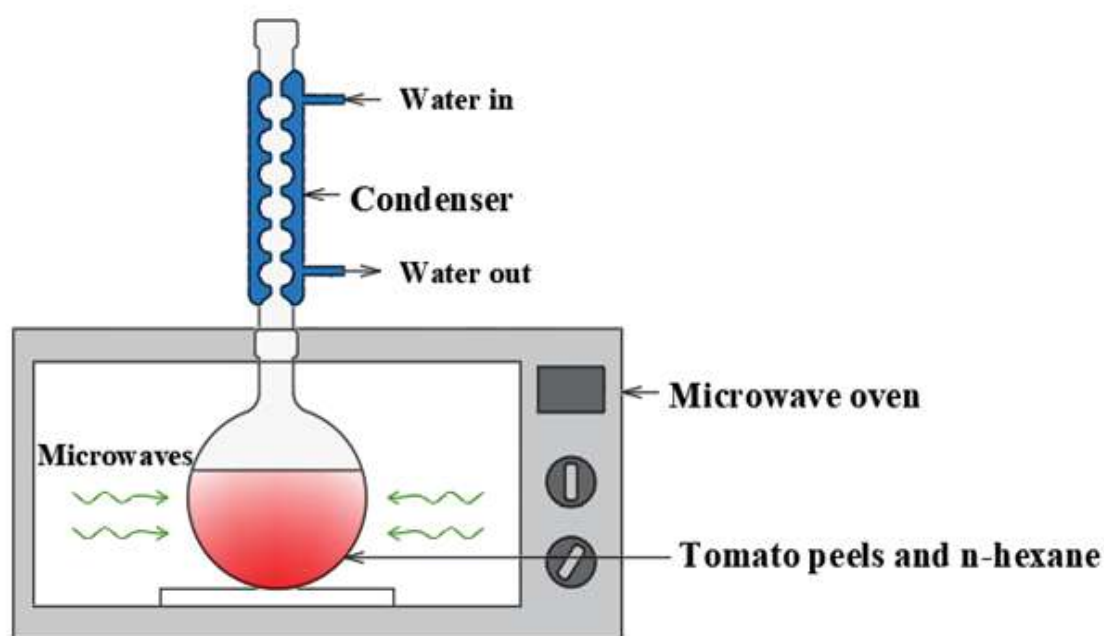
Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, μεταξύ των οποίων η φυσικοχημική φύση του φυτικού υποστρώματος, η πολικότητα των επιθυμητών ενώσεων, η θερμική τους ευαισθησία, το κόστος του εξοπλισμού και, κυρίως, η δυνατότητα βιομηχανικής εφαρμογής της μεθόδου. Η βιωσιμότητα των παραπάνω τεχνολογιών αποδεικνύεται επίσης από τη μειωμένη χρήση τοξικών διαλυτών και την εύκολη προσαρμογή τους σε κανονιστικά πλαίσια ασφαλείας και οικολογικής διαχείρισης. Παρακάτω παρουσιάζεται μία αναλυτική εξήγηση των παραπάνω σημαντικότερων σύγχρονων μεθόδων για καλύτερη κατανόηση του θέματος.

5.2.1 Εκχύλιση με Μικροκύματα

Η εκχύλιση με μικροκύματα αποτελεί μια εξελιγμένη μέθοδο που χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα για την απομόνωση ουσιών από φυτικά υλικά, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για φυσικές ενώσεις όπως τα καροτενοειδή της τομάτας. Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται την ενέργεια των μικροκυμάτων για να θερμάνει το δείγμα και τον διαλύτη, με τρόπο πολύ πιο άμεσο και αποτελεσματικό απ' ό,τι οι κλασικές μέθοδοι. Μέσω αυτής της διαδικασίας, η θερμότητα

αναπτύσσεται γρήγορα μέσα στη φυτική μάζα, προκαλώντας τη ρήξη των κυτταρικών δομών και επιτρέποντας στα καροτενοειδή, όπως το λυκοπένιο, να απελευθερωθούν ευκολότερα στον διαλύτη (Μαυρομμάτης & Κολοβός, 2018).

Η ικανότητα των μικροκυμάτων να επηρεάζουν απευθείας τα μόρια του νερού και άλλων πολικών ουσιών στο εσωτερικό του φυτικού υλικού προκαλεί μια έντονη εσωτερική πίεση. Αυτή η πίεση «σπάει» τα τοιχώματα των κυττάρων και διευκολύνει την έξοδο των καροτενοειδών στο εκχυλιστικό μέσο (Σιγάλα & Θεοδωρίδης, 2016). Στην περίπτωση της τομάτας, η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στον πολτό όσο και στα υπολείμματα επεξεργασίας (φλούδες, σπόρους), με εξαιρετικά αποτελέσματα ως προς την ανάκτηση λυκοπενίου και άλλων σχετικών ενώσεων, όπως το β-καροτένιο και η λουτεΐνη.



Εικόνα 23. Σχηματική Αναπαράσταση Εκχύλισης Μικροκυμάτων σε Τομάτα.

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-microwave-assisted-extraction-system-for-recovering-lycopene-from-tomato_fig4_378971197

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο περιορισμένος χρόνος εκχύλισης, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο θερμικής αποικοδόμησης των ευαίσθητων καροτενοειδών. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται μικρότερες ποσότητες διαλυτών, ενώ η ίδια η διαδικασία είναι ευκολότερη στον έλεγχο και μπορεί να προσαρμοστεί σε ημιβιομηχανική ή και βιομηχανική κλίμακα (Κωνσταντινίδης & Παπαγεωργίου, 2020). Εφόσον ρυθμιστούν σωστά οι παράμετροι όπως η θερμοκρασία (π.χ. 70°C), ο χρόνος και η ισχύς των μικροκυμάτων, μπορεί να επιτευχθεί εξαγωγή λυκοπενίου με απόδοση που φτάνει ή και ξεπερνά το 95%.

Αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση του συγκεκριμένου συστήματος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για υποπροϊόντα τομάτας που διαφορετικά θα απορρίπτονταν, ενισχύοντας έτσι την αξιοποίησή τους σε τρόφιμα ή συμπληρώματα με αντιοξειδωτική δράση. Όμως, όπως σε κάθε τεχνική, απαιτείται σωστή επιλογή των συνθηκών και του διαλύτη (συνήα επιλέγονται αιθανόλη, ακετόνη ή μίγματά τους) ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα του εκχυλίσματος και να αποφευχθεί αλλοίωση των χρωστικών ή η δημιουργία ανεπιθύμητων παραπροϊόντων (Μιχαηλίδης & Αντωνίου, 2021).

Γενικά, ως εκχυλιστική μέθοδος αποτελεί μια αποτελεσματική λύση για την απομόνωση των καροτενοειδών της τομάτας, προσφέροντας ταυτόχρονα πλεονεκτήματα τόσο σε επίπεδο ποιότητας όσο και βιωσιμότητας. Για αυτόν τον λόγο, εντάσσεται πλέον στις προτεινόμενες «πράσινες τεχνολογίες» για τη μεταποίηση γεωργικών προϊόντων (Καραγιάννης & Χαλικιάς, 2022).

5.2.2 Εκχύλιση με Υπερήχους

Η τεχνική της εκχύλισης με υπερήχους (*Ultrasound-Assisted Extraction – UAE*) έχει κερδίσει σημαντικό έδαφος τα τελευταία χρόνια ως μια προηγμένη και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος για την απομόνωση φυτοχημικών ενώσεων υψηλής βιολογικής αξίας. Πρόκειται για μια φυσικοχημική διαδικασία που αξιοποιεί ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας (συνήθως 20–100 kHz), τα οποία διαδίδονται μέσω ενός υγρού μέσου και προκαλούν ταλαντώσεις στην πίεση. Αυτές οι ταλαντώσεις οδηγούν στον σχηματισμό μικροσκοπικών φυσαλίδων, οι οποίες αναπτύσσονται, συνενώνονται και τελικά καταρρέουν με βίαιο τρόπο, δημιουργώντας το φαινόμενο της «ακουστικής σπηλαίωσης» (*acoustic cavitation*). Κατά την κατάρρευση των φυσαλίδων αυτών, δημιουργούνται τοπικά εξαιρετικά υψηλές πιέσεις (μέχρι 1000 atm) και θερμοκρασίες (έως και 5000 K), φαινόμενα που προκαλούν ρήξη των κυτταρικών τοιχωμάτων του φυτικού υλικού, διευκολύνοντας έτσι την αποδέσμευση των εγκλωβισμένων ενώσεων, όπως τα καροτενοειδή (Μανδαλάκης & Γεωργιάδου, 2019).



Εικόνα 24. Εκχύλιση με Υπερήχους.
Πηγή:

<https://www.hielscher.com/information>

Η εφαρμογή της UAE στην εκχύλιση καροτενοειδών από υποπροϊόντα της τομάτας –όπως φλούδες και σπόροι που απομένουν μετά τη βιομηχανική επεξεργασία, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας των εν λόγω υπολειμμάτων σε λυκοπένιο, β-καροτένιο και λουτεΐνη. Η μέθοδος επιτρέπει την ανάκτηση των ενώσεων αυτών χωρίς την ανάγκη χρήσης υψηλών θερμοκρασιών, οι οποίες συχνά οδηγούν σε θερμική αποικοδόμηση των καροτενοειδών, τα οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο φως, τη θερμότητα και το οξυγόνο. Έτσι, εξασφαλίζεται υψηλή απόδοση και σταθερότητα του τελικού εκχυλίσματος (Αναστασίου & Παναγιώτου, 2021).

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της εκχύλισης με υπερήχους είναι η δυνατότητα προσαρμογής της διαδικασίας στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Υπάρχουν δύο βασικά είδη εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται: το λουτρό υπερήχων και ο καθετήρας υπερήχων. Το λουτρό υπερήχων είναι πιο προσιτό οικονομικά και εφαρμόζεται κυρίως σε μικρής κλίμακας πειραματικές διαδικασίες. Αντιθέτως, ο καθετήρας υπερήχων είναι κατάλληλος για πιο στοχευμένες και ενεργειακά αποδοτικές εφαρμογές, καθώς μεταφέρει άμεσα την ηχητική ενέργεια στο δείγμα και επιτυγχάνει πιο ομοιογενή και έντονη σπηλαίωση (Καραγιάννη & Κουγιουμτζής, 2020).

Πριν από την εφαρμογή της υπερηχητικής εκχύλισης, είναι συχνή η ανάγκη για προεπεξεργασία του φυτικού δείγματος. Τέτοιες ενέργειες περιλαμβάνουν την αφυδάτωση (ξηρή ή με λυοφιλίωση), την άλεση ώστε να αυξηθεί η ειδική επιφάνεια, ή ακόμη και το ήπιο ζεμάτισμα για την απενεργοποίηση ενζύμων που προκαλούν αποικοδόμηση των καροτενοειδών. Για την εκχύλιση χρησιμοποιούνται κυρίως λιποδιαλυτοί διαλύτες, όπως ο οξικός αιθυλεστέρας ή ο αιθέρας, οι οποίοι έχουν την ικανότητα να διαλύουν αποτελεσματικά τα καροτενοειδή. Σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμόζεται και μίγμα διαλυτών σε αναλογία που βελτιστοποιεί την εκλεκτικότητα και την απόδοση της εκχύλισης (Χατζηγεωργίου & Τσερκέζης, 2018).

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, είναι σημαντικό να ακολουθήσει ο καθαρισμός του εκχυλίσματος. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση διαχωριστικής χοάνης και στη συνέχεια με αφυδάτωση μέσω άνυδρου θεικού νατρίου (Na_2SO_4), ενώ η προσθήκη αντιοξειδωτικών, όπως το ασκορβικό νάτριο ή η βουτυλιωμένη υδροξυτολουόλη (*BHT*), βοηθά στη διατήρηση της σταθερότητας των καροτενοειδών. Επιπλέον, η χρήση ασθενών βάσεων, όπως το όξινο ανθρακικό νάτριο ($NaHCO_3$), μπορεί να συμβάλει στην εξουδετέρωση των απελευθερωμένων οξέων που προκύπτουν κατά τη διαδικασία (Καραλή & Μπελογιάννη, 2017).

Συνολικά, η εκχύλιση με υπερήχους συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της αποδοτικότητας, της ταχείας επεξεργασίας και της περιβαλλοντικής συμβατότητας. Εντάσσεται στο πλαίσιο της πράσινης χημείας και αποτελεί ιδανική επιλογή για τη βιομηχανική αξιοποίηση υποπροϊόντων της τομάτας, καθώς προσφέρει μια οικονομικά βιώσιμη και τεχνολογικά εξελιγμένη μέθοδο για την ανάκτηση θερμοευαίσθητων αντιοξειδωτικών ενώσεων με σημαντική διατροφική και φαρμακευτική αξία (Στεργίου & Νικολαΐδης, 2022).

5.2.3 Εκχύλιση με Υπερκρίσιμα Ρευστά

Η εκχύλιση με υπερκρίσιμα ρευστά (Supercritical Fluid Extraction – SFE) αποτελεί επίσης μία από τις πλέον σύγχρονες και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες διαχωρισμού, η οποία έχει αναδειχθεί ως εξαιρετικά αποτελεσματική στην ανάκτηση θερμοευαίσθητων ενώσεων από φυσικές πρώτες ύλες. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη χρήση ρευστών που βρίσκονται σε υπερκρίσιμη κατάσταση, δηλαδή σε θερμοκρασία και πίεση πάνω από τα κρίσιμα σημεία τους, όπου αποκτούν μοναδικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά: εμφανίζουν πυκνότητα παρόμοια με υγρού αλλά ιξώδες και διάχυση όμοια με αερίου. Οι ιδιότητες αυτές επιτρέπουν στο υπερκρίσιμο ρευστό να διεισδύει εύκολα στους φυτικούς ιστούς και να διαλύει εκλεκτικά τις επιθυμητές ενώσεις, με αποτέλεσμα υψηλές αποδόσεις εκχύλισης χωρίς την ανάγκη χρήσης τοξικών ή θερμικά επιθετικών μέσων (González et al., 2021).

Το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο υπερκρίσιμο ρευστό είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το οποίο μετατρέπεται στην επιθυμητή κατάσταση όταν υποβληθεί σε θερμοκρασία άνω των $31.1^\circ C$ και πίεση μεγαλύτερη από $73.8\ bar$. Το CO_2 διαθέτει πληθώρα πλεονεκτημάτων: είναι άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό, μη εύφλεκτο, ευρέως διαθέσιμο και απολύτως ασφαλές για τρόφιμα και φαρμακευτικές εφαρμογές, γεγονός που του προσδίδει τον χαρακτηρισμό *GRAS* (*Generally Recognized As Safe*) από διεθνείς οργανισμούς όπως ο *FDA* και η *EFSA*. Επιπλέον, επειδή μπορεί να ανακτηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί μέσω απλής αποσυμπίεσης, η χρήση του ευνοεί την εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και ενισχύοντας τον πράσινο χαρακτήρα της μεθόδου (Salgado et al., 2020).

Η χρήση του υπερκρίσιμου CO_2 στην εκχύλιση καροτενοειδών από υποπροϊόντα βιομηχανικής τομάτας, όπως οι φλούδες και οι σπόροι, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική λόγω της μη πολικής φύσης των εν λόγω ενώσεων. Το CO_2 επιδεικνύει υψηλή συγγένεια με μη πολικά μόρια, επιτρέποντας την εκλεκτική ανάκτηση λυκοπενίου, β -καροτενίου και άλλων αντιοξειδωτικών

χωρίς ανάγκη για χρήση οργανικών διαλυτών. Η διαδικασία δεν απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η θερμική αποικοδόμηση των ευαίσθητων καροτενοειδών, διατηρώντας στο μέγιστο τη βιοδραστικότητά τους (Machmudah et al., 2018).

Σε περιπτώσεις που απαιτείται η εκχύλιση πολικών συστατικών, όπως φαινολικές ενώσεις, είναι δυνατή η προσθήκη κατάλληλων συνδιαλυτών, όπως η αιθανόλη, η οποία ενισχύει την πολικότητα του διαλύτη και διευρύνει το φάσμα των ενώσεων που μπορούν να εξαχθούν. Η αιθανόλη είναι επίσης χαμηλής τοξικότητας, βιοδιασπώμενη και επιτρεπτή σε τρόφιμα, γεγονός που ενισχύει ακόμη περισσότερο τον πράσινο χαρακτήρα της τεχνικής (Lang & Wai, 2001).

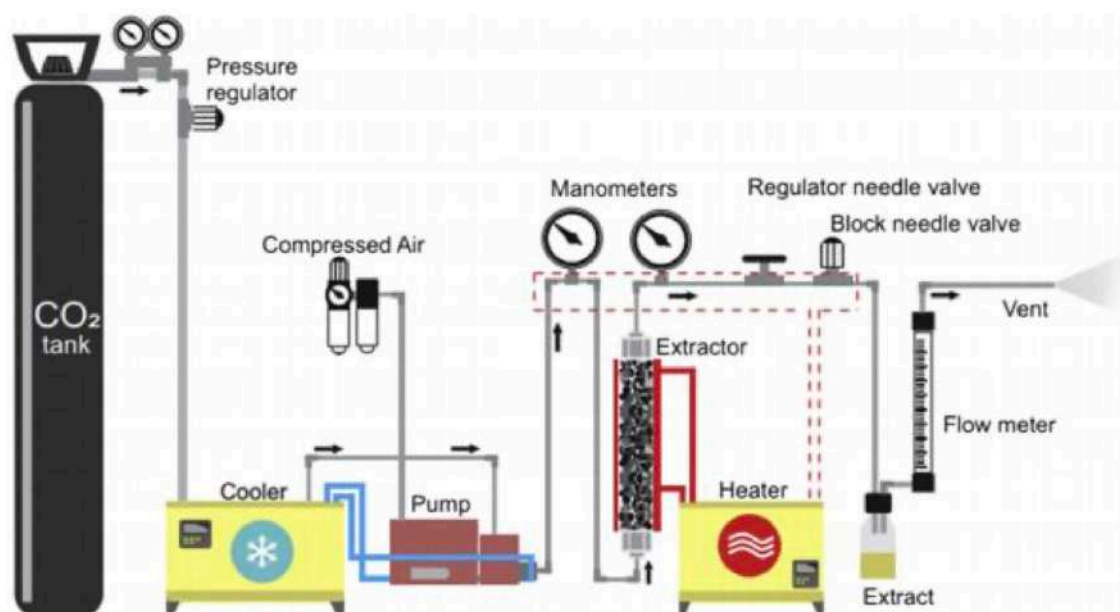
Η αποδοτικότητα της SFE επηρεάζεται σημαντικά από παραμέτρους όπως η πίεση, η θερμοκρασία και η χρήση συνδιαλυτών. Γενικά, η αύξηση της πίεσης οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας του CO_2 , ενισχύοντας τη διαλυτική του ικανότητα. Ωστόσο, η υπέρβαση ορισμένων ορίων (π.χ. πάνω από 450 bar) μπορεί να μειώσει την εκλεκτικότητα και να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία εκχύλισης κυμαίνεται συνήθως από 35 έως 60°C, τιμές οι οποίες είναι αρκετά χαμηλές ώστε να αποφεύγεται η αποικοδόμηση των θερμοευαίσθητων συστατικών, αλλά και αρκετά υψηλές για να ενισχύσουν την κινητικότητα των μορίων και την ταχύτητα της εκχύλισης (Gomez et al., 2022).

Για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, συχνά εφαρμόζεται και ενζυμική προεπεξεργασία του δείγματος. Ενδεικτικά, η χρήση ενζύμων όπως η γλυκοσιδάση έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει τη διάσπαση των κυτταρικών τοιχωμάτων και απελευθερώνει μεγαλύτερο ποσοστό εγκλωβισμένων λιποδιαλυτών συστατικών. Σε σχετική μελέτη, η απόδοση εκχύλισης λυκοπενίου αυξήθηκε κατά 153% και η αντίστοιχη απόδοση λιπιδίων κατά 137% μετά από ενζυμική κατεργασία, σε σύγκριση με την απλή SFE χωρίς προεπεξεργασία (Corrêa et al., 2008).

