



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαχανάκια Βρυξελλών: Μελέτη προφίλ βιοδραστικών ενώσεων με αναλυτικές τεχνικές

English title

Brussels sprouts: Study of the bioactive compounds profile using analytical techniques



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ/NAME OF STUDENT

Μίχος Μιχαήλ / Mihos Mihail

ΟΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ/NAME OF SUPERVISOR

Βασιλεία Σινάνογλου / Vassilia Sinanoglou



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Λαχανάκια Βρυξελλών: Μελέτη προφίλ βιοδραστικών ενώσεων με αναλυτικές τεχνικές

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και της
Επιβλέπουσας**

Η πτυχιακή εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

| Α/α | ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ | ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ | ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|-----|---------------------|----------------------------|------------------|
| 1 | ΣΙΝΑΝΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΑ | ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ / ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ | |
| 2 | ΚΡΙΤΣΗ ΕΥΤΥΧΙΑ | ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ/ ΜΕΛΟΣ | |
| 3 | ΤΣΙΑΚΑ ΘΑΛΕΙΑ | ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ/ ΜΕΛΟΣ | |

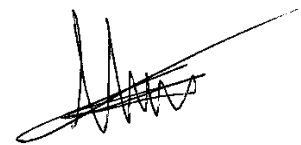
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μίχος Μιχαήλ με αριθμό μητρώου 20684059 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Επιστημών Τροφίμων του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών
Μιχαήλ Μίχος



Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσης εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου Βασιλεία Σινάνογλου, για την βοήθεια, την καθοδήγηση, την ενέργεια και τις γνώσεις που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής την κα. Ευτυχία Κρίση, Επίκουρη Καθηγήτρια ΠΑΔΑ και την κα. Τσιάκα Θάλεια, Επίκουρη Καθηγήτρια ΠΑΔΑ, για τις παρατηρήσεις τους και τη συμμετοχή τους ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής της εν λόγω εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στους ανθρώπους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώσεις

Αφιερωμένη στους γονείς μου Δημήτρη και Κλεονίκη και στον αδελφό μου Παναγιώτη που ήταν πάντα δίπλα μου.

Περίληψη

Η βιομηχανία τροφίμων αποτελεί έναν συνεχώς αναπτυσσόμενο κλάδο· του οποίου η κύρια κατεύθυνση προσανατολίζεται στην κάλυψη των αναγκών του καταναλωτικού κοινού τόσο σε διατροφικό όσο και σε οργανοληπτικό/ποιοτικό επίπεδο. Προς αυτή την κατεύθυνση, τα σταυρανή λαχανικά και ιδιαίτερα τα λαχανάκια Βρυξελλών θεωρούνται υπερτροφές (superfood) και η κατανάλωση τους, τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζει αλματώδη αύξηση σε διεθνές επίπεδο. Οι βιολογικές ευεργετικές για την ανθρώπινη υγεία ιδιότητές τους οφείλονται στην πληθώρα φυτοχημικών ενώσεων που περιέχουν με σημαντικότερους εκπροσώπους τις γλυκοζινολικές ενώσεις. Η έλλειψη επιστημονικής έρευνας στο πεδίο σε συνδυασμό με την ραγδαία αύξηση της ζήτησής τους υπογραμμίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα.

Επομένως, στην παρούσα εργασία μελετάται το βιοδραστικό προφίλ σε εμπορικά διαθέσιμα σε εμπορικά διαθέσιμα λαχανάκια Βρυξελλών της ελληνικής αγοράς με χρήση φασματοσκοπίας υπερύθρου (Mid-infrared (MIR) spectroscopy). Συγκεκριμένα, η λήψη των φασμάτων πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αποσβένουσας ολικής ανάκλασης (ATR) σε διαφορετικά τμήματα/στρώματα του λαχάνου Βρυξελλών. Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν δεκαέξι (16) δείγματα από κάθε στρώμα (εσωτερικό, ενδιάμεσο και εξωτερικό). Τα φάσματα υπεβλήθησαν σε ATR διόρθωση, κανονικοποίηση και ομαλοποίηση (ATR Correction, Normalize, Smoothing), ενώ η στατιστική επεξεργασία και ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού IBM SPSS statistics. Την προεπεξεργασία των τιμών απορρόφησης στα αντίστοιχα εύρη κύματος, ακολούθησε η εφαρμογή μονοπαραγοντικής ανάλυσης διακύμανσης (One-Way ANOVA) για τον εντοπισμό των στατιστικά σημαντικών διαφορών που παρουσιάζονται μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών σε συγκεκριμένα εύρη. Τα τελικά αποτελέσματα αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν με επιστημονικά δεδομένα από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Οι κύριες ταινίες απορρόφησης συσχετίζονται με τις απορροφήσεις των γλυκοζινολικών ενώσεων του καρπού. Παρατηρήθηκε ότι τα λαχανάκια Βρυξελλών παρουσιάζουν όμοιο βιοχημικό προφίλ με τα υπόλοιπα λαχανικά της οικογένειας των σταυρανθών, όπως είναι το μπρόκολο, εμφανίζοντας ταινίες απορρόφησης στην περιοχή των υδατανθράκων, των πρωτεϊνών και των λιπιδίων. Επίσης αξίζει

να σημειωθεί ότι εντοπίστηκε στατιστικά σημαντική αύξηση της απορρόφησης των γλυκοζινολικών ενώσεων από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά στρώματα του καρπού, καθότι ο φυσικός ρόλος των ενώσεων αυτών είναι να αποτελούν αμυντικό μηχανισμό στο φυτό απέναντι σε μηχανικές κακώσεις, παράσιτα και παθογόνους μικροοργανισμούς, με αποτέλεσμα να βρίσκονται διαμερισμένες και συσσωρευμένες σε συγκεκριμένα κύτταρα τα οποία απαιτούν άμεση απόκριση σε ένα εξωτερικό ερέθισμα.

Λέξεις – Κλειδιά: Λαχανάκια Βρυξελλών, βιοδραστικές φυτοχημικές ενώσεις, γλυκοζινολικές ενώσεις, φασματοσκοπία υπέρυθρου

Abstract

The food industry is a constantly developing sector, whose guiding compass is meeting the needs of consumers both in terms of nutrition and quality. Cruciferous vegetables and especially Brussels sprouts are superfoods and their consumption has shown a rapid increase at an international level in recent years. Their biologically beneficial properties for human health are due to the abundance of phytochemical compounds, the most important of which are glucosinolate compounds. The relative absence of scientific studies combined with the aforementioned rapid increase in their demand led to the writing of this paper. In this regard, a research was carried out on commercially available Brussels sprouts in the Greek market which were subjected to infrared spectroscopy (MIR). FTIR spectra were obtained at room temperature using the attenuated total reflectance (ATR) method in different parts/layers of Brussels sprouts. In particular, 16 samples from each layer - internal, intermediate and external - were used. The spectra were subjected to ATR correction, normalization and normalization (ATR Correction, Normalize, Soothing), while statistical processing and analysis was performed using IBM SPSS statistics software. Having performed the necessary pre-processing of the absorbance values in the respective wavelength ranges, a one-way ANOVA was applied where the statistically significant difference between the different parts of the Brussels sprouts in specific ranges was identified. The final results were analyzed and compared with the scientific data from the existing literature. The main bands where they formed are related to the absorptions of the glucosinolic compounds of this vegetable. It was observed that Brussels sprouts present a similar biochemical profile to the rest of the cruciferous vegetables - such as broccoli - showing absorption bands in the area of carbohydrates, proteins and lipids. A statistically significant increase in the absorption of glucosinolic compounds from the inner to the outer layers of the vegetable was also detected, as the natural role of these compounds is the defense mechanism they offer to the plant against mechanical damage, parasites and pathogenic microorganisms, so that they are compartmentalized and accumulated in specific cells that require an immediate response to an external stimulus.

Keywords: Brussels sprouts, bioactive phytochemical compounds, glucosinolic compounds, infrared spectroscopy

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| Κεφάλαιο 1: Γενικές πληροφορίες για τα λαχανάκια Βρυξελλών | 15 |
| 1.1 Εισαγωγική περιγραφή και συνοπτική αναφορά του φυτού..... | 15 |
| 1.2 Η οικογένεια και το γένος στα λαχανάκια Βρυξελλών | 16 |
| 1.2.1 Οικογένεια <i>Brassicaceae</i> | 16 |
| 1.2.2 Γένος <i>Brassica</i> | 17 |
| 1.3 Τρόποι καλλιέργειας των φυτών <i>Brassica oleracea</i> | 19 |
| 1.3.1 Εδαφοκλιματικές συνθήκες για τα λαχανάκια Βρυξελλών | 20 |
| 1.3.2 Καλλιεργητικές φροντίδες για τα λαχανάκια Βρυξελλών..... | 20 |
| 1.4 Τρόποι συντήρησης των συγκομισμένων προϊόντων | 22 |
| 1.5 Συστατικά/Διατροφική αξία..... | 25 |
| 1.5.1 Συστατικά/Διατροφική αξία των λαχανικών γένους <i>Brassica</i> | 25 |
| 1.5.2 Συστατικά/Διατροφική Αξία στα λαχανάκια Βρυξελλών | 26 |
| 1.6 Κύρια βιοδραστικά φυτοχημικά που περιέχονται στα φυτά <i>Brassica</i> | 28 |
| 1.6.1 Γλυκοσινολικά (GLCs) | 29 |
| 1.6.2 Φαινολικές Ενώσεις..... | 31 |
| 1.6.2.1 Υδροξυκιναμωμικά Οξέα (HCAs) | 32 |
| 1.6.2.2 Φλαβονοειδή..... | 32 |
| 1.6.2.3 Ανθοκυανίνες | 33 |
| 1.6.3 Τοκοφερόλες & Καροτενοειδή..... | 34 |
| 1.6.4 Άλλα τερπένια & Έλαια Σπόρων..... | 35 |
| 1.7 Βιολογική δράση λόγω των φυτοχημικών ενώσεων στα λαχανάκια Βρυξελλών | 35 |
| 1.7.1 Αντιμικροβιακή Δράση..... | 37 |
| 1.7.2 Αντιοξειδωτική Δράση..... | 40 |
| 1.8 Βασικές θεωρητικές αρχές φασματοσκοπικής απορρόφησης στο υπέρυθρο φάσμα (IR) | 41 |
| Κεφάλαιο 2: Ανασκόπηση μελετών φασματοσκοπίας σε φυτά του γένους <i>Brassica</i> | 44 |
| Κεφάλαιο 3: Σκοπός της εργασίας..... | 53 |
| Κεφάλαιο 4: Υλικά, όργανα και μέθοδοι | 54 |
| 4.1 Εξεταζόμενος δειγματοχώρος με εφαρμογή φασματοσκοπίας υπέρυθρου | 54 |
| 4.2 Οργανολογία και μεθοδολογία | 55 |
| Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα επεξεργασίας των φασμάτων υπέρυθρου (IR) και συζήτηση αυτών | 57 |
| 5.1 Αποτίμηση των φασμάτων απορρόφησης MIR στις αντίστοιχες δονήσεις των δεσμών..... | 57 |
| 5.2 Συζήτηση και σχολιασμός της ετερότητας των απορροφήσεων μέσω στατιστικής συσχέτισης των διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών | 60 |
| Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα..... | 73 |

| | |
|---|----|
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΕΙΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ | 76 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΤΙΜΩΝ | 79 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΛΗΦΘΕΝ ΦΑΣΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ATR-FTIR ΑΠΟ ΤΑ ΛΑΧΑΝΑΚΙΑ ΒΡΥΞΕΛΛΩΝ | 80 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 81 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Η επικράτηση διαφορετικών οφθαλμών –στα φυτά του είδους <i>Brassica oleracea</i> - οδήγησε στη δημιουργία πολλών διαφορετικών μορφότυπων. Πηγή: AMS Rahman | 19 |
| Εικόνα 2: Πρώιμο στάδιο ανάπτυξης των Brussels sprouts Πηγή – Ιστοσελίδα: https://www.mistikakirou.gr/laxanakia-vrixellon-kalliergeia/ | 19 |
| Εικόνα 3: Η αφαίρεση του κορυφαίου τμήματος στα Λαχανάκια Βρυξελλών, επιτυγχάνει υψηλές αποδόσεις του προϊόντος Πηγή: Jakoric, J. et al, 2016 | 22 |
| Εικόνα 4: Ψυκτικός θάλαμος προϊόντων μετά την συγκομιδή Πηγή: Atef Mohamed Elansari et al, 2019..... | 23 |
| Εικόνα 5: Χημικές δομές των κύριων βιοδραστικών ενώσεων εκχυλισμάτων που προέρχονται από Brussels sprouts Πηγή: Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020 | 29 |
| Εικόνα 6: (a) Γενική δομή των γλυκοζινολικών ενώσεων, όπου η πλευρική ομάδα R διαφοροποιείται ανά χημική κατηγορία (b) χημική δομή της γλυκοραφανίνης (c) χημική δομή της γλυκομπρασικίνης. Πηγή: Faye Langston et al, 2023 | 30 |
| Εικόνα 7: Υδρόλυση γλυκοζινολικών αλάτων από το ένζυμο μυροσινάση και τα διάφορα προϊόντα υδρόλυσης τους Πηγή: Adarsh Pal Vig et al, 2009 | 31 |
| Εικόνα 8: Η χημική δομή των σημαντικότερων γλυκοζινολικών οξέων Πηγή: Τμήμα φαρμακευτικής, «Φαρμακογνωσία Ι φαινολικά οξέα» & Zahra Lorigooini et al, 2020, στο Recent Advances in Natural Products Analysis (pp. 199-219)..... | 32 |
| Εικόνα 9: Αριστερά απεικονίζεται η γενική δομή των φλαβονοειδών. Δεξιά απεικονίζονται δύο από τα σημαντικότερα φλαβονοειδή τα οποία συναντώνται στα λαχανάκια Βρυξελλών- η καμφερόλη και η κερκετίνη Πηγή: Priyanka Singh et al, 2021 & Ho Sik Rho et al, 2011 | 33 |
| Εικόνα 10: Βασικά δομικά χαρακτηριστικά των ανθοκυανιδών στο φυτό <i>Brassica oleracea</i> . Γενική δομή κυανιδίνης-3-διγλυκοζίτη-5-γλυκοζίτη (A) με πιθανούς αρωματικούς υποκαταστάτες ακυλίου που τυπικά τροποποιούν τις μονάδες γλυκοζυλίου 3-C (B). Πηγή: River J. Pachulicz et al, 2023 | 34 |
| Εικόνα 11: Τα σημαντικότερα λιπαρά οξέα τα οποία εντοπίζονται στα φυτά του γένους <i>Brassica</i> Πηγή: EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, 2016 & Annamaria Mancini et al, 2015 & Mengyue Gong et al, 2020 | 35 |
| Εικόνα 12: Κύριες βιολογικές δράσεις των φυτών <i>Brassica</i> και οι βιοδραστικές ενώσεις τους Πηγή: Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020 | 36 |
| Εικόνα 13: Παράγοντες που επηρεάζουν την χημική σύνθεση των <i>Brassica spp</i> Πηγή: Martínez, Armesto, Gómez-Limia, & Carballo, 2020..... | 37 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 14: Αντιβακτηριακή δραστηριότητα & μηχανισμός βακτηριακής αντίστασης Πηγή: Martínez, Armesto, Gómez-Limia, & Carballo, 2020..... | 40 |
| Εικόνα 15: Ο μέσος όρος φασμάτων διαφόρων τύπων δειγμάτων μπρόκολου που αναλύθηκαν με φασματοσκοπία στο μέσο υπέρυθρο (μετά από ομαλοποίηση και εξομάλυνση). Πηγή: Faye Langston et al, 2023..... | 45 |
| Εικόνα 16: Χημική δομή: (α) γενικής γλυκοσινολικής ένωσης (β) γλυκοραφανίνης (γ) γλυκομπρασικίνης Πηγή: Faye Langston et al, 2023 | 46 |
| Εικόνα 17: Αναπαράσταση της καλλιέργειας εννέα ποικιλιών Brassicaceae στον πειραματικό αγρό. Το χωράφι χωρίστηκε σε τέσσερα υπο-πεδία και οι σειρές των φυτών ήταν τυχαία διατεταγμένες μέσα σε κάθε υπο-πεδίο. Πηγή: Luciano Di Martino et al, 2024 | 47 |
| Εικόνα 18: Φάσματα MIR των δειγμάτων που συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν, κατά μέσο όρο σύμφωνα με την κατηγορία που ανήκει. Πηγή: Luciano Di Martino et al, 2024 | 48 |
| Εικόνα 19: Ληφθέν φάσμα φασματοσκοπίας μέσου υπέρυθρου, στο οποίο απεικονίζεται με έντονη μπλε γραμμή ο μέσος όρος και με ασθενές γαλάζιο χρώμα το εύρος απορρόφησης των διαφορετικών δειγμάτων. Πηγή: Ali Ali Redha, Faye Langston et al, 2023..... | 50 |
| Εικόνα 20: Οι τέσσερις περιοχές του φάσματος του μέσου υπέρυθρου Πηγή: Asep Bayu Dani Nandiyanto et al, 2019 | 52 |
| Εικόνα 21: Αριστερά (α) φαίνονται τα λαχανάκια Βρυξελλών τα οποία επιλέχθηκαν για την ανάλυση Δεξιά (β) φαίνονται τα τεμαχισμένα τμήματα που υποβλήθηκαν στην φασματομετρία καθώς και η σπάτουλα η οποία χρησιμοποιήθηκε για την διάταξη και την μεταφορά των δειγμάτων από τον εργαστηριακό πάγκο στον κρύσταλλο του οργάνου. . | 55 |
| Εικόνα 22: Κοινές κορυφές απορρόφησης σε τμήματα του φάσματος απορρόφησης του μπρόκολου (α) και των λαχάνων Βρυξελλών (β). Πηγή: Ali Ali Redha et al, 2023..... | 62 |
| Εικόνα 23: Απουσία ταινίας απορρόφησης στην περιοχή του τριπλού δεσμού για τα λαχανάκια Βρυξελλών | 63 |
| Εικόνα 24: Τμήμα από το φάσμα του λαχάνου Βρυξελλών (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III). Το βέλος με το πράσινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση εύρους 1732 -1737 cm^{-1} οφειλόμενη στη χλωροφύλλη. Το βέλος με το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση εύρους 1629 - 1635 cm^{-1} οφειλόμενη στις πρωτεΐνες και στην γλυκοραφανίνη. | 65 |
| Εικόνα 25: Κοινές κορυφές απορρόφησης σε τμήματα φάσματος του μπρόκολου (α) και των λαχάνων Βρυξελλών (β). Το βέλος με το πράσινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση του εύρους 1099-1101 cm^{-1} Το βέλος με το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση του εύρους 1147-1149 cm^{-1} Το βέλος με το κίτρινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση του εύρους 1022-1024 cm^{-1} | 70 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1: Πίνακας δεδομένων για τις συνθήκες αποθήκευσης στα λαχανάκια Βρυξελλών. (Πηγή ιστοσελίδα: https://www.isofruit.gr/lachanika/lachanakia-vryxellon/). | 24 |
| Πίνακας 2: Διατροφική Αξία διάφορων φυτών Brassica Πηγή: USDA, 2024 | 26 |
| Πίνακας 3: Θρεπτική Αξία των ωμών και των βραστών Brussels sprouts Πηγή ιστοσελίδα: USDA 2024 & https://www.mednutrition.gr/portal/efarmoges/leksiko-diatrofis/15934-laxanakia-vryksellon | 27 |
| Πίνακας 4: Αποτελέσματα κορυφών 16 δειγμάτων του εσωτερικού τμήματος | 57 |
| Πίνακας 5: Αποτελέσματα κορυφών 16 δειγμάτων του ενδιάμεσου τμήματος..... | 57 |
| Πίνακας 6: Αποτελέσματα κορυφών 16 δειγμάτων του εξωτερικού τμήματος | 58 |
| Πίνακας 7: Χαρακτηριστικές κορυφές στα φάσματα απορρόφησης της γλυκοραφάνινης και της γλυκομπρασικίνης Πηγή: Faye Langston et al, 2019 & Asep Bayu Dani Nandiyanto et al, 2019 | 59 |
| Πίνακας 8: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 3280 – 3340 cm^{-1} | 61 |
| Πίνακας 9: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 2922 cm^{-1} | 63 |
| Πίνακας 10: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1629 - 1635 cm^{-1} | 64 |
| Πίνακας 11: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1415 - 1419 cm^{-1} | 66 |
| Πίνακας 12: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1369 - 1373 cm^{-1} | 66 |
| Πίνακας 13: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1319 - 1323 cm^{-1} | 67 |
| Πίνακας 14: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1238 - 1242 cm^{-1} | 68 |
| Πίνακας 15: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1099 - 1101 cm^{-1} | 69 |

| | |
|--|----|
| Πίνακας 16: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1022 - 1024 cm^{-1} | 69 |
| Πίνακας 17: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 536 - 586 cm^{-1} | 71 |
| Πίνακας 18: Συγκεντρωτικός πίνακας με την ταινία απορρόφησης, το είδος της δόνησης και την αποτίμηση. | 71 |

Κεφάλαιο 1: Γενικές πληροφορίες για τα λαχανάκια Βρυξελλών

1.1 Εισαγωγική περιγραφή και συνοπτική αναφορά του φυτού

Τα σταυρανθή λαχανικά προέρχονται από φυτά της οικογένειας που είναι γνωστή στους βοτανολόγους με την ονομασία *Cruciferae* ή εναλλακτικά, *Brassicaceae*. Τα φυτά της οικογένειας *Cruciferae* έχουν άνθη (flowers) με τέσσερα ίσου μεγέθους πέταλα σε σχήμα σταυρού. "*Brassica*" είναι ο λατινικός όρος για το λάχανο. Πολλά σταυρανθή λαχανικά συνήθως προέρχονται από το γένος *Brassica*, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται τα λαχανάκια Βρυξελλών (Brussels sprouts) (Jane V. Higdon, et al, 2007). Σήμερα, οι καταναλωτές απαιτούν προϊόντα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά για βέλτιστα οφέλη για την υγεία. Από την άποψη αυτή, τα φυτά της οικογένειας *Brassicaceae* συγκεντρώνουν μεγάλο αριθμό ειδών που καταναλώνονται ευρέως σε όλο τον κόσμο. Η δημοτικότητα των *Brassica* αυξάνεται λόγω της διατροφικής τους αξίας και των φαρμακολογικών τους επιδράσεων, περιλαμβάνοντας μεγάλο αριθμό φυτικών τροφίμων, όπως λάχανα, μπρόκολο, κουνουπίδι, μουστάρδες καθώς και, ελαιοκράμβη, κανόλα, κ.α. Τα τελευταία χρόνια, η φυτοχημική σύνθεση των *Brassicaceae* έχει μελετηθεί σε βάθος, δεδομένου ότι περιέχουν πολλούς πολύτιμους μεταβολίτες, οι οποίοι συνδέονται άμεσα με διάφορες αναγνωρισμένες βιολογικές δραστηριότητες. Μεταξύ των λαχανικών *Brassica*, τα λαχανάκια Βρυξελλών (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*) είναι πλούσια σε βιταμίνη Α, ασκορβικό οξύ, γλυκοσινολικά και ορισμένες φαινολικές ενώσεις (Haripriya Shanmugam et al, 2018). Τα επιστημονικά στοιχεία επιβεβαιώνουν ποικίλες ιατρικές ιδιότητες τους για τη θεραπεία χρόνιων ασθενειών, όπως η παχυσαρκία, ο διαβήτης τύπου 2, οι καρδιαγγειακές παθήσεις (υπέρταση, εγκεφαλικό επεισόδιο), ο καρκίνος και η οστεοπόρωση. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά των φυτών της οικογένειας *Brassicaceae* που προσδίδονται από τα φυτοχημικά τους, έχουν επεκτείνει τις μελλοντικές προοπτικές σχετικά με τη χρήση τους για ευεργετικές επιδράσεις στην ανθρώπινη διατροφή και την υγεία παγκοσμίως (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

Το λαχανάκι Βρυξελλών (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*) ον σταυρανθές λαχανικό είναι σημαντική πλούσια πηγή ενώσεων που περιέχουν θείο, γνωστές ως γλυκοζινολικές ενώσεις, οι οποίες είναι οι μητρικές ενώσεις των ισοθειοκυανικών και των ινδολών (Yang Gong et al, 2010). Οι γλυκοζινολικές ενώσεις υδρολύονται σε ισοθειοκυανικές ενώσεις (ITC) με τη δράση της μυροσινάσης παρουσία νερού (Stephen S. Hecht, 2000). Τα σταυρανθή λαχανικά,

συμπεριλαμβανομένων των Brussels sprouts, περιέχουν ποικιλία γλυκοσινολικών, καθένα από τα οποία σχηματίζει διαφορετικές ισοθιοκυανικές ενώσεις (ITC), όπως σουλφοραφάνη, ισοθιοκυανικό φαινυλαιθυλεστέρα και ισοθιοκυανικό αλλύλιο, καθώς και ενώσεις ινδόλης (Yang Gong et al, 2010). Οι ITC, οι οποίες είναι δυνητικά βιοδραστικές ενώσεις που περιέχονται στα σταυρανθή λαχανικά, διερευνώνται για τις αντικαρκινικές ιδιότητές τους, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς τους να αναστέλλουν γονίδια που προάγουν τον σχηματισμό όγκων. Επίσης, η υψηλή πρόσληψη σταυρανθών λαχανικών έχει συσχετιστεί με χαμηλότερο κίνδυνο εμφάνισης διαφόρων τύπων καρκίνου καθώς επίσης η πρόληψη του καρκίνου έχει συσχετιστεί με τα υψηλά επίπεδα γλυκοσινολικών σταυρανθών λαχανικών (Tanii H et al, 2008).

Συγκεκριμένα, τα λαχανάκια Βρυξελλών συγκαταλέγονται στα είκοσι (20) πιο θρεπτικά τρόφιμα σύμφωνα με τη βαθμολογία του Δείκτη Συνολικής Θρεπτικής Πυκνότητας, η οποία μετρά την περιεκτικότητα σε βιταμίνες, μέταλλα και φυτοθρεπτικά συστατικά σε σχέση με το θερμιδικό περιεχόμενο. Τα λαχανάκια Βρυξελλών περιέχουν επίσης υψηλή ποσότητα χλωροφύλλης, η οποία μπορεί να εμποδίσει τις καρκινογόνες επιδράσεις των ετεροκυκλικών αμινών που παράγονται κατά το ψήσιμο κρεάτων στη σχάρα σε υψηλή θερμοκρασία (Emine Nakilcioglu-Tas et al, 2017). Πρόσφατες μελέτες έχουν αναφέρει ότι η κατανάλωση σταυρανθών λαχανικών, στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα λαχανάκια Βρυξελλών, ενδέχεται να παρουσιάσει προστατευτική δράση έναντι του οξειδωτικού στρες, σε αρκετά είδη καρκίνων, σε καρδιαγγειακές παθήσεις, στον διαβήτη και στην υπέρταση, καθώς και χαμηλότερα επίπεδα χοληστερόλης (Jane V. Higdon et al, 2007).

1.2 Η οικογένεια και το γένος στα λαχανάκια Βρυξελλών

1.2.1 Οικογένεια *Brassicaceae*

Η οικογένεια *Brassicaceae* ταξινομείται στην ομάδα των δικοτυλήδων αγγειόσπερμων και περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό ειδών (~ 3.709), τα οποία διαχωρίζονται σε 338 διαφορετικά γένη (Al-Shehbaz, Beilstein, & Kellogg, 2006), συμπεριλαμβανομένων των γενών *Brassica*, *Arabidopsis*, *Camelina*, *Crambe*, *Glaucocarpum*, *Sinapis* και *Thlaspi* (SI Warwick, 2011). Ωστόσο, η πρόοδος στην κατανόηση των φυλογενετικών σχέσεων μεταξύ των ταξινομικών κατηγοριών οδηγούν στην ανάπτυξη σύγχρονων συστημάτων ταξινόμησης που

αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τις τρέχουσες γνώσεις. Τα *Brassicaceae* (*Cruciferae*) είναι μια σχετικά μεγάλη οικογένεια, που σήμερα περιλαμβάνει περίπου 4.140 είδη (αρχικά δεδομένα), για τα οποία έχουν προταθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης, συμπεριλαμβανομένων σημαντικών ιστορικών ταξινομήσεων (DA German et al, 2023). Η οικογένεια *Brassicaceae* διακρίνεται εύκολα από την ύπαρξη της σταυροειδούς στεφάνης, των τετραδυναμικών στήμονων, των καψοειδών καρπών, των έντονα κυρτών εμβρύων (embryos) και του πικάντικου υδαρή χυμού (Al-Shehbaz, 2011). Η πικάντικη μυρωδιά από τα θρυμματισμένα φύλλα αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της οικογένειας (Ali Raza, et al, 2020). Η ταξινομική κατηγοριοποίηση των *Brassicaceae* θεωρούνταν πολύπλοκη και συγκεχυμένη έως το 2006, όπου οι τεχνικές μοριακής βιολογίας κατάφεραν να καθορίσουν κατάλληλα την ταξινόμηση των σημαντικών αυτών φυτών (Franzke, Lysak, Al-Shehbaz, Koch, & Mummenhoff, 2010- Russo, 2008).

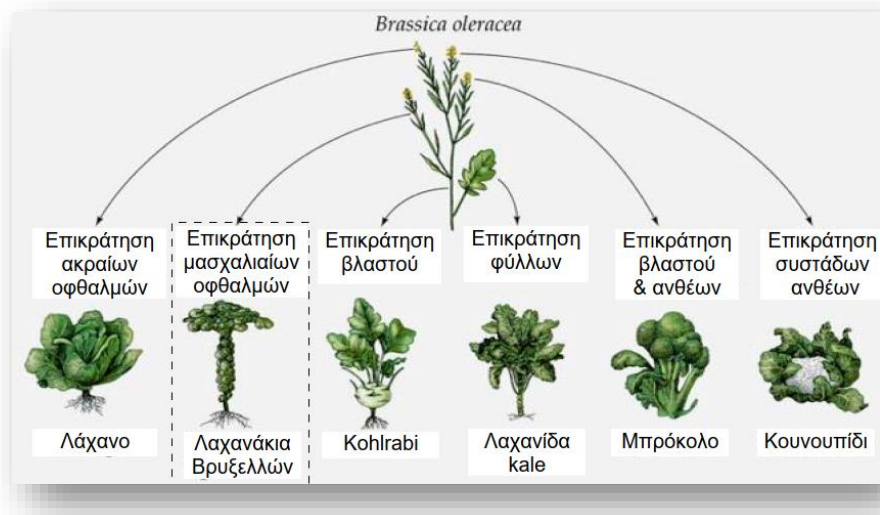
Η παγκόσμια κατανομή τους σε ευρεία κλίμακα καθώς και η άφθονη κατανάλωσή τους στη διατροφή, προσδίδει ιδιαίτερη διατροφική και οικονομική σημασία, δεδομένου ότι τα *Brassicaceae* είναι τα πιο συχνά καταναλισκόμενα φυτά που παράγουν βρώσιμα άνθη (edible buds), φύλλα, ρίζες, σπόρους και στελέχη. Κάθε ένα από τα αναφθέντα μέρη του φυτού αυτού έχει πολλαπλές χρήσεις. Επίσης, στο ευρύτερο πλαίσιο της παραγωγής των προϊόντων από τα φυτά της οικογένειας αυτής, παράγεται μία πληθώρα υποπροϊόντων τα οποία αξιοποιούνται προς όφελος του ανθρώπου, όπως λάδι, καρυκεύματα, ζωοτροφές και κονσερβοποιημένα τρόφιμα (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

1.2.2 Γένος *Brassica*

Το γένος *Brassica* έχει μακρά ιστορία σε όλες τις ηπείρους στην εφαρμογή της γεωργίας, αποτελώντας το σημαντικότερο από τα φυτά *Brassicaceae*. Το γένος *Brassica* περιλαμβάνει μια ευρεία ομάδα ποωδών (μη ξυλώδης βλαστός) φυτών, συμπεριλαμβανομένων πολλών λαχανικών που προέρχονται από την περιοχή της Μεσογείου. Αυτά τα λαχανικά περιέχουν διάφορα φυτοχημικά, όπως φαινολικά οξέα, φλαβονοειδή, γλυκοσινολικά και τα προϊόντα υδρόλυσης τους (Haripriya Shanmugam et al, 2018). Το *Brassica* spp. ταξινομείται γενικά σε τρεις ομάδες, δηλαδή στα αγριοκάρπια (viz coles), στις μουστάρδες και στην ελαιοκράμβη. Τα αγριοκάρπια είναι φυλλώδη και στελεχωμένα λαχανικά (δηλαδή διαθέτουν μίσχο/κοτσάνι). Η ομάδα περιλαμβάνει το λάχανο, το μπρόκολο, το κουνουπίδι, τα

λαχανάκια Βρυξελλών, που θεωρούνται εξαιρετική πηγή βιταμίνης C και φυλλικών αλάτων. Οι μουστάρδες είναι η μουστάρδα σκόρδου (*Alliaria petiolata*), η λευκή μουστάρδα (*Brassica alba*), η μουστάρδα Αιθιοπίας (*B. carinata*), η ασιατική μουστάρδα (*B. juncea*), η ελαιοκράμβη (*B. napus*), η μαύρη μουστάρδα (*B. nigra*), η ελαιοκράμβη (*B. rapa*), η λευκή σινάπι (*Calopina irregularis*), η σινάπι μπάλα (*Neslia paniculata*), η σινάπι τρεκλ (*Erysimum repandum*), η σινάπι φραγκοσουκιάς (*Sisymbrium officinale*), η ασιατική σινάπι φραγκοσουκιάς (*S. orientale*), η λεία σινάπι (*S. erysimoides*) και η κανόλα είναι οι κυριότερες οικονομικά σημαντικές καλλιέργειες ελαιούχων σπόρων σε πολλές χώρες. Τέλος, η *Brassica napus* περιλαμβάνει σημαντικές καλλιέργειες ελαιούχων σπόρων, όπως το κανόλα ή η ελαιοκράμβη, συμπεριλαμβανομένου του κινέζικου λάχανου, rak choi και του γογγυλοκράμβου (turnip). Ειδικότερα τα *Brassica napus L.*, αποτελούν την τρίτη σημαντικότερη ελαιοκαλλιέργεια στον κόσμο μετά τον αραβόσιτο και τον φοίνικα (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

Το κυριότερο είδος λαχανικών είναι το *B. oleracea*, το οποίο περιλαμβάνει διάφορα κεφαλωτά (headed) και μη κεφαλωτά (non-headed) λάχανα, λάχανο (kale), μπρόκολο, λαχανάκια Βρυξελλών, κουνουπίδι και άλλα τα οποία είναι τα πιο κοινά λαχανικά που καταναλώνονται σε όλο τον κόσμο για τη διατροφή του ανθρώπου (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020). Το κέντρο προέλευσης του συγκεκριμένου είδους είναι η λεκάνη της Μεσογείου και οι αρχέγονοι πρόγονοι των σύγχρονων μορφών καλλιέργειας *B. oleracea* είχαν επιλεχτεί πριν χιλιάδες χρόνια και ως προϊόν του χρόνου, μέσω των καλλιεργειών των άγριων μορφών των φυτών αυτών, προέκυψε η εμφάνιση μορφολογικής ποικιλομορφίας μεταξύ των καλλιεργειών *B. oleracea* καθώς υφίστανται ανάπτυξη (Εικόνα 1). (CF Quiros et al, 2011)



Εικόνα 1: Η επικράτηση διαφορετικών οφθαλμών –στα φυτά του είδους *Brassica oleracea*– οδήγησε στη δημιουργία πολλών διαφορετικών μορφότυπων.
Πηγή: AMS Rahman

1.3 Τρόποι καλλιέργειας των φυτών *Brassica oleracea*

Είναι γνωστό ότι τα σταυρανή λαχανικά (*Brassicaceae*) περιλαμβάνουν πολλά σημαντικά είδη που καλλιεργούνται παγκοσμίως και χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για μαγειρικούς και ιατρικούς σκοπούς σε διαφορετικούς πολιτισμούς (Dunja Šamec et al, 2019). Εν προκειμένω πρόκειται να επισημανθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, σε επίπεδο καλλιέργειας, που αφορούν τα λαχανάκια Βρυξελλών (Εικόνα 2) τόσο σε εδαφοκλιματικές συνθήκες που απαιτούνται όσο και τις καλλιεργητικές φροντίδες του συγκεκριμένου φυτού.



Εικόνα 2: Πρώιμο στάδιο ανάπτυξης των Brussels sprouts
Πηγή – Ιστοσελίδα: <https://www.mistikakipou.gr/laxanakia-vrixellon-kalliergeia/>

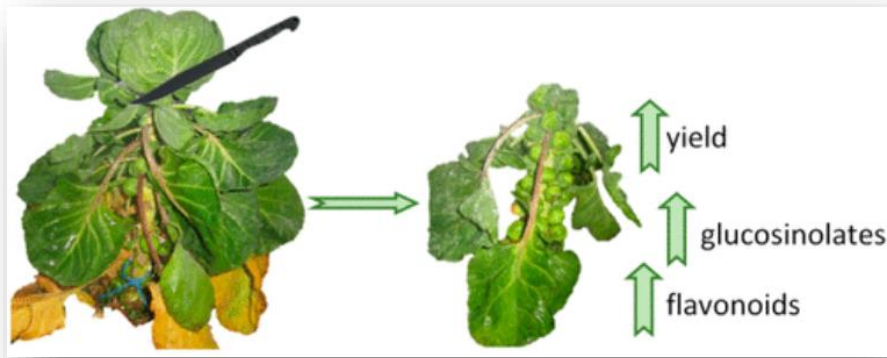
1.3.1 Εδαφοκλιματικές συνθήκες για τα λαχανάκια Βρυξελλών

Το έδαφος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την καλλιέργεια του μελετούμενου λαχανικού. Γενικά, για την καλλιέργειά τους συνιστώνται δροσερά και γόνιμα εδάφη με καλή αποστράγγιση. Ευδοκιμούν, όμως, καλύτερα στα μέσης σύστασης βαριά εδάφη με σχετικά όξινο pH. Συγκεκριμένα το pH του εδάφους θα πρέπει να έχει άριστη τιμή 6 - 6,5, ενώ σε πολύ χαμηλότερη τιμή επηρεάζεται αρνητικά η διαθεσιμότητα των ιχνοστοιχείων (απαραίτητα για το λάχανο). Εδάφη πλούσια σε οργανικές ουσίες δεν θεωρούνται κατάλληλα διότι αναπτύσσονται μικρά και περιορισμένης παραγωγής λαχανάκια. Όσον αφορά τη θερμοκρασία καλλιέργειας τους παρουσιάζουν αντοχή χωρίς καταστροφή σε θερμοκρασίες έως και -10°C . Ιδανικό εύρος θερμοκρασιών θεωρείται το $15-18^{\circ}\text{C}$. Τα λαχανάκια που παράγονται σε περιόδους χαμηλών θερμοκρασιών θεωρούνται καλύτερης ποιότητας. Επίσης, τα λαχανάκια Βρυξελλών αναπτύσσονται καλύτερα σε ηλιοφανείς θέσεις, προστατευμένα όμως από τον καύσωνα του καλοκαιριού, όπου δίνει πλουσιότερη παραγωγή καρπών. Τέλος, αναφορικά με τους μήνες τους έτους στους οποίους ενδείκνυται η εμφύτευσή τους, οι μήνες Απρίλιος και Μάιος κρίνονται καταλληλότεροι συγκριτικά με τους μήνες Ιούνιος και Ιούλιος όσον αφορά την απόδοση και την ποιότητα των λαχάνων Βρυξελλών. Αν και έχει παρατηρηθεί σημαντική επίδραση στο ξηρό βάρος τους, στην περιεκτικότητα των σακχάρων και στην περιεκτικότητα της βιταμίνης C, λόγω διαφορετικού μήνα εμφύτευσης, ωστόσο δεν έχει εντοπιστεί καμία άλλη συσχέτιση μεταξύ ημερομηνία εμφύτευσης και άλλων χημικών παραμέτρων (N. Mirecki, 2006). Γενικώς, οι επιστημονικές έρευνες επί της καταλληλότερης εποχής εμφύτευσης καταδεικνύουν το καλοκαίρι, καθότι σχηματίζονται λαχανάκια Βρυξελλών με περισσότερα φύλλα, υψηλότερο δείκτης επιφάνειας του φύλλου (Leaf Area Index) και μεγαλύτερο βλαστό (Everaarts, A. P. et al, 1998).

1.3.2 Καλλιεργητικές φροντίδες για τα λαχανάκια Βρυξελλών

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο πολλαπλασιασμός του φυτού, πραγματοποιείται σε φυτώρια (κυρίως κατά την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών, όπως προαναφέρθη). Σχετικά με την σπορά, τα νεαρά φυτάρια μεταφυτεύονται στο χωράφι 4-6 εβδομάδες μετά τη βλάστησή τους. Στο χωράφι, τα φυτά φυτεύονται σε γραμμές με απόσταση 60-90 εκατοστά μεταξύ τους, ενώ η κάθε γραμμή απέχει από τη διπλανή της περίπου 40-60 εκατοστά. Ειδικότερα, τα λαχανάκια που

καλλιεργούνται σε πυκνότητα επιπέδου· δύο φυτά ανά τετραγωνικό μέτρο (m²) πετυχαίνουν μεγαλύτερες αποδόσεις, δηλαδή μεγαλύτερο αριθμό εμπορεύσιμων βλαστών από καλλιέργειες διαφορετικής πυκνότητας. Εν γένει, τα φυτά υψηλής πυκνότητας καταλήγουν ψηλότερα, πιο λεπτά σε σχέση με τα φυτά διαφορετικής πυκνότητας, καθώς εμφανίζουν επίσης μεγαλύτερη ομοιομορφία, η οποία εξυπηρετεί την ταξινόμηση τους (E.W.M. Verheij, 1970). Τα λαχανάκια Βρυξελλών απαιτούν τακτικό πότισμα κατά την περίοδο του φθινοπώρου, δύο φορές την εβδομάδα, ενώ την περίοδο του χειμώνα μειώνεται το πότισμα ανάλογα με τις βροχοπτώσεις που επικρατούν. Γενικά, οι ανάγκες σε νερό αυξάνουν με την την άνοδο των θερμοκρασιών, καθώς τα λαχανάκια Βρυξελλών προτιμούν να αναπτύσσονται στον ήλιο. Αν και η καλλιέργειά τους δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία, συνηθίζεται η προσθήκη βιολογικού λιπάσματος, μία φορά τον μήνα, για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη παραγωγή. Κατά τη φύτευση του λάχανου Βρυξελλών, γίνεται η προσθήκη κοπριάς και κομπόστ στο χώμα που τα βοηθούν στην ανάπτυξη. Κατά την διάρκεια της καλλιέργειας του λάχανου Βρυξελλών, αποφεύγεται η προσθήκη λιπάσματος αζώτου, καθώς συντελεί στο μαλάκωμα και την ποιοτική υποβάθμισή του. Η πρόσληψη του αζώτου δεν σχετίζεται με την ημερομηνία εμφύτευσής τους και με την πυκνότητα κατά την καλλιέργεια τους (Everaarts, A. P., & Van Beusichem, M. L., 1998). Τα κεφαλάκια του λάχανου Βρυξελλών αρχίζουν να σχηματίζονται μέσα στο φθινόπωρο από το κάτω μέρος του φυτού προς την κορυφή, όπου σταδιακά ωριμάζουν και είναι έτοιμα για συγκομιδή έπειτα από 4-5 μήνες. Η συγκομιδή των καρπών πραγματοποιείται όταν τα λαχανάκια αποκτήσουν διάμετρο 3-4 εκατοστών. Πραγματοποιείται με το χέρι σε διαδοχικές επεμβάσεις, από κάτω προς τα πάνω με αφαίρεση των φύλλων που καλύπτουν περιμετρικά το λαχανάκι. Μια τυπική συγκομιδή ολοκληρώνεται σε 5-10 “χέρια”. Τέλος, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι μια κοινή τεχνολογική πρακτική στην παραγωγή λαχάνων Βρυξελλών (*Brassica oleracea* L. var. *gemmifera*) είναι η αφαίρεση του κορυφαίου τμήματος του φυτού λίγες εβδομάδες πριν από τη συγκομιδή (Εικόνα 3), προκειμένου να προωθηθεί η ανάπτυξη βοηθητικών βλαστών και να εξασφαλιστούν υψηλότερες αποδόσεις. Είναι γνωστό ότι αυτό το μέτρο επηρεάζει θετικά το μέγεθος των βλαστών του φυτού (Jakoric, J. et al, 2016).



Εικόνα 3: Η αφαίρεση του κορυφαίου τμήματος στα Λαχανάκια Βρυξελλών, επιτυγχάνει υψηλές αποδόσεις του προϊόντος
Πηγή: Jakoric, J. et al, 2016

1.4 Τρόποι συντήρησης των συγκομισμένων προϊόντων

Αν και οι ιδανικές συνθήκες διάθεσης υψηλής ποιότητας προϊόντων στους καταναλωτές προϋποθέτουν την άμεση επεξεργασία της πρώτης ύλης ή της άμεσης διάθεσης της στην αγορά, αμέσως μετά τη συγκομιδή, εντούτοις πολλές φορές απαιτείται βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση, ώστε να ρυθμιστεί η ροή του προϊόντος από την εκάστοτε μονάδα τροφίμων (Αναγνωστοπούλου Α., Ταλέλλη Α. 2008. *Τεχνολογία & Ποιότητα Φρούτων & Λαχανικών*, Εκδ. Νέων τεχνολογιών, Αθήνα).

Απαραίτητο στάδιο για τη συντήρηση των λαχάνων Βρυξελλών αποτελεί η πρόψυξη. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται δυναμικά προψυκτήρια χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης – υγρού βολβού. Πρόκειται για ειδικά προψυκτήρια κατάλληλα για την πρόψυξη στα λαχανάκια Βρυξελλών που είναι ασυσκεύαστα αμέσως μετά τη συγκομιδή. Τα προψυκτήρια αυτά ελέγχουν τη σχετική υγρασία και δημιουργούν χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση που έχει ως αποτέλεσμα τη γρήγορη πτώση της θερμοκρασίας. Η σχετική υγρασία που ελέγχεται εν προκειμένω αναφέρεται στη μέγιστη μάζα υδρατμών που συγκρατείται στην κατάσταση κορεσμού (Νικόλαος Π. Ζόγκας, 2017. *Βασικές αρχές μηχανικής τροφίμων*, Εκδ τζιόλα, Θεσσαλονίκη). Επίσης, χρησιμοποιούνται δυναμικά προψυκτήρια υψηλής αναρροφητικής ικανότητας στα οποία πραγματοποιείται ειδική μελέτη του χρόνου απορρόφησης της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα, ώστε η ψύξη να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, μέχρι την καρδιά του προψυχόμενου προϊόντος (Atef Mohamed Elansari et al, 2019).

Το βασικό στάδιο της συντήρησης των λαχάνων Βρυξελλών αποτελεί η ψύξη. Πιο συγκεκριμένα, για τα λαχανάκια Βρυξελλών χρησιμοποιείται από τις βιομηχανίες τροφίμων δυναμική ψύξη. Η δυναμική ψύξη ελέγχει σε πολλαπλά σημεία τις συνθήκες απόλυτης και ιδανικής ρύθμισης των παραμέτρων συντήρησης στο σύνολο του όγκου του ψυκτικού θαλάμου με πλήρη κάλυψη όλου του 24ώρου (Εικόνα 4). Η δυναμική ψύξη εξασφαλίζει μεγαλύτερη διατηρησιμότητα με επιμήκυνση του χρόνου αποθήκευσης κατά 15% έως 20% του αναφερόμενου - στα δεδομένα του πίνακα- χρόνου που παρατίθεται παρακάτω (Πίνακας 1). Επίσης, υπογραμμίζεται η σημαντικότητα του ψυκτικού θαλάμου χαμηλού αερισμού συνεχούς ροής νερού· ο οποίος αποτελεί τον πλέον εξειδικευμένο ψυκτικό θάλαμο για προϊόντα με απαιτήσεις υψηλής υγρασίας και με κυκλοφορία αέρα μικρότερη από 25 ανακυκλοφορίες ανά ώρα σε σχέση με τον συνολικό όγκο του θαλάμου. Η υψηλή υγρασία εξασφαλίζεται με νερό που παρέχεται σε συνεχή ροή (Atef Mohamed Elansari et al, 2019).



*Εικόνα 4: Ψυκτικός θάλαμος προϊόντων μετά την συγκομιδή
Πηγή: Atef Mohamed Elansari et al, 2019*

Τέλος, σχετικά με τις συνθήκες εντός του ψυκτικού θαλάμου, η θερμοκρασία πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλα τα σημεία του ψυκτικού θαλάμου και η ψύξη να επιτυγχάνεται με ψυχρό αέρα, ο οποίος να κινείται με μεσαίες ταχύτητες και με στρωτή ροή σε όλο τον όγκο του ψυκτικού θαλάμου. Η σχετική υγρασία πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 93% και 96%, γεγονός που επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση υγραντήρων, είτε με την επιλογή αεροψυκτήρων με λειτουργία υπολογισμένη για μικρό εύρος διαφοράς θερμοκρασίας εισόδου –

εξόδου (ΔΤ) του ψυκτικού μέσου του κυκλώματος ψύξης (Atef Mohamed Elansari et al, 2019).

Πίνακας 1: Πίνακας δεδομένων για τις συνθήκες αποθήκευσης στα λαχανάκια Βρυξελλών.
(Πηγή ιστοσελίδα: <https://www.isofruit.gr/lachanika/lachanakia-vryxellon/>).

| Θερμοκρασία Αποθήκευσης | Σχετική Υγρασία (RH) | Χρονικό Διάστημα | Πρόψυξη | Ευαισθησία στο αιθυλένιο | Παραγωγή αιθυλενίου | Ελεγχόμενη ατμόσφαιρα |
|-------------------------|----------------------|------------------|----------|--------------------------|---------------------|-----------------------|
| 0 °C - 0,3 °C | 93%-96% | 1-2 μήνες | αερόψυξη | Υψηλή | Χαμηλή | Δεν προτείνεται |

Επιπρόσθετα, τονίζονται ορισμένα κομβικά σημεία έτσι ώστε να επιτευχθεί η ιδανική απόδοση της συντήρησης στα λαχανάκια Βρυξελλών. Καταρχάς, τα λαχανάκια Βρυξελλών κατά τη διαλογή τους πρέπει να καθαρίζονται από τα χαλαρά φύλλα ή από άλλες ατέλειες και να απομακρύνονται όσα έχουν μαλακή υφή, είναι υπερμεγέθη ή έχουν διαφοροποιημένο σχήμα ενώ κατά τη συγκομιδή τους πρέπει να τοποθετούνται σε αεριζόμενα καλάθια και να μεταφέρονται όσο το δυνατόν συντομότερα στους χώρους πρόψυξης, διαλογής, συσκευασίας και αποθήκευσης σε ψυκτικούς θαλάμους. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα μηχανικά τραύματα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες αλλαγές στη σύνθεση, όπως απώλεια περιεκτικότητας σε ασκορβικό οξύ και ανάπτυξη δυσάρεστης οσμής (Αναγνωστοπούλου Α., Ταλέλλη Α. 2008. *Τεχνολογία & Ποιότητα Φρούτων & Λαχανικών*, Εκδ. Νέων τεχνολογιών, Αθήνα). Γενικά, δεν προτείνεται η ελεγχόμενη ατμόσφαιρα, ωστόσο αν χρησιμοποιηθεί πρέπει να γίνει διατήρηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε μεσαία επίπεδα, καθότι βοηθά στη μείωση του κιτρινίσματος και της φθοράς των φύλλων ενώ αναστέλλει σε μεγάλο ποσοστό την παραγωγή αιθυλενίου το οποίο κρίνεται ανεπιθύμητο και πρέπει να απομακρύνεται με χρήση εξαερισμού ή απορροφητών. Τέλος, καθίσταται ευκολονόητο ότι η δυναμική ψύξη για τη συντήρηση στα λαχανάκια Βρυξελλών είναι απαραίτητη καθώς και η διατήρηση της ψυκτικής αλυσίδας σε όλες τις φάσεις διακίνησης του ψυγμένου προϊόντος (Atef Mohamed Elansari et al, 2019).