Η εκχύλιση με υπερκρίσιμα ρευστά εφαρμόζεται τόσο σε ερευνητικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο. Οι σύγχρονες μονάδες περιλαμβάνουν αντλία παροχής CO_2 , σύστημα εισαγωγής συνδιαλύτη, αντιδραστήρα εκχύλισης και δοχείο συλλογής. Στο τελικό στάδιο, το CO_2 απομακρύνεται μέσω αποσυμπίεσης ή συμπύκνωσης, αφήνοντας το εκχύλισμα καθαρό και απαλλαγμένο από υπολείμματα διαλυτών, γεγονός που διευκολύνει τη χρήση του χωρίς περαιτέρω καθαρισμό. Όταν χρησιμοποιούνται βιοδιαλύτες όπως η αιθανόλη, εφαρμόζεται

εξάτμιση σε ήπιες συνθήκες για την απομάκρυνσή τους χωρίς απώλειες δραστηκότητας (Reverchon & De Marco, 2006).

Αν και η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την ποιότητα, την καθαρότητα και τη φιλικότητα προς το περιβάλλον, εντούτοις, το υψηλό κόστος του εξοπλισμού και των αναγκαίων συνθηκών λειτουργίας αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την καθολική εφαρμογή της. Παρά ταύτα, η τεχνολογία *SFE* αναδεικνύεται σε στρατηγικής σημασίας εργαλείο για την ανάκτηση φυσικών καροτενοειδών από φυτικά υπολείμματα, προσδίδοντας προστιθέμενη αξία στη βιομηχανική επεξεργασία τομάτας και προωθώντας τις αρχές της βιώσιμης μεταποίησης (Esquivel et al., 2020).



Εικόνα 25. Εκχύλιση με Υπερκρίσιμο Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂). Πηγή:
https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/859/Asimomitis_16010%20Vlachaki_16014.pdf?sequence=1&sAllowed=y#%5B%7B%22num%22%3A123%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22XYZ%22%22%3A%22%22%7D%5D%3E

5.2.4 Εκχύλιση με Υγρό υπό Πίεση

Η μέθοδος της εκχύλισης με υγρό υπό πίεση βασίζεται στη χρήση υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων για να διατηρείται ο διαλύτης σε υγρή φάση, ακόμη και όταν ξεπερνιέται το φυσιολογικό σημείο βρασμού του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύεται η αποτελεσματικότητα της εκχύλισης, καθώς το υγρό αποκτά μεγαλύτερη κινητικότητα, διεισδύει πιο εύκολα στο φυτικό υλικό και διαλύει πιο αποδοτικά τα συστατικά που στοχεύουμε να απομονώσουμε. Τα καροτενοειδή της τομάτας, όπως το λυκοπένιο και η β-

καροτίνη, αποτελούν λιποδιαλυτές ενώσεις οι οποίες ανταποκρίνονται ιδιαίτερα καλά σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας όταν ο διαλύτης είναι κατάλληλα επιλεγμένος. Αυτή η τεχνική έχει αποδειχθεί ιδανική για την απομόνωση τέτοιων συστατικών από φυτικά υπολείμματα που προκύπτουν κατά τη βιομηχανική επεξεργασία της τομάτας (Κουτσούκος, 2018).

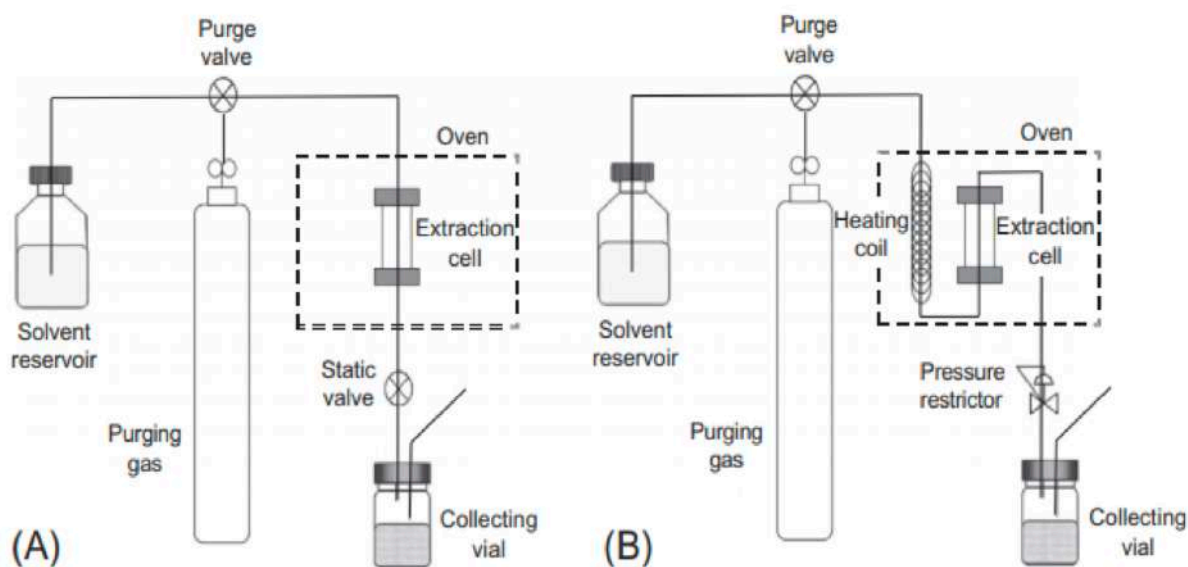
Στο πλαίσιο των πράσινων τεχνολογιών, η *PLE* αξιοποιεί ήπιους διαλύτες όπως η αιθανόλη, το d-λιμονένιο και ο οξικός μεθυλεστέρας, οι οποίοι είναι ασφαλείς για εφαρμογές σε τρόφιμα και επιβαρύνουν λιγότερο το περιβάλλον σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς οργανικούς διαλύτες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση υποκρίσιμου νερού, δηλαδή νερού που έχει θερμανθεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 100 και 374 °C αλλά διατηρείται σε υγρή μορφή λόγω της πίεσης. Υπό αυτές τις συνθήκες, το νερό αλλάζει τις φυσικοχημικές του ιδιότητες και μπορεί να λειτουργήσει σαν διαλύτης για λιποδιαλυτές ενώσεις. Έτσι, μπορεί να εκχυλίσει αποτελεσματικά ακόμη και καροτενοειδή, συνδυάζοντας αποδοτικότητα και περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Ζαμπέλης & Μπαλατσούρας, 2020).

Η συσκευή εκχύλισης με υγρό υπό πίεση αποτελείται από μια σειρά στοιχείων, όπως η δεξαμενή του διαλύτη, οι αντλίες, ο θάλαμος εκχύλισης που θερμαίνεται και το δοχείο συλλογής. Το δείγμα τοποθετείται μέσα σε ειδική κυψέλη από ανοξείδωτο χάλυβα, επενδυμένη με φίλτρο, και ο διαλύτης αντλείται στο εσωτερικό της υπό πίεση. Αφού ολοκληρωθεί η εκχύλιση, το εκχύλισμα κατευθύνεται σε ψυχόμενο δοχείο ώστε να αποφευχθεί η θερμική υποβάθμιση ευαίσθητων ενώσεων όπως τα καροτενοειδή, τα οποία αλλοιώνονται εύκολα όταν εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα (Καραχρήστος, 2016).

Η λειτουργία της συσκευής μπορεί να γίνει είτε σε συνεχή ροή είτε σε φάσεις (*batch mode*). Στην περίπτωση της φασικής λειτουργίας, ο διαλύτης εισέρχεται στην κυψέλη και θερμαίνεται μαζί με το δείγμα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, συνήθως 5 έως 10 λεπτά. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, οι αυξημένες θερμοκρασίες προκαλούν θερμική διαστολή του διαλύτη και του φυτικού υλικού, αυξάνοντας την εσωτερική πίεση και διευκολύνοντας την απελευθέρωση των καροτενοειδών. Η εκχύλιση μπορεί να επαναληφθεί με τον ίδιο ή διαφορετικό διαλύτη, ενώ στο ενδιάμεσο γίνεται καθαρισμός με άζωτο ώστε να αποτραπεί η ανάμειξη ανεπιθύμητων ενώσεων (Δεληγιάννης, 2015).

Η θερμοκρασία αποτελεί βασική παράμετρο που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Σε μέτρια επίπεδα (π.χ. 100–150 °C), ευνοείται η εκχύλιση καροτενοειδών χωρίς να διακυβεύεται η σταθερότητά τους. Ωστόσο, σε θερμοκρασίες άνω των 180 °C μπορεί να προκληθεί θερμική αποικοδόμηση, ιδίως όταν δεν υπάρχει κατάλληλος έλεγχος της διάρκειας εκχύλισης. Παράλληλα, η πίεση παίζει κυρίως ρόλο στη διατήρηση του διαλύτη σε υγρή μορφή, χωρίς όμως να επιδρά σημαντικά στην απόδοση της εκχύλισης μετά από ένα ορισμένο όριο. Η ομοιόμορφη και ελεγχόμενη ροή του διαλύτη είναι επίσης απαραίτητη, ώστε να εξασφαλιστεί πλήρης επαφή με το δείγμα και αποφυγή απωλειών στα επιθυμητά συστατικά (Βασιλειάδης & Αντωνίου, 2019).

Συνολικά, η μέθοδος *PLE* προσφέρει υψηλή απόδοση εκχύλισης, μειώνει την κατανάλωση διαλύτη και είναι σχετικά γρήγορη. Αυτά τα χαρακτηριστικά την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για τη βιομηχανική απομόνωση καροτενοειδών από παραπροϊόντα τομάτας, όπως φλούδες και σπόρους, συμβάλλοντας έτσι στη βιώσιμη αξιοποίηση των υπολειμμάτων και στην παραγωγή φυσικών, βιοδραστικών συστατικών για χρήση σε τρόφιμα ή συμπληρώματα διατροφής (Καλογεροπούλου & Παππάς, 2021).



Εικόνα 26. Εκχύλιση με Υγρό υπό Πίεση σε Παρτίδες (Α) και Συνεχής (Β). Πηγή:

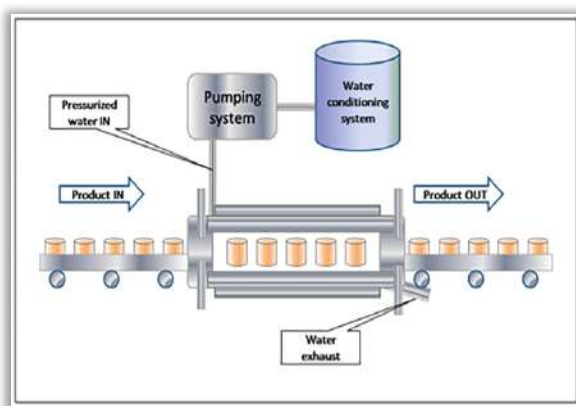
https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/859/Asimomitis_16010%20Vlachaki_16014.pdf?sequence=1&isAllowed=y%5B%7B%22num%22%3A123%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22X

5.2.5 Εκχύλιση με Υψηλή Υδροστατική Πίεση

Η εκχύλιση με υψηλή υδροστατική πίεση βασίζεται στη χρήση πολύ μεγάλων πιέσεων (έως 600 MPa) και χαμηλών θερμοκρασιών για την αποδέσμευση βιοδραστικών συστατικών από φυτικά υλικά. Η πίεση αυτή προκαλεί αλλαγές στη δομή των κυττάρων, οδηγώντας σε ρήξη των κυτταρικών μεμβρανών και διευκολύνοντας τη διείσδυση του διαλύτη στο εσωτερικό τους. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για ευαίσθητες ενώσεις, όπως οι ανθοκυάνες και τα καροτενοειδή, επειδή αποφεύγεται η χρήση υψηλής θερμοκρασίας (Καλογεροπούλου & Παππάς, 2021). Γενικότερα απαιτείται ελάχιστη ενέργεια και μικρές ποσότητες διαλύτη, ενώ μπορεί να χρησιμοποιήσει ήπιους, μη τοξικούς διαλύτες όπως η αιθανόλη και το νερό. Η αιθανόλη είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και θεωρείται ασφαλής για εφαρμογές σε τρόφιμα, ενώ ταυτόχρονα βοηθά στη διατήρηση των αντιοξειδωτικών ιδιοτήτων των ενώσεων (Δεληγιάννης, 2015).

Η διαδικασία περιλαμβάνει την ξήρανση του δείγματος (συνήθως με λυοφιλίωση), την άλεσή του σε μικρά σωματίδια και την ανάμειξη με διαλύτη. Το μείγμα τοποθετείται σε σακούλα και υποβάλλεται σε πίεση για λίγα λεπτά. Η πίεση προκαλεί ρήξη των κυττάρων, με αποτέλεσμα την αποδέσμευση των επιθυμητών συστατικών, τα οποία συλλέγονται μετά από κοσκίνισμα ή επανάληψη της εκχύλισης (Βασιλειάδης & Αντωνίου, 2019). Η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από την πίεση, τη θερμοκρασία και το είδος του διαλύτη. Πίεση 300–500 MPa για λίγα λεπτά είναι συνήθως αρκετή για αποτελεσματική εκχύλιση. Οι θερμοκρασίες παραμένουν χαμηλές (20–50 °C) για να προστατευτούν οι ευαίσθητες ενώσεις, ενώ μικρή αύξηση θερμοκρασίας κατά τη συμπίεση μπορεί να αντιμετωπιστεί με ψύξη (Ζαμπέλης & Μπαλατσούρας, 2020).

Γενικά, η HHPE είναι μία πράσινη, ήπια και αποδοτική τεχνική, ιδανική για την αξιοποίηση φυτικών υποπροϊόντων, όπως τα κατάλοιπα της βιομηχανικής τομάτας, συμβάλλοντας στη βιώσιμη παραγωγή φυτικών συστατικών με βιοδραστικές ιδιότητες (Καραχρήστος, 2016).



Εικόνα 27. Εκχύλιση Προϊόντος με Υψηλή Υδροστατική Πίεση.

Πηγή: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-35843-2_10

5.2.6 Εκχύλιση με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία (PEF)

Η εκχύλιση με παλμικά ηλεκτρικά πεδία (PEF) αποτελεί μια σύγχρονη, μη θερμική μέθοδο που έχει τραβήξει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για τη δυνατότητά της να ενισχύει τη διαδικασία ανάκτησης πολύτιμων φυτικών συστατικών. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν απαιτεί αυξημένες θερμοκρασίες, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για την προστασία θερμοευαίσθητων μορίων, όπως τα καροτενοειδή. Οι ενώσεις αυτές, και κυρίως το λυκοπένιο, που αποτελεί βασικό αντιοξειδωτικό της τομάτας, παρουσιάζουν ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες, κάτι που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη ήπιων τεχνολογιών εκχύλισης (Barba et al., 2015).

Η βασική αρχή της μεθόδου έγκειται στην εφαρμογή διαδοχικών παλμών ηλεκτρικού πεδίου υψηλής έντασης πάνω σε δείγματα φυτικής προέλευσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μικροσκοπικές διαταραχές στη δομή της κυτταρικής μεμβράνης, ένα φαινόμενο που είναι γνωστό ως ηλεκτροδιάτρηση. Μέσω αυτών των μικροσκοπικών πόρων που δημιουργούνται στην κυτταρική μεμβράνη, διευκολύνεται σημαντικά η έξοδος των ενδοκυτταρικών ενώσεων, όπως οι λιποδιαλυτές καροτενοειδείς χρωστικές. Η εφαρμογή PEF πριν ή κατά τη διάρκεια της εκχύλισης αυξάνει δραστικά την απόδοση της διαδικασίας, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για καροτενοειδή, των οποίων η διαθεσιμότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης (Puértolas & Barba, 2016).

Η τεχνολογία αυτή είναι ευέλικτη και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε στερεά όσο και σε υγρά δείγματα. Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει έναν θάλαμο επεξεργασίας με δύο ηλεκτρόδια και μια γεννήτρια υψηλής τάσης. Το δείγμα τοποθετείται μεταξύ των ηλεκτροδίων και υποβάλλεται σε παλμούς ηλεκτρικού πεδίου που διαρκούν μερικά μικροδευτερόλεπτα. Η ένταση του πεδίου κυμαίνεται από 1 έως 80 kV/cm, ανάλογα με τον τύπο του δείγματος και την επιθυμητή επίδραση. Ειδικά για προϊόντα όπως η τομάτα, η εφαρμογή μετρίων εντάσεων φαίνεται να ενισχύει την αποδέσμευση του λυκοπενίου, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί τη θερμική υποβάθμιση που θα προέκυπτε σε συμβατικές θερμικές τεχνικές (Barba et al., 2015).

Η επίδραση της έντασης του πεδίου, της διάρκειας και του αριθμού των παλμών είναι καθοριστική για την αποτελεσματικότητα της εκχύλισης. Όσο αυξάνεται η ένταση του πεδίου, τόσο εντονότερη είναι η διάτρηση της μεμβράνης, έως ένα όριο πέραν του οποίου μπορεί να υπάρξει υποβάθμιση των συστατικών. Για τον λόγο αυτό, η διαδικασία πρέπει να

προσαρμόζεται ανάλογα με το είδος του δείγματος, με στόχο τη βέλτιστη ανάκτηση συστατικών όπως οι καροτενοειδείς ενώσεις, διατηρώντας παράλληλα τη χημική τους σταθερότητα (Barba et al., 2015).

Στην πράξη, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί είτε ως αυτόνομη τεχνική είτε ως προκατεργασία πριν από άλλες μεθόδους εκχύλισης, όπως η εκχύλιση με υπερκρίσιμα ρευστά ή με μικροκύματα. Ειδικά στην περίπτωση των υποπροϊόντων βιομηχανικής τομάτας, όπως οι φλούδες και τα σπέρματα, η εφαρμογή παλμικών ηλεκτρικών πεδίων έχει φανεί ότι μειώνει τον χρόνο εκχύλισης και βελτιώνει την απόδοση σε λυκοπένιο και β-καροτένιο. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή φυσικών εκχυλισμάτων υψηλής συγκέντρωσης σε αντιοξειδωτικά, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν σε τρόφιμα, καλλυντικά ή και φαρμακευτικά προϊόντα (Luengo et al., 2014).

Σε γενικές γραμμές, ως τεχνική χαρακτηρίζεται από χαμηλό ενεργειακό κόστος, ήπιο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και δυνατότητα χρήσης ασφαλών διαλυτών, γεγονός που την κατατάσσει στις «πράσινες τεχνολογίες» επεξεργασίας τροφίμων. Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη βιώσιμη αξιοποίηση των αγροβιομηχανικών παραπροϊόντων καθιστά την τεχνολογία των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων ιδιαίτερα επίκαιρη και υποσχόμενη (Corrales et al., 2008).

5.2.7 Ενζυμικά Υποβοηθούμενη Εκχύλιση

Η χρήση ενζύμων για την υποβοήθηση της εκχύλισης βιοδραστικών συστατικών αποτελεί μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και εξελισσόμενη τεχνική, καθώς στηρίζεται στη φυσική ικανότητα των ενζύμων να διασπούν σύνθετες κυτταρικές δομές και να απελευθερώνουν ουσίες όπως τα καροτενοειδή. Τα ένζυμα είναι πρωτεΐνες που λειτουργούν ως καταλύτες, δηλαδή επιταχύνουν τις χημικές αντιδράσεις χωρίς να καταναλώνονται, και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές βιομηχανικές και βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Η δράση τους βασίζεται στην ικανότητά τους να αναγνωρίζουν συγκεκριμένα μόρια-στόχους, όπως η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη ή η πηκτίνη, και να τα διασπούν, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την αποδέσμευση πολύτιμων ενώσεων από τον φυτικό ιστό (Γαλανάκης, 2021).

Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην εκχύλιση καροτενοειδών από την τομάτα και τα βιομηχανικά της υποπροϊόντα, όπως οι φλούδες και τα σπέρματα. Ειδικά το λυκοπένιο, το βασικό καροτενοειδές της τομάτας, βρίσκεται εγκλωβισμένο μέσα σε λιποφιλικά κυτταρικά διαμερίσματα, γεγονός που καθιστά την απελευθέρωσή του δύσκολη χωρίς κατάλληλη επεξεργασία. Η χρήση ενζύμων, όπως οι κυτταρινάσες και οι πηκτινάσες, διασπά τους τοίχους

των φυτικών κυττάρων, επιτρέποντας στο λυκοπένιο και στα υπόλοιπα καροτενοειδή να απελευθερωθούν πιο εύκολα στον διαλύτη, αυξάνοντας έτσι την απόδοση της εκχύλισης. Επιπλέον, χάρη στη δυνατότητα χρήσης ήπιων συνθηκών (όπως χαμηλότερη θερμοκρασία και ουδέτερο pH), διατηρούνται τα φυσικά χαρακτηριστικά και η βιοδραστικότητα των συστατικών, χωρίς αλλοιώσεις από τη θερμική επεξεργασία (Καραμπελιώτης & Μαντζουράτος, 2020).