Καινούργια πρόκληση αποτελεί η τάση για κατανάλωση πρακτικών τροφίμων καθότι σε πολλές χώρες αύξηθηκε η ζήτηση για αφυδατωμένα λαχανικά υψηλής ποιότητας. Σε ολόκληρο τον κόσμο, η τάση αυτή αναμένεται να διατηρηθεί και ακόμη να επιταχυνθεί κατά την επόμενη δεκαετία. Η αφυδάτωση αναδεικνύει τα

λαχανικά σε μια πιο σταθερή και ασφαλή κατάσταση, καθώς μειώνει τη δραστηριότητα του νερού και παρατείνει τη διάρκεια ζωής στο ράφι. Ουσιαστικά, η ενεργότητα ύδατος αντιπροσωπεύει την ποσότητα του νερού που είναι διαθέσιμη στους μικροοργανισμούς για να διεξάγουν τις μεταβολικές τους λειτουργίες στα τρόφιμα με αποτέλεσμα να προκαλούν δυσάρεστες επιπτώσεις επί του ίδιου του τροφίμου (D. Knorr et al, 2021 & Π. Κοτζεκίδου Ρουκά, 2016. *Μικροβιολογία τροφίμων & Μικροβιολογική ανάλυση τροφίμων*, Εκδ Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη). Πολλές συμβατικές θερμικές μέθοδοι, όπως η ξήρανση με ροή αέρα, η ξήρανση υπό κενό και η ξήρανση με κατάψυξη, φέρουν μεγάλους χρόνους ξήρανσης σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με την ξήρανση με μικροκύματα (MW). Η κατάσταση αυτή προκαλεί ανεπιθύμητη θερμική υποβάθμιση των τελικών προϊόντων (Emine Nakilcioglu-Taş et al, 2018). Αξίζει να αναφερθεί ότι η επεξεργασία με MW παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα από τις άλλες συμβατικές διεργασίες θέρμανσης, όπως ομοιόμορφη ξήρανση με διείσδυση, επιλογή απορροφούμενης ακτινοβολίας από το νερό, που οδηγεί σε ομοιόμορφη περιεκτικότητα υγρασίας εντός του τροφίμου και ευκολία ελέγχου της θέρμανσης επί του προϊόντος (Ravi Pandiselvam et al, 2022).

1.5 Συστατικά/Διατροφική αξία

1.5.1 Συστατικά/Διατροφική αξία των λαχανικών γένους *Brassica*

Τα λαχανικά του γένους *Brassica* περιέχουν πληθώρα θρεπτικών συστατικών, τα οποία ευθύνονται για την υψηλή διατροφική αξία που διαθέτουν καθώς και για την συνεισφορά τους στην ανθρώπινη υγεία. Η διατροφική αξία των διαφόρων λαχανικών *Brassica* παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Το νερό είναι το κύριο συστατικό αυτών των λαχανικών, με εύρος μεταξύ 89%-92%, ενώ η περιεκτικότητα σε λίπος είναι σχετικά χαμηλή (0,37 g στο μπρόκολο).

Ορισμένα φυτά, όπως το λάχανο (kale) (λαχανίδα), παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο, περίπου έξι φορές περισσότερο από άλλα είδη αυτών των λαχανικών και διπλάσια σε μαγνήσιο (32,7 mg). Τονίζεται ότι και τα δύο είναι απαραίτητα στην ανθρώπινη διατροφή προσφέροντας έναν υγιεινότερο τρόπο ζωής (USDA, 2019). Οι βιταμίνες αποτελούν ένα από τα κύρια συστατικά των λαχανικών *Brassica*, όπως τα καροτένια, οι τοκοφερόλες, η βιταμίνη C και το φολικό οξύ. Η οικογένεια αυτών των φυτών θεωρείται επίσης πλούσια σε ανόργανα άλατα, με το ασβέστιο και τον σίδηρο να βρίσκονται σε αφθονία. Αποτελούν επίσης

μια καλή πηγή φωσφόρου (P), θείου (S), χλωρίου (Cl), ασβεστίου (Ca), σιδήρου (Fe), στροντίου (Sr) και καλίου (K) (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

Πίνακας 2: Διατροφική Αξία διάφορων φυτών Brassica
Πηγή: USDA, 2024

| Φυτά Brassica | Διατροφική Αξία ανά 100 γραμμάρια | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|------------------|----------------------|------------|---------------|----------|---------------|---------------|--------------|
| | Ενέργεια (kcal) | Υδατάνθρακες (g) | Διαιτητικές Ίνες (g) | Λιπαρά (g) | Πρωτεΐνες (g) | Νερό (g) | Ασβέστιο (mg) | Μαγνήσιο (mg) | Βιταμ C (mg) |
| Μπρόκολο | 34 | 6,64 | 2,60 | 0,37 | 2,82 | 89,30 | 47,00 | 21,00 | 89,20 |
| Κουνουπίδι | 25 | 4,97 | 2,00 | 0,28 | 1,92 | 92,07 | 22,00 | 15,00 | 48,20 |
| Κόκκινο Λάχανο | 31 | 4,97 | 2,10 | 0,16 | 1,43 | 90,39 | 45,00 | 16,00 | 57,00 |
| Λευκό Λάχανο | 25 | 5,80 | 2,20 | 0,09 | 1,28 | 92,18 | 40,00 | 12,00 | 36,60 |
| Λάχανο kale | 35 | 4,42 | 4,10 | 1,49 | 2,92 | 89,63 | 254,00 | 32,70 | 93,40 |
| Μουστάρδα /Σινάπι | 60 | 5,83 | 4,00 | 3,34 | 3,74 | 83,72 | 63,00 | 48,00 | 0,30 |
| Κινέζικο Λάχανο | 13 | 2,18 | 1,00 | 0,20 | 1,50 | 95,32 | 105,00 | 19,00 | 45,00 |

1.5.2 Συστατικά/Διατροφική Αξία στα λαχανάκια Βρυξελλών

Τα λαχανάκια Βρυξελλών είναι μια εξαιρετική πηγή βιταμίνης K, γεγονός που αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα οφέλη τους. Η βιταμίνη K λειτουργεί ως συνένζυμο κατά τη σύνθεση συγκεκριμένων πρωτεϊνών που συμβάλλουν στην πήξη του αίματος και στον οστικό μεταβολισμό. Το δεύτερο σημαντικότερο θρεπτικό συστατικό τους είναι η βιταμίνη C, η οποία βελτιώνει τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος (Janice L. Thompson, Melinda M. Manore, Linda A. Vaughan, 2021. *Η επιστήμη της διατροφής* τέταρτη έκδοση, Εκδ. Ιατρικές εκδόσεις Λαγός Δημήτριος, Αθήνα). Αυτό το λαχανικό διαθέτει χαμηλή περιεκτικότητα σε κορεσμένα λιπαρά και χοληστερόλη και αποτελεί μια καλή πηγή ριβοφλαβίνης, μαγνησίου και φωσφόρου (Πίνακας 3). Τα λαχανάκια Βρυξελλών είναι επίσης μια πολύ καλή πηγή βιταμινών A και B6, θειαμίνης, φολλικού οξέος, καλίου και μαγγανίου, καθώς και χαλκού, ασβεστίου και σιδήρου. Η περιεκτικότητα σε κάλιο βοηθάει στον έλεγχο του καρδιακού ρυθμού και της αρτηριακής πίεσης καθώς

συμβάλλει στη βιοσύνθεση αιμοθρομβωτικών παραγόντων (Tommaso Filippini et al, 2020 & Σφλώμος Κ., Βαρζάκας Θ. 2019. *Εισαγωγή στην επιστήμη & την τεχνολογία τροφίμων*, Εκδ τσότρας, Αθήνα).

Επίσης, στα λαχανάκια Βρυξελλών υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση γλυκοσινολικών ενώσεων που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη δράση αποτοξίνωσης των κυττάρων, οι οποίες ενώσεις πρόκειται να αναλυθούν σε ακόλουθη ενότητα (1.6.1). Επιπλέον, είναι γνωστά για την αντιοξειδωτική τους δράση δεδομένου ότι περιέχουν καμφερόλη (kaempferol), μια αντιοξειδωτική ουσία που παρουσιάζει διάφορες φαρμακολογικές ιδιότητες, μεταξύ των οποίων αντιμικροβιακές, αντιφλεγμονώδεις, αντιοξειδωτικές, αντικαρκινικές, καρδιοπροστατευτικές, νευροπροστατευτικές και αντιδιαβητικές δραστηριότητες και εφαρμόζεται στη χημειοθεραπεία του καρκίνου (Muhammad Imran et al, 2019). Συγκεκριμένα, τα πλούσια σε καμφερόλη τρόφιμα έχουν συνδεθεί με μείωση του κινδύνου ανάπτυξης ορισμένων τύπων καρκίνου, συμπεριλαμβανομένου του δέρματος, του ήπατος και του παχέος εντέρου. Σημαντικό είναι να υπογραμμιστεί ότι περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε φυτικές ίνες συγκριτικά με άλλα λαχανικά, γεγονός που μπορεί να προάγει την καλή λειτουργία του πεπτικού συστήματος και να διατηρεί τα επίπεδα γλυκόζης στο αίμα σταθερά μειώνοντας τις πιθανότητες εμφάνισης διαβήτη τύπου 2 (João Carlos da Silva Dias et al, 2017)

Πίνακας 3: Θρεπτική Αξία των ωμών και των βραστών Brussels sprouts

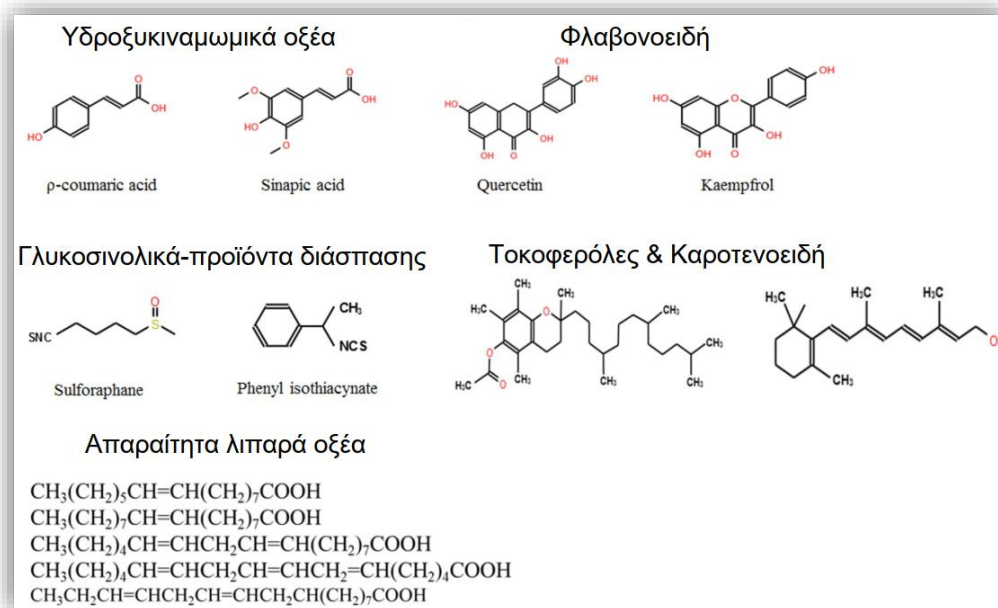
Πηγή ιστοσελίδα: USDA 2024 & <https://www.mednutrition.gr/portal/efarmoges/leksiko-diatrofis/15934-laxanakia-vryksellon>

| Θρεπτική Αξία ανά 100 γραμμάρια | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|--------|------------------|------|--------|---------------|------|--------|
| | Ωμά | Βραστά | | Ωμά | Βραστά | | Ωμά | Βραστά |
| Θερμίδες (kcal) | 43 | 36 | Βιταμίνη Κ (μg) | 177 | 140 | Ασβέστιο (mg) | 42,0 | 36,0 |
| Πρωτεΐνες (g) | 3,38 | 2,5 | Βιταμίνη C (mg) | 85,0 | 62,0 | Σίδηρος (mg) | 1,4 | 1,2 |
| Υδατάνθρακες (g) | 9,0 | 7,1 | Βιταμίνη Α (IU) | 754 | 775 | Μαγνήσιο (mg) | 23,0 | 20,0 |
| Σάκχαρα (g) | 2,2 | 1,7 | Βιταμίνη Β6 (mg) | 0,2 | 0,2 | Φώσφορος (mg) | 69,0 | 56,0 |
| Φυτικές ίνες (g) | 3,8 | 2,6 | Φολικό Οξύ (μg) | 61,0 | 60,0 | Κάλιο (mg) | 389 | 317 |
| Λίπος (g) | 0,3 | 0,5 | Ριβοφλαβίνη (mg) | 0,1 | 0,1 | Νάτριο (mg) | 25,0 | 257 |
| Κορεσμένο (g) | 0,1 | 0,1 | Θειαμίνη (mg) | 0,1 | 0,1 | Μαγγάνιο (mg) | 0,3 | 0,2 |
| Χοληστερόλη (mg) | 0,0 | 0,0 | | | | Χαλκός (mg) | 0,1 | 0,1 |

1.6 Κύρια βιοδραστικά φυτοχημικά που περιέχονται στα φυτά *Brassica*

Τα φυτά *Brassica* παρέχουν όχι μόνο θρεπτικά συστατικά, αλλά και πολλές ετερογενείς φυτοχημικές ενώσεις, αν και περιέχονται σε πολύ μικρές ποσότητες, που θεωρούνται ευρέως ευεργετικές για την ανθρώπινη ευημερία και υγεία. Πρόκειται για βιοδραστικές χημικές ουσίες που επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία (Afifa Aziz et al, 2022). Οι φυτοχημικές ενώσεις αναφέρονται μερικές φορές αδόκιμα ως φυτοθρεπτικά συστατικά, ωστόσο, δεν θεωρούνται απαραίτητα θρεπτικά συστατικά όπως οι πρωτεΐνες, τα λίπη, τα μέταλλα και οι βιταμίνες. Τα φυτοχημικά είναι υπεύθυνα για το χρώμα, το άρωμα, τη μυρωδιά και τη γεύση των φυτών. Η ταξινόμηση των φυτοχημικών είναι δύσκολη, διότι παρουσιάζουν διαφορές ως προς την προέλευση, το στάδιο ανάπτυξης καθώς και τη σύνθεση της κάθε ομάδας *Brassica*. Γενικά, οι φυτοχημικές ουσίες ως δευτερογενείς μεταβολίτες (τερπενοειδή, αλκαλοειδή, φαινολικές ενώσεις, λιγνάνες, φυτικά στεροειδή, κουρκουμίνες, σαπωνίνες, φλαβονοειδή, γλυκοζίτες), ανάλογα με το ρόλο τους στον μεταβολισμό των φυτών, συμβάλλουν στο αμυντικό σύστημα του ίδιου του φυτού έναντι επιβλαβών εξωγενών παραγόντων (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

Ειδικότερα, η οικογένεια *Brassica* είναι πλούσια σε φυτοχημικές ενώσεις που αναγνωρίζονται ως βιοδραστικοί δευτερογενείς μεταβολίτες που απαντώνται φυσικά σε αυτά τα φυτά, έχουν την ικανότητα να δρουν σε διάφορους μοριακούς στόχους στα κύτταρα. Τα φυτά *Brassica* είναι πλούσια σε γλυκοσινολικές ενώσεις (GLSs) και τα προϊόντα διάσπασής τους (ισοθειοκυανικά και ινδόλες), φαινολικές ενώσεις- συμπεριλαμβανομένων επίσης των φλαβονοειδών, των τοκοφερόλων και των καροτενοειδών, μεταξύ άλλων τερπενίων και σημαντικών σπορέλαιων (Besma Abbaoui et al, 2018). Στην εικόνα 5 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές μοριακές δομές των βιοδραστικών ενώσεων που ταυτοποιούνται σε εκχυλίσματα φυτών *Brassica*.



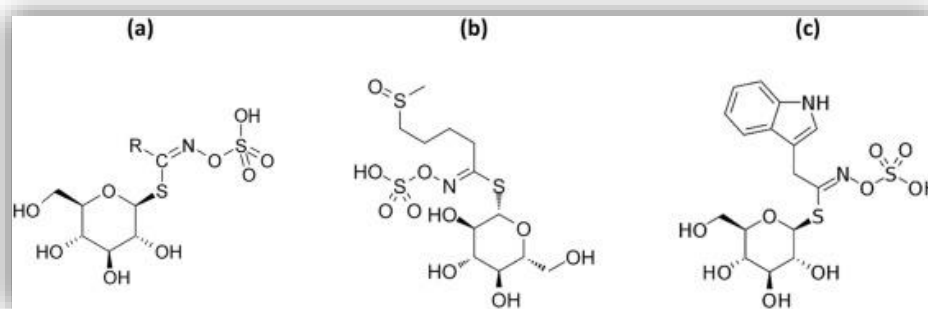
Εικόνα 5: Χημικές δομές των κύριων βιοδραστικών ενώσεων εκχυλισμάτων που προέρχονται από *Brussels sprouts*
 Πηγή: Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η σύνθεση, η ποικιλομορφία και η συγκέντρωση/περιεκτικότητα των φυτοχημικών ουσιών του γένους *Brassica* εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως η βλάστηση, οι περιβαλλοντικές συνθήκες ή η παροχή θρεπτικών συστατικών στις καλλιέργειες. Επιπλέον, η χημική φύση κάθε συστατικού είναι υπεύθυνη για τις διαφορετικές βιοδραστικές ιδιότητες που αναγνωρίζονται. (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

1.6.1 Γλυκοσινολικά (GLCs)

Τα γλυκοσινολικά είναι υδατοδιαλυτά ανιόντα που υπάρχουν σε δεκάεξι οικογένειες δικοτυλήδωνων αγγειόσπερμων, μεταξύ των οποίων και ένας μεγάλος αριθμός βρώσιμων ειδών. Πάνω από 100 γλυκοσινολικές ενώσεις έχουν ταυτοποιηθεί, κυρίως σε λαχανικά της οικογένειας *Cruciferae*, όπως λάχανο, μπρόκολο, λαχανάκια Βρυξελλών, κουνουπίδι, κάρδαμο, χρένο, γογγύλι και μουστάρδα (Stephen S. Hecht, 2000). Ειδικότερα, πρόκειται για μια μικρή αλλά ποικιλόμορφη ομάδα πάνω από 130 προϊόντων που περιέχουν άζωτο και θείο και βρίσκονται σχεδόν αποκλειστικά στα σταυρανθή φυτά (1% του ξηρού βάρους τους) (Abbaoui et al., 2018). Η δομή των GLCs περιέχει ένα κεντρικό β-θειογλυκοζίτη N υδροξυθειϊκό με μια πλευρική αλυσίδα και ένα τμήμα β-D-γλυκοπυρανόζης (Εικόνα 6). Η δομή της πλευρικής αλυσίδας καθορίζει την ταξινόμησή της, με βάση το πρόδρομο αμινοξύ, σε (1) αλειφατική (π.χ. γλυκοραφανίνη- Ala, Leu, Ile, Val, Met),

(2) αρωματική (π.χ. γλυκοναστουρτίνη- Phe, Tyr) και (3) ινδολική (π.χ. γλυκομπρασικήνη- Trp). Έχουν ταυτοποιηθεί ~ 130 τύποι γλυκοσινολικών, από 11 οικογένειες φυτών, ωστόσο, μόνο πέντε είναι τα πιο συχνά απαντώμενα σε τρόφιμα για ανθρώπινη κατανάλωση. Συγκεκριμένα, είναι η γλυκομπρασικήνη, η σιγκρινίνη, η γλυκοραφασατίνη (δεϋδροερουκίνη), η γλυκοραφανίνη και η γλυκοϊμπερίνη (James Melrose, 2019).

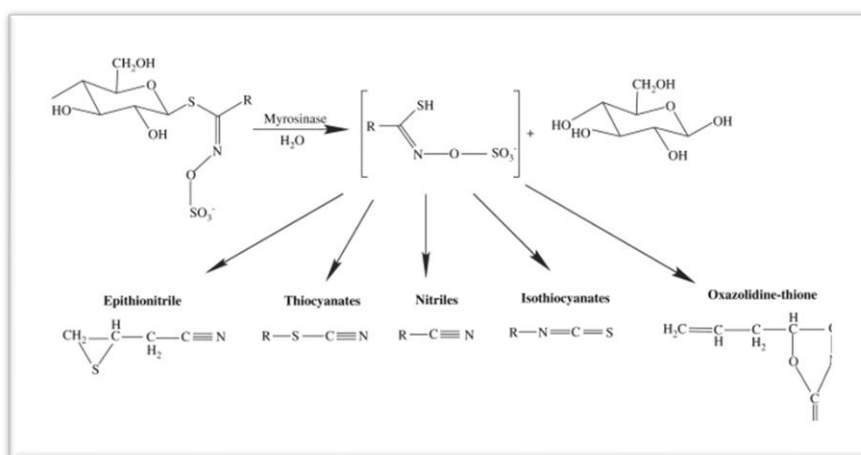


Εικόνα 6: (a) Γενική δομή των γλυκοζινολικών ενώσεων, όπου η πλευρική ομάδα R διαφοροποιείται ανά χημική κατηγορία (b) χημική δομή της γλυκοραφανίνης (c) χημική δομή της γλυκομπρασικήςνης.
Πηγή: Faye Langston et al, 2023

Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι η περιεκτικότητα και οι τύποι των γλυκοσινολικών που υπάρχουν σε φυτά, όπως η ρόκα, επηρεάζονται από τη βλάστηση. Ειδικότερα, κατά την ανάπτυξη του φυτού παρατηρείται διάσπαση και μετασχηματισμός των γλυκοσινολικών ενώσεων. Ως εκ τούτου η συνολική περιεκτικότητα σε γλυκοσινολικά ελαττώνεται ωστόσο αυξάνεται ο αριθμός των διαφορετικών τύπων των γλυκοσινολικών λόγω του μετασχηματισμού που αυτά επιδέχονται (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

Αυτοί οι δευτερογενείς μεταβολίτες ενεργοποιούνται μέχρι να υδρολυθούν από το ένζυμο μυροσινάση (β-θειογλυκοσιδάση γλυκοϋδρολάση, E.C.3.2.3.1), που απελευθερώνεται έπειτα από κάποια μηχανική βλάβη στο φυτό (Εικόνα 7). Τα πιο συνηθισμένα προϊόντα διάσπασης των γλυκοσινολικών είναι τα ισοθειοκυανικά, τα νιτρίλια, τα θειοκυανικά, τα επιθειονιτρίλια και τα οξαζολιδινεθίλια (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020). Γενικά, *in vitro* πειράματα έχουν δείξει τη θεραπευτική τους χρησιμότητα των υδρολυμένων γλυκοσινολικών ενώσεων ως αντιμικροβιακά έναντι μίας σειράς κλινικά σημαντικών βακτηρίων και μυκήτων. (Melrose, 2019; Wang et al., 2019). Βασιζόμενοι μάλιστα στην αντιμικροβιακή και εντομοκτόνο δράση τους, ορισμένες ποικιλίες της οικογένειας *Brassicaceae*

φυτεύονται σε συνδυασμό με άλλες καλλιέργειες, καθώς μπορούν να βοηθήσουν στην απώθηση ή τη διακοπή του κύκλου ζωής ορισμένων επιβλαβών εντόμων (Luciano Di Martino et al, 2024). Αξίζει να υπογραμμιστεί ότι οι γλυκοσινολικές ενώσεις καθώς αποτελούν μέρος ενός βιολογικού αμυντικού μηχανισμού των φυτικών οργανισμών, βρίσκονται διαμερισμένες και συσσωρευμένες σε συγκεκριμένα κύτταρα· κυρίως δε τα κύτταρα τα οποία απαιτούν άμεση ανταπόκριση σε ένα εξωτερικό ερέθισμα, δηλαδή στα κύτταρα της επιφάνειας των εξωτερικών φυλλωμάτων (Francesco Di Gioia et al, 2021)



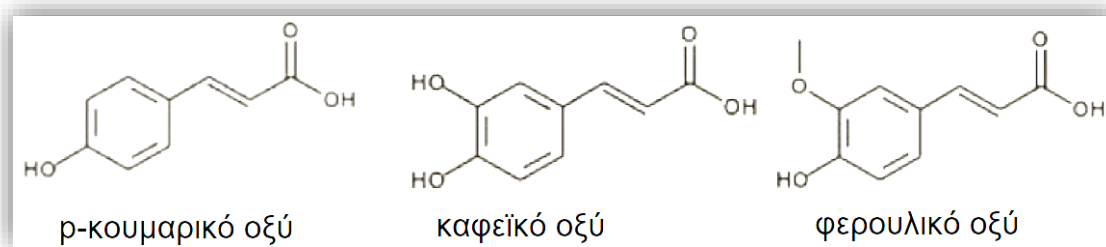
Εικόνα 7: Υδρόλυση γλυκοζινολικών αλάτων από το ένζυμο μυροσινάση και τα διάφορα προϊόντα υδρόλυσης τους
Πηγή: Adarsh Pal Vig et al, 2009

1.6.2 Φαινολικές Ενώσεις

Τα λαχανικά του γένους *Brassica* διαθέτουν ισχυρές αντιοξειδωτικές ιδιότητες που αποδίδονται στα υψηλά επίπεδα βιταμινών, με έμφαση στα καροτενοειδή και ιδιαίτερα στις φαινολικές ενώσεις. Η ταξινόμησή τους ανάλογα με τον αριθμό και τη διάταξη των ατόμων άνθρακα τα ομαδοποιεί στα φλαβονοειδή (φλαβονόλες, φλαβόνες, φλαβαν-3-όλες, ανθοκυανιδίνες, φλαβανόνες και ισοφλαβόνες) και στα μη φλαβονοειδή (φαινολικά οξέα, υδροξυκινναμάτες, σπιλβένια), ενώ συχνά συνδέονται με σάκχαρα και οργανικά οξέα. Η πιο διαδεδομένη και ποικίλη ομάδα φαινολικών συστατικών στα είδη *Brassica* είναι οι φαινόλες, τα φαινολικά οξέα, τα φλαβονοειδή (πελαργονιδίνη, κυανιδίνη, δελφινιδίνη, πεονιδίνη, πετουνιδίνη και μαλβιδίνη) και τα υδροξυκινναμωμικά οξέα (p-κουμαρικό, σιναπτικό και φερουλικό οξύ, που συχνά βρίσκονται σε σύζευξη με σάκχαρα ή άλλα υδροξυκινναμωμικά οξέα). (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

1.6.2.1 Υδροξυκινναμικά Οξέα (HCAs)

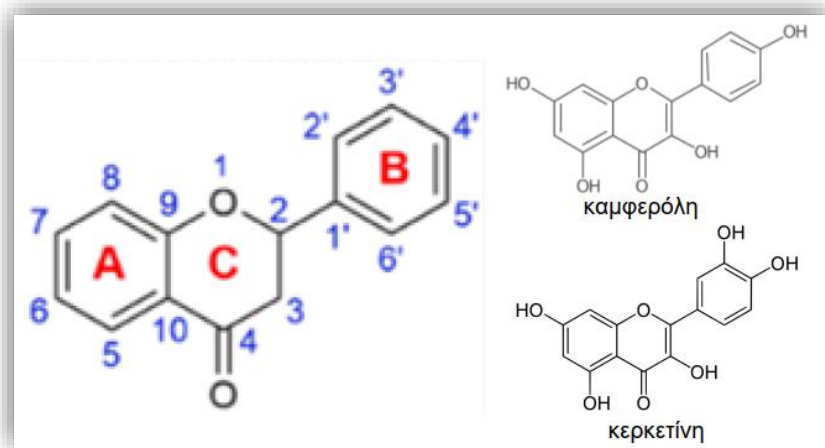
Η ομάδα των υδροξυκινναμικών οξέων (HCAs) περιλαμβάνει αρκετές πολικές ενώσεις. Τα κινναμωμικά οξέα διαθέτουν εννέα άτομα άνθρακα (C6-C3) που συνήθως συνδέονται με το φυτικό κυτταρικό τοίχωμα. Είναι οργανικά οξέα, όπως το καφεϊκό (3,4-δι-υδροξυκινναμικό) οξύ, το φερουλικό (4-υδροξυ-3-μεθοξυκινναμικό) οξύ, το σιναπικό (3,5-διμεθοξυ-4-υδροξυκινναμικό) οξύ και το ρ-κουμαρικό (4-υδροξυκινναμικό) οξύ (Εικόνα 8). Τα HCAs είναι επίσης φαινολικές ενώσεις που κατανέμονται στα φυτά και εμφανίζουν φαρμακολογικές ιδιότητες που αποδίδονται στην παρουσία υδροξυλικών ομάδων συνδεδεμένων με τον αρωματικό δακτύλιο (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).



Εικόνα 8: Η χημική δομή των σημαντικότερων γλυκοζινολικών οξέων
Πηγή: Τμήμα φαρμακευτικής, «Φαρμακογνωσία Ι φαινολικά οξέα» & Zahra Lorigooini et al, 2020, στο *Recent Advances in Natural Products Analysis* (pp. 199-219).

1.6.2.2 Φλαβονοειδή

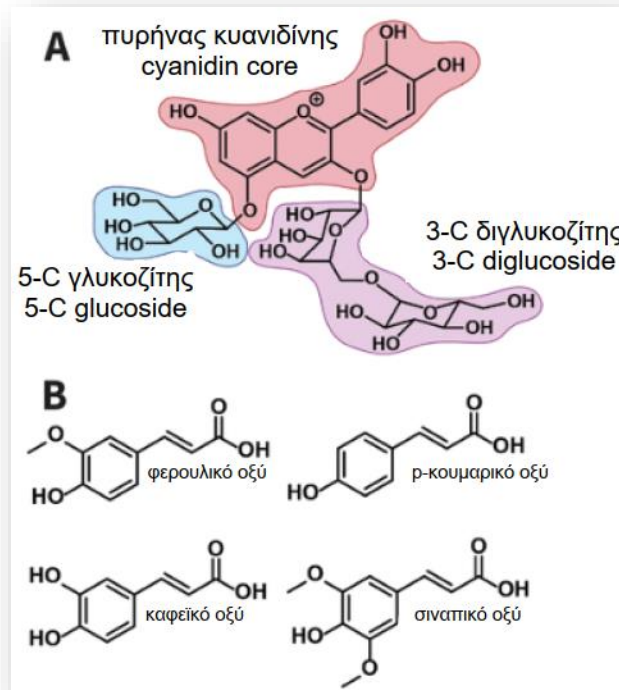
Τα φλαβονοειδή είναι βασικά συστατικά των κυττάρων των φυτών με υψηλή αντιοξειδωτική δράση και εμπλέκονται σε μια τεράστια ποικιλία βιολογικών λειτουργιών (αντικαρκινικές, ανοσοτροποποιητικές και κυτταρικής ομοιόστασης). Τα φλαβονοειδή περιέχουν 15 άτομα άνθρακα στη βασική τους δομή διατεταγμένα με τη μορφή C6-C3-C6 με δύο αρωματικούς δακτυλίους (A, B) που συνδέονται με τρεις άνθρακες, οι οποίοι μπορεί να συνδέονται ή όχι με έναν τρίτο δακτύλιο (C) (Εικόνα 9) (Maria Celeste Dias et al, 2021 & Τμήμα φαρμακευτικής, «Φαρμακογνωσία Ι φαινολικά οξέα»). Οι φλαβονόλες που ταυτοποιήθηκαν είναι η κερκετίνη, η καμφερόλη, η ισοραμνετίνη και η κυανιδίνη και αντιπροσωπεύουν τα πιο δημοφιλή φλαβονοειδή στα διάφορα είδη του γένους *Brassica*. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι, η παρουσία των φλαβονοειδών συμβάλλουν προτρεπτικά στην κατανάλωση των λαχανικών αυτών. (Fusari Gómez et al, 2019).



Εικόνα 9: Αριστερά απεικονίζεται η γενική δομή των φλαβονοειδών. Δεξιά απεικονίζονται δύο από τα σημαντικότερα φλαβονοειδή τα οποία συναντώνται στα λαχανάκια Βρυξελλών· η καμπερόλη και η κερκετίνη
 Πηγή: Priyanka Singh et al, 2021 & Ho Sik Rho et al, 2011

1.6.2.3 Ανθοκυανίνες

Οι ανθοκυανίνες είναι υδατοδιαλυτές φυτικές χρωστικές ουσίες που ευθύνονται για τα βαθιά πλούσια μοβ/κόκκινα/μπλε χρώματα στο κόκκινο λάχανο και το μοβ κουνουπίδι. Αποτελούν μία από τις κύριες υποκατηγορίες των φλαβονοειδών, των πολυφαινολών. Οι ανθοκυανίνες είναι οι συζευγμένες με σάκχαρα μορφές των ανθοκυανιδινών, κοινές ανθοκυανίνες είναι η πελαργονιδίνη, η κυανιδίνη, η δελφινιδίνη, η πεονιδίνη, η πετουνιδίνη και η μαλβιδίνη, με την κυανιδίνη να είναι η πιο κοινή στις καλλιέργειες *Brassica* (Carmen Rodríguez-García, et al 2019). Οι ανθοκυανίνες του γένους *Brassica* παρουσιάζουν ασυνήθιστα πολύπλοκες δομές με ένα ή περισσότερα κινναμωμικά οξέα (Εικόνα 10). Οι εστεροποιημένες μορφές p-κουμαρυλίου και φερουλοϋλίου της κυανιδίνης-3-σοφοροσίδης-5-γλυκοσίδης κυριαρχούν στο κουνουπίδι, ενώ οι εστέρες σιναπουϋλίου είναι κυρίως παρόντες στο κόκκινο λάχανο (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).



Εικόνα 10: Βασικά δομικά χαρακτηριστικά των ανθοκυανιδίων στο φυτό *Brassica oleracea*. Γενική δομή κυανιδίνης-3-διγλυκοζιτη-5-γλυκοζιτη (A) με πιθανούς αρωματικούς υποκαταστάτες ακυλίου που τυπικά τροποποιούν τις μονάδες γλυκοζυλίου 3-C (B).

Πηγή: River J. Pachulicz et al, 2023

1.6.3 Τοκοφερόλες & Καροτενοειδή

Οι τοκοφερόλες και οι τοκοτριενόλες (βιταμίνη E) είναι λιποδιαλυτές ενώσεις με ισχυρή αντιοξειδωτική δράση που προστατεύουν τις κυτταρικές μεμβράνες, τα πολυακόρεστα λιπαρά οξέα και την βιταμίνη A από οξείδωση. Επίσης, προστατεύουν τα λευκά αιμοσφαίρια και ενισχύουν τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος του ανθρώπινου οργανισμού (Janice L. Thompson, Melinda M. Manore, Linda A. Vaughan, 2021. *Η επιστήμη της διατροφής* τέταρτη έκδοση, Εκδ. Ιατρικές εκδόσεις Λαγός Δημήτριος, Αθήνα).

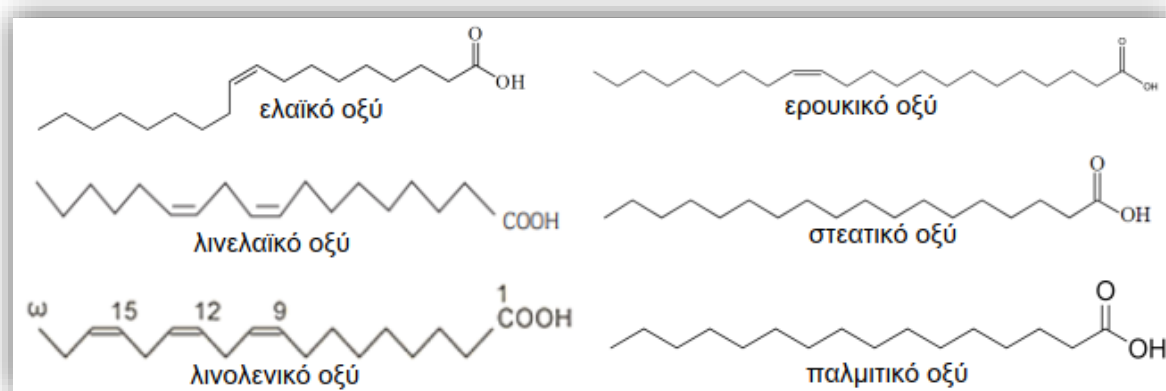
Τα καροτενοειδή είναι συμμετρικά τετρατερπένια με χαρακτηριστική δομή σαράντα ατόμων άνθρακα με συζευγμένους διπλούς δεσμούς, υπεύθυνα για τη δράση απορρόφησης ριζών και την αντιοξειδωτική ικανότητα. Η λειτουργία τους ως χρωστικές ουσίες (κίτρινες, πορτοκαλί ή κόκκινες) στην οικογένεια *Brassicaceae* εκτιμάται και αναγνωρίζεται ευρέως. Τα πιο αντιπροσωπευτικά καροτενοειδή είναι το β-καροτένιο, το α-καροτένιο, το γ-καροτένιο και η β-κρυπτοτοξανθίνη, δρουν ως πρόδρομες ουσίες της βιταμίνης A και ως αντιοξειδωτικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι,

η επίδραση διαφορετικών ποιοτήτων φωτός επηρεάζουν τα επίπεδα καροτενοειδών στα πράσινα φυλλώδη λαχανικά (Katja Frede et al., 2019).

1.6.4 Άλλα τερπένια & Έλαια Σπόρων

Οι φυτοστερόλες είναι στεροειδείς αλκοόλες, οργανικές ενώσεις με μοριακό πυρήνα 17 ατόμων άνθρακα και χαρακτηριστική τριδιάστατη διάταξη τεσσάρων δακτυλίων. Οι φυτοστερόλες ανήκουν στην ομάδα των ισοπρενοειδών, ομοιάζουν δομικά με τη χοληστερόλη αλλά λειτουργικά είναι αντίθετες και διατροφικά είναι ένα από τα σημαντικότερα συστατικά του ελαίου, το οποίο είναι ευεργετικό για την ανθρώπινη υγεία. Στην πραγματικότητα, οι φυτοστερόλες αυξάνουν τη διαλυτοποίηση της χοληστερόλης με αποτέλεσμα η απορρόφηση της χοληστερόλης μειώνεται στο έντερο (Sharma, Rai, & Prasad, 2018).

Τα φυτά *Brassicaceae* θεωρούνται οικογένεια φυτών πλούσια σε ελαιούχους σπόρους και οικονομικά σημαντικά. Όσον αφορά τα σπορέλαια των *Brassicaceae*, περιλαμβάνουν λιπαρά οξέα. Στο έλαιο που εξάγεται από τις καλλιέργειες των φυτών του γένους *Brassica* ανιχνεύονται επτά κύρια λιπαρά οξέα [παλμιτικό, στεατικό, ελαϊκό, λινολεϊκό, λινολενικό, εικοσενοϊκό και ερουκικό] (Εικόνα 11)] και άλλα δευτερεύοντα λιπαρά οξέα (αραχιδικό, αραχιδονικό και βενεχικό) (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).



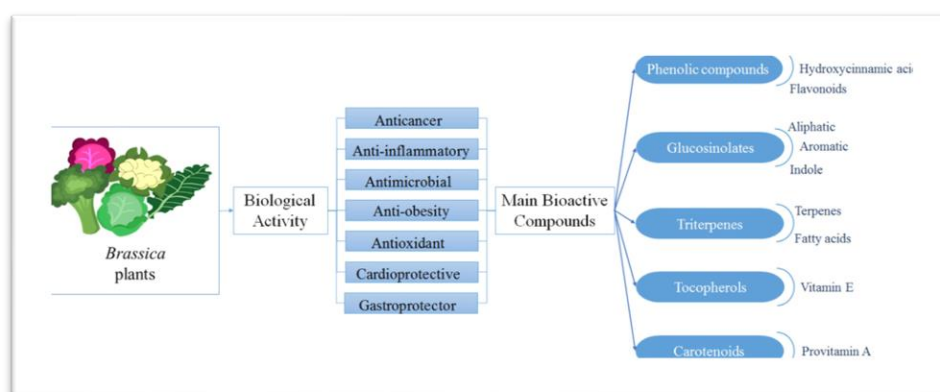
Εικόνα 11: Τα σημαντικότερα λιπαρά οξέα τα οποία εντοπίζονται στα φυτά του γένους *Brassica*
Πηγή: EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, 2016 & Annamaria Mancini et al, 2015
& Mengyue Gong et al, 2020

1.7 Βιολογική δράση λόγω των φυτοχημικών ενώσεων στα λαχανάκια Βρυξελλών

Τα φυτά *Brassicaceae* (σταυρανθή) έχουν προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου ότι τα τελευταία χρόνια οι φυτοχημικές ενώσεις που τα απαρτίζουν έχουν συνδεθεί άμεσα με ευεργετικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η

βιολογική δράση συνδέεται με διάφορα οφέλη για την υγεία, όπως αντικαρκινική, αντιοξειδωτική, αντιφλεγμονώδης και καρδιοπροστατευτική δράση. Η δράση αυτή οφείλεται κυρίως στη συνέργεια των γλυκοσινολικών, των πολυφαινολών και των τριτερπενίων, που θεωρούνται τα κύρια σύμπλοκα στα σταυρανθή και τα πιο μελετημένα όσον αφορά τη δομή, τον μηχανισμό δράσης και τις επιδράσεις στα ανθρώπινα κύτταρα (Šamec & Salopek-Sondi, 2019). Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, αυξανόμενα επιστημονικά στοιχεία έχουν δείξει ότι η κατανάλωση σταυρανθών λαχανικών φέρει προληπτικό ρόλο έναντι ποικίλων ανθρώπινων ασθενειών. Η διαπίστωση αυτή ώθησε την ανάπτυξη θρεπτικών συστατικών που προέρχονται από τα συγκεκριμένα λαχανικά και τη χρήση τους ως συμπληρώματα διατροφής που περιλαμβάνουν φυτικά εκχυλίσματα ή συγκεκριμένες ενώσεις. Ενδεικτικά, η σύσταση ενός συνηθισμένου συμπληρώματος με βάση τα σταυρανθή φυτά αποτελείται από 550 mg αποξηραμένα λαχανάκια Βρυξελλών και λάχανο (kale), νερό και στεατικό ασβέστιο ως μέσο ροής (flow agent) σε κάψουλα ζελατίνης. Η προτεινόμενη χρήση είναι 1 κάψουλα / ημέρα (Stephanie Mondloch et al, 2019).

Στην εικόνα 12 παρουσιάζονται βιολογικές δράσεις που οφείλονται στην κατανάλωση λαχανικών του είδους *Brassica*, οι οποίες σχετίζονται με τους άφθονους δευτερογενείς μεταβολίτες που αναπτύσσουν ως κύριο αμυντικό μηχανισμό.

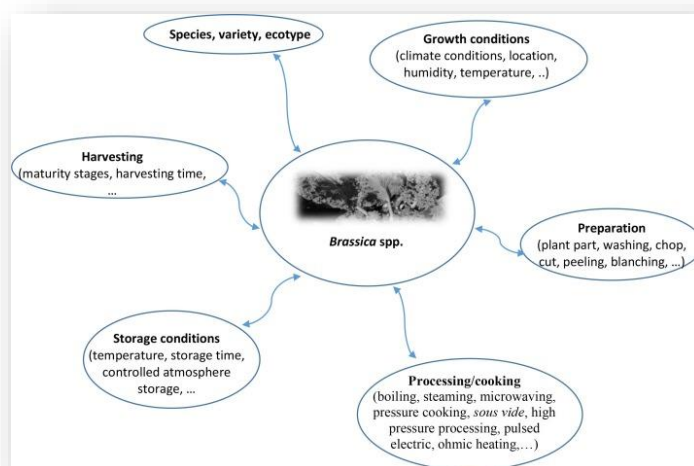


Εικόνα 12: Κύριες βιολογικές δράσεις των φυτών *Brassica* και οι βιοδραστικές ενώσεις τους
 Πηγή: Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020

Γενικώς, αξίζει να αναφερθεί ότι μεταξύ των φυτών του γένους *Brassica* διαπιστώνονται διαφορές στη συγκέντρωση και στην ποικιλία των φυτοχημικών ουσιών. Επίσης, υπάρχουν έντονες διαφορές στη συγκέντρωση των βιοδραστικών ενώσεων μεταξύ των σπόρων και των φύλλων του ίδιου του φυτού. Έχουν βρεθεί

επίσης ενώσεις που είναι μοναδικές στα φύλλα και απουσιάζουν εντελώς από τον σπόρο (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

Ένα σημαντικό σημείο για την αποτελεσματικότητα των βιοδραστικών ενώσεων που υπάρχουν στα λαχανικά της οικογένειας *Brassicaceae* είναι η κατάλληλη επεξεργασία και ο χειρισμός τους. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν άμεσα τις διατροφικές και οργανοληπτικές ιδιότητές τους, επηρεάζοντας τη βιοδραστικότητα των ενώσεών τους. Για παράδειγμα, το τελικό αποτέλεσμα διεργασιών όπως το μπλανσάρισμα (ζεμάτισμα), το μαγείρεμα ή/και η κονσερβοποίηση, επηρεάζει τη σύνθεση και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των λαχανικών *Brassica* (Εικόνα 13) (Martínez, Armesto, Gómez-Limia, & Carballo, 2020).



Εικόνα 13: Παράγοντες που επηρεάζουν την χημική σύνθεση των *Brassica spp*
Πηγή: Martínez, Armesto, Gómez-Limia, & Carballo, 2020

1.7.1 Αντιμικροβιακή Δράση

Από αρχαιοτάτων χρόνων, πολλά φυτά είναι γνωστό ότι ασκούν θεραπευτικές ιδιότητες κατά των ανθρώπινων λοιμώξεων λόγω της περιεκτικότητάς τους σε δευτερογενείς μεταβολίτες, οι οποίοι σε πιο πρόσφατες εποχές έχουν βρεθεί ότι δρουν ως αντιμικροβιακοί παράγοντες κατά των ανθρώπινων παθογόνων (Ramona Barbieri et al, 2017). Ειδικότερα, οργανικές ενώσεις φυτικής πρόλευσης που φέρουν θείο στα μόριά τους έχουν επιδείξει αντιβακτηριακή δράση έναντι θετικών και αρνητικών κατά gram βακτηρίων. Από τα γλυκοσινολικά και την υδρόλυσή τους από το ένζυμο μυροσινάση προκύπτουν ορισμένα ειδικά προϊόντα που επηρεάζουν την ανάπτυξη διαφόρων μικροοργανισμών (Barbieri et al., 2017). Το βιοδραστικό δυναμικό των γλυκοσινολικών που παράγονται από λαχανικά της

οικογένειας Brassicaceae τα καθιστούν άριστα υποψήφια για τον βιοέλεγχο παθογόνων μικροοργανισμών που προκαλούν σοβαρές ανθρώπινες λοιμώξεις. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα γλυκοσινολικά που αναφέρθηκαν δρουν συνεργιστικά με τα συμβατικά αντιβιοτικά, βελτιώνοντας τη δράση τους (James Melrose, 2019). Έχουν αναπτυχθεί διάφορες διαδικασίες εκχύλισης, στις οποίες χρησιμοποιούνται ως μέσο εκχύλισης το νερό, οργανικοί διαλύτες, μίγματα νερού/οργανικών διαλυτών ή αιθέρια έλαια, προκειμένου να απομονωθούν συγκεκριμένες ενώσεις, οι οποίες φέρουν θεραπευτική δράση (S Sasidharan et al, 2011).

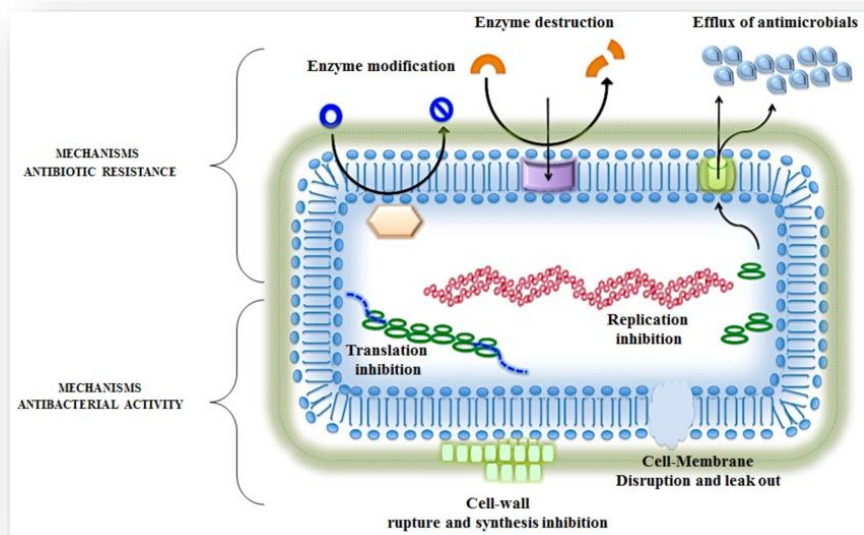
Οι γλυκοσινολικές ενώσεις αποτελούν μία διακριτή ομάδα βιοδραστικών ενώσεων που διαθέτουν ευρύ φάσμα βιοδραστικότητας. Δεν είναι σημαντικά μόνο για τα φυτά, για τα οποία λειτουργούν ως το κύριο αμυντικό τους σύστημα αλλά και για τους ανθρώπους. Είναι γνωστό ότι στη σημερινή εποχή που διαβαίνουμε τα φυσικά προϊόντα παρουσιάζουν ιδιαίτερη ζήτηση ενώ προϊόντα συνθετικών χημικών ουσιών παραγκωνίζονται με το πέρασμα των χρόνων (Adarsh Pal Vig et al, 2009). Δεδομένου ότι τα εμπορικά διαθέσιμα φάρμακα έχουν συχνά επισημανθεί αρνητικά λόγω των παρενεργειών τους και της σχετικής τοξικότητάς τους καθώς και η εμφανιζόμενη ανθεκτικότητα των στελεχών στα συμβατικά αντιβιοτικά, καθιστά την αναζήτηση νέων αντιμικροβιακών παραγόντων εξαιρετικά σημαντική. Τα μόρια που συντίθενται από τα φυτά είναι μη αντιβιοτικά φάρμακα με αντιβακτηριακές ιδιότητες που μπορούν να δημιουργήσουν ευκαιρίες για καινοτόμες θεραπευτικές προσεγγίσεις (Martínez, Armesto, Gómez-Limia, & Carballo, 2020).