Ενδεικτικά, σε μελέτη που εφαρμόστηκε σε απόβλητα επεξεργασίας τομάτας, η προσθήκη ενζυμικών μειγμάτων όπως το Pecllyve® και το Cellulyve® κατά τη διάρκεια της εκχύλισης με εξάνιο, αύξησε σημαντικά την περιεκτικότητα σε λυκοπένιο, ενώ ταυτόχρονα μείωσε τον χρόνο της διαδικασίας στο μισό. Αντίστοιχα, έχει αποδειχθεί ότι και άλλες πολυσακχαριδικές ενώσεις που υπάρχουν στους φυτικούς ιστούς, όπως η πηκτίνη, μπορούν να απομονωθούν πιο αποτελεσματικά όταν η εκχύλιση συνδυαστεί με ενζυμική προεπεξεργασία. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο βελτιώνει τη συνολική αξιοποίηση των παραπροϊόντων της τομάτας, αλλά συμβάλλει και στην πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή βιοδραστικών συστατικών, μειώνοντας τη χρήση χημικών διαλυτών (Παναγιωτόπουλος, 2018).

Η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει προκατεργασία του φυτικού υλικού, όπως λυοφιλίωση ή άλεση, για την αύξηση της επιφάνειας επαφής. Ακολουθεί ρύθμιση του *pH* και προσθήκη των ενζύμων σε κατάλληλη θερμοκρασία, με την επώαση να διαρκεί από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες, ανάλογα με το υπόστρωμα και τον τύπο του ενζύμου. Μετά την αδρανοποίηση των ενζύμων (συνήθως με θερμική επεξεργασία), ακολουθεί η εκχύλιση με υδατικά ή οργανικά διαλύματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να εφαρμοστεί και ταυτόχρονη ενζυμική υδρόλυση και εκχύλιση, μειώνοντας περαιτέρω το κόστος και τον απαιτούμενο χρόνο (Φωτιάδου & Κοσμίδου, 2019).

Συνολικά, η ενζυμικά υποβοηθούμενη εκχύλιση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη βιομηχανική αξιοποίηση της τομάτας και ειδικά για την ανάκτηση καροτενοειδών υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η τεχνική αυτή συνδυάζει την αξιοπιστία της βιοτεχνολογίας με τις απαιτήσεις της πράσινης χημείας, προσφέροντας ασφαλή και αποδοτικά αποτελέσματα, ενώ ανοίγει προοπτικές για περαιτέρω εφαρμογές στον τομέα των φυσικών αντιοξειδωτικών και των λειτουργικών τροφίμων (Γαλανάκης, 2021).

5.3 Καθαρισμός και Επεξεργασία Εκχυλισμάτων

Η διαδικασία καθαρισμού και επεξεργασίας των εκχυλισμάτων αποτελεί καθοριστικό στάδιο για την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση των καροτενοειδών που περιέχονται στα παραπροϊόντα της βιομηχανικής επεξεργασίας της τομάτας. Η παρουσία ανεπιθύμητων ουσιών, όπως λιπίδια, κηροειδή, σάκχαρα και πολυφαινόλες, μπορεί να παρεμποδίσει την ακρίβεια των αναλύσεων και να μειώσει τη σταθερότητα των εκχυλισμένων συστατικών. Επομένως, πριν από την εφαρμογή των αναλυτικών μεθόδων, απαιτείται ένας κατάλληλα σχεδιασμένος καθαρισμός που να σέβεται τις ιδιαιτερότητες των στοχευόμενων μορίων, όπως τα λυκοπένιο, β-καροτένιο, λουτεΐνη και άλλα συναφή καροτενοειδή (Καλαϊτζής, 2018).

Η πρώτη φάση του καθαρισμού περιλαμβάνει την απομάκρυνση των λιπαρών ουσιών που συνοδεύουν τα καροτενοειδή, κυρίως με χρήση υγρής-υγρής εκχύλισης ή διαδοχικής πλύσης με οργανικούς διαλύτες. Η απολίπανση είναι απαραίτητη, καθώς τα λιπίδια όχι μόνο περιπλέκουν τη χρωματογραφική ανάλυση, αλλά επηρεάζουν και τη σταθερότητα των καροτενοειδών κατά τη φύλαξη και τις μεταγενέστερες αναλύσεις. Συνήθως χρησιμοποιούνται διαλύτες όπως το εξάνιο ή το πετρελαϊκό αιθέρας, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμόζεται και ψυχρή εκχύλιση για την αποφυγή αποικοδόμησης (Αποστολάτος & Μαυρίδης, 2016).

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται εκχύλιση στερεάς φάσης (*SPE - Solid Phase Extraction*), μια τεχνική με υψηλή επιλεκτικότητα και αναπαραγωγιμότητα, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα εμπλουτισμού των εκχυλισμάτων και απομάκρυνσης υδατοδιαλυτών ή πολικών ενώσεων. Η επιλογή του προσροφητικού υλικού (συνήθως *C18*, διαζωλικές ρητίνες ή πολυμερικά υλικά) καθορίζει και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, με στόχο την απομόνωση των καροτενοειδών σε καθαρή μορφή χωρίς υπολείμματα άλλων οργανικών ενώσεων (Γαλανάκης, 2020).

Η εξάτμιση του διαλύτη και ο περαιτέρω διαχωρισμός πραγματοποιούνται υπό ήπιες συνθήκες (π.χ. με περιστροφικό εξάτμιστήρα υπό μειωμένη πίεση) ώστε να διατηρηθούν οι θερμοευαίσθητες ενώσεις ανέπαφες. Ακολουθεί φιλτράρισμα ή φυγοκέντρωση για την απομάκρυνση μικροσωματιδίων που ενδέχεται να επηρεάσουν την καθαρότητα του δείγματος και να προκαλέσουν μετατοπίσεις στη φασματοσκοπική ανάλυση (Νασούλης & Κωστούλας, 2019).

Για τον προσδιορισμό των καροτενοειδών χρησιμοποιούνται διάφορες αναλυτικές μέθοδοι, με πιο διαδεδομένη τη φασματοφωτομετρία *UV-Vis*. Η μέθοδος βασίζεται στην ικανότητα των καροτενοειδών να απορροφούν φως στην περιοχή των 400–500 nm, με το λυκοπένιο να εμφανίζει μέγιστη απορρόφηση περίπου στα 470 nm. Η τεχνική αυτή, παρά την απλότητά της, απαιτεί καθαρό δείγμα και προσεκτική ρύθμιση παραμέτρων για την αποφυγή παρεμβολών από άλλες ενώσεις με παρόμοιο φάσμα (Κατσαρός & Θεοδορίδης, 2015).

Πιο ακριβής, ωστόσο, είναι η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (*HPLC*), η οποία επιτρέπει την ταυτοποίηση και τον ποσοτικό προσδιορισμό των επιμέρους καροτενοειδών. Η *HPLC* με ανιχνευτή διαδοχικής απορρόφησης (*DAD*) ή φθορισμομετρικό ανιχνευτή παρέχει λεπτομερή κατανομή των συστατικών ακόμη και σε σύνθετα μίγματα, ενώ σε συνδυασμό με πρότυπα διαλυμάτων επιτρέπει την ακριβή ποσοτικοποίηση του λυκοπενίου και των συγγενών του (Γεωργούλης & Μανώλης, 2021).

Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση του δείκτη χρώματος (*color index method*), ιδιαίτερα σε βιομηχανικό ή ημι-ποσοτικό επίπεδο, όπου δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια. Ο δείκτης βασίζεται στην αναλογία απορροφήσεων σε δύο χαρακτηριστικά μήκη κύματος και συνδέεται εμπειρικά με τη συγκέντρωση λυκοπενίου. Παρότι λιγότερο ακριβής, η μέθοδος αυτή είναι ταχεία, οικονομική και χρήσιμη για προκαταρκτική εκτίμηση της ποιότητας των προϊόντων εκχύλισης (Μπουρνάκας, 2007).

Η επιλογή της κατάλληλης αναλυτικής μεθόδου εξαρτάται από τις απαιτήσεις της κάθε μελέτης, τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού και το στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας στο οποίο εντάσσεται. Σε κάθε περίπτωση, η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα εξαρτώνται άμεσα από τον σωστό σχεδιασμό του σταδίου καθαρισμού και την αποτελεσματική απομόνωση των καροτενοειδών από τα παρεμβαλλόμενα συστατικά (Γαλανάκης, 2020).

Μετά την επιλογή του κατάλληλου διαλύτη εκχύλισης, που στις σύγχρονες μεθόδους περιλαμβάνει και τους πράσινους υδρόφοβους ευτηκτικούς διαλύτες (HDESs), ακολουθεί ένα κρίσιμο στάδιο καθαρισμού και απομόνωσης των καροτενοειδών, το οποίο αποτελεί προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή των αναλυτικών μεθόδων αξιολόγησης (Καλαϊτζής, 2018).

5.4 Ενδεικτικό Πλάνο Εκχύλισης και Ανάλυσης Καροτενοειδών

Για την πληρέστερη κατανόηση των πειραματικών διαδικασιών που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια της εργασίας, κρίνεται απαραίτητη η θεωρητική αποσαφήνιση των μεθόδων εκχύλισης, καθαρισμού και προσδιορισμού των καροτενοειδών, καθώς και των δοκιμών αξιολόγησης της αντιοξειδωτικής ικανότητάς τους. Οι μέθοδοι που αναλύονται παρακάτω εφαρμόζονται στο πειραματικό μέρος της παρούσας μελέτης και προσφέρουν το απαραίτητο υπόβαθρο για την επιστημονική τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων.

Η νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης ενθαρρύνει τη μείωση της χρήσης πετροχημικών διαλυτών και οργανικών ενώσεων με υψηλή τοξικότητα. Το νερό θεωρείται ο πιο «πράσινος» διαλύτης, προσφέροντας πολλά πλεονεκτήματα όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με καινοτόμες τεχνικές, όπως υπέρηχοι, μικροκύματα και υπερύψηλη πίεση. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα του νερού στην ανάκτηση μη πολικών και υδρόφοβων αναλυτών είναι περιορισμένη σε σχέση με αυτή των οργανικών διαλυτών, ακόμα και όταν χρησιμοποιείται με καινοτόμες τεχνικές. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, ερευνάται η χρήση εναλλακτικών διαλυτών με «πράσινες» ιδιότητες, όπως η απουσία τοξικότητας, ευφλεκτότητας και η μείωση των κινδύνων για τους εργαζόμενους, ενώ παράλληλα διαθέτουν φυσικοχημικές ιδιότητες παρόμοιες με τους παραδοσιακούς διαλύτες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπάρχει για τη χρήση ιοντικών υγρών και βαθέως ευτηκτικών διαλυτών (Deep Eutectic Solvents).

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί νέοι τύποι διαλυτών που είναι φιλικότεροι προς το περιβάλλον σε σχέση με τους συμβατικούς οργανικούς διαλύτες, οι οποίοι είναι συχνά τοξικοί και επικίνδυνοι. Μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες κατηγορίες είναι οι Υδρόφοβοι Ευτηκτικοί Διαλύτες (*Hydrophobic Deep Eutectic Solvents – HDESs*). Οι διαλύτες αυτοί δημιουργούνται με ανάμιξη δύο ή περισσότερων φυσικών ενώσεων, όπως λιπαρά οξέα, αλκοόλες ή τερπένια, που μέσω αλληλεπιδράσεων υδρογόνου σχηματίζουν ένα σταθερό και υγρό μίγμα σε θερμοκρασία δωματίου. Η μοναδικότητά τους έγκειται στην ικανότητά τους να διαλύουν λιποδιαλυτές ενώσεις, όπως είναι τα καροτενοειδή – με πιο χαρακτηριστικό το λυκοπένιο. Επιπλέον, οι *HDESs* είναι μη πτητικοί και βιοδιασπώμενοι, επομένως δεν εκπέμπουν τοξικούς ατμούς και δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον. Η εφαρμογή τους στην εκχύλιση καροτενοειδών όχι μόνο αυξάνει την απόδοση σε δραστικά συστατικά, αλλά παράλληλα μειώνει την ανάγκη για επιβλαβείς χημικούς διαλύτες, κάνοντάς τους εξαιρετικά ελκυστικούς για τη βιώσιμη βιομηχανία τροφίμων και φυσικών προϊόντων (Γαλανάκης, 2020).

Για να αξιολογηθεί η αντιοξειδωτική ικανότητα των ουσιών που έχουν εκχυλιστεί με τους παραπάνω διαλύτες, χρησιμοποιείται συχνά μια μέθοδος που ονομάζεται δοκιμή *DPPH*. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε ένα μόριο – το *DPPH* (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) – το οποίο έχει ένα έντονο μωβ χρώμα όταν είναι σε ελεύθερη ριζική μορφή. Όταν όμως έρθει σε επαφή με ουσίες που έχουν αντιοξειδωτική δράση, το *DPPH* αντιδρά με αυτές και εξουδετερώνεται, αλλάζοντας το χρώμα του διαλύματος από μωβ σε κίτρινο. Αυτή η αλλαγή στο χρώμα μετριέται με ειδικό όργανο που λέγεται φασματοφωτόμετρο, σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η αλλαγή στο χρώμα, τόσο ισχυρότερη είναι η αντιοξειδωτική ικανότητα του δείγματος. Τα αποτελέσματα εκφράζονται είτε ως ποσοστό εξουδετέρωσης των ελευθέρων ριζών είτε με τη μορφή της τιμής *IC50*, η οποία δείχνει τη συγκέντρωση του δείγματος που απαιτείται για να εξουδετερώσει το 50% των ριζών *DPPH*. Η μέθοδος *DPPH* είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί είναι απλή, γρήγορη και οικονομική, και εφαρμόζεται ευρέως σε φυσικά εκχυλίσματα, τρόφιμα και καλλυντικά (Κατσαρός & Θεοδωρίδης, 2015).

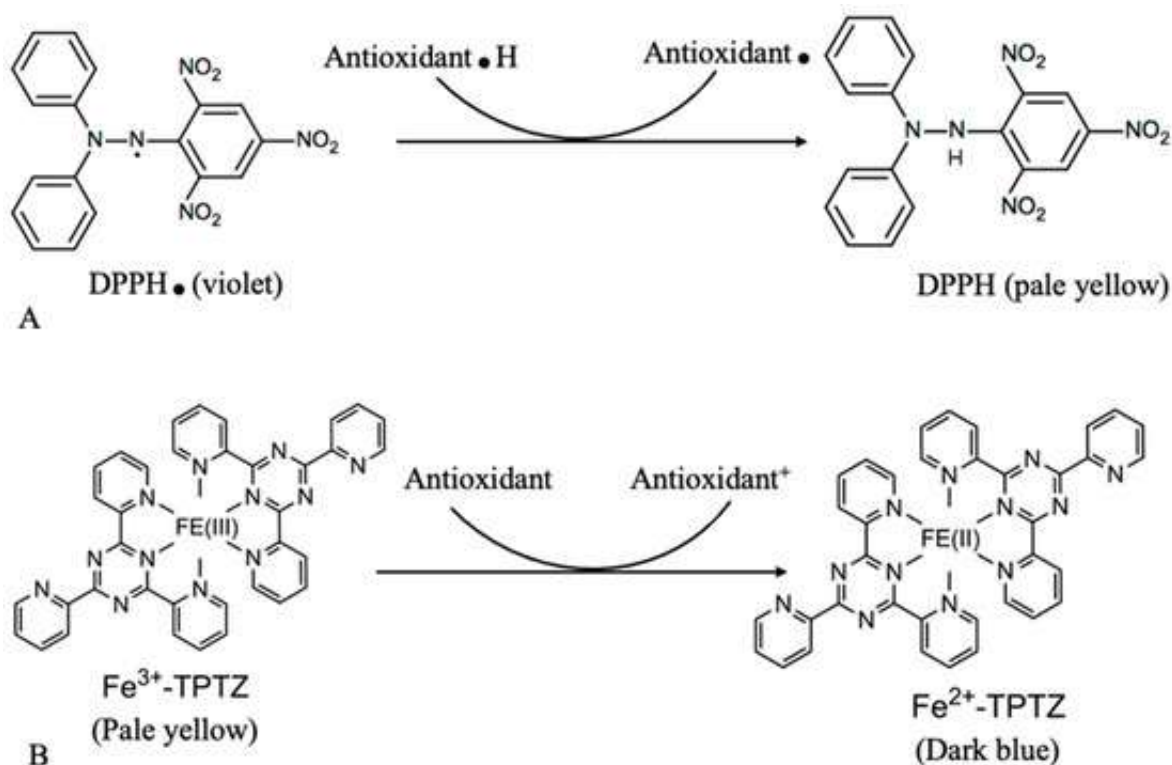
Μια άλλη σημαντική μέθοδος για την εκτίμηση της αντιοξειδωτικής δράσης ενός δείγματος είναι η δοκιμή *FRAP*, η οποία προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων *Ferric Reducing Antioxidant Power*. Σε αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποιείται ένα χημικό σύμπλοκο που περιέχει τρισθενή σίδηρο (Fe^{3+}) και ένα αντιδραστήριο με το όνομα *TPTZ* (2,4,6-tripyridyl-s-triazine). Όταν το δείγμα περιέχει ουσίες με αναγωγική ικανότητα, δηλαδή που μπορούν να προσφέρουν ηλεκτρόνια, τότε το Fe^{3+} μετατρέπεται σε δισθενή σίδηρο (Fe^{2+}), και το διάλυμα αλλάζει χρώμα από άχρωμο σε έντονο μπλε. Η ένταση του μπλε χρώματος, η οποία μετριέται στα 593 nm με φασματοφωτόμετρο, αντιστοιχεί στην αντιοξειδωτική ισχύ του δείγματος. Η μέθοδος *FRAP* θεωρείται πολύ αξιόπιστη και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την εκτίμηση υδατοδιαλυτών αντιοξειδωτικών, όπως είναι οι πολυφαινόλες και ορισμένες βιταμίνες. Συχνά χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με άλλες δοκιμές, όπως η *DPPH*, για να σχηματιστεί μια πληρέστερη εικόνα για τη λειτουργικότητα των φυτικών εκχυλισμάτων (Αποστολάτος & Μαυρίδης, 2016).

Συνοψίζοντας, οι εναλλακτικές τεχνικές εκχύλισης και αξιολόγησης των αντιοξειδωτικών ενώσεων που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο έχουν καθοριστική σημασία για τη μελέτη φυσικών εκχυλισμάτων και ιδιαίτερα των καροτενοειδών, όπως το λυκοπένιο. Η στροφή προς πιο φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους, όπως η χρήση υδρόφοβων βαθέων ευτηκτικών διαλυτών, αποτελεί πλέον όχι μόνο επιστημονική αναγκαιότητα αλλά και κατεύθυνση που προωθείται ενεργά από τη διεθνή και ευρωπαϊκή πολιτική. Μέσα από τη θεωρητική κατανόηση της λειτουργίας αυτών των διαλυτών, αναδεικνύεται η δυνατότητα αύξησης της

εκλεκτικότητας και της αποτελεσματικότητας κατά την εκχύλιση βιοδραστικών ενώσεων, χωρίς τη χρήση τοξικών ή επικίνδυνων ουσιών.

Παράλληλα, οι μέθοδοι αξιολόγησης της αντιοξειδωτικής δράσης, όπως η δοκιμή *DPPH* και η μέθοδος *FRAP*, προσφέρουν απλές αλλά αξιόπιστες λύσεις για την ποσοτική εκτίμηση της βιολογικής δραστηριότητας των εκχυλισμάτων. Η βαθύτερη κατανόηση των αρχών λειτουργίας τους επιτρέπει την ακριβέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων. Οι τεχνικές αυτές, όπως παρουσιάστηκαν, δεν εφαρμόζονται μόνο για ερευνητικούς σκοπούς αλλά βρίσκουν ευρεία χρήση στη βιομηχανία τροφίμων, φαρμάκων και καλλυντικών.

Η ανάλυση που προηγήθηκε στοχεύει να προσφέρει στον αναγνώστη μια σαφή και ολοκληρωμένη εικόνα των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Μέσα από αυτή την ενότητα, δημιουργούνται οι βάσεις για την καλύτερη κατανόηση των μεθοδολογιών που ακολουθούν και διασφαλίζεται η ορθή ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.



Εικόνα 28. Αντίδραση στην οποία βασίζονται οι δοκιμασίες αντιοξειδωτικών *DPPH* (A) και *FRAP* (B).