Τα προϊόντα υδρόλυσης των γλυκοσινολικών ενώσεων (GLCs) είναι ισχυροί αναστολείς της βακτηριακής δραστηριότητας. Τα ισοθειοκυανικά αλλύλια (Allyl isothiocyanates) χρησιμοποιούνται ως συντηρητικό στη βιομηχανία τροφίμων. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι τα υδρολυτικά προϊόντα αλκυλίου και αρυλίου των γλυκοσινολικών ενώσεων υπήρξαν κυτταροτοξικά για τα βακτήρια *Salmonella typhimurium*. Κατά κύριο λόγο οι αναφορές σχετικά με τη βακτηριοκτόνο δράση των ισοθειοκυανικών περιορίστηκαν σε ανθρώπινα παθογόνα. Το ισοθειοκυανικό βενζύλιο (Benzyl isothiocyanate) χρησιμοποιείται ως αντιβιοτικό για τη θεραπεία λοιμώξεων του αναπνευστικού και του ουροποιητικού συστήματος. Τα gram αρνητικά βακτήρια είναι γενικά λιγότερο ευαίσθητα από τα gram θετικά βακτήρια απέναντι στις ισοθειοκυανικές ενώσεις. Η μεγαλύτερη

τοξικότητα των ισοθειοκυανικών ενώσεων συνδέεται συχνά με αυξημένη μεταβλητότητα όσον αφορά την δράση τους απέναντι στους μικροοργανισμούς (βακτήρια, μύκητες) (Adarsh Pal Vig et al, 2009). Για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί σημαντική μείωση του αριθμού των *Verticillium dahliae microsclerotia* στο έδαφος που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με υπολείμματα μπρόκολου. Αντίθετα, το έδαφος που δεν υποβλήθηκε σε επεξεργασία με υπολείμματα μπρόκολου παρουσίασε πενταπλάσια αύξηση του αριθμού των μικροσκληρωτίων (Adarsh Pal Vig et al, 2009).

Επίσης, δράση φέρουν τα υδρολυμένα προϊόντα των γλυκοσινολικών ενώσεων επί των βακτηρίων. Έχει αποδειχτεί ότι η σουλφοραφάνη (SFN), υδρολυτικό προϊόν της γλυκοραφανίνης, ανέστειλε την ανάπτυξη και θανάτωσε πολλά στελέχη του ελικοβακτηριδίου του πυλωρού στον δοκιμαστικό σωλήνα και στην ιστοκαλλιέργεια, συμπεριλαμβανομένων στελεχών ανθεκτικών στα αντιβιοτικά. Το ελικοβακτήριο του πυλωρού πρόκειται για ένα πολύ επικίνδυνο βακτήριο καθώς η βακτηριακή λοίμωξη που προκαλεί σχετίζεται με σημαντική αύξηση του κινδύνου καρκίνου του στομάχου (Adarsh Pal Vig et al, 2009).

Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται η διαδικασία που πραγματοποιείται στο εσωτερικό του κυττάρου κατά την επαφή του με κάποιον αντιμικροβιακό παράγοντα, προκαλώντας ανασταλτικό αποτέλεσμα ή αντίσταση. Ένας αντιμικροβιακός παράγοντας ορίζεται ως μια φυσική ή συνθετική ουσία που θανατώνει ή αναστέλλει την ανάπτυξη μικροοργανισμών όπως βακτήρια και μύκητες (S.C. Burnett-Boothroyd & B.J. McCarthy, 2011).



Εικόνα 14: Αντιβακτηριακή δραστηριότητα & μηχανισμός βακτηριακής αντίστασης
 Πηγή: Martínez, Armesto, Gómez-Limía, & Carballo, 2020

Μια άλλη σημαντική ομάδα δευτερογενών μεταβολιτών με αντιμικροβιακή δράση που υπάρχουν στα φυτά είναι οι φαινολικές ενώσεις. Η αντιμικροβιακή τους δράση εξαρτάται από τη χημική τους δομή, συγκεκριμένα από τη θέση του βενζολικού δακτυλίου και το μήκος της κορεσμένης αλυσίδας. Ο τρόπος δράσης της, περιορίζεται στην αδρανοποίηση των κυτταρικών ενζύμων και την τροποποίηση της διαπερατότητας των μεμβρανών (Kenia Mirozlava Favela-González et al, 2020).

1.7.2 Αντιοξειδωτική Δράση

Η ελεύθερη ρίζα –ένα άτομο ή μόριο με ένα ή περισσότερα ασύζευκτα ηλεκτρόνια και ανεξάρτητη παρουσία- συμμετέχει πολύ εύκολα σε αντιδράσεις οξειδοαναγωγής με γειτονικά μόρια. Κατά τις αντιδράσεις αυτές όχι μόνο μεταβάλλονται σημαντικά τα γειτονικά μόρια στόχοι, αλλά μερικές φορές μεταβιβάζονται τα ασύζευκτα ηλεκτρόνια από στόχο σε στόχο, δημιουργώντας έτσι μία δεύτερη, τρίτη κ.ο.κ. ελεύθερη ρίζα υπό μορφή αλυσιδωτής αντίδρασης. Η πολύ μεγάλη βλαπτική επίδραση των ελεύθερων ριζών οφείλεται ακριβώς στον πολλαπλασιασμό των μεταβολών που προκαλούνται από παρόμοιες αλυσιδωτές αντιδράσεις (Giovanni Martemucci et al, 2022 & Priya Chaudhary et al, 2023). Ένας

αντιοξειδωτικός παράγοντας αναστέλλει το σχηματισμό αυτών των ελεύθερων ριζών ή διακόπτει τη διάδοσή τους (Dejian Huang et al, 2005).

Τα περισσότερα λαχανικά υπόκεινται σε συνεχές οξειδωτικό στρες. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ενός αντιοξειδωτικού συστήματος είναι σημαντική για τον έλεγχο της οξείδωσης των κυττάρων. Η βιταμίνη C, η βιταμίνη E και τα καροτενοειδή είναι άμεσα αντιοξειδωτικά, καθώς εξουδετερώνουν τις ελεύθερες ρίζες πριν βλάψουν τα κύτταρα. Οι γλυκοσινολικές ενώσεις και τα προϊόντα υδρόλυσης τους θεωρούνται έμμεσα αντιοξειδωτικά, καθώς δεν εξουδετερώνουν άμεσα τις ελεύθερες ρίζες, αλλά ρυθμίζοντας τη δραστηριότητα των ξενοβιοτικών μεταβολικών ενζύμων (ένζυμα φάσης I και φάσης II), που ενεργοποιούν τη μακροχρόνια αντιοξειδωτική δράση. Η δράση των ενζύμων της φάσης I (ένζυμα κυτοχρώματος P450) έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ορισμένων μορίων με τοξική δράση καθότι ενισχύει την λιποδιαλυτότητα τους. Αντιθέτως τα ένζυμα φάσης II αυξάνουν τη διαλυτότητα στο νερό και προάγουν την απέκκριση αυτών των μεταβολιτών από το σώμα. Ως εκ τούτου, η αναστολή της φάσης I και η επαγωγή των ενζύμων φάσης II είναι απαραίτητες για την προστασία των κυττάρων από βλάβες του DNA από καρκινογόνους παράγοντες και αντιδραστικά είδη οξυγόνου. Τα γονίδια για τα ένζυμα φάσης II περιέχουν μια συγκεκριμένη αλληλουχία DNA που ονομάζεται στοιχείο αντιοξειδωτικής απόκρισης (ARE). Τα υδρολυτικά προϊόντα των γλυκοσινολικών ενώσεων, έχει αποδειχθεί ότι αυξάνουν τη δραστηριότητα των ενζύμων φάσης II αυξάνοντας τη μεταγραφή γονιδίων που περιέχουν ARE. Έτσι τα προϊόντα υδρόλυσης των γλυκοσινολικών ενώσεων, ιδίως τα ισοθειοκυανικά, έχουν κερδίσει την προσοχή ως ισχυροί επαγωγείς ενζύμων φάσης II, τα οποία είναι σημαντικά για την αποτοξίνωση των ηλεκτροφίλων και την προστασία από το οξειδωτικό στρες (Adarsh Pal Vig et al, 2009).

1.8 Βασικές θεωρητικές αρχές φασματοσκοπικής απορρόφησης στο υπέρυθρο φάσμα (IR)

Αρχικά, το φως είναι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που ορίζεται από τις ιδιότητες του μήκους κύματος (λ), της συχνότητας (f) και της ενέργειας (E). Η υπέρυθρη περιοχή βρίσκεται στη μέση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και περιλαμβάνει τρεις μεγάλες περιοχές: την άπω υπέρυθρη περιοχή (FIR), τη μέση υπέρυθρη περιοχή (MIR) και την εγγύς υπέρυθρη περιοχή (NIR). Η απορρόφηση από ένα υλικό οποιουδήποτε μήκους κύματος, προκαλεί μοριακές δονήσεις. Οι μεταβολές

της φωτεινής ενέργειας μεταξύ των τριών περιοχών οδηγούν σε ποικίλες απορροφήσεις από διαφορετικά μόρια και δεσμούς και προκαλούν διαφόρους τύπους δονήσεων (Krzysztof B. Beć et al, 2020 & Μιχαήλ Σ. Μπρατάκος, 2021. *Ενόργανη χημική ανάλυση. Εφαρμογές σε τρόφιμα και ποτά*, Εκδ. Παπαζήση, Αθήνα).

Η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα μόριο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μοριακής του ενέργειας. Λόγω του ότι η μοριακή ενέργεια μπορεί να λάβει ορισμένες τιμές, το μόριο απορροφά εκλεκτικά εκείνη την ακτινοβολία που θα αυξήσει την ενέργεια του από μία επιτρεπόμενη τιμή σε μία άλλη. Κάθε ηλεκτρονιακή κατάσταση αποτελείται από μικρότερες δονητικά ενεργειακές στάθμες· οι οποίες με την σειρά τους αποτελούνται από μικρότερες περιστροφικά ενεργειακές στάθμες. Τα μόρια με απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας υφίστανται διέγερση και περιστροφή σε υψηλότερες δονητικές (vibrational) και περιστροφικές (rotational) στάθμες ενέργειας, πάντα όμως στην ίδια ηλεκτρονιακή κατάσταση και συγκεκριμένα στη βασική (S_0). Έτσι, οι απορροφήσεις στην υπέρυθρη περιοχή οφείλονται σε διεγέρσεις δόνησης ή κάμψης – παραμόρφωσης των δεσμών και περιστροφής του μορίου. Βέβαια, απαραίτητη προϋπόθεση απορρόφησης υπέρυθρης (IR) ακτινοβολίας από το μόριο είναι να προκληθεί αλλαγή στη διπολική του ροπή. Όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της διπολικής ροπής του μορίου, τόσο ισχυρότερη είναι η απορρόφηση (Krzysztof B. Beć et al, 2020 & Yukihiro Ozaki, 2021).

Στα πολυατομικά μόρια οι ομοιοπολικοί δεσμοί αλλά και τα άτομα που τα αποτελούν, δεν συνδέονται σταθερά μεταξύ τους και επομένως μπρούν να δονούνται γύρω από τις καταστάσεις ηρεμίας τους. Επιπλέον οι υπάρχουσες γωνίες δεσμών μπορούν να αυξομειώνονται ύστερα από την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και δείγματος, οπότε εμφανίζονται ζώνες απορρόφησης οι οποίες και αντιστοιχούν σε θεμελιώδεις τρόπους δόνησης. Οι τρόποι δόνησης διακρίνονται στις ακόλουθες τάξεις:

1. Δονήσεις τάσης ή έκτασης (stretching vibrations)

Σε αυτές η δόνηση τελείται κατά μήκος του άξονα του χημικού δεσμού, που συνδέει τα δονούμενα άτομα και μεταβάλλεται η μεταξύ τους απόσταση (αυξάνεται ή ελαττώνεται) χωρίς όμως μεταβολή του άξονα ή των γωνιών του δεσμού. Οι συζευγμένες δονήσεις διακρίνονται σε συμμετρικές και σύμμετρες δονήσεις τάσης (π.χ. $>CH_2$) (Lucero Azusena Castillejos-Mijangos et al, 2022).

2. Δονήσεις κάμψης (bending)

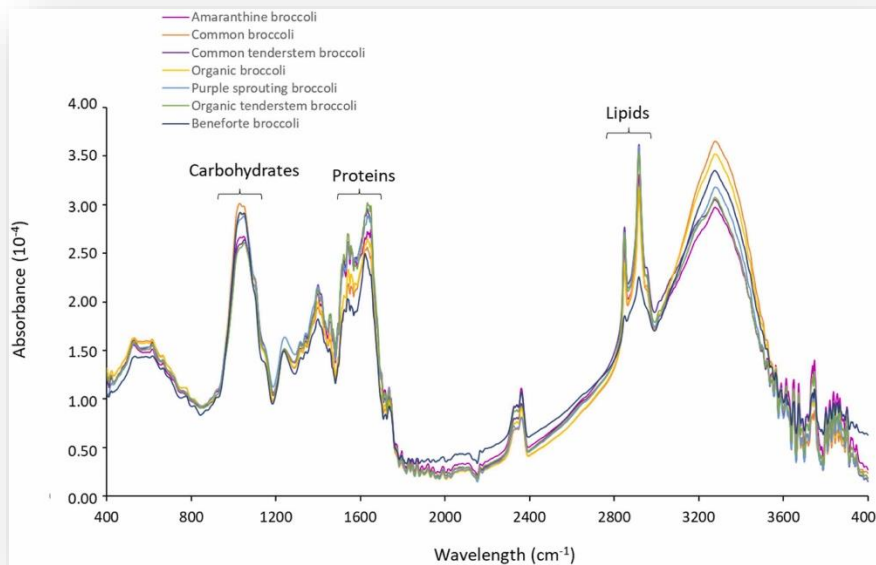
Οι δονήσεις αυτές χαρακτηρίζονται από μια συνεχή μεταβολή της γωνίας μεταξύ δύο δεσμών, που συνδέονται με ένα κεντρικό άτομο. Απαιτούν μικρότερες ενέργειες από τις δονήσεις τάσης και διακρίνονται σε δονήσεις «εντός του επιπέδου ισορροπίας (in-plane)» και σε δονήσεις «εκτός του επιπέδου ισορροπίας (out-of-plane)» (Krzysztof B. Beć et al, 2020).

Τα φάσματα υπερύθρου τα οποία λαμβάνονται από το όργανο (φασματοφωτόμετρο) αντιστοιχούν σε διεγέρσεις μεταξύ των διαφόρων ενεργειακών σταθμών δόνησης. Γραφικά απεικονίζονται ως μεταβολές της απορρόφησης σε συνάρτηση με τον κυματαριθμό (cm^{-1}). Η αποτίμηση, δηλαδή η ερμηνεία ενός φάσματος MIR είναι η απόδοση των απορροφήσεων στις αντίστοιχες δονήσεις των δεσμών και κατά συνέπεια στις αντίστοιχες ομάδες. Γενικώς αν και τα αποτελέσματα δεν είναι πάντα τα ακριβέστερα εξ αιτίας των αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν από δονήσεις άλλων ατόμων, που συνδέονται με τα άτομα της χαρακτηριστικής ομάδας, είναι δυνατόν με μεγάλη πιθανότητα να καθοριστεί το εύρος των κυματαριθμών στον οποίο θα βρεθεί ο κυματαριθμός απορρόφησης μιας δραστηρικής ομάδας. Για να επιτύχουμε να αποτίμηση αξιοποιούμε διαγράμματα συσχέτισης και πίνακες συσχέτισης οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως οδηγοί για περαιτέρω μελέτη. Είναι πολύ σημαντικό να επισημανθεί ότι η εμφάνιση μίας ταινίας απορρόφησης σε μία προβλεπόμενη θέση δεν αποτελεί απόδειξη παρουσίας της αντίστοιχης ομάδας, αφού μπορεί να προέρχεται από συνδυασμό άλλων, ενώ αντίθετα η απουσία μίας ταινίας απορρόφησης σε μία προβλεπόμενη θέση αποτελεί απόδειξη απουσίας της αντίστοιχης ομάδας (Krzysztof B. Beć et al, 2020 & Μιχαήλ Σ. Μπρατάκος, 2021. Ενόργανη χημική ανάλυση. Εφαρμογές σε τρόφιμα και ποτά, Εκδ. Παπαζήση, Αθήνα).

Κεφάλαιο 2: Ανασκόπηση μελετών φασματοσκοπίας σε φυτά του γένους *Brassica*

Η φασματοσκοπία του μέσου υπέρυθρου (MIR), στην περισσότερο χρησιμοποιούμενη περιοχή των $4.000 - 400 \text{ cm}^{-1}$, έχει εξελιχθεί από μία εργαστηριακή τεχνική ρουτίνας σε ένα φασματοσκοπικό εργαλείο ανίχνευσης τελευταίας τεχνολογίας. Η εξέλιξη αυτή προήλθε από την πρόσφατη πρόοδο σε όλο-ένα και πιο εξελιγμένες τεχνικές απόκτησης φασμάτων και από την ανάπτυξη προηγμένων υλικών παραγωγής, καθοδήγησης και ανίχνευσης της ακτινοβολίας. Σήμερα λοιπόν, καθίσταται δικαιολογημένη η παρουσία πληθώρας ερευνών με την εφαρμογή της εν λόγω πρακτικής (Krzysztof B. Beć et al, 2020 & Yukihiro Ozaki, 2021).

Συγκεκριμένα, το επιστημονικό περιοδικό/τεύχος «Journal of Food Composition and Analysis» δημοσίευσε μία μελέτη της οποίας τα τελικά αποτελέσματα υπέδειξαν ότι η φασματοσκοπία (MIR) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαφοροποίηση των τύπων των φυτών γένους *Brassica*, εν προκειμένω διαφοροποίηση του κοινού μπρόκολου από το τρυφερό μπρόκολο (Tenderstem). Επίσης, η φασματοσκοπία, μπορεί να επιστρατευθεί ως μέσο διαχωρισμού των φυτικών αυτών προϊόντων μεταξύ βιολογικής και μη βιολογικής παραγωγής. Στην πραγματικότητα, οι ερευνητές εφάρμοσαν σε 53 συνολικά δείγματα μπρόκολου, έναν συνδυασμό τεχνικών υγρής χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης (HPLC) με στόχο τον ποσοτικό προσδιορισμό των γλυκοζινολικών ενώσεων με τη φασματοσκοπία μέσου υπέρυθρου (MIR) και συγκεκριμένα στην περιοχή του δακτυλικού αποτυπώματος ($800 - 1400 \text{ cm}^{-1}$) με σκοπό τον ποιοτικό προσδιορισμό των ενώσεων. Έπειτα, στο πλαίσιο της χημειομετρικής ανάλυσης, δηλαδή της συσχέτισης των μετρήσεων των μεθόδων με την κατάσταση του συστήματος μέσω εφαρμογής μαθηματικών/στατιστικών μεθόδων, ελήφθησαν τα τελικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, όσον αφορά τα φάσματα της φασματοσκοπίας υπέρυθρου, ελήφθη το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 15).

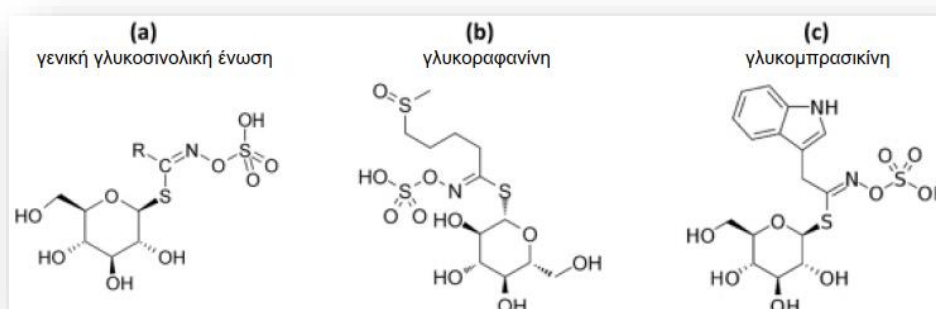


Εικόνα 15: Ο μέσος όρος φασμάτων διαφόρων τύπων δειγμάτων μπρόκολου που αναλύθηκαν με φασματοσκοπία στο μέσο υπέρυθρο (μετά από ομαλοποίηση και εξομάλυνση).
 Πηγή: Faye Langston et al, 2023

Όπως γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα, εντοπίζονται κοινές σημαντικές κορυφές/ταινίες απορρόφησης για τους διάφορους τύπους του μπρόκολου, στις περιοχές που σχετίζονται με υδατάνθρακες, λιπίδια και πρωτεΐνες. Ειδικότερα, οι υψηλές κορυφές με κυμαριθμό 1099 cm^{-1} αποδίδονται σε δονήσεις τάσης ή έκτασης (stretching vibrations) του δεσμού C-O των αλδευδών και των κετονών. Οι υψηλές κορυφές στα 2916 cm^{-1} αποδίδονται στις δονήσεις τάσης C-H των αλκυλίων. Οι ευρείες ζώνες απορρόφησης μεταξύ 3255 cm^{-1} και 3450 cm^{-1} αποδίδονται στις δονήσεις τάσης O-H των αλκοολών (Jackson et al, 1996). Οι ισχυρές κορυφές οι οποίες αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα για την περιοχή των δακτυλικών αποτυπωμάτων των υδατανθράκων (Hong et al., 2021) εντοπίζονται μεταξύ 920 cm^{-1} και 1185 cm^{-1} . Οι κορυφές μεταξύ των 1500 cm^{-1} και 1700 cm^{-1} σχετίζονται με ομάδες αμιδίων I και II, όπου η κορυφή των 1635 cm^{-1} αντιστοιχεί στην παραμόρφωση (deformation) του δεσμού N-H ομάδας αμιδίου I ενώ οι κορυφές των 1642 cm^{-1} και 1652 cm^{-1} αντιστοιχούν στη δόνηση τάσης (stretching vibrations) του δεσμού C=O ομάδας αμιδίου I επίσης (Turker-Kaya et al, 2017). Η κορυφή στα 1538 cm^{-1} αποδίδεται στις δονήσεις κάμψεις (bending) του δεσμού N-H καθώς και στις δονήσεις τάσης (stretching vibrations) C-N των αμιδίων II. Επιπρόσθετα, οι δονήσεις τάσης του μεθυλενίου ($-\text{CH}_2$), τόσο οι συμμετρικές όσο και οι ασύμμετρες, οι οποίες προέρχονται από τα λιπίδια, εντοπίζονται από τις

κορυφές των 2847 cm^{-1} και 2916 cm^{-1} . Οι κορυφές των 1099 cm^{-1} και 1241 cm^{-1} σχετίζονται με τις συμμετρικές και ασύμμετρες δονήσεις τάσης των δεσμών του εστέρα C-O-C, και οι κορυφές στα 1733 cm^{-1} και 1749 cm^{-1} αντιστοιχούν στον δεσμό C=O των εστέρων (Jackson et al, 1996).

Αναλυτικότερα, ο Vo και οι συνεργάτες του έχουν αναφερθεί στις χαρακτηριστικές κορυφές του φάσματος απορρόφησης του υπέρυθρου (IR) για συγκεκριμένες γλυκοζινολικές ενώσεις (Vo et al, 2013). Αυτοί οι ερευνητές έχουν αναφερθεί σε συγκεκριμένες απορροφήσεις δεσμών τόσο για την γλυκοραφανίνη· $3316, 2976, 2868, 1651, 1495, 1265, 1063\text{ cm}^{-1}$ [Εικόνα 16 (b)] όσο και για την γλυκομπρασικίνη· $3378, 1600, 1236, 1041\text{ cm}^{-1}$ [Εικόνα 16 (c)]. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι γλυκοσινολικές ενώσεις περιέχουν στο μόριο τους έναν σπάνιο δεσμό C=N-θειϊκό τμήμα [Εικόνα 16 (a)], ο οποίος ανιχνεύεται σε ισχυρές κορυφές μεταξύ 1630 cm^{-1} και 1690 cm^{-1} οι οποίες επικαλύπτουν τις κορυφές της ομάδας αμιδίων I. Επιπλέον, η β-D-θειογλυκόζη (β-D-thioglucose) εμφανίζει χαρακτηριστικές κορυφές περίπου στα $1000\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ (C-O), 2900 cm^{-1} (C-H) και στα $3200\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ (O-H). Ωστόσο, η ευρεία κορυφή που ανιχνεύεται περίπου στα 3200 cm^{-1} μπορεί να συσχετισθεί με την απορρόφηση ενώσεων οι οποίες περιέχουν αλκοόλες, φαινόλες, καρβοξυλομάδες και ενδεχομένως ομάδες ινδόλης (Ma et al., 2018). Για την ίδια κορυφή έχει αναφερθεί επίσης ότι συσχετίζεται με την απορρόφηση του δεσμού N-H των αμιδίων (Larkin, 2018).