Πηγή: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/6/1225>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 Εισαγωγή

Το πειραματικό μέρος της παρούσας μελέτης σχεδιάστηκε με στόχο τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας εκχύλισης καροτενοειδών από παραπροϊόντα της βιομηχανικής επεξεργασίας τομάτας, χρησιμοποιώντας ήπιες, φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους και πράσινους διαλύτες. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκε η τεχνική εκχύλισης με τη βοήθεια θερμικής επεξεργασίας, υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και χρόνου, με χρήση διαλυτών διαφορετικής πολικότητας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις της συνολικής περιεκτικότητας καροτενοειδών, καθώς και της αντιοξειδωτικής ικανότητας των εκχυλισμάτων μέσω των μεθόδων *DPPH* και *FRAP*. Η πειραματική προσέγγιση βασίστηκε σε πλήρες πειραματικό σχεδιασμό, με στόχο την κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση εκχύλισης.

6.2 Υλικά και Μέθοδοι

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά και αντιδραστήρια:

- **Φρέσκα υποπροϊόντα τομάτας** (φλούδες και σπόροι) από βιομηχανική επεξεργασία
- **Αιθανόλη** (EtOH, food grade)
- **Ακετόνη**
- **Οξικός αιθυλεστέρας**
- **Εξάνιο**
- **Διάλυμα DPPH** (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) σε μεθανόλη, συγκέντρωση 100 μM
- **FRAP διάλυμα** (με βάση FeCl_3 και TPTZ)
- **Απιονισμένο νερό**

- **Μεθανόλη (HPLC βαθμού ή αναλυτική)**
- **FeCl₃** για το διάλυμα FRAP
- **Αλουμινόχαρτο** (για προστασία από φως)

Ταυτόχρονα ο Εργαστηριακός Εξοπλισμός περιελάμβανε:

- **Λυοφιλωτής «Biobase» και «Platinum 500»** – για την απομάκρυνση της υγρασίας μέσω ξήρανσης υπό κενό και την κατάψυξη του υλικού (διάρκειας μίας ώρας), αντίστοιχα.
- **Ηλεκτρικός θρυμματιστής / μπλέντερ**
- **Εργαστηριακό κόσκινο** – για τον καθορισμό κοκκομετρίας (0–1600 μm)
- **Ελαιόλουτρο** – για ελεγχόμενη θέρμανση δειγμάτων σε 20 °C, 50 °C και 80 °C
- **Γυάλινα δοχεία DURAN 50 mL**
- **Ζυγός ακριβείας**
- **Μαγνητικός αναδευτήρας με ράβδους ανάδευσης**
- **Φυγόκεντρος (4500 rpm)**
- **Φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης**
- **Πιπέτες μικρού όγκου και μικροσωληνάρια**
- **Στατικό Λογισμικό Πακέτο JMP**

6.3 Πειραματική Διαδικασία

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν φρέσκα δείγματα υποπροϊόντων τομάτας, τα οποία υποβλήθηκαν σε προκατεργασία ψύξης και αφυδάτωσης προκειμένου να καταστούν κατάλληλα για εκχύλιση και αξιολόγηση των καροτενοειδών τους. Αρχικά, τα δείγματα καταψύχθηκαν στους −50 °C για μία ώρα με χρήση του *Platinum 500*, ενός

εξειδικευμένου καταψύκτη βαθιάς κατάψυξης (−80 έως −50 °C) που προετοιμάζει δείγματα για λυοφιλίωση. Στη συνέχεια, η αφυδάτωση πραγματοποιήθηκε στο *Biobase BK-FD10P*, το οποίο είναι ένα σύστημα λυοφιλίωσης που επιτρέπει την απομάκρυνση της υγρασίας μέσω εξάχνωσης, μετατρέποντας απευθείας το παγωμένο νερό από στερεό σε αέριο (βλ. Εικόνες Πα.Β.1, Πα.Β.2 και Πα.Β3 του Παραρτήματος).

Μετά τη λυοφιλίωση, έγινε θραύση του κενού μέσω ελεγχόμενης εκτόνωσης, ώστε να αφαιρεθεί με ασφάλεια το καπάκι του θαλάμου και να ληφθούν τα αποξηραμένα δείγματα. Στη συνέχεια, τα αφυδατωμένα δείγματα αλέστηκαν με χρήση μπλέντερ, που απεικονίζεται στην εικόνα Πα.Β.4 του Παραρτήματος Β, για να επιτευχθεί σωστή ομογενοποίηση και κατόπιν υποβλήθηκαν σε κοσκίνιση ενός λεπτού, με κόσκινο διαφόρων διαμέτρων, για την αξιολόγηση της κοκκομετρίας (βλ. Εικόνες Πα.Β.5 και Πα.Β6 του Παραρτήματος Β). Οι κατανομές βάρους ανά κλάσμα ήταν: 0–100 μm (340,72 g), 100–200 μm (259,28 g), 200–400 μm (261,62 g), 400–800 μm (300,34 g) και 800–1600 μm (320,37 g). Κρίθηκαν σωστές αφού δεν ξεπερνούσαν τα 1600 μm (351,86 g).

Ακολούθως, όπως φαίνεται και στην εικόνα Πα.Β.7 του Παραρτήματος Β, θερμάνθηκε ελαιόλουτρο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες: 20°C, 50°C και 80 °C. Το ελαιόλουτρο αποτελεί μέσο έμμεσης θέρμανσης, συνήθως με χρήση παραφινέλαιου, για την ομοιόμορφη μεταφορά θερμότητας χωρίς απότομες διακυμάνσεις. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε για την ακριβή θέρμανση των δειγμάτων σε προκαθορισμένες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της εκχύλισης.

Για κάθε συνθήκη εκχύλισης, τοποθετήθηκε 0,8 g αποξηραμένου δείγματος σε *Duran* φιαλίδιο χωρητικότητας 50 mL. Τα φιαλίδια *Duran* είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και χημικούς διαλύτες, κατασκευασμένα από βοριοπυριτικό γυαλί, και είναι ιδανικά για εργαστηριακές εκχυλίσσεις. Μετά τη ζύγιση του δείγματος, προστέθηκε μαγνητικός αναδευτήρας και 20 ml αιθανόλης ως διαλύτης. Τα φιαλίδια τοποθετήθηκαν εντός του ελαιολουτρού για 30, 60 ή 90 λεπτά στους αντίστοιχους βαθμούς θερμοκρασίας, σύμφωνα με το πειραματικό σχέδιο 9 (βλ. Εικόνα Πα.Β.9 του Παραρτήματος Β).

Έπειτα από την ολοκλήρωση της εκχύλισης, τα δείγματα φυγοκεντρήθηκαν για 5 λεπτά στις 4500 rpm (βλ. Εικόνα Πα.Β.8 του Παραρτήματος Β). Ακολούθησε πενταπλή αραίωση με βάση τη σχέση αραίωσης ($C_1V_1 = C_2V_2$), ώστε να φτάσουν σε συγκεντρώσεις κατάλληλες για φασματοφωτομετρική ανάλυση. Η περιεκτικότητα των εκχυλισμάτων σε αιθανόλη

προσδιορίστηκε μέσω μετρήσεων με φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης (βλ. Εικόνα Πα.Β.11 του Παραρτήματος Β). Η συσκευή αυτή μετρά την απορρόφηση της ακτινοβολίας ενός δείγματος και τη συγκρίνει με το «τυφλό» δείγμα (*blank*), το οποίο περιέχει μόνο τον διαλύτη (στην περίπτωση αυτή, καθαρή αιθανόλη), επιτρέποντας τον ακριβή υπολογισμό της απορρόφησης από τις ουσίες στόχους. Για την ποσοτικοποίηση των καροτενοειδών χρησιμοποιείται ο νόμος Lambert-Beer, ο οποίος περιγράφει τη γραμμική σχέση μεταξύ της απορρόφησης (A) και της συγκέντρωσης (C) μιας ουσίας σε διάλυμα, με βάση την εξίσωση: $A = \epsilon \times b \times C$, όπου « ϵ » είναι η μοριακή απορροφητικότητα, « b » το μήκος της κυψελίδας και « C » η συγκέντρωση. Ο νόμος αυτός αποτελεί τη θεωρητική βάση της φασματοφωτομετρίας και εφαρμόζεται ευρέως σε αναλύσεις όπου απαιτείται ακριβής υπολογισμός της συγκέντρωσης ενός διαλυμένου συστατικού μέσω της μέτρησης της απορρόφησης της φωτεινής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένο μήκος κύματος (Harris, 2015).

Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν τέσσερα νέα δείγματα, καθένα από τα οποία περιείχε 0,5 g ξηρής μάζας, σε φιαλίδια *DURAN*. Για κάθε δείγμα χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός διαλύτης: αιθανόλη, ακετόνη, εξαάνιο και οξικός αιθυλεστέρας. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν εκ νέου στο ελαιόλουτρο στους 80°C για διάρκεια 1,5 ώρας (βλ. Εικόνα Πα.Β.10 Παραρτήματος Β). Μετά την εκχύλιση, ακολούθησε η ίδια διαδικασία φυγοκέντρησης και φασματοφωτομετρικής ανάλυσης όπως περιγράφηκε ανωτέρω.

Για την αξιολόγηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας των εκχυλισμάτων εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι: *FRAP* και *DPPH*, όπως αναλύονται στο θεωρητικό υπόβαθρο του Κεφαλαίου 5.2.8. Η μέθοδος *FRAP* βασίζεται στην ικανότητα αναγωγής του σιδήρου από την τρισθενή (Fe^{3+}) στη δισθενή μορφή (Fe^{2+}), γεγονός που συνοδεύεται από μεταβολή του χρώματος του διαλύματος σε μπλε, ένδειξη της παρουσίας αντιοξειδωτικών ενώσεων όπως το λυκοπένιο και τα καροτενοειδή. Πριν την αντίδραση, πραγματοποιήθηκε αραιώση 1:10 (900 μ L MeOH και 100 μ L δείγματος), ενώ η αντίδραση έγινε με προσθήκη 50 μ L $FeCl_3$ και 50 μ L δείγματος. Στο τελικό στάδιο, χρησιμοποιήθηκε επιπλέον αραιώση 1:5 με μεθανόλη και μετρήθηκαν συνολικά 12 δείγματα (4 διαλύτες $\times$ 3 επαναλήψεις) μαζί με 2 δείγματα τύφλα (*blank*), τα οποία περιείχαν μόνο τον διαλύτη χωρίς εκχύλισμα, για τη σωστή βαθμονόμηση του οργάνου.

Για τη μέθοδο *DPPH*, η οποία χρησιμοποιεί τη «συνθετική» ρίζα *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl* (*DPPH*), αραιώθηκε διάλυμα με 100 μ M *DPPH* σε μεθανόλη. Κατά τη δοκιμή, 25 μ L εκχυλίσματος αναμείχθηκαν με 975 μ L του διαλύματος *DPPH*. Η απορρόφηση μετρήθηκε στα 515 nm με το φασματοφωτόμετρο, με στόχο η αρχική απορρόφηση του *DPPH*

να κυμαίνεται γύρω στο 1. Η μεταβολή του χρώματος από βαθύ μωβ προς πιο ανοιχτό υποδεικνύει την εξουδετέρωση της ελεύθερης ρίζας και την παρουσία αντιοξειδωτικής δράσης.

Τέλος, συγκρίθηκε η εκχυλιστική ικανότητα των τεσσάρων διαλυτών ως προς την περιεκτικότητα σε καροτενοειδή και την αντιοξειδωτική δράση. Η αιθανόλη φαίνεται πως ανέδειξε τη μεγαλύτερη αντιοξειδωτική ικανότητα στα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν. Πέραν της αποδοτικότητάς της, η αιθανόλη πλεονεκτεί σημαντικά καθώς είναι food-grade, δηλαδή ασφαλής για χρήση σε προϊόντα που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους διαλύτες που παρουσιάζουν υψηλότερη τοξικότητα ή περιορισμούς στη χρήση σε τρόφιμα.

6.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και την εφαρμογή των διαφορετικών συνθηκών εκχύλισης καροτενοειδών που περιγράφηκαν, ακολούθησε η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, τόσο σε επίπεδο ποσοτικής απόδοσης όσο και στατιστικής ερμηνείας. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόστηκε σχεδιασμός τύπου *DOE (Design of Experiments)*, ο οποίος αξιοποίησε τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές, X_1 (τύπος διαλύτη ή λόγος διαλύτη/δείγματος), X_2 (χρόνος εκχύλισης) και X_3 (θερμοκρασία), με στόχο να διερευνηθεί η επίδρασή τους στη συνολική συγκέντρωση καροτενοειδών που ανακτώνται από τα υποπροϊόντα τομάτας.

Οι αποκρίσεις του συστήματος, εκφρασμένες ως συνολικά καροτενοειδή (*TPW Total Carotenoids*), παρουσίασαν σημαντική διακύμανση, με τις πραγματικές τιμές να κυμαίνονται από $129.03 \pm 7.23 \mu\text{g/g}$ (*Design Point 5*) έως και $1710.52 \pm 114.6 \mu\text{g/g}$ (*Design Point 13*). Στο διάγραμμα που δημιουργήθηκε από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρατηρούμε υψηλό βαθμό συμφωνίας των σημείων (πραγματικών τιμών) με τη διαγώνιο γραμμή ιδανικής πρόβλεψης. Ειδικά για τα design points 12, 13 και 15, οι προβλεπόμενες τιμές ($875,28 - 1603,52 - 1195,38 \mu\text{g/g}$ αντίστοιχα) ακολουθούν πολύ πιστά τις πραγματικές μετρήσεις ($812,46 - 1710,52 - 1151,2 \mu\text{g/g}$), που δείχνει εξαιρετική προσαρμογή. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την έντονη εξάρτηση της απόδοσης από τις μεταβλητές του συστήματος (βλ. Εικόνα Πα.Γ.1 του Παραρτήματος Γ). Το στατιστικό μοντέλο που προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων εμφάνισε υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης, με τιμή $R^2 = 0.9703$, δηλαδή το 97% της συνολικής διακύμανσης των συγκεντρώσεων εξηγείται από το μοντέλο. Η

τιμή του *Root Mean Square Error* ($RMSE = 119.74$) δείχνει χαμηλό μέσο σφάλμα πρόβλεψης, ενώ το *p-value* του μοντέλου (0.0026) αποδεικνύει τη στατιστική του σημασία, όπως ξεκάθαρα απεικονίζεται και στην Εικόνα Πα.Γ.3 του Παραρτήματος Γ.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των παραμέτρων, ο σημαντικότερος παράγοντας ήταν η θερμοκρασία (X_3), με τιμή συντελεστή 387.95 και υψηλή στατιστική σημαντικότητα ($p = 0.0003$), ακολουθούμενη από τη μεταβλητή X_1 (διαλύτης ή λόγος διαλύτη/δείγματος), με τιμή 295.79 και επίσης πολύ χαμηλό p (0.0009). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση $X_1 \times X_3$ ($p = 0.0062$), γεγονός που δείχνει ότι ο συνδυασμός υψηλής θερμοκρασίας και κατάλληλου διαλύτη μεγιστοποιεί τη συγκέντρωση καροτενοειδών. Αντίθετα, ο χρόνος (X_2) και οι τετραγωνικοί όροι δεν παρουσίασαν στατιστική σημαντικότητα, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι κύριες επιδράσεις υπερσχύουν των πολυωνυμικών ή μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων (βλ. Εικόνα Πα.Γ.3 του Παραρτήματος Γ).

Ο έλεγχος προσαρμογής του μοντέλου (*Lack of Fit test*) επιβεβαίωσε την επάρκεια του μοντέλου ($p = 0.1797 > 0.05$), ενώ το γράφημα παλινδρόμησης έδειξε καλή συμφωνία μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών (βλ. Εικόνα Πα.Γ.3 του Παραρτήματος Γ). Επιπλέον, το διάγραμμα επιθυμητότητας (*desirability plot*) καθόρισε ως ιδανικές συνθήκες εκχύλισης τις $X_1 = 40$, $X_2 = 90$ και $X_3 = 80$ (σε πραγματικές μονάδες), οι οποίες αντιστοιχούν σε μέγιστη προβλεπόμενη συγκέντρωση 1737.49 $\mu\text{g/g}$ με συνολική επιθυμητότητα 0.975, μία τιμή που υποδεικνύει σχεδόν τέλεια βελτιστοποίηση (βλ. Εικόνα Πα.Γ.2 του Παραρτήματος Γ).

Σε δεύτερη φάση, πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη τεσσάρων διαφορετικών διαλυτών υπό σταθερές συνθήκες (80°C για 90 λεπτά) προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση του είδους διαλύτη στην εκχυλιστική ικανότητα. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν το εξάνιο ως τον αποδοτικότερο διαλύτη ($1264.34 \pm 65.75 \mu\text{g/g}$), ενώ ακολούθησαν η αιθανόλη ($1152.97 \pm 26.52 \mu\text{g/g}$), ο οξικός αιθυλεστέρας ($1115.72 \pm 37.93 \mu\text{g/g}$) και η ακετόνη ($1073.21 \pm 24.68 \mu\text{g/g}$). Ωστόσο, παρά τη χαμηλότερη συγκέντρωση, η αιθανόλη υπερέχει σαφώς ως προς τη συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα, σύμφωνα με τις μεθόδους *FRAP* και *DPPH* που εφαρμόστηκαν στη μελέτη (βλ. Εικόνα Πα.Γ.1 του Παραρτήματος Γ).

Η μέθοδος *FRAP* έδειξε ισχυρή ικανότητα των εκχυλισμάτων αιθανόλης να αναγάγουν ιόντα Fe^{3+} σε Fe^{2+} , υποδεικνύοντας σημαντική παρουσία λυκοπενίου και καροτενοειδών, ενώ αντίστοιχα, η μέθοδος *DPPH* έδειξε ότι τα δείγματα που προήλθαν από εκχύλιση με αιθανόλη παρουσίασαν την εντονότερη εξουδετέρωση ελεύθερων ριζών. Το γεγονός αυτό, σε

συνδυασμό με τη χαμηλή τοξικότητα και τη νομικά αποδεκτή χρήση της αιθανόλης ως διαλύτη σε τρόφιμα (*food-grade*), καθιστά την αιθανόλη την πιο κατάλληλη επιλογή για μελλοντική εφαρμογή της μεθόδου σε βιομηχανική κλίμακα ή σε προϊόντα με διατροφική ή φαρμακευτική χρήση.

Συμπερασματικά, τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η βελτιστοποιημένη εκχύλιση καροτενοειδών από παραπροϊόντα τομάτας εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και τον τύπο του διαλύτη, καθώς και από τη συνεργιστική δράση αυτών των δύο παραμέτρων. Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη της απόδοσης, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζει την εφαρμογή της μεθόδου για ανάκτηση πολύτιμων αντιοξειδωτικών ενώσεων από γεωργικά υπολείμματα, συμβάλλοντας στη βιώσιμη αξιοποίηση του αγροδιατροφικού τομέα.

6.5 Συζήτηση

Η παρούσα πειραματική μελέτη προσέφερε μια ουσιαστική ευκαιρία εμβάθυνσης στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο κρίσιμοι παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, ο χρόνος εκχύλισης και κυρίως η επιλογή διαλύτη, επηρεάζουν την αποδοτικότητα της εκχύλισης καροτενοειδών από παραπροϊόντα βιομηχανικής τομάτας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, αν και αναμενόμενα σε ορισμένα σημεία, ανέδειξαν επιπλέον ενδιαφέρουσες πτυχές που επιβεβαιώνουν αλλά και εμπλουτίζουν τη θεωρητική γνώση που είχαμε για τη συγκεκριμένη διαδικασία.

Αρχικά, η ιδιαίτερη σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση της απόδοσης εξαγωγής, δεν αποτελεί έκπληξη, καθώς είναι ήδη γνωστό ότι η θέρμανση διευκολύνει τη διάχυση των μορίων του διαλύτη εντός της φυτικής μήτρας και ενισχύει τη διαλυτότητα των λιποδιαλυτών ενώσεων όπως τα καροτενοειδή. Αυτό που καθίσταται σαφές από τη μελέτη είναι ότι η αύξηση της θερμοκρασίας όχι μόνο επιταχύνει τη διαδικασία, αλλά φαίνεται να δρα συνεργιστικά όταν συνδυάζεται με έναν κατάλληλο διαλύτη, γεγονός που αναδεικνύει τη δυναμική σχέση μεταξύ φυσικοχημικών παραμέτρων και χημικών χαρακτηριστικών του υλικού στόχου. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει τη θεωρία της εκλεκτικής αλληλεπίδρασης των διαλυτών με τα συστατικά του δείγματος, και μπορεί να καθοδηγήσει μελλοντικές στρατηγικές για αποδοτικότερη εκχύλιση.

Από την άλλη πλευρά, παρόλο που ο χρόνος εκχύλισης θεωρείται κρίσιμος σε πολλές μεθοδολογίες, τα πειραματικά ευρήματα δείχνουν πως μετά από ένα ορισμένο χρονικό σημείο η επιπλέον έκθεση του δείγματος στον διαλύτη δεν προσφέρει αξιόλογη αύξηση στην απόδοση. Αντίθετα, υπάρχει πιθανότητα να προκληθούν φαινόμενα αποσταθεροποίησης των ενώσεων λόγω παρατεταμένης θερμικής επίδρασης ή οξείδωσης, ιδίως όταν δεν υφίστανται συνθήκες πλήρους απουσίας οξυγόνου. Αυτό το εύρημα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας σε πιθανούς μελλοντικούς σχεδιασμούς σε βιομηχανική κλίμακα, όπου ο αποδοτικός χρονισμός αποτελεί κρίσιμο παράγοντα κόστους.

Ειδική αναφορά αξίζει να γίνει στην επιλογή των διαλυτών. Η σύγκριση τεσσάρων διαφορετικών τύπων (αιθανόλη, ακετόνη, εξάνιο και οξικός αιθυλεστέρας) έδειξε ότι ενώ διαλύτες όπως το εξάνιο είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί στην εκχύλιση λιποδιαλυτών ενώσεων, δεν μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλοι για εφαρμογές που σχετίζονται με τρόφιμα ή φαρμακευτικά προϊόντα, λόγω της τοξικότητας και των ρυθμιστικών περιορισμών που τα συνοδεύουν. Αντιθέτως, η αιθανόλη, παρόλο που δεν έδωσε τη μέγιστη συγκέντρωση καροτενοειδών, υπερίσχυσε στις δοκιμές αντιοξειδωτικής ικανότητας. Αυτό το στοιχείο αναδεικνύει μια σημαντική πτυχή που πολλές φορές παραβλέπεται: δεν είναι μόνο η ποσότητα της εκχυλιζόμενης ένωσης που έχει σημασία, αλλά και η βιοδραστικότητα και σταθερότητά της υπό τις επιλεγμένες συνθήκες.

Η διαφοροποίηση της απορρόφησης μεταξύ των δειγμάτων στις δύο διαφορετικές μεθόδους (*FRAP* και *DPPH*) μπορεί να ερμηνευτεί και μέσα από το πρίσμα της εκλεκτικότητας των μεθόδων. Ενώ η μέθοδος *FRAP* ευνοεί τη μέτρηση ενώσεων που δρουν μέσω αναγωγικών μηχανισμών, η *DPPH* βασίζεται περισσότερο στη δυνατότητα δέσμευσης ελευθέρων ριζών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ελαφρές διαφορές μεταξύ των δύο ως προς την τελική αποτίμηση της αντιοξειδωτικής δράσης. Η ομοφωνία όμως μεταξύ των δύο μεθόδων ως προς την ανωτερότητα της αιθανόλης, προσδίδει επιπλέον αξιοπιστία στα αποτελέσματα.

Στην πράξη, οι παρατηρήσεις αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για τον κλάδο της βιώσιμης αγροδιατροφικής βιομηχανίας. Η χρήση αιθανόλης ως πράσινου διαλύτη ευθυγραμμίζεται με τις απαιτήσεις για περιβαλλοντικά φιλικές διεργασίες και ανοίγει προοπτικές για ανάκτηση φυσικών χρωστικών και αντιοξειδωτικών χωρίς να τίθενται σε κίνδυνο η ασφάλεια του καταναλωτή ή η συμμόρφωση με τη νομοθεσία. Παράλληλα, η δυνατότητα αξιοποίησης των παραπροϊόντων της τομάτας ως πηγή υψηλής προστιθέμενης αξίας, ενισχύει τις αρχές της

κυκλικής οικονομίας και προσφέρει λύσεις σε προβλήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση αγροτικών αποβλήτων.

Αναμφισβήτητα, τα ευρήματα της εργασίας αυτής ενισχύουν την πεποίθηση ότι η στοχευμένη τροποποίηση των πειραματικών παραμέτρων, όταν στηρίζεται σε ορθολογική σχεδίαση (*DOE*) και συνοδεύεται από στατιστική αξιολόγηση, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές και πρακτικά εφαρμόσιμες καινοτομίες στον τομέα της φυσικοχημικής απομόνωσης βιοδραστικών ενώσεων. Η δυνατότητα ακριβούς πρόβλεψης της εκχυλιστικής απόδοσης δεν αποτελεί μόνο ένα θεωρητικό πλεονέκτημα, αλλά προσφέρει σημαντικά εργαλεία σε όσους σχεδιάζουν και υλοποιούν παραγωγικές διαδικασίες με βάση φυσικά υπολείμματα.

Κλείνοντας, η εργασία δεν περιορίζεται στην απλή τεκμηρίωση της αποτελεσματικότερης μεθόδου εκχύλισης. Φέρνει στο φως τον ουσιαστικό ρόλο της διεπιστημονικής προσέγγισης στην αξιοποίηση γεωργικών παραπροϊόντων, συνδυάζοντας χημεία, τεχνολογία τροφίμων και περιβαλλοντική διαχείριση. Το γεγονός αυτό καθιστά την παρούσα μελέτη χρήσιμη όχι μόνο για τον ακαδημαϊκό διάλογο, αλλά και για την πρακτική εφαρμογή της γνώσης στην παραγωγή καινοτόμων, φιλικών προς το περιβάλλον προϊόντων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η τομάτα, πέρα από το αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας διατροφής, αποτελεί και μία από τις σημαντικότερες βιομηχανικές καλλιέργειες παγκοσμίως. Η μεταποίησή της για την παραγωγή προϊόντων όπως οι σάλτσες, οι πολτοί και τα κονσερβοποιημένα είδη, συνοδεύεται από την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων παραπροϊόντων (φλούδες, σπόρους, ίνες) που πολύ συχνά καταλήγουν ως απόβλητα. Κι όμως, αυτές οι φαινομενικά «άχρηστες» ύλες είναι γεμάτες με πολύτιμες βιοδραστικές ενώσεις, όπως τα καροτενοειδή και ειδικότερα το λυκοπένιο, οι οποίες έχουν ήδη αποδειχθεί ευεργετικές για την υγεία του ανθρώπου. Μέσα από αυτό το πρίσμα, τα υποπροϊόντα της τομάτας αποκτούν πλέον νέα αξία και αντιμετωπίζονται όχι ως απόβλητα, αλλά ως ευκαιρία.

Η αξιοποίηση αυτών των συστατικών απαιτεί σύγχρονες, φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους εκχύλισης. Οι λεγόμενες «πράσινες τεχνολογίες», με χρήση ασφαλών διαλυτών όπως η αιθανόλη και με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, έρχονται να δώσουν λύσεις εκεί που παλαιότερες, πιο τοξικές μέθοδοι παρουσίαζαν κινδύνους. Η επιστημονική κοινότητα σήμερα στρέφεται προς βιώσιμες διεργασίες που δεν θέτουν σε κίνδυνο την υγεία ούτε επιβαρύνουν το περιβάλλον – και σε αυτό το πλαίσιο, η εργασία αυτή φιλοδοξεί να δώσει ένα μικρό αλλά ουσιαστικό λιθαράκι.

Το πειραματικό σκέλος της παρούσας μελέτης σχεδιάστηκε με σκοπό να ελέγξει την αποτελεσματικότητα διαφόρων διαλυτών και θερμοκρασιών στην εκχύλιση των καροτενοειδών από υποπροϊόντα τομάτας, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο λυκοπένιο και στην αντιοξειδωτική τους δράση. Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν απέδειξαν με σαφήνεια ότι η αιθανόλη, ειδικά σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (80°C) και μακράς διάρκειας εκχύλισης (90 λεπτά), προσφέρει τη μεγαλύτερη απόδοση και το πιο ισχυρό αντιοξειδωτικό αποτέλεσμα. Αυτή η διαπίστωση αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία αν αναλογιστεί κανείς ότι η αιθανόλη είναι *food-grade* διαλύτης, άρα κατάλληλη για τρόφιμα και ασφαλής για τον καταναλωτή. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των μεθόδων *FRAP* και *DPPH* ενίσχυσαν την εικόνα αυτή, προσφέροντας στατιστικά σημαντικές αποδείξεις για την ισχυρή αντιοξειδωτική ικανότητα των εκχυλισμάτων.

Η σύνδεση μεταξύ θεωρίας και πράξης γίνεται εδώ ιδιαίτερα έντονη: όσα αναφέρθηκαν στο θεωρητικό υπόβαθρο, από τη σημασία του λυκοπενίου έως τις αρχές των πράσινων

εκχυλιστικών μεθόδων, επιβεβαιώνονται μέσα από την πειραματική προσέγγιση. Με απλά λόγια, η εργασία αυτή αποδεικνύει ότι μπορούμε να μετατρέψουμε το «περιττό» σε κάτι πολύτιμο, αξιοποιώντας έξυπνα τις φυσικές δυνατότητες των φυτικών υλών και τις σύγχρονες τεχνικές εργαστηριακής ανάλυσης.

Αναμφισβήτητα, τα ευρήματα της παρούσας μελέτης ανοίγουν τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή. Ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές προτάσεις:

1. **Διεύρυνση της πειραματικής βάσης:** Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν περισσότερους τύπους διαλυτών, όπως μείγματα αιθανόλης με νερό ή φυτικά έλαια, αλλά και εναλλακτικές θερμοκρασίες και χρόνους εκχύλισης ώστε να δημιουργηθεί ένα πιο ολοκληρωμένο προφίλ απόδοσης.
2. **Εφαρμογή σε πιλοτική ή ημιβιομηχανική κλίμακα:** Η εργαστηριακή επιτυχία της αιθανόλης ως διαλύτη θα μπορούσε να επεκταθεί σε μεγαλύτερη κλίμακα, ώστε να εξεταστεί η βιωσιμότητα της εφαρμογής της στη βιομηχανική πράξη.
3. **Ενσωμάτωση των εκχυλισμάτων σε προϊόντα:** Η αξιοποίηση των εκχυλισμάτων σε τρόφιμα λειτουργικής διατροφής, συμπληρώματα ή καλλυντικά είναι μια άκρως ενδιαφέρουσα προοπτική που αξίζει να διερευνηθεί, με έμφαση στη σταθερότητα, τη βιοδιαθεσιμότητα και την αποδοχή από τους καταναλωτές.
4. **Ανάπτυξη κυκλικών μοντέλων μεταποίησης:** Η εργασία αυτή μπορεί να αποτελέσει βάση για σχεδιασμό καινοτόμων κυκλικών μοντέλων στη βιομηχανία τροφίμων, όπου τα παραπροϊόντα δεν απορρίπτονται αλλά επανεισάγονται ως πρώτη ύλη σε νέες γραμμές παραγωγής.
5. **Περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση:** Τέλος, είναι απαραίτητο να συμπληρωθεί η παρούσα προσέγγιση με αναλύσεις κόστους-οφέλους και μελέτες του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ώστε να τεκμηριωθεί η συνολική βιωσιμότητα και ωφέλεια της προτεινόμενης μεθόδου.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία δεν περιορίζεται απλώς σε μια εργαστηριακή διερεύνηση, αλλά επιδιώκει να αναδείξει έναν νέο τρόπο σκέψης γύρω από τη διαχείριση των φυτικών υπολειμμάτων. Μέσα από μία προσέγγιση που βασίζεται στην επιστήμη, τον σεβασμό στο περιβάλλον και την καινοτομία, προσφέρει ένα παράδειγμα για το πώς η έρευνα μπορεί να

παράξει λύσεις με πραγματικό κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο. Η ανακάλυψη κρύβεται συχνά στα πιο απλά πράγματα, και αυτή τη φορά, ίσως να βρίσκεται στο εσωτερικό μιας φλούδας τομάτας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

- Αθανασίου, Μ., & Χριστοδούλου, Ε. (2019). *Τεχνολογίες εξαγωγής και καθαρισμού φυσικών προϊόντων φυτικής προέλευσης*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Αναγνωστόπουλος, Σ. (2021). *Αξιοποίηση γεωργικών υποπροϊόντων στη βιομηχανία τροφίμων*. Εκδόσεις Αγροτική Βιβλιοθήκη.
- Αναστασίου, Ε., & Παναγιώτου, Δ. (2021). Τεχνολογίες εξαγωγής φυσικών ενώσεων από υποπροϊόντα τροφίμων. *Επιστήμη και Τεχνολογία Τροφίμων*, 17(1), 39–47.
- Αντωνιάδης, Κ., & Ράμμος, Δ. (2020). *Τεχνολογίες τροφίμων και εφαρμογές στον αγροδιατροφικό τομέα*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη.
- Αποστολάτος, Α., & Μαυρίδης, Π. (2016). *Τεχνικές χημικής ανάλυσης φυσικών προϊόντων*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
- Βαβλάμης, Ν., & Τριανταφυλλίδης, Ι. (2018). *Φυτικά καροτενοειδή: Ιδιότητες και μέθοδοι απομόνωσης*. Εκδόσεις Ζήτη.
- Βασιλειάδης, Δ., & Αντωνίου, Γ. (2019). *Καινοτόμες τεχνικές εκχύλισης βιοδραστικών ενώσεων στη βιομηχανία τροφίμων*. Αθήνα: Εκδόσεις Τεχνολογίας Τροφίμων.
- Γαλανάκης, Κ. (2020). *Καινοτόμες τεχνολογίες στην αξιοποίηση αγροτικών υποπροϊόντων*. Χανιά: Ένωση Ελληνικών Ερευνητικών Ινστιτούτων.
- Γαλανάκης, Κ. (2021). *Καινοτόμες τεχνολογίες εκχύλισης φυσικών προϊόντων: Αρχές, εξοπλισμός και εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη.
- Γεωργούλης, Χ., & Μανώλης, Δ. (2021). *Αναλυτικές μέθοδοι προσδιορισμού φυσικών καροτενοειδών*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Δεληγιάννης, Χ. (2015). *Τεχνολογίες πράσινης εκχύλισης: Εργαστηριακές και βιομηχανικές εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Μακεδονίας.
- Ζαμπέλης, Ι., & Μπαλατσούρας, Θ. (2020). *Περιβαλλοντικά φιλικές μέθοδοι εκχύλισης: Εφαρμογές στον αγροδιατροφικό τομέα*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Ζαχαριάς, Γ., & Παπαδόπουλος, Ι. (2021). *Χημεία φυσικών προϊόντων: Θεωρία και πράξη*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Μακεδονίας.
- Ζαχαριάς, Ν., & Παπαδόπουλος, Ε. (2021). *Εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης στη βιομηχανία τροφίμων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

- Ζήκος, Γ. (2017). *Διαλυτική εκχύλιση βιοδραστικών ενώσεων από φυτικά υπολείμματα: Θεωρία και πρακτική*. Αθήνα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Αθηνών.
- Καλαϊτζής, Π. (2018). *Βιοδραστικές ενώσεις στη βιομηχανική τομάτα και τρόποι εκχύλισης*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστήμιο Μακεδονίας.
- Καλογεροπούλου, Σ., & Παππάς, Α. (2021). *Αξιοποίηση παραπροϊόντων τομάτας: Τεχνολογικές δυνατότητες και προοπτικές*. Αθήνα: Εκδόσεις Αγροτικής Καινοτομίας.
- Καραγεωργίου, Α., & Σταυριανός, Γ. (2017). *Τεχνικές εκχύλισης βιοδραστικών ενώσεων από φυτικά υλικά*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Μακεδονίας.
- Καραγιάννης, Σ., & Χαλικιάς, Ι. (2022). *Καινοτόμες μέθοδοι εκχύλισης φυτικών βιοδραστικών ενώσεων*. Εκδόσεις Γ. Δαρδανός.
- Καραγιάννη, Σ., & Κουγιουμτζής, Σ. (2020). Υπερήχοι στην ανάκτηση βιοδραστικών ουσιών από φυτικά υλικά. *Χημεία και Περιβάλλον*, 26(3), 112–120.
- Καραλή, Μ., & Μπελογιάννη, Α. (2017). Εφαρμογές των υπερήχων στη βιομηχανία τροφίμων. *Σύγχρονες Μέθοδοι Επεξεργασίας Τροφίμων*, 2, 65–73.
- Καραμήτσου, Μ., & Παπαδόπουλος, Χ. (2016). *Βασικές αρχές εκχύλισης: Εφαρμογές στον φυτοχημικό έλεγχο*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Καραμπελιώτης, Σ., & Μαντζουράτος, Δ. (2020). *Τεχνολογία Επεξεργασίας Φυτικών Προϊόντων: Από την Πρώτη Ύλη στα Βιοδραστικά Συστατικά*. Αθήνα: Εκδόσεις Ίων.
- Καραχρήστος, Π. (2016). *Χημική Ανάλυση Τροφίμων – Εργαστηριακές Μέθοδοι και Εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλης.
- Κατσαρός, Ν., & Θεοδωρίδης, Γ. (2015). *Φασματοφωτομετρικές και χρωματογραφικές τεχνικές στον έλεγχο τροφίμων*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Κιτσοπανίδης, Γ., & Καμενίδης, Χ. (2003). *Αγροτική οικονομία και πολιτική*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Κουτρούμπας, Π., & Χατζηευσταθίου, Σ. (2018). Κλασικές μέθοδοι εκχύλισης και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. *Πρακτικά Συνεδρίου Αγροχημείας*, 45(2), 88–94.
- Κουτρούμπας, Σ., & Χατζηευσταθίου, Ν. (2018). *Μέθοδοι εκχύλισης και προσδιορισμού βιοδραστικών ενώσεων σε φυτικά υλικά*. Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- Κουτσούκος, Α. (2018). *Καροτενοειδή και αντιοξειδωτικά στη βιομηχανία τροφίμων: Τεχνολογίες απομόνωσης και εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Κωνσταντινίδης, Α., & Παπαγεωργίου, Ε. (2020). Αξιοποίηση των μικροκυμάτων στην εκχύλιση φυτικών αντιοξειδωτικών. *Ελληνικό Περιοδικό Χημικής Τεχνολογίας*, 14(2), 77–85.