Εικόνα 16: Χημική δομή: (α) γενικής γλυκοσινολικής ένωσης (β) γλυκοραφανίνης (γ) γλυκομπρασικίνης
Πηγή: Faye Langston et al, 2023

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι έχουν παρατηρηθεί σημαντικές διαφορές των φασμάτων υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταξύ αλειφατικών γλυκοσινολικών ενώσεων και αλεικυκλικών γλυκοσινολικών ενώσεων, των οποίων η παρουσία του

κλειστού δακτυλίου οφείλεται στην ύπαρξη ινδόλης. Ειδικότερα, για τις γλυκοσινολικές ενώσεις με ινδόλη έχουν παρατηρηθεί απορροφήσεις περίπου στα $1350\text{ cm}^{-1} - 1650\text{ cm}^{-1}$ (Coates, 2007).

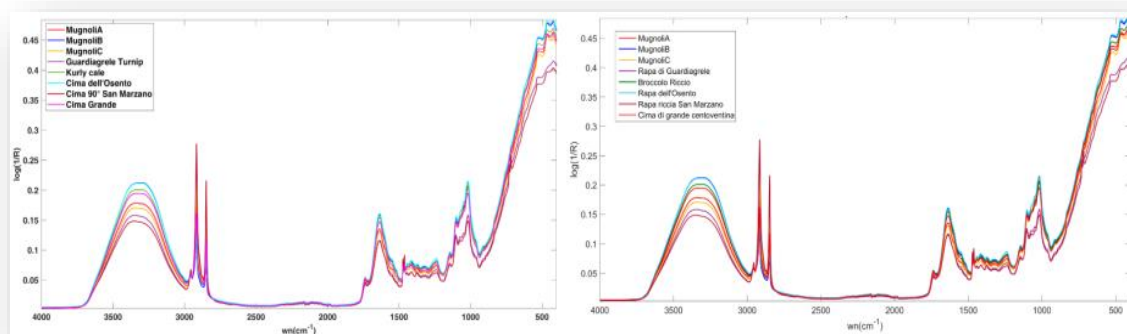
Πρόσφατα, δημοσιεύτηκε άρθρο με την ονομασία «Non-Destructive Characterization of Italian Local Brassicaceae Cultivars Using ATR-FT-IR and Chemometrics» στο οποίο περιγράφεται ο συνδυασμός εξασθενημένης ολικής ανάκλασης μετασχηματισμού Fourier υπέρυθρων φασμάτων και των μετέπειτα χημειομετρικών αναλύσεων που επέτρεψε την ακριβή ταξινόμηση των δειγμάτων βάσει μόνο του γενετικού τους υπόβαθρου. Η μελέτη διεξήχθη σε οκτώ από τις εννέα ποικιλίες *Brassicaceae* που καλλιεργήθηκαν, συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν σε πειραματικό αγρό (field), καθώς μία κατηγορία αποκλείστηκε λόγω μη σημαντικού αριθμού δειγμάτων. Οι ντόπιες φυλές που αναλύθηκαν σε αυτή τη μελέτη καλλιεργήθηκαν μέσα στον ίδιο πειραματικό αγρό στο Pattorano sul Gizio (Abruzzo, Κεντρική Ιταλία), χωρισμένες σε τέσσερα υπο-πεδία. Κάθε υπο-πεδίο χωρίστηκε περαιτέρω σε εννέα σειρές, μία για κάθε καλλιεργούμενο είδος. Στη συνέχεια, η σειρά των εννέα σειρών τυχαιοποιήθηκε για κάθε υποπεδίο (Εικόνα 17). Η καλλιέργεια φυτικών ειδών στο ίδιο πειραματικό πεδίο επιτρέπει την εκτίμηση διαφορετικών χαρακτηριστικών μεταξύ των εξεταζόμενων ποικιλιών χωρίς την επίδραση του κλίματος και του εδάφους.



Εικόνα 17: Αναπαράσταση της καλλιέργειας εννέα ποικιλιών *Brassicaceae* στον πειραματικό αγρό. Το χωράφι χωρίστηκε σε τέσσερα υπο-πεδία και οι σειρές των φυτών ήταν τυχαία διατεταγμένες μέσα σε κάθε υπο-πεδίο. Πηγή: Luciano Di Martino et al, 2024

Όλοι οι σπόροι φυτεύτηκαν στις 8 Σεπτεμβρίου 2022, συγκομίστηκαν στις 6 Φεβρουαρίου 2023, αποθηκεύτηκαν σε ψυγείο και αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας υπέρυθρη φασματοσκοπία εντός τριών ημερών από τη

συγκομιδή. Τα φάσματα καταγράφηκαν στα $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ φασματική περιοχή με 4 cm^{-1} ανάλυση οργάνου (instrumental resolution). Το background signal συλλέχθηκε με τον κρύσταλλο εκτεθειμένο στον αέρα. Τα φάσματα ATR-FT-IR ελήφθησαν μετά τον καθαρισμό των φύλλων με χαρτί κουζίνας για να αφαιρεθούν τυχόν υπολείμματα εδάφους. Όλα τα δείγματα αναλύθηκαν εντός τριών ημερών από τη συγκομιδή, με τα φύλλα να αποθηκεύονται στο ψυγείο. Ο κρύσταλλος καθαρίστηκε χρησιμοποιώντας μεθανόλη και υγρά μαντηλάκια μετά από κάθε ανάλυση δείγματος. Μεριμνήθηκε ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρης εξάτμιση της μεθανόλης πριν από την τοποθέτηση νέου δείγματος στη συσκευή ATR. Ελήφθη το ακόλουθο γράφημα απορρόφησης υπέρυθρου φάσματος των δειγμάτων (Εικόνα 18).



Εικόνα 18: Φάσματα MIR των δειγμάτων που συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν, κατά μέσο όρο σύμφωνα με την κατηγορία που ανήκει.
Πηγή: Luciano Di Martino et al, 2024

Γενικώς τα φάσματα που προέκυψαν αντικατοπτρίζουν εύστοχα την αναμενόμενη σύνθεση των δειγμάτων, τα οποία αποτελούνται κυρίως από νερό, πρωτεΐνες, σάκχαρα υδατάνθρακες, φυτικές ίνες, καθώς και φαινολικές ενώσεις, χλωροφύλλες, γλυκοζινολικά, καροτενοειδή κτλ (Luciano Di Martino et al, 2024).

Πιο επεξηγηματικά, η ευρεία κορυφή στα 3360 cm^{-1} αποδίδεται στη δόνηση τάσης του δεσμού O-H του μορίου του νερού. Αυτή η κορυφή επικαλύπτεται επίσης από δονήσεις τάσης του δεσμού O-H μορίων σακχάρων, φαινολικών ενώσεων, βιταμίνης C καθώς και από τις δονήσεις τάσης του δεσμού N-H των πρωτεϊνών και των ινδολών που περιέχονται στις γλυκοσινολικές ενώσεις (Vo et al, 2014). Η κορυφή των (περίπου) 2920 cm^{-1} αποδίδεται στις συμμετρικές δονήσεις τάσης του δεσμού C-H ενώ η κορυφή των (περίπου) 2860 cm^{-1} αποδίδεται στις ασύμμετρες δονήσεις τάσης του δεσμού C-H. Στη συνέχεια, η κορυφή των 1740 cm^{-1} αντιστοιχεί

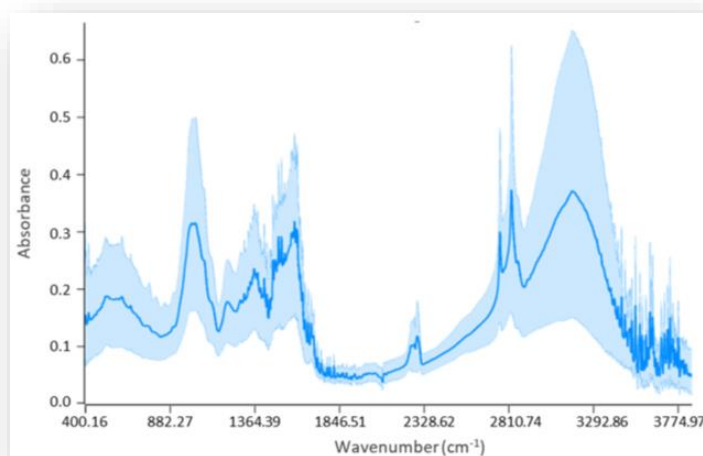
στις δονήσεις τάσης του δεσμού C=O στα μόρια των χλωροφύλλων και των πηκτινών (Reale et al, 2023). Η ευρεία κορυφή των 1640 cm^{-1} αποτελεί συνδυασμό διαφόρων δονήσεων. Συγκεκριμένα, προκύπτει από δονήσεις κάμψεις του δεσμού O-H, δονήσεις κάμψεις του δεσμού H-O-H του μορίου του νερού, δονήσεις της αμινομάδας των πρωτεϊνών και από τις δονήσεις του δεσμού C=N-θειικό τμήμα οι οποίες προκαλούν ισχυρές ταινίες μεταξύ των τιμών 1630 cm^{-1} και 1690 cm^{-1} (Faye Langston et al, 2023).

Η απορρόφηση στα 1515 cm^{-1} συσχετίζεται με τη δόνηση τάσης των αμιδίων II των πρωτεϊνών. Ωστόσο, εντός τους εύρους $1500 - 1200$, οι απορροφήσεις αποδίδονται στις δονήσεις κάμψης του μεθυλενίου (-CH₂) της κυτταρίνης (cellulose), καθώς και σε διάφορες δονήσεις των πηκτινών και χλωροφύλλων. Οι απορροφήσεις στο εύρος $1200 - 950\text{ cm}^{-1}$ αποδίδονται στην ασύμμετρη δόνηση τάσης του γλυκοζιτικού δεσμού C-O-C καθώς επίσης στις δονήσεις τάσης των δεσμών C-C και C-O των δακτυλίων, των πολυσακχαριτών (Martina Foschi et al, 2022). Αξίζει να σημειωθεί ότι απορροφήσεις εντός του εύρους (περίπου) $1495 - 1265\text{ cm}^{-1}$ αποδίδονται σε δονήσεις του δεσμού S=O των γλυκοσινολικών ενώσεων. Τέλος, απορροφήσεις στις τιμές 1600 cm^{-1} και 1100 cm^{-1} συσχετίζονται με την ύπαρξη αρωματικών ενώσεων, φλαβονοειδών και φαινολών (Luciano Di Martino et al, 2024).

Τα φάσματα απορρόφησης (IR) που ελήφθησαν στο πλαίσιο της χημειομετρικής ανάλυσης υποβλήθηκαν σε διεργασία ταξινόμησης (classification problems), χρησιμοποιώντας το λογισμικό SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) για ταξινόμηση των δειγμάτων και διακριτική ανάλυση (PLS-DA-Partial Least Squares Discriminant Analysis).

Επίσης το κορυφαίο περιοδικό του ινστιτούτου επιστήμης και τεχνολογίας τροφίμων δημοσίευσε εν έτει 2023 ένα άρθρο με την ονομασία «Determination of glucosinolates in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) by combining mid-infrared (MIR) spectroscopy with chemometrics». Οι ερευνητές Ali Ali Redha και Faye Langston μαζί με την υπόλοιπη επιστημονική ομάδα διεξήγαγε αυτή την μελέτη με σκοπό να αξιολογήσει την εφαρμογή της φασματοσκοπίας μέσου υπέρυθρου (MIR) για τον προσδιορισμό των γλυκοσινολικών ενώσεων στο εμπορικό μπρόκολο (*Brassica oleracea* var. *italica*). Χρησιμοποιήθηκαν 53 δείγματα (n=53) από διαφορετικές ποικιλίες τα οποία αναλύθηκαν εφαρμόζοντας φασματοσκοπία μέσου υπέρυθρου (MIR) και υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης, ώστε στο

τέλος να εφαρμοστεί η μέθοδος της παλινδρόμησης μερικών ελαχίστων τετραγώνων (PLSR), στο πλαίσιο της χημειομετρικής ανάλυσης των τιμών. Ειδικότερα οι κεφαλές των μπρόκολων (florets) δέχτηκαν ξήρανση με κατάψυξη (λυοφιλίωση) μέχρι τελικής υγρασίας 4%-6%. Τα λυοφιλωμένα δείγματα αλέθηκαν σε σκόνη χρησιμοποιώντας εμπορικό μύλο και αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγείς πλαστικές σακούλες στους $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέχρι την ανάλυση. Το φάσμα MIR των λυοφιλοποιημένων δειγμάτων μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ένα φασματομέτρο υπέρυθρων μετασχηματισμού Thermo™ Scientific Nicolet iS5 Fourier (FTIR) με τη τεχνική της εξασθενημένης ολικής ανάκλασης (ATR). Τα φάσματα καταγράφηκαν μεταξύ 4000 και 400 cm^{-1} χρησιμοποιώντας το λογισμικό OMNIC™. Έπειτα υπολογίστηκε το μέσο φάσμα για κάθε δείγμα. Για να αποφευχθεί η διασταυρούμενη μόλυνση μεταξύ των δειγμάτων, ο κρύσταλλος του φασματομέτρου καθαρίστηκε και ξηράνθηκε με 70% ισοπροπυλική αλκοόλη μεταξύ των δειγμάτων. Έτσι από την παραπάνω πειραματική πορεία προέκυψε το ακόλουθο φάσμα (Εικόνα 19).



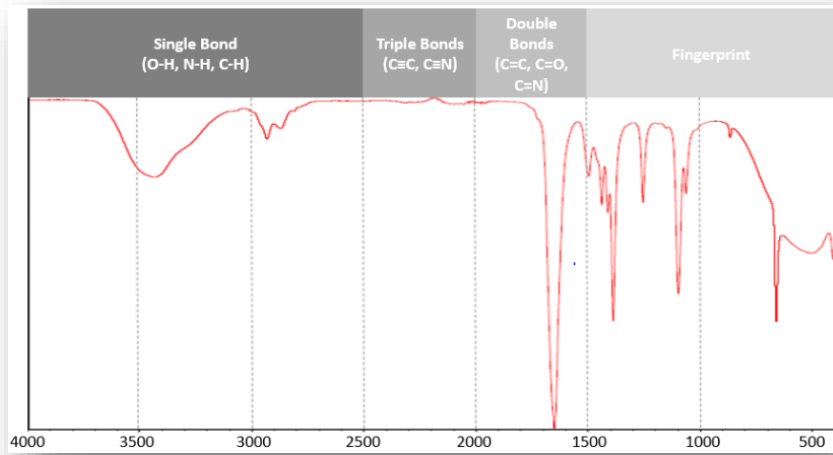
Εικόνα 19: Ληφθέν φάσμα φασματοσκοπίας μέσου υπέρυθρου, στο οποίο απεικονίζεται με έντονη μπλε γραμμή ο μέσος όρος και με ασθενές γαλάζιο χρώμα το εύρος απορρόφησης των διαφορετικών δειγμάτων.
Πηγή: Ali Ali Redha, Faye Langston et al, 2023

Οι κορυφές που σχετίζονται με τα κύρια μακροθρεπτικά στοιχεία που υπάρχουν στο μπρόκολο μπορούν να παρατηρηθούν στις εξής περιοχές: περίπου $900 - 1200\text{ cm}^{-1}$ (υδατάνθρακες), περίπου $1500 - 1680\text{ cm}^{-1}$ (πρωτεΐνες) και περίπου $2835 - 2980\text{ cm}^{-1}$ (λιπίδια). Ειδικότερα αναφορικά με την περιοχή των υδατανθράκων, κορυφές στις τιμές $930 - 1180\text{ cm}^{-1}$ φαίνεται να αποδίδονται στις δονήσεις τάσης (stretching vibrations) των δεσμών C-O και C-OH καθώς επίσης

και στις δονήσεις κάμψης (bending) του δεσμού C-H. Οι δονήσεις αυτές προέρχονται είτε από δομικούς είτε από μη-δομικούς υδατάνθρακες (όπως γλυκόζη, φρουκτόζη κτλ) (Campas-Baypoli et al., 2009). Έπειτα, στην περιοχή των πρωτεϊνών, κορυφές στις τιμές περίπου 1540 cm^{-1} και 1640 cm^{-1} αποδίδονται αντίστοιχα στις δονήσεις κάμψης του δεσμού N-H (αμίδιο II) και στις δονήσεις τάσης του δεσμού C=O (αμίδιο I) (Miller et al., 2013). Καταληκτικά η διπλή κορυφή στην περιοχή των λιπιδίων, 2849 cm^{-1} και 2926 cm^{-1} αντιστοιχούν στη συμμετρική και ασύμμετρη δόνηση τάσης του μεθυλενίου (-CH₂) (Abdullah et al., 2014). Αυτή η απορρόφηση σχετίζεται με τη περιεκτικότητα σε λιπαρά οξέα του μπρόκολου όπως αναφέρεται και από άλλους ερευνητές (Campas-Baypoli et al., 2009).

Τέλος, το επιστημονικό περιοδικό «Indonesian Journal of Science & Technology» δημοσίευσε το έτος 2019 ένα άρθρο με την ονομασία «How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material» το οποίο καταδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να αποτιμηθεί ένα ληφθέν φάσμα απορρόφησης για υλικά οργανικής φύσης· όπως είναι τα τρόφιμα, παρέχοντας τις ακριβείς απορροφήσεις για τις αντίστοιχες δονήσεις των δεσμών. Συγκεκριμένα, αναφέρεται σε φάσματα των οποίων οι παράμετροι είναι η απορρόφηση και ο κυματαριθμός. Γενικά το φάσμα IR, βάσει του εύρους των κυματαριθμών, διακρίνεται στο εγγύς υπέρυθρο ($13000 - 4000\text{ cm}^{-1}$), στο μέσο υπέρυθρο ($4000 - 400\text{ cm}^{-1}$) και στο άπω υπέρυθρο ($<400\text{ cm}^{-1}$). Η παρούσα μελέτη αφορά ανάλυση της μεθόδου FTIR στο εύρος του μέσου υπέρυθρου.

Επίσης, αναφέρεται η διάκριση της περιοχής του μέσου υπέρυθρου σε τέσσερις περιοχές (Εικόνα 20). Στην περιοχή του απλού δεσμού ($4000 - 2500\text{ cm}^{-1}$), στην περιοχή του τριπλού δεσμού ($2500 - 2000\text{ cm}^{-1}$), στην περιοχή του διπλού δεσμού ($2000 - 1500\text{ cm}^{-1}$) και στην περιοχή του δακτυλικού αποτυπώματος ($1500 - 600\text{ cm}^{-1}$).



Εικόνα 20: Οι τέσσερις περιοχές του φάσματος του μέσου υπέρυθρου
Πηγή: Asep Bayu Dani Nandiyanto et al, 2019

Κεφάλαιο 3: Σκοπός της εργασίας

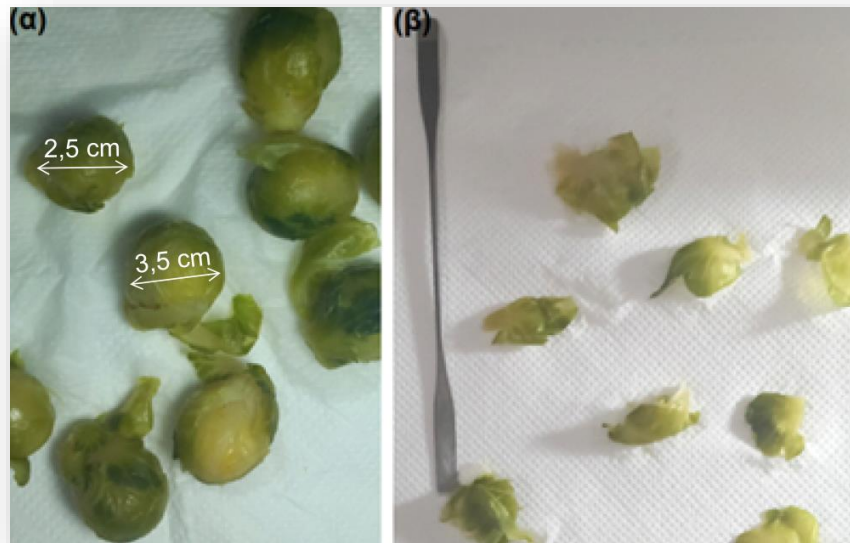
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική μελέτη διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών με χρήση φασματοσκοπίας μέσου υπέρυθρου. Τα λαχανάκια Βρυξελλών κατέχουν ήδη μεγάλο μερίδιο στη διεθνή αγορά και με το πέρασμα του χρόνου γίνονται όλοένα και πιο δημοφιλή στη χώρα μας. Ειδικότερα, η πληθώρα των φυτοχημικών ενώσεων που περιέχουν, έχουν άμεσα συσχετισθεί με ευεργετικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με τη βαθμολογία του Δείκτη Συνολικής Θρεπτικής Πυκνότητας συγκαταλέγεται στα 20 πιο θρεπτικά τρόφιμα υπογραμμίζοντας την άμεση ανάγκη κατανάλωσής τους. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το κενό που εντοπίζεται στο επίπεδο των επιστημονικών δημοσιεύσεων καθιστούν απαραίτητη την ενδελεχή μελέτη του βιοχημικού προφίλ αυτού του λαχανικού, μέσω ευέλικτων και μη καταστρεπτικών μεθόδων όπως είναι η φασματοσκοπία απορρόφησης στη μέση υπέρυθρη περιοχή με την τεχνική εξασθενημένης ολικής ανάκλασης με μετασχηματισμό Fourier (ATR-FTIR). Εν προκειμένω, χρησιμοποιήθηκαν λαχανάκια Βρυξελλών τα οποία διατίθενται στην ελληνική αγορά και υποβλήθηκαν σε ανάλυση με χρήση φασματοσκοπίας υπέρυθρου. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη και στατιστική επεξεργασία των ληφθέντων απορροφήσεων με στόχο την ανάδειξη των λαχάνων Βρυξελλών ως ένα ωφέλιμο για την ανθρώπινη υγεία τρόφιμο καθώς και τη διάκριση των διαφορετικών τμημάτων του καρπού αυτού με την ενδεχόμενη προοπτική αξιοποίησής του ως συμπλήρωμα διατροφής.

Κεφάλαιο 4: Υλικά, όργανα και μέθοδοι

4.1 Εξεταζόμενος δειγματοχώρος με εφαρμογή φασματοσκοπίας υπέρυθρου

Επιλέχθηκαν 16 δείγματα των λαχάνων Βρυξελλών από εμπορικά διαθέσιμο προϊόν «λαχανάκια Βρυξελλών Μπάρμπτα Στάθης» των 450 γραμμαρίων. Αρχικά το προϊόν διατίθονταν στην αγορά ον κατεψυγμένο στους -18°C . Εν συνεχεία, κατά το στάδιο της απόψυξης, αποθηκεύτηκε στο ψυγείο του εργαστηρίου δηλαδή σε θερμοκρασιακό εύρος $1 - 8^{\circ}\text{C}$ ώστε τα δείγματα να καταστούν κατάλληλα για τον μετέπειτα χειρισμό. Με σκοπό την επιτάχυνση της διαδικασίας, τα δείγματα αφέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($28-30^{\circ}\text{C}$) υπό σκιά. Το στάδιο της απόψυξης διεκόπη όταν τα δείγματα κρίθηκαν επαρκώς αποψυγμένα και έτοιμα για την ακόλουθη ανάλυση.

Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε απορροφητικό χαρτί κουζίνας και υπέστησαν τεμαχισμό ώστε να ληφθούν εξωτερικά, ενδιάμεσα και εσωτερικά (καρδιά) τμήματα του καρπού [Εικόνα 21 (β)]. Η κοπή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κοφτερής εργαστηριακής λεπίδας ενώ για τη στοίχισή τους και τη μεταφορά τους στο φασματόμετρο χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακή σπάτουλα. Το μέγεθος των λαχάνων Βρυξελλών τα οποία επιλέχθηκαν για την ανάλυση κυμαίνονταν μεταξύ $2,5 - 3,5\text{ cm}$ (διάμετρος) [Εικόνα 21 (α)] ενώ καρποί μικρότερου μεγέθους δεν επιλεχτήκαν, λόγω ενδεχόμενης μη ικανοποιητικής ανάπτυξης των καρπών αυτών και επομένως διαφοροποιημένου βιοχημικού προφίλ. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι, προτού τοποθετούν τα δείγματα προς ανάλυση ο ατμοσφαιρικός αέρας χρησιμοποιήθηκε για τον μηδενισμό του φασματόμετρου. Ο κρύσταλλος καθαριζόταν χρησιμοποιώντας μαντηλάκι εβαπτισμένο σε αλκοόλη μετά από ανάλυση κάθε δείγματος. Μεριμνήθηκε ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρης εξάτμιση της αλκοόλης πριν από την τοποθέτηση νέου δείγματος στη συσκευή ATR.



Εικόνα 21: Αριστερά (α) φαίνονται τα λαχανάκια Βρυξελλών τα οποία επιλέχτηκαν για την ανάλυση Δεξιά (β) φαίνονται τα τεμαχισμένα τμήματα που υποβλήθηκαν στην φασματομετρία καθώς και η σπάτουλα η οποία χρησιμοποιήθηκε για την διάταξη και την μεταφορά των δειγμάτων από τον εργαστηριακό πάγκο στον κρύσταλλο του οργάνου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεδομένου ότι στα λαχανάκια Βρυξελλών, υπάρχουν παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα τις διατροφικές και οργανοληπτικές ιδιότητές τους, υποβαθμίζοντας τη βιοδραστικότητα των ενώσεών τους -όπως το στάδιο της συγκομιδής τους, οι συνθήκες ανάπτυξης του φυτού, οι συνθήκες αποθήκευσης του προϊόντος, η θερμική κατεργασία (ζεμάτισμα/μαγείρεμα)- για αυτό το λόγο επιλέχτηκαν τα νωπά δείγματα από την ίδια εμπορική συσκευασία χωρίς να υποστούν καμία μορφή θερμικής κατεργασίας (Martínez, Armesto, Gómez-Limia, & Carballo, 2020).