- Λεοντίου, Γ., & Παπανικολάου, Ι. (2019). *Βασικές αρχές φυσικοχημείας και εφαρμογές στη βιοτεχνολογία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Μανδαλάκης, Δ., & Γεωργιάδου, Ι. (2019). Μηχανισμοί σπηλαίωσης στην εκχύλιση με υπερήχους. *Πρακτικά 12ου Πανελληνίου Συνεδρίου Βιομηχανικής Χημείας*, 256–262.
- Μαυρογένης, Σ., & Παναγιωτίδης, Κ. (2020). *Σύγχρονες τεχνικές εκχύλισης φυσικών ενώσεων*. Εκδόσεις Ιωνική.
- Μαυρομμάτης, Δ., & Κολοβός, Ν. (2018). Η εφαρμογή της εκχύλισης με μικροκύματα στη φυτοχημεία. *Πρακτικά 8ου Πανελληνίου Συνεδρίου Χημείας Τροφίμων*, 412–418.
- Μιχαηλίδης, Π., & Αντωνίου, Γ. (2021). Φυσικοχημικές μεταβολές στην εκχύλιση λυκοπενίου με μικροκύματα. *Τεχνολογία Τροφίμων και Διατροφής*, 9(1), 49–55.
- Μιχαηλίδης, Σ. (2017). *Αναλυτική Χημεία Φυτικών Δειγμάτων*. Πειραιάς: Εκδόσεις Σταμούλης.
- Μουντζούρης, Ι. (2024). *Παραγωγή φυλλωδών λαχανικών με υπερλίπανση ιχνοστοιχείων σε αεροπονικό θερμοκήπιο*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Μπουρνάκας, Β. (2007). Μυκητοκτόνα συνιστώμενα για την τομάτα. *Γεωργία - Κτηνοτροφία*, 10, 86–87.
- Νασούλης, Ι., & Κωστούλας, Μ. (2019). *Τεχνικές διαχωρισμού και καθαρισμού φυτικών εκχυλισμάτων*. Πάτρα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΑΠ.
- Νικολαΐδης, Δ., & Κανελλόπουλος, Β. (2020). *Χημεία Τροφίμων: Σύνθεση, Μεταβολές και Ανάλυση Βιοδραστικών Συστατικών*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Παναγιωτόπουλος, Γ. (2018). *Φυτικά εκχυλίσματα και φυσικά αντιοξειδωτικά: Από την εκχύλιση στη χρήση σε τρόφιμα και καλλυντικά*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Παπαδοπούλου, Α., & Μπαλάσκας, Σ. (2016). *Βιοδραστικές Ενώσεις των Τροφίμων: Δομή, Ιδιότητες και Εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Ιων.
- Πετροπουλάκης, Α. (2018). *Βιοδραστικές ενώσεις και λειτουργικά τρόφιμα*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Ρήγας, Π., & Κοντογεώργης, Δ. (2019). Εφαρμογές ανάδευσης στην αποδοτικότητα εκχύλισης καροτενοειδών. *Επιστημονικά Χρονικά Τροφίμων και Διατροφής*, 14(2), 65–72.
- Σέμος, Α. (2004). *Οικονομική ανάλυση της αγροτικής παραγωγής και μεταποίησης*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλης.
- Σιγάλα, Α., & Θεοδωρίδης, Χ. (2016). *Εκχύλιση και καθαρισμός φυσικών προϊόντων: σύγχρονες τεχνικές και εφαρμογές*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

- Σταθόπουλος, Α., & Γρηγοριάδης, Ν. (2020). Χρήση οργανικών διαλυτών για την απομόνωση φυτοχημικών. *Δελτίο Ελληνικής Εταιρείας Χημείας Τροφίμων*, 9(1), 33–41.
- Στεργίου, Α., & Νικολαΐδης, Π. (2022). Καινοτόμες μέθοδοι αξιοποίησης αγροβιομηχανικών αποβλήτων. *Αγροτεχνολογία και Περιβάλλον*, 8(1), 91–100.
- Φωτιάδου, Μ., & Κοσμίδου, Ε. (2019). *Τεχνολογίες Βιοεπεξεργασίας και Εκχύλισης Φυτικών Υλικών*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Χατζηγεωργίου, Β., & Τσερκέζης, Ν. (2018). Τεχνικές εκχύλισης λιποδιαλυτών συστατικών από φρούτα και λαχανικά. *Ελληνικό Περιοδικό Τεχνολογίας Τροφίμων*, 12(2), 142–148.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Adkins, S. (2000). Tomato spotted wilt virus – Disease management and control. *Plant Disease*, 84(6), 545–556.
- Agarwal, S., & Rao, A. V. (2000). Tomato lycopene and its role in human health and chronic diseases. *CMAJ*, 163(6), 739–744.
- Aitken, R. J., Gibb, Z., Baker, M. A., Drevet, J. R., & Gharagozloo, P. (2016). Causes and consequences of oxidative stress in spermatozoa. *Reproduction, Fertility and Development*, 28(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1071/RD15325>
- Anastasiadis, F., Apostolidou, I., & Michailidis, A. (2020). Mapping sustainable tomato supply chain in Greece: A framework for research. *Foods*, 9(5), 539. <https://doi.org/10.3390/foods9050539>
- Anthon, G. E., & Barrett, D. M. (2008). Factors affecting tomato paste viscosity and its measurement. *Journal of Food Science*, 73(7), E273–E277.
- Arab, L., & Steck, S. (2000). Lycopene and cardiovascular disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 71(6), 1691S–1695S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/71.6.1691S>
- Assar, D. H., Vidalle, M. C., Chopra, M., & Hafizi, S. (2016). Lycopene acts through multiple mechanisms to inhibit proliferation of human prostate cancer cells. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 610, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.06.011>
- Bachau, P. C. (1981). Nutritional value of tomatoes: A comprehensive review. *Journal of Nutritional Science*, 15(3), 245–251.

- Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., & Vorobiev, E. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77, 773–798. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015>
- Baswan, S. M., Katta, R., & Wolf, J. E. (2016). Sunscreens: Dermatologic and Cosmetic Use. *Journal of Drugs in Dermatology*, 15(1), 9–16.
- Bhandari, S. R., & Kumar, P. (2021). Lycopene content, antioxidant activity, and quality of tomato fruit: A review. *Food Reviews International*, 37(3), 243–260. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1600545>
- Boileau, T. W., Boileau, A. C., & Erdman, J. W. (1999). Bioavailability of all-trans and cis-isomers of lycopene. *Experimental Biology and Medicine*, 222(4), 345–351.
- Borguini, R. G., & Ferraz da Silva Torres, E. A. (2009). Tomatoes and tomato products as dietary sources of antioxidants. *Food Reviews International*, 25(4), 313–325. <https://doi.org/10.1080/87559120903155859>
- Bose, K. S., & Agarwal, S. (2007). Lycopene and tomato products as therapeutic agents for cardiovascular disease. *Risk Factors in Coronary Artery Disease*, 40(6), 186–190.
- Black, L. L., Jones, J. B., & Somodi, G. C. (2001). Bacterial spot of tomato and pepper: Identification and management. *Plant Disease*, 85(6), 682–688.
- Blum, A., Monir, M., Wirsansky, I., & Ben-Ami, M. (2007). The effect of tomato-rich diet on cardiovascular risk factors. *Clinical Investigations in Arteriosclerosis*, 10(4), 1–6.
- Boileau, T. W.-M., Boileau, A. C., & Erdman, J. W. (2002). Bioavailability of all-trans and cis-isomers of lycopene. *Experimental Biology and Medicine*, 227(10), 914–919. <https://doi.org/10.1177/153537020222701003>
- Boileau, T. W.-M., Moore, A. C., & Erdman, J. W. (1999). Carotenoids and vitamin A. In M. Shils, J. A. Olson, M. Shike, & A. C. Ross (Eds.), *Modern Nutrition in Health and Disease* (9th ed., pp. 525–541). Williams & Wilkins.
- Bourassa, P., et al. (2013). Ferulic acid induces gene expression changes in colon cancer cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(8), 15177–15191. <https://doi.org/10.3390/ijms140815177>
- Boydston, R. A., & Williams, M. M. (2015). Weed management in tomato: Current status and future challenges. *HortScience*, 50(3), 323–327.

- Bramley, P. M. (2002). Regulation of carotenoid formation during tomato fruit ripening and development. *Journal of Experimental Botany*, 53(377), 2107–2113. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf227>
- Bramley, P. M., Fraser, P. D., & Sandmann, G. (1992). Phytoene synthesis in tomatoes: Changes during fruit ripening. *Phytochemistry*, 31(2), 451–455.
- Britton, G. (1995). Structure and properties of carotenoids in relation to function. *FASEB Journal*, 9(15), 1551–1558. <https://doi.org/10.1096/fasebj.9.15.8529832>
- Calniquer, J., Steinberg, D., & Sionov, R. V. (2022). Synergistic effect of tomato and rosemary polyphenols against UV-induced oxidative damage in skin cells. *Phytotherapy Research*, 36(5), 2179–2189. <https://doi.org/10.1002/ptr.7431>
- Calvo, M. M., García, M. L., & Selgas, M. D. (2021). Tomato by-products: A valuable source of bioactive compounds with potential applications in the food industry. *Food Science and Technology International*, 27(3), 181–194. <https://doi.org/10.1177/1082013220942045>
- Candido, V., Miccolis, V., Castronuovo, D., & Boari, F. (2020). Soil solarization and mulching to manage weeds and increase yield in tomato under greenhouse conditions. *Horticultural Science*, 55(4), 456–462.
- Canene-Adams, K., Campbell, J. K., Zaripheh, S., Jeffery, E. H., & Erdman, J. W. (2005). The tomato as a functional food. *Journal of Nutrition*, 135(5), 1226–1230.
- Carr, A., & Frei, B. (1999). Does vitamin C act as a pro-oxidant under physiological conditions? *FASEB Journal*, 13(9), 1007–1024.
- Chaerani, R., & Voorrips, R. E. (2006). Tomato early blight (*Alternaria solani*): The pathogen, genetics, and breeding for resistance. *Plant Breeding*, 125(1), 1–9.
- Chan, J. M., Gann, P. H., & Giovannucci, E. L. (2005). Role of diet in prostate cancer development and progression. *Journal of Clinical Oncology*, 23(32), 8152–8160. <https://doi.org/10.1200/JCO.2005.03.086>
- Chen, L., Stacewicz-Sapuntzakis, M., Duncan, C., Sharifi, R., Ghosh, L., & van Breemen, R. B. (2002). Oxidative DNA damage in prostate cancer patients consuming tomato sauce-based entrees as a whole-food intervention. *Journal of the National Cancer Institute*, 94(21), 1575–1581. <https://doi.org/10.1093/jnci/94.21.1575>
- Clinton, S. K., Emenhiser, C., Schwartz, S. J., Bostwick, D. G., Williams, A. W., Moore, B. J., & Erdman, J. W. (1996). cis-trans Lycopene isomers, carotenoids, and retinol in the human prostate. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 5(10), 823–833.

- Corrales, M., Toepfl, S., Butz, P., Knorr, D., & Tauscher, B. (2008). Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: A comparison. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(1), 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.06.002>
- Corrêa, I. C. S., Pinto, L. A. A., & Rodrigues, S. (2008). Enzymatic pre-treatment of tomato pomace to enhance the recovery of lycopene by supercritical carbon dioxide. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 447–452.
- Ddamulira, G., Swennen, R., Batte, M., & Lorenzen, J. (2022). Soil amendments and pH management in vegetable crop production: A critical review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 1391–1407.
- Desneux, N., Luna, M. G., Guillemaud, T., & Urbaneja, A. (2010). The invasive South American tomato pinworm, *Tuta absoluta*: Biology, distribution and damage, a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 377–392.
- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3010–3014. <https://doi.org/10.1021/jf0115589>
- Diretto, G., Welsch, R., Stringer, M. A., Pizarro, L., Frohnmeyer, H., Stigliani, A. L., & Al-Babili, S. (2007). The role of carotenoids in plant stress responses and fruit quality. *Plant Cell Reports*, 26(11), 2027–2038. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0376-2>
- Donohoe, D. R., et al. (2012). The microbiome and butyrate regulate energy metabolism and autophagy in the mammalian colon. *Cell Metabolism*, 13(5), 517–526. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2011.02.018>
- Dorais, M., Demers, D.-A., Papadopoulos, A. P., & Gosselin, A. (2001). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews*, 26, 239–319.
- Dorais, M., Ehret, D. L., & Papadopoulos, A. P. (2008). Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: From the seed to the consumer. *Phytochemistry Reviews*, 7(2), 231–250.
- Engelhard, Y. N., Gazer, B., & Paran, E. (2006). Natural antioxidants from tomato extract reduce blood pressure in patients with grade-1 hypertension: A double-blind, placebo-controlled pilot study. *American Heart Journal*, 151(1), 100.e1–100.e6. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2005.04.077>

- Esquivel, P., Sánchez, D. M., & Vargas, A. (2020). Green extraction technologies for high-value compounds from tomato by-products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 95, 232–245.
- Farinetti, A., Zurlo, V., Manenti, A., Coppi, F., & Mattioli, A. V. (2020). Mediterranean diet and colorectal cancer: A systematic review. *Nutrition Journal*, 19(1), 92. <https://doi.org/10.1186/s12937-020-00618-2>
- Ferreira, F. A., & Teixeira, A. S. (2019). Synergistic effects of herbicide and fertilizer application on *Cyperus* control in tomato. *Journal of Agricultural Science*, 157(2), 289–298.
- Figueriredo, A. M., Almeida, J. L., & Santos, M. R. (2022). Combined effects of lycopene and metformin on glycaemic control and antioxidant markers in diabetic rats. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 190, 109996.
- Fraser, P. D., Truesdale, M. R., Bird, C. R., Schuch, W., & Bramley, P. M. (1994). Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development. *Plant Physiology*, 105(1), 405–413.
- Fraser, P. D., & Bramley, P. M. (2004). The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids. *Progress in Lipid Research*, 43(3), 228–265.
- Ford, N. A., & Erdman, J. W. (2012). Are lycopene and β -carotene metabolites bioactive? *Nutrition Reviews*, 70(12), 711–721. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2012.00543.x>
- Fordham, J. R., Schwab, W., & Weller, R. F. (2001). Lycopene accumulation in tissues and plasma of healthy humans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(2), 578–581.
- Fraser, P. D., & Bramley, P. M. (2004). The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids. *Progress in Lipid Research*, 43(3), 228–265. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2003.10.002>
- Gartner, C., Stahl, W., & Sies, H. (1997). Lycopene is more bioavailable from tomato paste than from fresh tomatoes. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 66(1), 116–122. <https://doi.org/10.1093/ajcn/66.1.116>
- Giovannucci, E. (1999). Tomatoes, tomato-based products, lycopene, and cancer: Review of the epidemiologic literature. *Journal of the National Cancer Institute*, 91(4), 317–331. <https://doi.org/10.1093/jnci/91.4.317>
- Giovannucci, E., Rimm, E. B., Liu, Y., Stampfer, M. J., & Willett, W. C. (2002). A prospective study of tomato products, lycopene, and prostate cancer risk. *Journal of the National Cancer Institute*, 94(5), 391–398. <https://doi.org/10.1093/jnci/94.5.391>

- Gomez, P. A., Baldelli, A., & Chemat, F. (2022). Thermodynamics and optimization of supercritical CO₂ extraction of carotenoids: Advances and applications. *The Journal of Supercritical Fluids*, 179, 105428. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105428>
- González, L. A., Salinas, C., & Pérez, J. (2021). Supercritical fluid extraction of bioactive compounds from plants: Fundamentals and applications. *Industrial Crops and Products*, 164, 113354. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113354>
- Gould, W. A. (1974). *Tomato production, processing and technology*. Westport, CT: AVI Publishing Company.
- Graydon, R. J., & Chan, J. M. (2006). Lycopene supplementation and IGF-1 modulation: an update. *Nutrition Reviews*, 64(4), 182–189. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2006.tb00198.x>
- Greco, E., Romano, S., Iacobelli, M., Ferrero, S., Baroni, E., Minasi, M. G., & Tesarik, J. (2005). ICSI in cases of sperm DNA damage: beneficial effect of oral antioxidant treatment. *Human Reproduction*, 20(9), 2590–2594. <https://doi.org/10.1093/humrep/dei091>
- Grether-Beck, S., Marini, A., Jaenicke, T., Stahl, W., & Krutmann, J. (2017). Molecular evidence that oral supplementation with lycopene-rich tomato nutrient complex protects against UVA1 radiation-induced gene expression. *Experimental Dermatology*, 26(6), 552–555. <https://doi.org/10.1111/exd.13330>
- Gross, J. (1991). *Pigments in vegetables: Chlorophylls and carotenoids*. Springer.
- Gruda, N. (2005). Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(3), 227–247. <https://doi.org/10.1080/07352680591008628>
- Harris, D. C. (2015). *Quantitative chemical analysis* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.
- Harms-Ringdahl, M., Jenssen, D., & Henriksson, J. (2006). Tomato juice intake suppressed oxidative DNA damage in human peripheral blood lymphocytes. *Nutrition and Cancer*, 54(1), 45–48. https://doi.org/10.1207/s15327914nc5401_6
- Hart, D. J., & Scott, K. J. (1995). Development and evaluation of an HPLC method for the analysis of carotenoids in foods, and the measurement of the carotenoid content of vegetables and fruits commonly consumed in the UK. *Food Chemistry*, 54(1), 101–111.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). *The water-culture method for growing plants without soil* (Circular 347). California Agricultural Experiment Station.

- Hochmuth, G., & Hochmuth, R. (2001). *Keys to successful tomato and cucumber production in perlite media*. University of Florida IFAS Extension. Ανακτήθηκε από <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS169>
- Hunt, G. (1980). Phenolic constituents of tomato fruit cuticles. *Phytochemistry*, 19(7), 1415–1419. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)83890-4](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)83890-4)
- Ilahy, R., Hdider, C., Lenucci, M. S., Tlili, I., & Dalessandro, G. (2011). Phytochemical composition and antioxidant activity of high-lycopene tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars grown in southern Italy. *Scientia Horticulturae*, 127(3), 255–261.
- Jankauskienė, J., Brazaitytė, A., Bobinas, Č., & Duchovskis, P. (2013). Effect of transplant growth stage on tomato productivity. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 12(2), 143–152.
- Jones, J. B. (2008). *Tomato plant culture: In the field, greenhouse, and home garden* (2nd ed.). CRC Press.
- Kader, A. A. (2017). *Postharvest technology of horticultural crops*. University of California Agriculture and Natural Resources.
- Kim, J. Y., Park, S. J., & Kim, J. Y. (2010). Dietary tomato intake and cancer risk: A review of epidemiological studies. *Cancer Science*, 101(6), 1241–1246. <https://doi.org/10.1111/j.1349-7006.2010.01502.x>
- Kim, Y., Jeon, S., & Lee, J. (2019). Lycopene suppresses angiogenesis mediated by vascular endothelial growth factor in human umbilical vein endothelial cells. *Nutrients*, 11(3), 552. <https://doi.org/10.3390/nu11030552>
- Klee, H. J., & Giovannoni, J. J. (2011). Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annual Review of Genetics*, 45, 41–59. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-110410-132507>
- Krinsky, N. I., & Johnson, E. J. (2005). Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Molecular Aspects of Medicine*, 26(6), 459–516. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2005.10.001>
- Kuti, J. O., & Konuru, H. B. (2005). Effects of genotype and cultivation environment on lycopene content in red-ripe tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(12), 2021–2026.
- Lang, Q., & Wai, C. M. (2001). Supercritical fluid extraction in herbal and natural product studies — A practical review. *Talanta*, 53(4), 771–782.

- Lazcano, C., Arnold, J., Tato, A., Zaller, J. G., & Domínguez, J. (2009). Compost and vermicompost as nursery pot components: Effects on tomato plant growth and morphology. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(4), 944–951.
- Leonardi, C., Guichard, S., & Bertin, N. (2013). High temperature and plant density affect dry matter partitioning and fruit quality in tomato. *Scientia Horticulturae*, 99(3–4), 215–224.
- Leskovar, D. I., & Cantliffe, D. J. (1991). Comparison of plant establishment methods, transplant age, and container cell size for tomato production. *HortScience*, 26(2), 141–144.
- Lhamo, T., Gyalmo, T., Pem, T., & Bajgai, Y. (2022). Effect of different pruning systems on yield and quality of tomato grown under greenhouse. *Bhutanese Journal of Agriculture*, 5(1), 71–82.
- Li, X., Xu, J., Xu, C. F., & Deng, X. (2014). Dietary lycopene and the risk of stroke: A meta-analysis of observational studies. *Molecular Nutrition & Food Research*, 58(2), 201–208. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201300553>
- Lin, C. H., & Chen, B. H. (2005a). Stability of lycopene during heating and illumination in a model system. *Food Chemistry*, 90(4), 891–897. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.06.033>
- Louis, P., Hold, G. L., & Flint, H. J. (2014). The gut microbiota, bacterial metabolites and colorectal cancer. *Nature Reviews Microbiology*, 12(10), 661–672.
- Luengo, E., Álvarez, I., & Raso, J. (2014). Improving the pressing extraction of polyphenols of orange peel by pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 23, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.12.004>
- Machmudah, S., Goto, M., Sasaki, M., & Hirose, T. (2018). Supercritical CO₂ extraction of lycopene: Recent trends and perspectives. *Separation and Purification Technology*, 194, 141–152.
- Mauromicale, G., Sortino, O., & Longo, A. M. G. (2019). Effects of compost application on soil fertility, microbial community and yield performance in greenhouse tomato cultivation. *Scientia Horticulturae*, 252, 320–329.
- Miller, N. J., Sampson, J., Candeias, L. P., Bramley, P. M., & Rice-Evans, C. A. (1996). Antioxidant activities of carotenes and xanthophylls. *FEBS Letters*, 384(3), 240–242. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(96\)00363-4](https://doi.org/10.1016/0014-5793(96)00363-4)
- Monaco, T. J., Weller, S. C., & Ashton, F. M. (2002). *Weed science: Principles and practices*. John Wiley & Sons.

- Moreno, J. C., Mi, J., Agrawal, S., Kossler, S., Tureckova, V., Tarkowska, D., ... & Al-Babili, S. (2021). Carotenoid metabolism in plants: The role of transcriptional regulation and the potential for metabolic engineering. *Journal of Experimental Botany*, 72(14), 5127–5141. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab152>
- Moriones, E., & Navas-Castillo, J. (2000). Tomato yellow leaf curl virus, an emerging virus complex causing epidemic diseases worldwide. *Virus Research*, 71(1–2), 123–134.
- Mortensen, A., Skibsted, L. H., & Truscott, T. G. (2001). Carotenoids and carotenoid radicals: A summary from the workshop on carotenoid radical formation and their relevance to human biology. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 385(1), 13–19. <https://doi.org/10.1006/abbi.2000.2151>
- Moretti, C. L., Sargent, S. A., Huber, D. J., Calbo, A. G., & Puschmann, R. (1998). Chemical composition and physical properties of pericarp, locule, and placental tissues of tomatoes with internal bruising. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(4), 656–660. <https://doi.org/10.21273/JASHS.123.4.656>
- Muller, P., Li, X. P., & Niyogi, K. K. (2001). Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. *Plant Physiology*, 125(4), 1558–1566. <https://doi.org/10.1104/pp.125.4.1558>
- Napoli, C., de Nigris, F., Williams-Ignarro, S., Pignalosa, O., Sica, V., & Ignarro, L. J. (1999). Oxidation-sensitive mechanisms in the arterial wall: A link between inflammation and atherosclerosis. *International Journal of Molecular Medicine*, 4(1), 17–26.
- Ngouajio, M., Wang, G., & Goldy, R. (2007). Withholding of drip irrigation between transplanting and flowering increases the yield of field-grown tomato under plastic mulch. *Agricultural Water Management*, 87(3), 285–291.
- Nieman, D. C., Gillitt, N. D., Chen, G., Zhang, Q., Sha, W., & Kay, C. D. (2018). Tomato-based softgel capsules increase plasma carotenoids and reduce post-exercise plasma myoglobin and muscle soreness in trained runners. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 15(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12970-018-0255-0>
- Nikam, T. D., Taware, P. B., & Shinde, B. D. (2022). Effects of *Pongamia pinnata* oil on weed control and physiological response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Plant Protection Research*, 62(3), 355–364.
- Norat, T., Rinaldi, S., Overvad, K., Grønbaek, H., Tjønneland, A., Halkjaer, J., ... & Riboli, E. (2002). Blood biomarkers of IGF-1 and risk of prostate cancer: A European prospective study. *Lancet Oncology*, 3(9), 562–569. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(02\)00820-9](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(02)00820-9)

- Nowicki, M., Foolad, M. R., Nowakowska, M., & Kozik, E. U. (2012). Potato and tomato late blight caused by *Phytophthora infestans*: An overview of pathology and resistance breeding. *Plant Disease*, 96(1), 4–17.
- Nutrova. (2021). Clinical trial: Effects of collagen and antioxidant supplementation on skin quality in Indian women. *Nutrova Research Center*.
- O’Kennedy, N., Crosbie, L., Whelan, S., Luther, V., Horgan, G., & Duttaroy, A. K. (2006). Effects of tomato extract on platelet aggregation in healthy humans: A randomized, double-blinded, placebo-controlled trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 84(3), 561–569. <https://doi.org/10.1093/ajcn/84.3.561>
- Obermüller-Jevic, U. C., Olano-Martin, E., Wood, S. M., Corbacho, A. M., Luan, Y. Y., Souquet, J. M., ... & Southon, S. (2003). Lycopene inhibits the growth of normal human prostate epithelial cells in vitro. *Journal of Nutrition*, 133(2), 335–339. <https://doi.org/10.1093/jn/133.2.335>
- Odell, G. B. (1992). Stand establishment and yield responses to improved direct-seeding methods of tomatoes. *HortScience*, 27(11), 1185–1187.
- Okada, T., Sugishita, T., Murakami, T., Murai, H., & Saikusa, T. (2000). Effect of the defatted rice germ enriched with GABA on sleeplessness and autonomic disorder. *Journal of the Japanese Society of Nutrition and Food Science*, 53(2), 87–90.
- Oliveira, M. R. V., Henneberry, T. J., & Anderson, P. (2001). History, current status, and collaborative research projects for the whitefly, *Bemisia tabaci*. *Crop Protection*, 20(9), 709–723.
- Padayatty, S. J., et al. (2003). Vitamin C as an antioxidant: Evaluation of its role in disease prevention. *Journal of the American College of Nutrition*, 22(1), 18–35.
- Peet, M. M., & Welles, G. (2005). Greenhouse tomato production. In N. Janick (Ed.), *Horticultural Reviews* (Vol. 31, pp. 157–225). John Wiley & Sons.
- Preet, R., Mohapatra, P., & Das, D. (2015). Lycopene inhibits growth of human colon cancer cells by inducing apoptosis and cell cycle arrest. *PLOS ONE*, 10(4), e0123471. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123471>
- Przybylska, S. (2020). Lycopene—a bioactive carotenoid offering multiple health benefits: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 71(4), 449–460. <https://doi.org/10.1080/09637486.2019.1678878>
- Puértolas, E., & Barba, F. J. (2016). Electrotechnologies applied to valorization of by-products from vegetables industry. In F. J. Barba, A. M. Sant’Ana, & S. Orlén (Eds.),

Innovative Technologies for Food Preservation (pp. 539–560). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811031-7.00015-8>

- Raiola, A., Rigano, M. M., Calafiore, R., Frusciante, L., & Barone, A. (2014). Enhancing the health-promoting effects of tomato fruit for biofortified food. *Mediators of Inflammation*, 2014, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2014/139873>
- Rančić, D., Quarrie, S. P., & Pećinar, I. (2010). Anatomy of tomato fruit and fruit pedicel during fruit development. In Méndez-Vilas, A. (Ed.), *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education* (Vol. 2, pp. 851–861). Formatex Research Center.
- Rao, A. V., & Agarwal, S. (1999). Role of lycopene as antioxidant carotenoid in the prevention of chronic diseases: A review. *Nutrition Research*, 19(2), 305–323. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(98\)00193-6](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(98)00193-6)
- Rao, A. V., & Rao, L. G. (2007). Carotenoids and human health. *Pharmacological Research*, 55(3), 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2007.01.012>
- Rajendran, R., Puppala, D., & Gunasekaran, S. (2005). Thermal isomerization of lycopene: Kinetics and modeling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(17), 6767–6774. <https://doi.org/10.1021/jf050230s>
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (8th ed.). CRC Press.
- Reverchon, E., & De Marco, I. (2006). Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter. *The Journal of Supercritical Fluids*, 38(2), 146–166.
- Robert, B., Frank, H. A., Sandmann, G., & Young, A. J. (2004). *The photochemistry of carotenoids*. Springer.
- Rodriguez, J. B., Ritter, R. M., & Rodriguez-Amaya, D. B. (1975). Carotenoids in seeds of different tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 23(4), 716–720.
- Rodriguez-Amaya, D. B. (2016). *Food carotenoids: Chemistry, biology and technology*. John Wiley & Sons.
- Rolland, F., Baena-Gonzalez, E., & Sheen, J. (2012). Sugar sensing and signaling in plants: Conserved and novel mechanisms. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 667–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105507>
- Ronen, G., Carmel-Goren, L., Zamir, D., & Hirschberg, J. (2000). An alternative pathway to β -carotene formation in plant chromoplasts discovered by map-based cloning of Beta

and old-gold color mutations in tomato. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(20), 11102–11107. <https://doi.org/10.1073/pnas.190177497>

- Rosato, V., Temple, N. J., La Vecchia, C., Castellan, G., Tavani, A., & Guercio, V. (2019). Mediterranean diet and cardiovascular disease: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *European Journal of Nutrition*, 58(1), 173–191. <https://doi.org/10.1007/s00394-018-1832-2>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2005). Growth, yield, and ion content of grafted melon plants grown under saline conditions. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(4), 496–502. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511975>
- Rowles, J. L., Ranard, K. M., Smith, J. W., An, R., & Erdman, J. W. (2018). Increased dietary and circulating lycopene are associated with reduced prostate cancer risk: a systematic review and meta-analysis. *Prostate Cancer and Prostatic Diseases*, 21, 319–336. <https://doi.org/10.1038/s41391-018-0039-6>
- Rymal, K. S., & Nakayama, T. O. M. (1974). Carotenoid composition of tomato seed: Genetic control and inheritance of seed pigmentation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 99(4), 336–338.
- Sablani, S. S., Andrews, P. K., Davies, N. M., Walters, T., & Mohekar, P. R. (2006). Effect of thermal treatments on stability of lycopene and beta-carotene in tomato juice. *Food Chemistry*, 95(2), 191–195.
- Sahin, K., Tuzcu, M., Sahin, N., Ali, S., & Kucuk, O. (2009). Tomato powder prevents lipid peroxidation induced by high dietary cholesterol in rats. *Nutrition Research*, 29(9), 700–706. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2009.09.002>
- Sahin, A., Yilmaz, A., & Yildiz, G. (2023). Valorization of tomato processing by-products in livestock feed. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 21(1), 8819–8829. https://pjlss.edu.pk/pdf_files/2025_1/8819-8829.pdf
- Saini, R. K., Nile, S. H., & Park, S. W. (2020). Carotenoids from fruits and vegetables: Chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities. *Food Research International*, 76, 735–750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.047>
- Sainju, U. M., Dris, R., & Singh, B. (2005). Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment*, 3(1), 168–183.
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S., & Kamat, M. Y. (2022). Lycopene as a functional food ingredient in the management of diabetes: Mechanisms and evidence from animal models. *Functional Foods in Health and Disease*, 12(3), 101–110.

- Salgado, J. M., Rodríguez, N., & Cortés, S. (2020). Eco-friendly extraction methods for natural antioxidants from agro-industrial waste. *Food and Bioproducts Processing*, 122, 75–86.
- Saltveit, M. E. (2005). Postharvest biology and handling. In *Principles of postharvest handling* (pp. 5–22). Academic Press.
- Salyaev, R. K., Rekoslavskaya, N. I., Stolbikov, A. S., Kiselev, S. L., & Shchelkunov, S. N. (2010). Immune response in mice after oral immunization with transgenic tomato fruits expressing hepatitis B surface antigen. *Genetika*, 46(11), 1457–1460. <https://doi.org/10.1134/S1022795410110051>
- Sandmann, G., Romer, S., & Fraser, P. D. (2006). Carotenoid biosynthesis and metabolic engineering in plants. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 448(2), 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2006.03.008>
- Sasser, J. N., & Freckman, D. W. (1987). A world perspective on nematology: The role of the society. In J. A. Veech & D. W. Dickson (Eds.), *Vistas on Nematology* (pp. 7–14). Society of Nematologists.
- Savvy Gardening. (2022). *How to harden off tomato plants: Insider secrets from a pro.* Ανακτήθηκε από <https://savvygardening.com/how-to-harden-off-tomato-plants/>
- Scarano, A., Butelli, E., De Santis, S., Di Matteo, A., Piccinno, M., Rizzello, F., ... & Martin, C. (2018). Combined dietary anthocyanins, flavonols and stilbenoids alleviate inflammatory bowel disease symptoms in mice. *Frontiers in Nutrition*, 5, 75. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00075>
- Schrader, W. (2020). *Hardening off plants: Getting transplants ready for the garden.* University of California Cooperative Extension. Ανακτήθηκε από <https://ucanr.edu/>
- Shchelkunov, S. N., Salyaev, R. K., Pozdnyakov, S. G., & Rekoslavskaya, N. I. (2006). Plants as a source of edible vaccines. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 42(2), 117–126. <https://doi.org/10.1134/S0003683806020022>
- Schierle, J., Bretzel, W., Bühler, I., Faccin, N., Hess, D., Steiner, K., & Schüep, W. (1997). Content and isomeric ratio of lycopene in food and human blood plasma. *Food Chemistry*, 59(3), 459–465.
- Schwingshackl, L., Schwedhelm, C., Hoffmann, G., Knüppel, S., Iqbal, K., Andriolo, V., Bechthold, A., & Boeing, H. (2020). Food groups and risk of all-cause mortality: A systematic review and meta-analysis of prospective studies. *American Journal of Clinical Nutrition*, 112(2), 245–256. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz263>

- Schwarz, D., Roupahel, Y., Colla, G., & Venema, J. H. (2014). Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: Thermal stress, water stress, and organic production in greenhouse environments. *Scientia Horticulturae*, 127(2), 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.003>
- Sharma, S. K., & Le Maguer, M. (1996a). Lycopene in tomatoes and tomato products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 36(1–2), 165–185. <https://doi.org/10.1080/10408399609527728>
- Sharma, S. K., & Le Maguer, M. (1996b). Lycopene in tomatoes and tomato products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 36(1–2), 55–69. <https://doi.org/10.1080/10408399609527722>
- Shi, J., & Le Maguer, M. (2000). Lycopene in tomatoes: Chemical and physical properties affected by food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(1), 1–42.
- Shidfar, F., Bahrololoumi, S., Shidfar, S., & Hajimiresmaiel, S. J. (2011). The effect of tomato consumption on blood pressure and cardiovascular risk markers in type 2 diabetic patients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(3), 289–294. <https://doi.org/10.3109/09637486.2010.536613>
- Silva, C., Ferreira, S., & Rocha, C. (2021). Sustainable valorization of tomato by-products to obtain bioactive compounds. *Molecules*, 27(5), 1701. <https://doi.org/10.3390/molecules27051701>
- Singh, D. K., Chauhan, R. S., & Verma, S. K. (2017). Hydroponics: A modern technique of soilless culture. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(5), 1523–1527.
- Song, B., Liu, K., Zhang, N., & Wang, L. (2017). The association between lycopene and stroke risk: A meta-analysis of observational studies. *Scientific Reports*, 7, 40978. <https://doi.org/10.1038/srep40978>
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer.
- Stahl, W., & Sies, H. (2005). Bioactivity and protective effects of natural carotenoids. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease*, 1740(2), 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2004.12.006>
- Takeda, A., Goto, T., & Kawada, T. (2021). Lycoperside H, a tomato seed saponin, alleviates atopic dermatitis-like symptoms via IL-33 signaling inhibition. *Journal of Functional Foods*, 77, 104344. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104344>
- Takeoka, G. R., Dao, L., Flessa, S., Gillespie, D. M., Jewell, W. T., Huebner, B., Bertow, D., & Ebeler, S. E. (2001). Processing effects on lycopene content and antioxidant activity

of tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(8), 3713–3717. <https://doi.org/10.1021/jf010027u>

- Tanaka, T., Shnimizu, M., & Moriwaki, H. (2012). Cancer chemoprevention by carotenoids. *Molecules*, 17(3), 3202–3242. <https://doi.org/10.3390/molecules17033202>
- Tang, F. Y., Pai, M. H., & Wang, X. D. (2018). Lycopene suppresses prostate cancer cell angiogenesis by downregulating VEGF expression. *Nutrition and Cancer*, 70(5), 712–722. <https://doi.org/10.1080/01635581.2018.1488890>
- The Tomato Genome Consortium. (2012). The tomato genome sequence provides insights into fleshy fruit evolution. *Nature*, 485(7400), 635–641.
- Tito, A., Barbulova, A., Zappelli, C., Pezzola, S., Rinaldi, A. O., Cucchiara, B., ... & Apone, F. (2022). Tomato stem cell extract protects human skin cells from heavy metal toxicity through DNA repair and collagen synthesis activation. *International Journal of Cosmetic Science*, 44(1), 76–85. <https://doi.org/10.1111/ics.12769>
- Tiwari, A., & Cummings, D. (2009). Carotenoids from tomatoes: Functional and health properties. In V. R. Preedy & R. R. Watson (Eds.), *Tomatoes and Tomato Products: Nutritional, Medicinal and Therapeutic Properties* (pp. 25–44). CRC Press.
- Tonucci, L. H., Holden, J. M., Beecher, G. R., Khachik, F., Davis, C. S., & Mulokozi, G. (1995). Carotenoid content of foods: An evaluation of analytical data. *Journal of Food Composition and Analysis*, 8(4), 292–307.
- Tsitsimpikou, C., Tsarouhas, K., Kioukia-Fougia, N., Skondra, C., Fragkiadaki, P., Papalexis, P., ... & Tsatsakis, A. M. (2014). Dietary supplementation with tomato-juice in patients with metabolic syndrome: A suggestion to alleviate detrimental clinical parameters. *Food and Chemical Toxicology*, 74, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.09.003>
- Tully, T., Ballard, C., & Maher-Edwards, G. (2022). Dietary antioxidants and cognitive aging: Clinical and epidemiological perspectives. *Journal of Nutrition and Aging*, 26(3), 211–225. <https://doi.org/10.1007/s12603-021-1705-6>
- University of Kentucky. (2024). *Septoria leaf spot of tomato*. Ανακτήθηκε από <https://plantpathology.ca.uky.edu/>
- Upadhyaya, B., Rao, A. V., & Campbell, N. R. (2011). Tomato products supplementation improves antioxidant biomarkers in healthy adults: a dose-response study. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2011, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2011/750343>

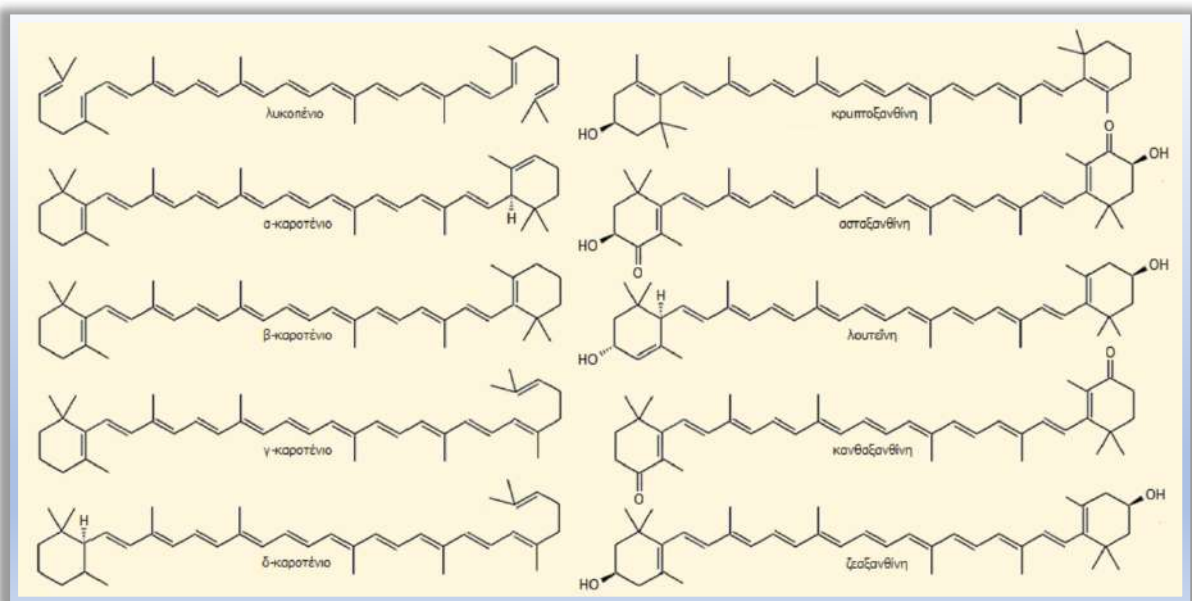
- Valero-Muñoz, M., Martín-Fernández, B., Ballesteros, S., de la Fuente, E., & Lahera, V. (2014). Tomato sauce supplementation improves oxidative stress parameters and lipid profile in overweight rats. *Food & Function*, 5(8), 2007–2011. <https://doi.org/10.1039/c4fo00220c>
- Van Gorkom, G. N. Y., Klein Wolterink, R. G. J., Van Elssen, C. H. M. J., Wieten, L., Germeraad, W. T. V., & Bos, G. M. J. (2018). Influence of vitamin C on lymphocytes: an overview. *Antioxidants*, 7(3), 41. <https://doi.org/10.3390/antiox7030041>
- van het Hof, K. H., West, C. E., Weststrate, J. A., & Hautvast, J. G. A. J. (2000). Dietary factors that affect the bioavailability of carotenoids. *The Journal of Nutrition*, 130(3), 503–506. <https://doi.org/10.1093/jn/130.3.503>
- Vaughan, J. G., & Geissler, C. (1997). *The New Oxford book of food plants*. Oxford University Press.
- Wang, Y., Chen, J., Xu, Z., & Liu, Y. (2021). Neuroprotective effects of lycopene against Parkinson's disease in experimental models: Mechanisms and clinical implications. *Frontiers in Nutrition*, 8, 678253. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.678253>
- Watzl, B., Bub, A., Briviba, K., & Rechkemmer, G. (1999). Supplementation of a low-carotenoid diet with tomato or carrot juice modulates immune functions in healthy men. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 43(6), 301–302. <https://doi.org/10.1159/000012796>
- Wertz, K., Siler, U., Goralczyk, R., & Hunziker, W. (2004). Lycopene induces growth inhibition and pro-apoptotic effects in human prostate cancer cells. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 74(6), 403–411. <https://doi.org/10.1024/0300-9831.74.6.403>
- Williams, C. A., Ramasamy, R., & Lipshultz, L. I. (2020). Lycopene and male infertility. *Asian Journal of Andrology*, 22(5), 500–505. https://doi.org/10.4103/aja.aja_35_20
- Xia, J., Wang, F., Wang, C., & Zhang, Y. (2018). Lycopene protects against DEN-induced hepatic tumorigenesis by inhibiting the growth of gut microbiota and reducing LPS levels in mice. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2104. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02104>
- Yamamoto, Y., Isoyama, E., Sofikitis, N., & Miyagawa, I. (2006). Effects of antioxidant treatment on sperm motility in patients with asthenozoospermia. *Journal of Urology*, 176(6), 2357–2360. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2006.07.142>
- Yang, J., Zhang, L., Liu, M., Hu, Y., & Tan, H. (2022). Esculeoside A, a tomato glycoalkaloid, ameliorates glucose metabolism in high-fat-diet-induced diabetic mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(18), 5457–5464.