4.2 Οργανολογία και μεθοδολογία

Η λήψη των φασμάτων FTIR πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου, χρησιμοποιώντας την μέθοδο της αποσβένουσας ολικής ανάκλασης (ATR). Κάθε δείγμα τμήματος του λαχάνου Βρυξελλών (εξωτερικό, ενδιάμεσο και εσωτερικό) τοποθετήθηκε προσεκτικά στο φασματόμετρο ATR-FTIR (Shimadzu, IRAffinity-1S FTIR Spectrometer, Japan). Η τιμή αναφοράς της αποσβένουσας ολικής ανάκλασης καθορίστηκε στα $3284,77 \text{ cm}^{-1}$. Τόσο το φάσμα με κενό τον θάλαμο τοποθέτησης του δείγματος με σκοπό την μείωση του θορύβου (background scan) όσο και τα φάσματα των δειγμάτων καταγράφηκαν στην περιοχή μεταξύ $4.000-499 \text{ cm}^{-1}$ με την διακριτική ικανότητα του οργάνου στα 4 cm^{-1} . Τα φάσματα FTIR των

δειγμάτων υπεβλήθησαν σε ATR διόρθωση, κανονικοποίηση και ομαλοποίηση (ATR Correction, Normalize, Soothing), ενώ η στατιστική επεξεργασία και ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την χρήση λογισμικού IBM SPSS statistics. Με την εφαρμογή μονοπαραγοντικής ανάλυσης διακύμανσης (One-Way ANOVA) εντοπίστηκε η στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων των διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών. Τέλος, καταγράφηκαν συνολικά όλες οι απορροφήσεις και οι διορθωμένες εντάσεις των κορυφών.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα επεξεργασίας των φασμάτων υπέρυθρου (IR) και συζήτηση αυτών

5.1 Αποτίμηση των φασμάτων απορρόφησης MIR στις αντίστοιχες δονήσεις των δεσμών

Από την φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων ελήφθησαν αξιοσημείωτες απορροφήσεις στα παρακάτω εύρη κυματαριθμών (cm^{-1}) για τα εσωτερικά (Πίνακας 4), ενδιάμεσα (Πίνακας 5) και εξωτερικά (Πίνακας 6) τμήματα του λαχάνου Βρυξελλών.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα κορυφών 16 δειγμάτων του εσωτερικού τμήματος

| Κορυφή (cm^{-1}) | Μέσος Όρος (Mean) | Τυπική Απόκλιση (SD) |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|
| 536-586 | 0,005 | 0,000 |
| 1022-1024 | 0,076 | 0,009 |
| 1099-1101 | 0,009 | 0,001 |
| 1147-1149 | - | - |
| 1238-1242 | 0,035 | 0,003 |
| 1319-1323 | 0,008 | 0,002 |
| 1369-1373 | 0,008 | 0,002 |
| 1415-1419 | 0,011 | 0,004 |
| 1629-1635 | 0,225 | 0,019 |
| 1732-1737 | - | - |
| 2855 | - | - |
| 2922 | 0,034 | 0,008 |
| 3280-3340 | 0,081 | 0,008 |

Πίνακας 5: Αποτελέσματα κορυφών 16 δειγμάτων του ενδιάμεσου τμήματος

| Κορυφή (cm^{-1}) | Μέσος Όρος (Mean) | Τυπική Απόκλιση (SD) |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|
| 536-586 | 0,004 | 0,001 |
| 1022-1024 | 0,077 | 0,011 |
| 1099-1101 | 0,013 | 0,003 |
| 1147-1149 | - | - |
| 1238-1242 | 0,036 | 0,004 |
| 1319-1323 | 0,009 | 0,002 |
| 1369-1373 | 0,008 | 0,002 |
| 1415-1419 | 0,007 | 0,001 |
| 1629-1635 | 0,231 | 0,030 |

| | | |
|------------------|-------|-------|
| 1732-1737 | - | - |
| 2855 | 0,015 | 0,003 |
| 2922 | 0,060 | 0,011 |
| 3280-3340 | 0,088 | 0,010 |

Πίνακας 6: Αποτελέσματα κορυφών 16 δειγμάτων του εξωτερικού τμήματος

| Κορυφή (cm⁻¹) | Μέσος Όρος (Mean) | Τυπική Απόκλιση (SD) |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 536-586 | 0,006 | 0,001 |
| 1022-1024 | 0,094 | 0,006 |
| 1099-1101 | 0,036 | 0,004 |
| 1147-1149 | 0,026 | 0,004 |
| 1238-1242 | 0,037 | 0,003 |
| 1319-1323 | 0,012 | 0,001 |
| 1369-1373 | 0,009 | 0,001 |
| 1415-1419 | 0,035 | 0,003 |
| 1629-1635 | 0,239 | 0,011 |
| 1732-1737 | 0,075 | 0,004 |
| 2855 | 0,075 | 0,004 |
| 2922 | 0,193 | 0,010 |
| 3280-3340 | 0,107 | 0,010 |

Από τους πίνακες των αποτελεσμάτων της απορρόφησης για τα εσωτερικά, ενδιάμεσα και εξωτερικά τμήματα εξάγεται πληθώρα συμπερασμάτων αναφορικά με την παρουσία των χαρακτηριστικών –για το λαχανάκι Βρυξελλών- ενώσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία περισσότερων των πέντε απορροφήσεων καταμαρτυρά ότι το εξεταζόμενο δείγμα δεν πρόκειται περί ενός απλού συστήματος αποτελούμενο από μικρού οργανικού βάρους ή ανόργανες ενώσεις. Αντιθέτως καταδεικνύει ότι πρόκειται περί ενός πολύπλοκου συστήματος -όπως άλλωστε είναι τα τρόφιμα- οργανικών ενώσεων (Asep Bayu Dani Nandiyanto et al, 2019).

Ακολουθώντας το πρωτόκολλο αποτίμησης του υπέρυθρου φάσματος των ερευνητών Asep Bayu Dani Nandiyanto et al, 2019 η ανάγνωση του φάσματος ξεκινά από την περιοχή του απλού δεσμού (4000 – 2500 cm⁻¹) . Ειδικότερα, η απορρόφηση στο μήκος κύματος των 3280 – 3340 cm⁻¹ αποδίδεται στη δόνηση τάσης του δεσμού O-H του μορίου του νερού καθώς επίσης στις δονήσεις τάσης

του δεσμού O-H μορίων σακχάρων, φαινολικών ενώσεων, βιταμίνης C καθώς και στις δονήσεις τάσης του δεσμού N-H των πρωτεϊνών και των ινδολών που περιέχονται στις γλυκοσινολικές ενώσεις (Luciano Di Martino et al, 2024 & Faye Langston et al, 2023). Αυτή η διαπίστωση επιβεβαιώνεται από τον Πίνακα 7 ο οποίος καταδεικνύει ότι τόσο η γλυκοραφανίνη όσο και η γλυκομπρασικίνη - οι οποίες συγκαταλέγονται μέσα στις πέντε πιο συχνά απαντώμενες γλυκοσινολικές ενώσεις στα τρόφιμα- απορροφούν στις τιμές 3316 cm^{-1} και 3378 cm^{-1} αντιστοίχως (James Melrose, 2019).

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικές κορυφές στα φάσματα απορρόφησης της γλυκοραφανίνης και της γλυκομπρασικίνης
Πηγή: Faye Langston et al, 2019 & Asep Bayu Dani Nandiyanto et al, 2019

| Ενώσεις | Τιμές κυματαριθμών (cm^{-1}) | | | | | | |
|-----------------|---|------|------|------|------|------|------|
| Γλυκοραφανίνη | 3316 | 2976 | 2868 | 1651 | 1495 | 1265 | 1063 |
| Γλυκομπρασικίνη | 3378 | 1600 | 1236 | 1041 | | | |

Έπειτα, η απορρόφηση στο μήκος κύματος 2922 cm^{-1} αποδίδεται στις συμμετρικές δονήσεις τάσης του δεσμού C-H (των αλκυλίων) ενώ η κορυφή των 2855 cm^{-1} αποδίδεται στις ασύμμετρες δονήσεις τάσης του δεσμού C-H, η οποία όπως εύκολα παρατηρεί κανείς, απουσιάζει από το φάσμα των δειγμάτων του εσωτερικού τμήματος σε αντίθεση με τα υπόλοιπα τμήματα (Luciano Di Martino et al, 2024).

Μεταβαίνοντας στην περιοχή του διπλού δεσμού -καθότι στην περιοχή του τριπλού δεσμού δεν εντοπίζονται δονήσεις δεσμών- εντοπίζεται η απορρόφηση στο εύρος κυματαριθμών $1629 - 1635\text{ cm}^{-1}$ η οποία αποτελεί συνδυασμό διαφόρων δονήσεων. Συγκεκριμένα, η απορρόφηση αυτή αποδίδεται στις δονήσεις κάμψης του δεσμού O-H, δονήσεις κάμψης του δεσμού H-O-H του μορίου του νερού, δονήσεις της αμινομάδας των πρωτεϊνών και κυρίως από τις δονήσεις του σπάνιου δεσμού C=N-θειικό τμήμα των γλυκοσινολικών ενώσεων οι οποίες προκαλούν ισχυρές ταινίες (Luciano Di Martino et al, 2024). Εν συνεχεία, η απορρόφηση στους κυματαριθμούς $1732 - 1737\text{ cm}^{-1}$, συσχετίζεται με τις δονήσεις τάσης του δεσμού C=O στα μόρια των εστέρων (Faye Langston et al, 2023). Επίσης, αυτές οι δονήσεις τάσης αποδίδονται στα μόρια των χλωροφύλλων και των πηκτινών (Luciano Di Martino et al, 2024).

Τέλος, ακολουθεί η ανάλυση των απορροφήσεων της περιοχής του δακτυλικού αποτυπώματος η οποία είναι μοναδική για κάθε διαφορετικό δείγμα.

Αρχικά, οι απορροφήσεις $1238 - 1242 \text{ cm}^{-1}$, $1319 - 1323 \text{ cm}^{-1}$, $1369 - 1373 \text{ cm}^{-1}$ και $1415 - 1419 \text{ cm}^{-1}$ αποδίδονται σε δονήσεις του δεσμού S=O των γλυκοσινολικών ενώσεων καθώς επίσης στις δονήσεις κάμψης του μεθυλενίου (CH_2) της κυτταρίνης (cellulose), καθώς και σε διάφορες δονήσεις των πηκτινών και των χλωροφύλλων. Οι απορροφήσεις $1022 - 1024 \text{ cm}^{-1}$ και $1099 - 1101 \text{ cm}^{-1}$ αποδίδονται στην ασύμμετρη δόνηση τάσης του γλυκοζιτικού δεσμού C-O-C καθώς επίσης στις δονήσεις τάσης των δεσμών C-C και C-O των δακτυλίων, των πολυσακχαριτών καθότι αποτελεί περιοχή δακτυλικών αποτυπωμάτων των υδατανθράκων (Luciano Di Martino et al, 2024 & Faye Langston et al, 2023). Επίσης στις απορροφήσεις $1022 - 1024 \text{ cm}^{-1}$, $1099 - 1101 \text{ cm}^{-1}$ και $1147 - 1149 \text{ cm}^{-1}$ μπορούν να αποδοθούν στην ένωση της β-D-θειογλυκόζης λόγω του δεσμού C-O των γλυκοσινολικών ενώσεων (Faye Langston et al, 2023).

5.2 Συζήτηση και σχολιασμός της ετερότητας των απορροφήσεων μέσω στατιστικής συσχέτισης των διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών

Καταρχάς αξίζει να επισημανθεί ότι η IR φασματοσκοπία είναι περισσότερο κατάλληλη για ποιοτικές και ημιποσοτικές αναλύσεις. Αντιθέτως οι εφαρμογές της στην ποσοτική ανάλυση είναι περιορισμένες. Ωστόσο βάσει των αποτελεσμάτων και της μετέπειτα στατιστικής επεξεργασίας τους, είναι δυνατόν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με τις ενώσεις του λαχάνου αυτού (Μιχαήλ Σ. Μπρατάκος, 2021. *Ενόργανη χημική ανάλυση. Εφαρμογές σε τρόφιμα και ποτά*, Εκδ. Παπαζήση, Αθήνα & Daniel Cozzolino et al, 2023).

Τα αποτελέσματα τα οποία ελήφθησαν για το εξωτερικό τμήμα των λαχάνων Βρυξελλών γενικώς παρουσιάζουν μία αύξουσα τάση του μέσου όρου (mean) των δεδομένων απορροφήσεων συγκριτικά με τα εσωτερικά και ενδιάμεσα τμήματά του καθώς εντοπίζονται απορροφήσεις οι οποίες είτε απουσιάζουν τελείως από τα εσωτερικά και ενδιάμεσα τμήματα, είτε εντοπίζονται ιδιαίτερως αυξημένες στα εξωτερικά.

Ειδικότερα στην τιμή της κορυφής $3280 - 3340 \text{ cm}^{-1}$ παρατηρείται αυξημένος μέσος όρος, όπου ενδεχομένως αποδίδεται στην αυξημένη περιεκτικότητα σε γλυκοσινολικές ενώσεις οι οποίες φέρουν ινδόλη, όπως η γλυκομπρασικήνη (Luciano Di Martino et al, 2024 & James Melrose, 2019). Επίσης παρατηρείται σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων του εσωτερικού

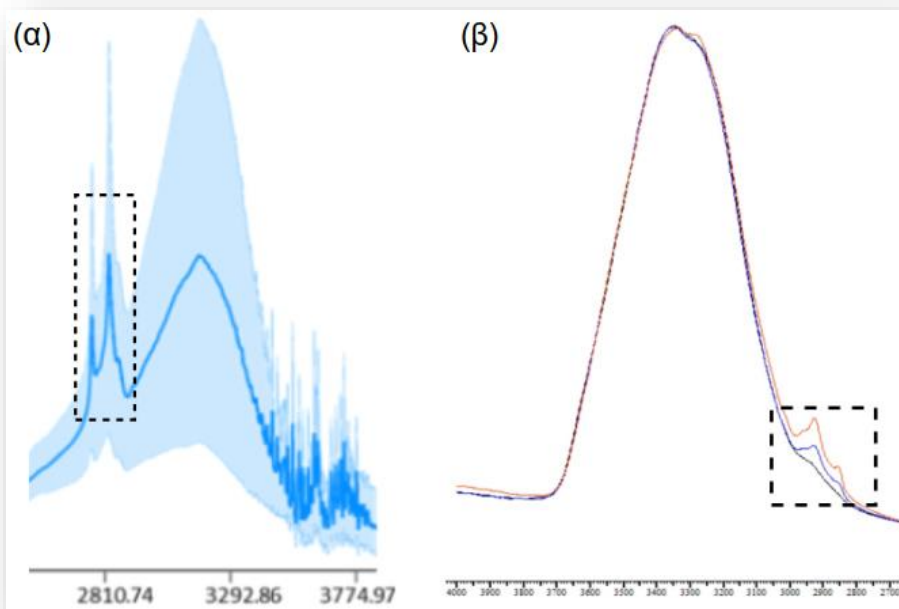
και μεσαίου τμήματος με τα δείγματα του εξωτερικού τμήματος (Πίνακας 8). Οι γλυκοσινολικές ενώσεις λειτουργούν ως γραμμή άμυνας του φυτού απέναντι σε μηχανικές κακώσεις, επιθέσεις παρασίτων και παθογόνων μικροοργανισμών. Έχει αναφερθεί ότι ο αμυντικός ρόλος των γλυκοζινολικών ενώσεων έναντι των επιβλαβών –για την υγεία του φυτού- παραγόντων οξύνεται με την επιδείνωση τους. Έτσι στα εξωτερικά τμήματα του καρπού εντοπίζονται σε σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες σε σύγκριση με το εσωτερικό του (Francesco Di Gioia et al, 2021). Δεν φαίνεται να αποδίδεται στην δόνηση τάσης του δεσμού O-H του μορίου του νερού καθώς η αφυδάτωση που υπέστη το δείγμα πριν την ανάλυση – μία μορφή ξήρανσης σε ρεύμα θερμού αέρα- δρα διεισδυτικά από την επιφάνεια του τροφίμου και εισχωρεί προς το εσωτερικό του, επομένως θα ήταν αδύνατον το εξωτερικό στρώμα να είναι πιο υδαρές από το εσωτερικό (Siméon Bourdoux et al, 2016).

Πίνακας 8: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 3280 – 3340 cm^{-1}

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|---|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | -,00731 | ,086 |
| | Εξωτερικό | -,02613* | <,001 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | ,00731 | ,086 |
| | Εξωτερικό | -,01881* | <,001 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,02613* | <,001 |
| | Ενδιάμεσο | ,01881* | <,001 |
| *Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05 | | | |

Ενώ η απορρόφηση στο κυματαριθμό 2922 cm^{-1} αποδίδεται στις συμμετρικές δονήσεις τάσης του δεσμού C-H (των αλκυλίων), η απορρόφηση στην τιμή κυματαριθμού 2855 cm^{-1} αποδίδεται στις ασύμμετρες δονήσεις τάσης του δεσμού C-H της χημικής ομάδας του μεθυλενίου (-CH₂), η οποία φαίνεται να απουσιάζει από τα εσωτερικά τμήματα και να εντοπίζεται αμυδρά στα ενδιάμεσα τμήματα (Luciano Di Martino et al, 2024). Όπως μάλιστα υπογραμμίζεται από ερευνητές η διπλή κορυφή στην περιοχή των λιπιδίων, περίπου 2849 και 2916 cm^{-1} , αντιστοιχεί σε συμμετρική και ασύμμετρη δόνηση έκτασης (stretching

vibrations) της ομάδας $-CH_2$ που σχετίζονται με την περιεκτικότητα του των λαχανικών του γένους *Brassica* –ειδικότερα του μπρόκολου- σε λιπαρά οξέα (Εικόνα 22) (Ali Ali Redha et al, 2023).



Εικόνα 22: Κοινές κορυφές απορρόφησης σε τμήματα του φάσματος απορρόφησης του μπρόκολου (α) και των λαχάνων Βρυξελλών (β).
Πηγή: Ali Ali Redha et al, 2023

Από την στατιστική επεξεργασία, προκύπτει ότι μεταξύ των δειγμάτων του εσωτερικού τμήματος και των δειγμάτων του μεσαίου τμήματος εντοπίζεται στατιστικά σημαντική διαφορά περιεκτικότητας λιπαρών οξέων. Ωστόσο σημαντική στατιστική διαφορά εντοπίζεται επίσης μεταξύ των δειγμάτων του μεσαίου στρώματος με τα δείγματα του εξωτερικού στρώματος (Πίνακας 9). Έτσι επαληθεύεται η αύξουσα περιεκτικότητα των στρωμάτων του καρπού σε λιπαρά οξέα, καθότι τα λαχανάκια Βρυξελλών και ιδιαίτερα οι σπόροι των φυτών του γένους *Brassica* –από τους οποίους σπόρους βλαστάνουν τα φυτά- είναι ιδιαίτερα πλούσιοι σε αυτές τις ενώσεις (Daniel Cozzolino et al, 2023).

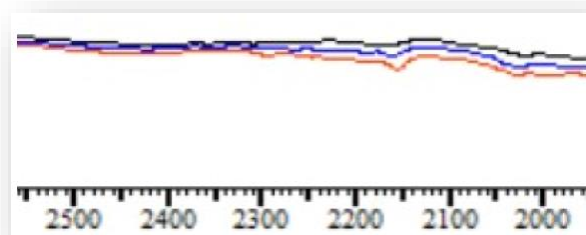
Πίνακας 9: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 2922 cm^{-1}

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|------------------|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | -,02581* | <,001 |
| | Εξωτερικό | -,15856* | <,001 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | ,02581* | <,001 |
| | Εξωτερικό | -,13275* | <,001 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,15856* | <,001 |
| | Ενδιάμεσο | ,13275* | <,001 |

*Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05

Λαμβάνοντας υπόψη τον πίνακα 7 θα μπορούσε αυτή η αύξουσα τάση της απορρόφησης να αποδοθεί δευτερευόντως στην αυξημένη περιεκτικότητα σε γλυκοσινολικές ενώσεις (κυρίως γλυκοραφανίνης και γλυκομπρασικίνης) στα εξωτερικά στρώματα έναντι των ενδιάμεσων και των εσωτερικών (Francesco Di Gioia et al, 2021).

Στην περιοχή του τριπλού δεσμού (2500 – 2000 cm^{-1}) δεν εντοπίζεται απορρόφηση η οποία θα οφείλονταν κυρίως στην παρουσία είτε αλειφατικού κυανιδίου/νιτριλίου είτε αρωματικού κυανιδίου/νιτριλίου (Εικόνα 23). Οι ενώσεις αυτές θα απορροφούσαν στις τιμές 2280 – 2240 cm^{-1} και 2240 – 2220 cm^{-1} αντιστοίχως (Asep Bayu Dani Nandiyanto et al, 2019).



Εικόνα 23: Απουσία ταινίας απορρόφησης στην περιοχή του τριπλού δεσμού για τα λαχανάκια Βρυξελλών

Αξίζει να τονιστεί ότι παρατηρείται απορρόφηση στους κυματαριθμούς 1732 – 1737 cm^{-1} στα εξωτερικά τμήματα ενώ στα εσωτερικά και ενδιάμεσα τμήματα απουσιάζει. Όπως προαναφέρθηκε, η απορρόφηση αυτή συσχετίζεται με

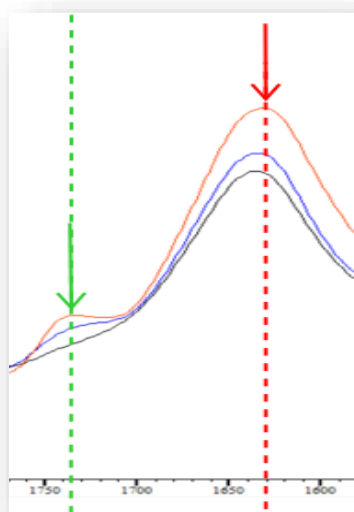
τα μόρια των εστέρων, των χλωροφύλλων και των πηκτινών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα λαχανάκια βρυξελλών περιέχουν ιδιαίτερως υψηλή περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη έναντι άλλων φυτών της οικογένειας *Brassicaceae* (Emine Nakilcioglu-Taş et al, 2017) δικαιολογείται η απουσία απορρόφησης στην τιμή της χλωροφύλλης στο εσωτερικό τμήμα του λαχάνου -το κατά το κοινώς λεγόμενον «καρδιά»- ενώ συγχρόνως δικαιολογείται η παρουσία της στα εξωτερικά στρώματα· καθότι είναι γνωστό ότι σε υψηλότερες εντάσεις φωτός προκαλείται ταχύτερη ανάπτυξη του συστήματος της φωτοσύνθεσης και επομένως της χλωροφύλλης (Parisa Ghorbanzadeh et al, 2021). Η απορρόφηση στους κυματαριθμούς 1629 cm^{-1} – 1635 cm^{-1} δεν εμφανίζει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων του εσωτερικού, του μεσαίου και του εξωτερικού τμήματος (Πίνακας 10). Επομένως φαίνεται ότι η περιεκτικότητα των γλυκοζινολικών ενώσεων και ειδικότερα της γλυκοραφανίνης –η οποία απορροφά $\approx 1651\text{ cm}^{-1}$ λόγω του δεσμού (C=N)- των διαφορετικών τμημάτων των λαχάνων Βρυξελλών, καθώς και η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες διατηρούνται σε σχετικά σταθερά επίπεδα, σε αντίθεση με την γλυκομπρασικίνη (Daniel Cozzolino et al, 2023). Αυτό το γεγονός δεν μας προκαλεί έκπληξη καθότι αξίζει να σημειωθεί ότι ο κύριος λόγος για τον οποίο τα λαχανάκια Βρυξελλών θεωρούνται *superfood* (υπερτρόφιμα) δεν είναι το πλούσιο πρωτεϊνικό περιεχόμενο τους αλλά η μεγάλη περιεκτικότητά τους σε βιοδραστικές φυτοχημικές ενώσεις, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος $1629 - 1635\text{ cm}^{-1}$

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|------------------|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | -,00619 | ,704 |
| | Εξωτερικό | -,01425 | ,166 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | ,00619 | ,704 |
| | Εξωτερικό | -,00806 | ,553 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,01425 | ,166 |
| | Ενδιάμεσο | ,00806 | ,553 |

*Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05

Αξίζει να υπογραμμιστεί ότι η σχηματιζόμενη ταινία στο φάσμα απορρόφησης οφειλόμενη στις πρωτεΐνες και την γλυκοραφανίνη σε σχέση με την σχηματιζόμενη ταινία απορρόφησης οφειλόμενη στην χλωροφύλλη είναι αρκετά μεγαλύτερη (Εικόνα 24). Η μεγαλύτερη επιφάνεια της κορυφής που προέρχεται από τις πρωτεΐνες του λαχάνου οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη περιεκτικότητα του σε αυτές (3,38 γραμμάρια ανά 100 γραμμάρια ωμού λαχάνου Βρυξελλών, Πίνακας 3) έναντι της μικρότερης περιεκτικότητας τους σε χλωροφύλλη ($0,84 \pm 0,03$ mg ανά 100 γραμμάρια λαχάνου Βρυξελλών) (Christophe El-Nakhel et al, 2021).



Εικόνα 24: Τμήμα από το φάσμα του λαχάνου Βρυξελλών (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ).

Το βέλος με το πράσινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση εύρους $1732 - 1737 \text{ cm}^{-1}$ οφειλόμενη στη χλωροφύλλη. Το βέλος με το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση εύρους $1629 - 1635 \text{ cm}^{-1}$ οφειλόμενη στις πρωτεΐνες και στην γλυκοραφανίνη.