- Yeats, T. H., Buda, G. J., Wang, Z., Chehanovsky, N., Moyle, L. C., Jetter, R., Schaffer, A. A., & Rose, J. K. C. (2012). The fruit cuticles of wild tomato species exhibit architectural and chemical diversity, providing a new model for studying the evolution of cuticle function. *The Plant Journal*, 69(4), 655–666. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04820.x>
- Yu, B., Wang, C. Y., Wang, Y., & Wang, L. (2019). Effect of β -carotene on reproductive function in mice. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 70, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2019.04.002>
- Yu, X., Zhang, J., Li, Q., Wang, L., & Li, D. (2020). Lycopene improves cognitive function and reduces neuroinflammation in Alzheimer's disease models. *Nutritional Neuroscience*, 23(12), 940–950. <https://doi.org/10.1080/1028415X.2019.1601191>
- Zanfini, A., Corbini, G., La Rosa, C., Dreassi, E., & Mulinacci, N. (2010). Antioxidant activity of tomato lipophilic extracts and interactions between carotenoids and α -tocopherol in synthetic mixtures. *LWT - Food Science and Technology*, 43(1), 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.06.007>
- Zechmeister, L. (1962). Cis-trans isomerism in carotenoids and polyenes. *Chemical Reviews*, 62(2), 269–295.
- Zhang, L. X., D'Andrea, M. R., & D'Andrea, D. L. (2006). Connexins in prostate gland development and carcinogenesis. *Histology and Histopathology*, 21(6), 613–619. <https://doi.org/10.14670/HH-21.613>
- Zhang, Y., D'Andrea, M. R., D'Andrea, D. L., & Erdman, J. W., Jr. (2009). *Lycopene inhibits the proliferation of human prostate cancer cells through regulation of the cell cycle*. *Journal of the National Cancer Institute*, 271(1), 34–42.
- Zhang, Y., Zeng, T., Guo, Y., & Wang, W. (2014). Tomato extract prevents endothelial dysfunction and atherosclerosis in rats by reducing oxidative stress and inflammation. *Mediators of Inflammation*, 2014, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/198356>
- Zhao, X., Li, Z., Liu, M., Xu, T., & Zhang, Y. (2021). Protective effects of tomato pomace powder on cerebral ischemia through modulation of oxidative stress and inflammation. *Biology*, 11(239), 1–44. <https://doi.org/10.3390/biology11020239>
- Zhu, Y., Xia, M., Yang, L., & Wang, X. (2022). The role of lycopene and tomato-based products in diabetes prevention and management: A review of current evidence. *Antioxidants*, 11(1), 45. <https://doi.org/10.3390/antiox11010045>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

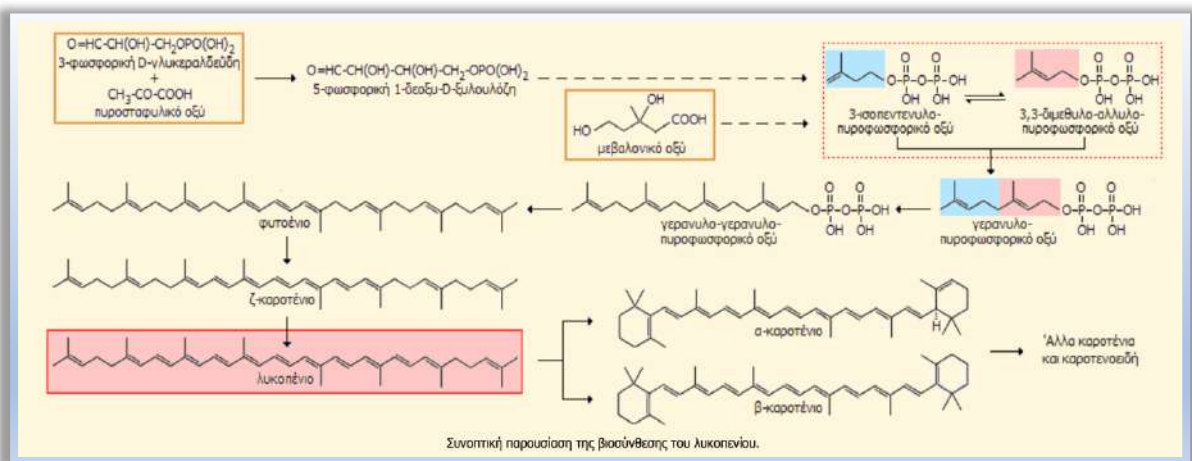
Παράρτημα Α

Δομή Καροτενοειδών



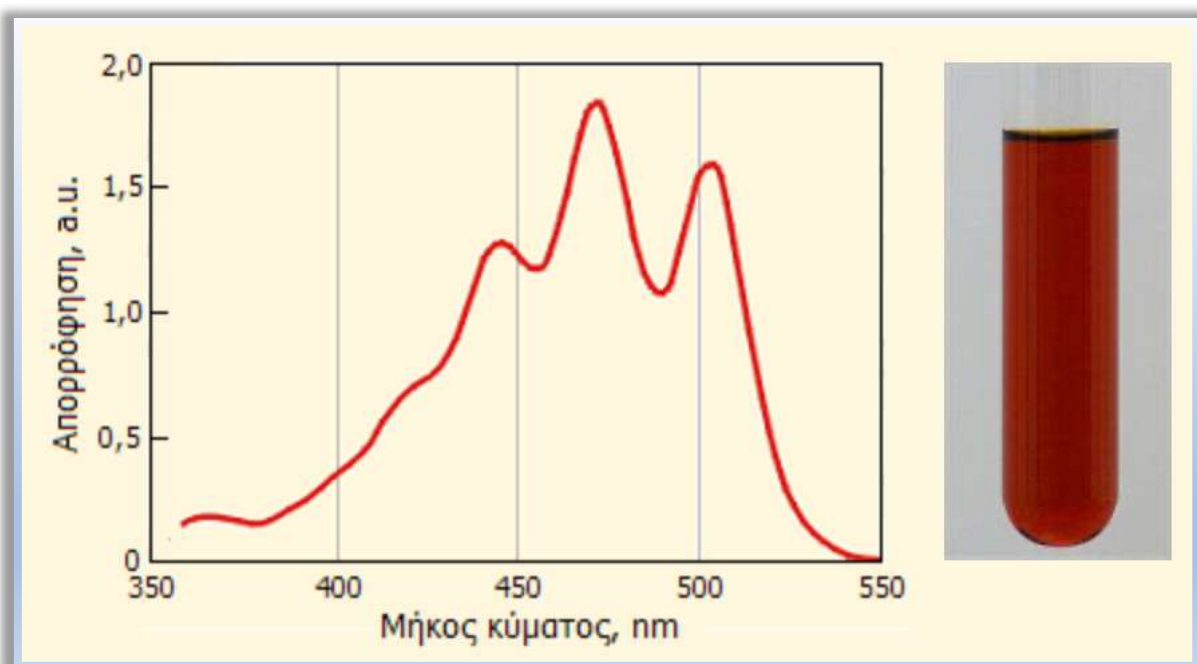
Εικόνα Πα.Α.1. Βασικά Καροτενοειδή - Καροτένια στα Αριστερά και Ξανθοφύλλες στα Δεξιά.

Πηγή: http://webapps.chem.uoa.gr/efs/chemicals/chem_lycopene.htm

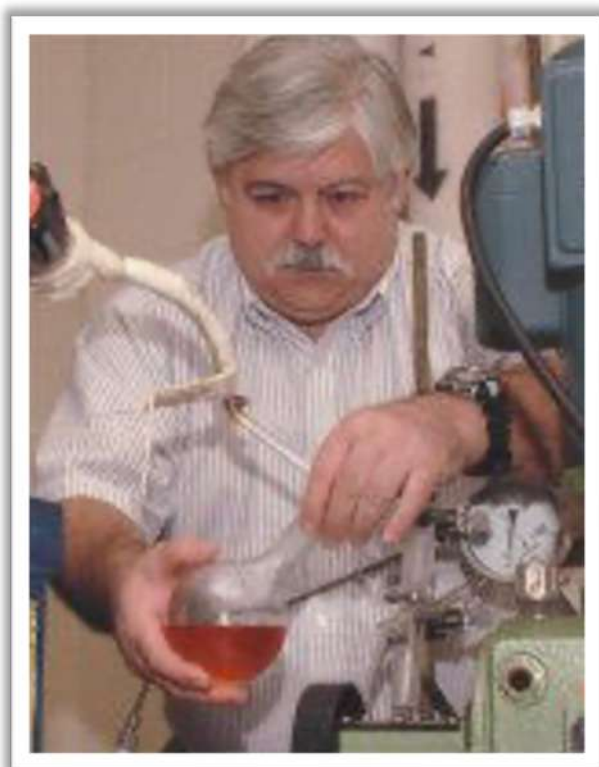


Εικόνα Πα.Α.2. Βιοσύνθεση του Λυκοπενίου.

Πηγή: http://webapps.chem.uoa.gr/efs/chemicals/chem_lycopene.htm#10



Εικόνα Πα.Α.3. Φάσμα απορρόφησης Λυκοπενίου (Αριστερά) και Διάλυμα Λυκοπενίου σε Οργανικό Διαλύτη (Δεξιά).
 Πηγή: http://webapps.chem.uoa.gr/efs/chemicals/chem_lycopene.htm#10



Εικόνα Πα.Α.4. Παραλαβή Λυκοπενίου.
 Πηγή: <https://blogs.ifas.ufl.edu/news/>

Λυκοπένιο σε φυτικά προϊόντα

Πηγή	μg/g υγρού δείγματος
Γκακ	2000 - 2300
Ωμή τομάτα	8,8 - 42
Χυμός τομάτας	86 - 100
Τοματοπολτός	63 - 131
Ketchup τομάτας	124
Καρπούζι	23 - 72
Ροζ γκρέιπφρουτ	3,6 - 34
Ροζ γουάβα	54
Παπάγια	20 - 53
Βερίκοκο	<0,1

Εικόνα Πα.Α.5. Περιεκτικότητα Λυκοπενίου σε Διαφορετικά Προϊόντα. Πηγή: <https://books.google.gr/books?id=B7P8HQimBAIC&printsec=frontcover&hl=el#v=onepage&q&f=false>

Παράρτημα Β

Πειραματική Διαδικασία



Εικόνα Πα.Β.1. Δίσκοι Εναπόθεσης Προϊόντος.
Πηγή: Φωτογράφιση κατά την διαδικασία.



Εικόνα Πα.Β.2. Μετρήσεις Biobase.
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



Εικόνα Πα.Β.3. Τοποθέτηση Προϊόντος στο Biobase.
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



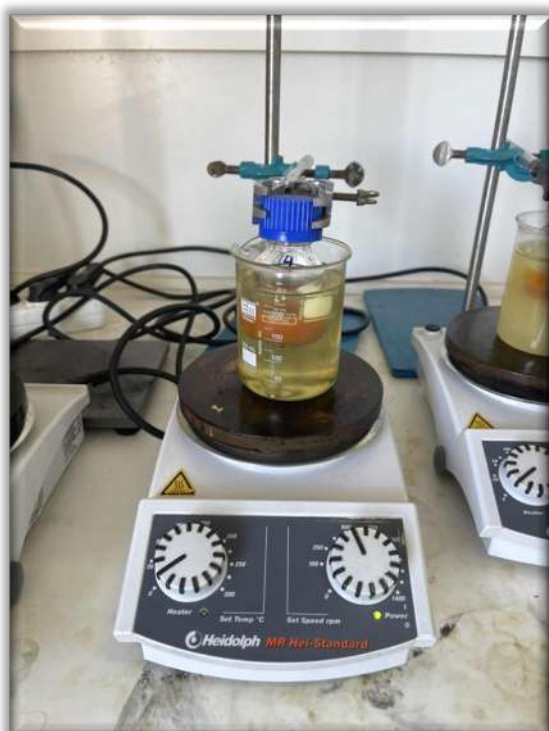
Εικόνα Πα.Β.4. Ηλεκτρικός Θρυμματιστής - Μπλέντερ.
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



Εικόνα Πα.Β.5. Εργαστηριακό Κόσκινο.
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



Εικόνα Πα.Β.6. Ηλεκτρομαγνητικός Αναδευτήρας
Κοσκίνων (Fritsch Analysette 3).
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



Εικόνα Πα.Β.7. Θέρμανση Δείγματος σε Ελαιόλουτρο.
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



Εικόνα Πα.Β.8. Φυγόκεντρος (4500 rpm).
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



Εικόνα Πα.Β.9. Ρυθμιστής Θερμοκρασίας.
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



Εικόνα Πα.Β.10. Θέρμανση Δείγματος σε Ελαιόλουτρο.
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.



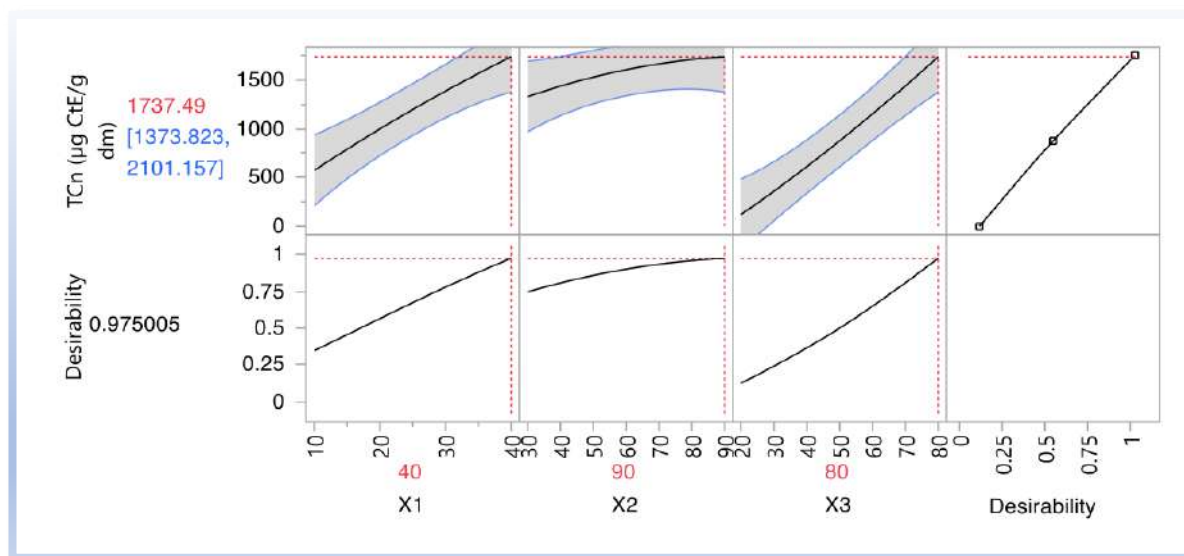
Εικόνα Πα.Β.11. Φασματοφωτόμετρο Διπλής Δέσμης
(Shimadzu UV-1900i).
Πηγή: Φωτογραφικό Αρχείο Ερευνητή.

Παράρτημα Γ
Αποτελέσματα Μελέτης

Design Point	Independent Variables			Responses	
	X_1	X_2	X_3	TPW Total Carotenoids Actual	TPW Total Carotenoids Predicted
1	1	-1	0	765.67 ± 30.63	763,52
2	-1	1	0	251.48 ± 5.03	253,63
3	0	0	0	662.92 ± 37.12	634,34
4	0	1	-1	230.94 ± 9.93	121,79
5	-1	0	-1	129.03 ± 7.23	236,03
6	1	0	-1	238.77 ± 7.4	285,10
7	0	0	0	558.23 ± 27.91	634,34
8	0	-1	-1	381.97 ± 16.42	337,79
9	-1	-1	0	264.83 ± 5.56	202,01
10	0	-1	1	706.85 ± 28.98	816,00
11	0	0	0	681.87 ± 17.05	634,34
12	1	1	0	812.46 ± 20.31	875,28
13	1	0	1	1710.52 ± 114.6	1603,52
14	-1	0	1	515.74 ± 28.88	469,41
15	0	1	1	1151.2 ± 25.33	1195,38
EtOH	1	1	1	1152.97 ± 26.52 a,b	
Acetone	1	1	1	1073.21 ± 24.68 b	
Ethyl acetate	1	1	1	1115.72 ± 37.93 a,b	
Hexane	1	1	1	1264.34 ± 65.75 a	

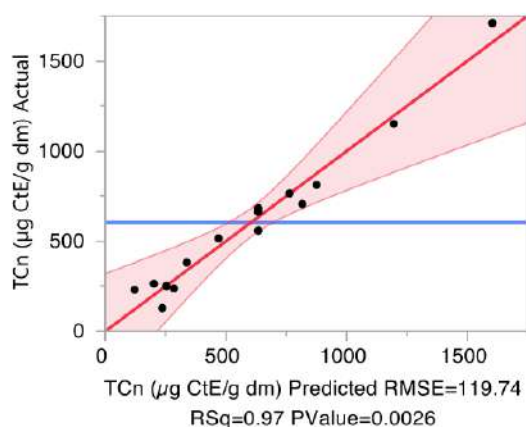
Εικόνα Πα.Γ.1. Πειραματικές και Προβλεπόμενες Τιμές Ολικών Καροτενοειδών (TPW) Βιομηχανικής Τομάτας και Αποδόσεις Τεσσάρων Διαλυτών (EtOH, Acetone, Ethyl acetate, Hexane).

Πηγή: Καταγεγραμμένα Αποτελέσματα Ερευνητή.



Εικόνα Πα.Γ.2. Διάγραμμα Επιθυμητότητας (Desirability) και Προβλεπόμενων Τιμών για την συγκέντρωση ολικών καροτενοειδών (TCn), σε συνάρτηση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές: X_1 (λόγος διαλύτη/δείγματος), X_2 (χρόνος εκχύλισης) και X_3 (θερμοκρασία εκχύλισης).

Πηγή: Καταγεγραμμένα Αποτελέσματα Ερευνητή.



Summary of Fit

RSquare	0.9703
RSquare Adj	0.9167
Root Mean Square Error	119.74
Mean of Response	604.17
Observations (or Sum Wgts)	15

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	9	2338478	259831	18.1208
Error	5	71693.94	14339	Prob > F
C. Total	14	2410172		0.0026 *

Lack Of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	3	62825.29	20942	4.7227
Pure Error	2	8868.65	4434.3	Prob > F
Total Error	5	71693.94		0.1797
			Max RSq	0.9963

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	634.34	69.135	9.18	0.0003 *
X1(10,40)	295.79	42.336	6.99	0.0009 *
X2(30,90)	40.845	42.336	0.96	0.3790
X3(20,80)	387.95	42.336	9.16	0.0003 *
X1*X2	15.035	59.872	0.25	0.8117
X1*X3	271.26	59.872	4.53	0.0062 *
X2*X3	148.85	59.872	2.49	0.0554
X1*X1	-39.98	62.317	-0.64	0.5494
X2*X2	-70.75	62.317	-1.14	0.3077
X3*X3	54.153	62.317	0.87	0.4246

Εικόνα Πα.Γ.3. Γραφική απεικόνιση της σχέσης προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών της συγκέντρωσης ολικών καροτενοειδών (TCn, $\mu\text{g CtE/G dm}$), με δείκτη συσχέτισης $R^2=0.97$ και τιμή $p=0.0026$. Συμπεριλαμβάνονται οι πίνακες ANOVA, αξιολόγησης μοντέλου, έλλειψης προσαρμογής (Lack of Fit) και παραμετρικών εκτιμήσεων για τις μεταβλητές X_1 (λόγος διαλύτη/δείγματος), X_2 (χρόνος εκχύλισης) και X_3 (θερμοκρασία εκχύλισης).

Πηγή: Καταγεγραμμένα Αποτελέσματα Ερευνητή.

Σας Ευχαριστώ Πολύ!!