Η επόμενη διακριτή διαφοροποίηση απορροφήσεων παρατηρείται στην περιοχή του δακτυλικού αποτυπώματος, στο εύρος των $1415 - 1419 \text{ cm}^{-1}$. Η διαφορά μεταξύ των απορροφήσεων των εσωτερικών και ενδιάμεσων τμημάτων ενδεχομένως αποδίδεται στην αυξημένη περιεκτικότητα των εξωτερικών στρωμάτων σε γλυκοσινολικές ενώσεις (Vo et al, 2013). Εντοπίζεται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων του εσωτερικού στρώματος με τα δείγματα του μεσαίου στρώματος. Επίσης εντοπίζεται σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων του μεσαίου με του εξωτερικού στρώματος (Πίνακας 11). Αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός ότι –για το συγκεκριμένο μήκος κύματος– δεν παρατηρείται η αύξουσα τάση περιεκτικότητας των γλυκοσινολικών ενώσεων από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά στρώματα. Τούτο καταδεικνύει ασφαλώς μεν την

υπερίσχυση του εξωτερικού στρώματος σε κυτταρίνη έναντι των υπολοίπων καθώς δε την υπερίσχυση του εσωτερικού στρώματος έναντι του μεσαίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι γενικώς οι απορροφήσεις εντός του εύρους (περίπου) 1495 – 1265 cm^{-1} αποδίδονται σε δονήσεις του δεσμού S=O των διαφόρων γλυκοσινολικών ενώσεων όπως είναι η γλυκοραφανίνη και η γλυκομπρασικήνη, έτσι καθίσταται δύσκολη η διάκριση τους (Ali Ali Redha et al, 2023).

Πίνακας 11: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1415 - 1419 cm^{-1}

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|------------------|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | ,00375* | ,004 |
| | Εξωτερικό | -,02419* | <,001 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | -,00375* | ,004 |
| | Εξωτερικό | -,02794* | <,001 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,02419* | <,001 |
| | Ενδιάμεσο | ,02794* | <,001 |

*Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05

Στη συνέχεια, η επόμενη απορρόφηση πραγματοποιείται στο εύρος 1369 cm^{-1} – 1373 cm^{-1} . Εν προκειμένω, εντοπίζεται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων του εσωτερικού και μεσαίου στρώματος με τα δείγματα του εξωτερικού στρώματος. Το εξωτερικό τμήμα παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη παρουσία γλυκοσινολικών ενώσεων έναντι των υπόλοιπων (Πίνακας 12).

Πίνακας 12: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1369 - 1373 cm^{-1}

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|------------------|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | ,00013 | ,971 |
| | Εξωτερικό | -,00144* | ,030 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | -,00013 | ,971 |
| | Εξωτερικό | -,00156* | ,017 |

| | | | |
|---|-----------|---------|------|
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,00144* | ,030 |
| | Ενδιάμεσο | ,00156* | ,017 |
| *Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05 | | | |

Ομοίως με το προηγούμενο εύρος, στη απορρόφηση με το εύρος $1319\text{ cm}^{-1} - 1323\text{ cm}^{-1}$ εντοπίζεται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων του εσωτερικού και μεσαίου στρώματος με τα δείγματα του εξωτερικού στρώματος (Πίνακας 13).

Πίνακας 13: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος $1319 - 1323\text{ cm}^{-1}$

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|---|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | -,00060 | ,514 |
| | Εξωτερικό | -,00419* | <,001 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | ,00060 | ,514 |
| | Εξωτερικό | -,00358* | <,001 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,00419* | <,001 |
| | Ενδιάμεσο | ,00358* | <,001 |
| *Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05 | | | |

Αντιθέτως, στο εύρος $1238\text{ cm}^{-1} - 1242\text{ cm}^{-1}$ δεν εντοπίζεται απολύτως καμία στατιστικά σημαντική διαφορά. Οι απορροφήσεις των δειγμάτων των τριών αυτών διαφορετικών στρωμάτων φαίνεται να κυμαίνονται σε παραπλήσια επίπεδα (Πίνακας 14). Πρόκειται για απορρόφηση αποδιδόμενη στις γλυκοζινολικές ενώσεις (Luciano Di Martino et al, 2024 & Faye Langston et al, 2023) καθώς και στις ασύμμετρες δονήσεις τάσης των δεσμών του εστέρα C-O-C (Jackson et al, 1996). Ειδικότερα στο συγκεκριμένο εύρος εντοπίζεται απορρόφηση της νεογλυκομπρασικίνης (1242 cm^{-1}), της οποίας τα επίπεδα παραμένουν σταθερά (Ali Ali Redha et al, 2023).

Πίνακας 14: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1238 - 1242 cm^{-1}

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|------------------|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | -,00081 | ,799 |
| | Εξωτερικό | -,00175 | ,361 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | ,00081 | ,799 |
| | Εξωτερικό | -,00094 | ,742 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,00175 | ,361 |
| | Ενδιάμεσο | ,00094 | ,742 |

*Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05

Έπειτα παρατηρείται μία αύξουσα τάση απορρόφησης στο εύρος 1147 – 1149 cm^{-1} , στο εύρος 1099 – 1101 cm^{-1} και στο εύρος 1022 – 1024 cm^{-1} . Συγκεκριμένα δε το πρώτο προαναφερθέν εύρος κυματαριθμών (1147 – 1149 cm^{-1}) τόσο στα εσωτερικά όσο και στα ενδιάμεσα τμήματα παρουσιάζει αμελητέα (\approx μηδενική) απορρόφηση. Αυτές οι τιμές, όπως προαναφέρθη, καταμαρτυρούν την παρουσία της ένωσης β -D-θειογλυκόζης, η οποία αποτελεί τμήμα των γλυκοσινολικών ενώσεων. Επομένως τα εξωτερικά τμήματα έτι μία φορά φαίνεται να παρουσιάζονται με αυξημένη περιεκτικότητα σε γλυκοσινολικές ενώσεις (Faye Langston et al, 2023 & Francesco Di Gioia et al, 2021).

Στο εύρος 1099 cm^{-1} – 1101 cm^{-1} εντοπίζεται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων όλων των διαφορετικών τμημάτων (Πίνακας 15), επαληθεύοντας τόσο την συνήθη αύξουσα τάση των γλυκοσινολικών ενώσεων όσο και την παρουσία υδατανθράκων, καθότι οι απορροφήσεις αυτές βρίσκονται εντός της περιοχής των δακτυλικών αποτυπωμάτων των πολυσακχαριτών (Luciano Di Martino et al, 2024 & Faye Langston et al, 2023). Ειδικότερα, έχει αναφερθεί ότι στις κορυφές περίπου 930 cm^{-1} έως 1180 cm^{-1} (οι οποίες προκαλούνται από δονήσεις τάσης των δεσμών C-O και C-OH και από δονήσεις κάμψης C-H) μπορεί να σχετίζονται τόσο με δομικούς όσο και με μη δομικούς υδατάνθρακες, όπως γλυκόζη, φρουκτόζη και πολυσακχαρίτες (π.χ. άμυλο) (Ali Ali Redha et al, 2023).

Πίνακας 15: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1099 - 1101 cm^{-1}

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|------------------|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | -,00450* | <,001 |
| | Εξωτερικό | -,02756* | <,001 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | ,00450* | <,001 |
| | Εξωτερικό | -,02306* | <,001 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,02756* | <,001 |
| | Ενδιάμεσο | ,02306* | <,001 |

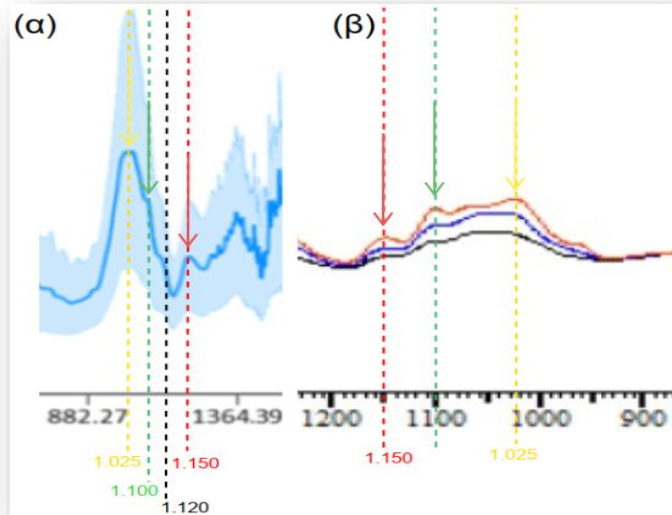
*Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05

Τέλος στο εύρος 1022-1024 cm^{-1} εντοπίζεται, για ακόμη μία φορά, στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων του εσωτερικού και του μεσαίου στρώματος έναντι των δειγμάτων του εξωτερικού στρώματος (Πίνακας 16). Έχει αναφερθεί ότι κορυφές που παρατηρήθηκαν γύρω στα 1000, 1040 και 1120 cm^{-1} μπορεί να αποδοθεί σε δονήσεις τάσης του δεσμού C-O ή C-OH των υδατανθράκων καθώς η απορρόφηση βρίσκεται εντός της περιοχής των δακτυλικών αποτυπωμάτων τους (Luciano Di Martino et al, 2024 & Faye Langston et al, 2023), ή λόγω του δεσμού S = O ορισμένων οργανοθειικών ενώσεων όπως είναι οι γλυκοσινολικές ενώσεις (Ali Ali Redha et al, 2023). Επίσης πρέπει να επισημανθεί ότι οι προαναφερθείσες απορροφήσεις του φάσματος των λαχάνων Βρυξελλών βρίσκονται σε ομοφωνία με ευρήματα σε φάσμα μπρόκολου άλλων ερευνητών (Εικόνα 25) (Ali Ali Redha et al, 2023).

Πίνακας 16: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 1022 - 1024 cm^{-1}

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|------------------|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | -,00069 | ,973 |
| | Εξωτερικό | -,01756* | <,001 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | ,00069 | ,973 |

| | | | |
|---|-----------|----------|-------|
| | Εξωτερικό | -,01688* | <,001 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,01756* | <,001 |
| | Ενδιάμεσο | ,01688* | <,001 |
| *Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05 | | | |



Εικόνα 25: Κοινές κορυφές απορρόφησης σε τμήματα φάσματος του μπρόκολου (α) και των λαχάνων Βρυξελλών (β).
 Το βέλος με το πράσινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση του εύρους 1099-1101 cm^{-1}
 Το βέλος με το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση του εύρους 1147-1149 cm^{-1}
 Το βέλος με το κίτρινο χρώμα υποδεικνύει την απορρόφηση του εύρους 1022-1024 cm^{-1}

Καταληκτικά, η απορρόφηση που εντοπίζεται στο εύρος 536 cm^{-1} – 586 cm^{-1} παρουσιάζει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δειγμάτων όλων των διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου (Πίνακας 17). Οι απορροφήσεις σε μικρότερες τιμές μήκους κύματος \approx 400 – 600 cm^{-1} αποδίδονται στις δονήσεις κάμψης του δεσμού –NCS εντός και εκτός επιπέδου ισορροπίας (in-plane & out-of-plane). Οι δονήσεις αυτές συσχετίζονται με τις ισοθειοκυανικές ενώσεις, οι οποίες παράγονται -όπως έχει αναφερθεί- κατά την ρήξη των κυτταρικών δομών και από την προκύπτουσα αλληλεπίδραση μεταξύ του ενζύμου μυροσινάσης και των γλυκοσινολικών ενώσεων. Καθίσταται λοιπόν ευκολονόητο ότι, η παρουσία τους αποτελεί ενδεικτικό στοιχείο της πρώην παρουσίας των γλυκοσινολικών ενώσεων (καθότι προέρχονται από αυτές) και έτσι αιτιολογείται η αύξουσα αυτή τάση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων. (Ali Ali Redha, Luciana Torquati et al, 2023).

Πίνακας 17: Αποτελέσματα One-Way ANOVA, για τις απορροφήσεις των 16 δειγμάτων των τριών διαφορετικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών, στο εύρος κύματος 536 - 586 cm^{-1}

| Τμήμα (I) | Τμήμα (J) | Mean Difference (I-J) Διαφορά Μέσων Όρων | Sig. p-value |
|---|-----------|--|-----------------|
| Εσωτερικό | Ενδιάμεσο | ,00106* | ,016 |
| | Εξωτερικό | -,00150* | <,001 |
| Ενδιάμεσο | Εσωτερικό | -,00106* | ,016 |
| | Εξωτερικό | -,00256* | <,001 |
| Εξωτερικό | Εσωτερικό | ,00150* | <,001 |
| | Ενδιάμεσο | ,00256* | <,001 |
| *Η διαφορά των μέσων όρων είναι σημαντική όταν p-value < 0,05 | | | |

Τέλος, προκύπτει ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 18) όπου παρουσιάζονται αναλυτικά η ζώνη απορρόφησης, το είδος δόνησης του δεσμού και η αποτίμηση της.

Πίνακας 18: Συγκεντρωτικός πίνακας με την ταινία απορρόφησης, το είδος της δόνησης και την αποτίμηση.

| Ταινία απορρόφησης | | Είδος δόνησης | Αποτίμηση | |
|----------------------|--|---|--|--------------------|
| Περιοχή απλού δεσμού | 3280 – 3340 cm^{-1} | Δόνηση έκτασης δεσμού N-H | Ινδόλες/γλυκοσινολικές ενώσεις (γλυκομπρασικήνη) | |
| | | | Πρωτεΐνες | |
| | 2922 cm^{-1} | Δόνηση έκτασης δεσμού O-H | | Μόριο νερού |
| | | | | Βιταμίνη C |
| | | | | Σάκχαρα |
| | | | | Φαινολικές ενώσεις |
| 2855 cm^{-1} | Ασύμμετρη δόνηση έκτασης του δεσμού C-H (-CH ₂) | Λιπαρά οξέα | | |
| 2922 cm^{-1} | Συμμετρική δόνηση έκτασης του δεσμού C-H (-CH ₂) | | | |
| Περιοχή διπλού | 1732 – 1737 cm^{-1} | Δόνηση έκτασης δεσμού C=O | Χλωροφύλλες | |
| | | | Πηκτίνες | |
| | 1629 - 1635 cm^{-1} | Δόνηση του σπάνιου δεσμού C=N-θεϊκό τμήμα | Γλυκοσινολικές ενώσεις (γλυκοραφανίνη) | |

| | | Δόνηση αμινομάδας | Πρωτεΐνες |
|---------------------------------|------------------------------|---|---|
| | | Δόνηση κάμψης δεσμού H-O-H | Μόριο νερού |
| Περιοχή δακτυλικού αποτυπώματος | 1415 – 1419 cm^{-1} | Δόνηση δεσμού S=O Δόνηση κάμψης μεθυλενίου (CH_2) | Ποικίλες γλυκοσινολικές ενώσεις Χλωροφύλλη Κυτταρίνη Πηκτίνη |
| | 1369 – 1373 cm^{-1} | | |
| | 1319 – 1323 cm^{-1} | | Γλυκοσινολικές ενώσεις (νεογλυκομπρασικήνη) |
| | 1238 – 1242 cm^{-1} | | |
| | 1147 – 1149 cm^{-1} | Παρουσία ένωσης β-D-γλυκόζης | Γλυκοσινολικές Ενώσεις |
| | 1099 – 1101 cm^{-1} | Ασύμμετρη δόνηση τάσης του γλυκοζιτικού δεσμού C-O-C Δονήσεις τάσης των δεσμών C-C και C-O των δακτυλίων, των πολυσακχαριτών | Πολυσακχαρίτες |
| | 1022 – 1024 cm^{-1} | | |
| | 536 – 586 cm^{-1} | δονήσεις κάμψης του δεσμού –NCS εντός και εκτός επιπέδου ισοροπίας (in-plane & out-of-plane) | Ισοθειοκυανικές ενώσεις |

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από την παρούσα μελέτη παρατηρήθηκε διαφοροποίηση των ταινιών απορρόφησης μεταξύ των εσωτερικών, ενδιάμεσων και εξωτερικών τμημάτων του λαχάνου Βρυξελλών. Αρχικά, τα αποτελέσματα τα οποία ελήφθησαν για το εξωτερικό τμήμα των λαχάνου Βρυξελλών γενικώς παρουσιάζουν μία αύξουσα τάση του μέσου όρου (mean) των δεδομένων απορροφήσεων συγκριτικά με τα εσωτερικά και ενδιάμεσα τμήματά του. Εντούτοις, προέκυψαν ισχυρές κορυφές οι οποίες αποδίδονται κυρίως στην έντονη παρουσία των γλυκοσινολικών ενώσεων καθώς επίσης ασθενέστερες κορυφές οι οποίες αποδίδονται σε ενώσεις πρωτεϊνικής φύσης, χλωροφύλλη, υδαάνθρακες, λιπαρά οξέα κτλ καθότι εντοπίστηκαν κορυφές στις περιοχές απορρόφησης των πρωτεϊνών των υδανθράκων και των λιπιδίων των λαχανικών του γένους *Brassica*.

Ειδικότερα, στατιστικά σημαντική διαφορά, η οποία αποδίδεται στην απορρόφηση των γλυκοζινολικών ενώσεων -μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων- εντοπίζεται στα μήκη κύματος $3280 - 3340 \text{ cm}^{-1}$, $1319-1323 \text{ cm}^{-1}$, $1369-1373 \text{ cm}^{-1}$, $1415-1419 \text{ cm}^{-1}$, $1147-1149 \text{ cm}^{-1}$. Αυτή η αυξανόμενη τάση των γλυκοσινολικών ενώσεων από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά τμήματα του λαχάνου βασίζεται στον αμυντικό μηχανισμό τον οποίο προσφέρουν οι ενώσεις αυτές έναντι μίας μηχανικής κάκωσης, ενός παρασίτου ή ενός παθογόνου μικροοργανισμού. Οι ενώσεις αυτές βρίσκονται διαμερισμένες και συσσωρευμένες σε συγκεκριμένα κύτταρα· κυρίως στα κύτταρα τα οποία απαιτούν άμεση ανταπόκριση σε ένα εξωτερικό ερέθισμα, δηλαδή στα κύτταρα της επιφάνειας των εξωτερικών φυλλωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι σχετικά με τις γλυκοσινολικές ενώσεις η γλυκομπρασικήνη (η οποία απορροφά στο εύρος $3280 - 3340 \text{ cm}^{-1}$) παρουσιάζει αυξημένη απορρόφηση στα εξωτερικά στρώματα έναντι της γλυκοραφάνινης (η οποία απορροφά στο εύρος $1629 - 1635 \text{ cm}^{-1}$) και της νεογλυκομπρασικήςνης (η οποία απορροφά στο εύρος $1238 - 1242 \text{ cm}^{-1}$) οι οποίες παραμένουν σε παραπλήσια επίπεδα μεταξύ των τμημάτων.

Επιπλέον, στατιστικά σημαντική διαφορά εντοπίζεται στα μήκη κύματος 2922 cm^{-1} και 2855 cm^{-1} των οποίων οι απορροφήσεις αποδίδονται στα λιπαρά οξέα. Οι χαρακτηριστικές διπλές κορυφές που σχηματίζονται στο γράφημα

εντοπίζονται επίσης στο μπρόκολο, το οποίο ανήκει στο ίδιο γένος (*Brassica*). Έτσι, επαληθεύεται η αύξουσα περιεκτικότητα των στρωμάτων του καρπού σε λιπαρά οξέα, καθότι τα λαχανάκια Βρυξελλών και ιδιαίτερα οι σπόροι των φυτών του γένους *Brassica*, από τους οποίους σπόρους βλαστάνουν τα φυτά, είναι ιδιαίτερα πλούσιοι σε αυτές τις ενώσεις. Επίσης, η απορρόφηση στις τιμές αυτές ενδεχομένως να αποδίδεται στις δονήσεις του εστερικού δεσμού της χλωροφύλλης, αιτιολογώντας τη ναππουσία απορρόφησης του εσωτερικού στρώματος στην τιμή 2855 cm^{-1} ενώ τα υπόλοιπα στρώματα εμφανίζουν αύξουσα τάση.

Επιπρόσθετα, στατιστικά σημαντική διαφορά εντοπίζεται στο μήκος κύματος $1732 - 1737\text{ cm}^{-1}$ του οποίου η απορρόφηση οφείλεται στα μόρια των χλωροφυλλών (α και β). Εφόσον είναι γνωστό ότι σε υψηλότερες εντάσεις φωτός προκαλείται ταχύτερη ανάπτυξη του συστήματος της φωτοσύνθεσης και επομένως της χλωροφύλλης, τα εξωτερικά τμήματα παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένη απορρόφηση σε σύγκριση με τα εσωτερικά και τα ενδιάμεσα.

Αναφορικά με τους υδατάνθρακες εντοπίζονται κορυφές με στατιστικά σημαντική διαφορά τιμών στα μήκη κύματος $1099 - 1101\text{ cm}^{-1}$ και $1022 - 1024\text{ cm}^{-1}$ μεταξύ εσωτερικών, ενδιάμεσων και εξωτερικών τμημάτων. Δεδομένου ότι η κυτταρίνη αποτελεί το κύριο δομικό συστατικό του κυτταρικού τοιχώματος των φυτικών κυττάρων, προσδίδοντας σταθερότητα στο φυτό -καθότι σχηματίζουν δέσμες οι οποίες με την σειρά τους διαπλέκονται σε πολύ ισχυρά πλέγματα- μπορούμε να αντιληφθούμε τον σημαντικότερο βιολογικό ρόλο που επιτελούν, ενισχύοντας τα εξωτερικά τμήματα του λαχάνου. Οι κορυφές που εντοπίστηκαν στο φάσμα, είναι χαρακτηριστικές για τα φυτά του γένους *Brassica* και ανιχνεύονται επίσης στο φάσμα απορρόφησης του μπρόκολου.

Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι το εξωτερικό στρώμα των λαχάνων Βρυξελλών κατά κοινή ομολογία θεωρείται πλουσιότερο σε φυτοχημικές ενώσεις με ωφέλιμη επίδραση στην ανθρώπινη υγεία. Το συμπέρασμα αυτό υπογραμμίζει τη σημαντικότητα της πρόσληψης φυτοχημικών ενώσεων μέσω της κατανάλωσης των λαχανικών της οικογένειας των σταυρανθών και ειδικότερα των λαχάνων Βρυξελλών.

Επομένως, οι βιομηχανίες τροφίμων μπορούν να στρέψουν το ενδιαφέρον τους περισσότερο στην παραγωγή, στη διάθεση καθώς και στην αξιοποίηση αυτών των ιδιαίτερα επωφελών υπερτροφών. Επιπλέον, η βιολογική δράση των φυτοχημικών ενώσεων τόσο σε αντιμικροβιακό όσο και σε αντιοξειδωτικό επίπεδο

ανοίγει νέους δρόμους για την εκμετάλλευση –εν προκειμένω- του εξωτερικού στρώματος του λαχάνου Βρυξελλών για την παρασκευή συμπληρωμάτων διατροφής.

Απώτερος στόχος της παρούσας μελέτης είναι η ταυτοποίηση και η ποσοτική αποτίμηση των γλυκοσινολικών ενώσεων στα τρία διαφορετικά τμήματα του λαχάνου Βρυξελλών με χρήση αναλυτικών τεχνικών (HPLC- High-performance liquid chromatography) καθώς και η πραγματοποίηση φασματοφωτομετρικής ανάλυσης για τη χλωροφύλλη μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων του λαχάνου Βρυξελλών αποτελεί απώτερο στόχο της παρούσας μελέτης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΕΙΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

| Εύρος Απορρόφησης | 16 δείγματα από το εσωτερικό τμήμα («καρδιά») του Λαχάνου Βρυξελλών | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 536-586 | 0,004 | 0,004 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| 1022-1024 | 0,072 | 0,082 | 0,063 | 0,062 | 0,087 | 0,068 | 0,069 | 0,076 | 0,088 | 0,083 | 0,074 | 0,074 | 0,072 | 0,082 | 0,089 | 0,082 |
| 1099-1101 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,012 |
| 1147-1149 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1238-1242 | 0,037 | 0,033 | 0,031 | 0,042 | 0,039 | 0,031 | 0,034 | 0,038 | 0,035 | 0,035 | 0,039 | 0,031 | 0,037 | 0,031 | 0,035 | 0,034 |
| 1319-1323 | 0,006 | 0,005 | 0,008 | 0,009 | 0,008 | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,009 | 0,010 | 0,010 | 0,005 | 0,009 | 0,007 | 0,010 | 0,011 |
| 1369-1373 | 0,008 | 0,008 | 0,006 | 0,006 | 0,009 | 0,010 | 0,012 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,008 |
| 1415-1419 | 0,022 | 0,013 | 0,014 | 0,008 | 0,007 | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,008 | 0,015 | 0,008 | 0,008 | 0,013 | 0,015 | 0,010 |
| 1629-1635 | 0,245 | 0,225 | 0,235 | 0,218 | 0,203 | 0,251 | 0,214 | 0,261 | 0,210 | 0,206 | 0,210 | 0,248 | 0,209 | 0,245 | 0,208 | 0,212 |
| 1732-1737 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2855 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2922 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,030 | 0,051 | 0,030 | 0,028 | 0,035 | 0,051 | 0,037 | 0,029 | 0,030 | 0,033 | 0,030 | 0,028 | 0,044 |
| 3280-3340 | 0,080 | 0,090 | 0,101 | 0,080 | 0,070 | 0,084 | 0,085 | 0,082 | 0,071 | 0,073 | 0,071 | 0,085 | 0,080 | 0,083 | 0,073 | 0,080 |

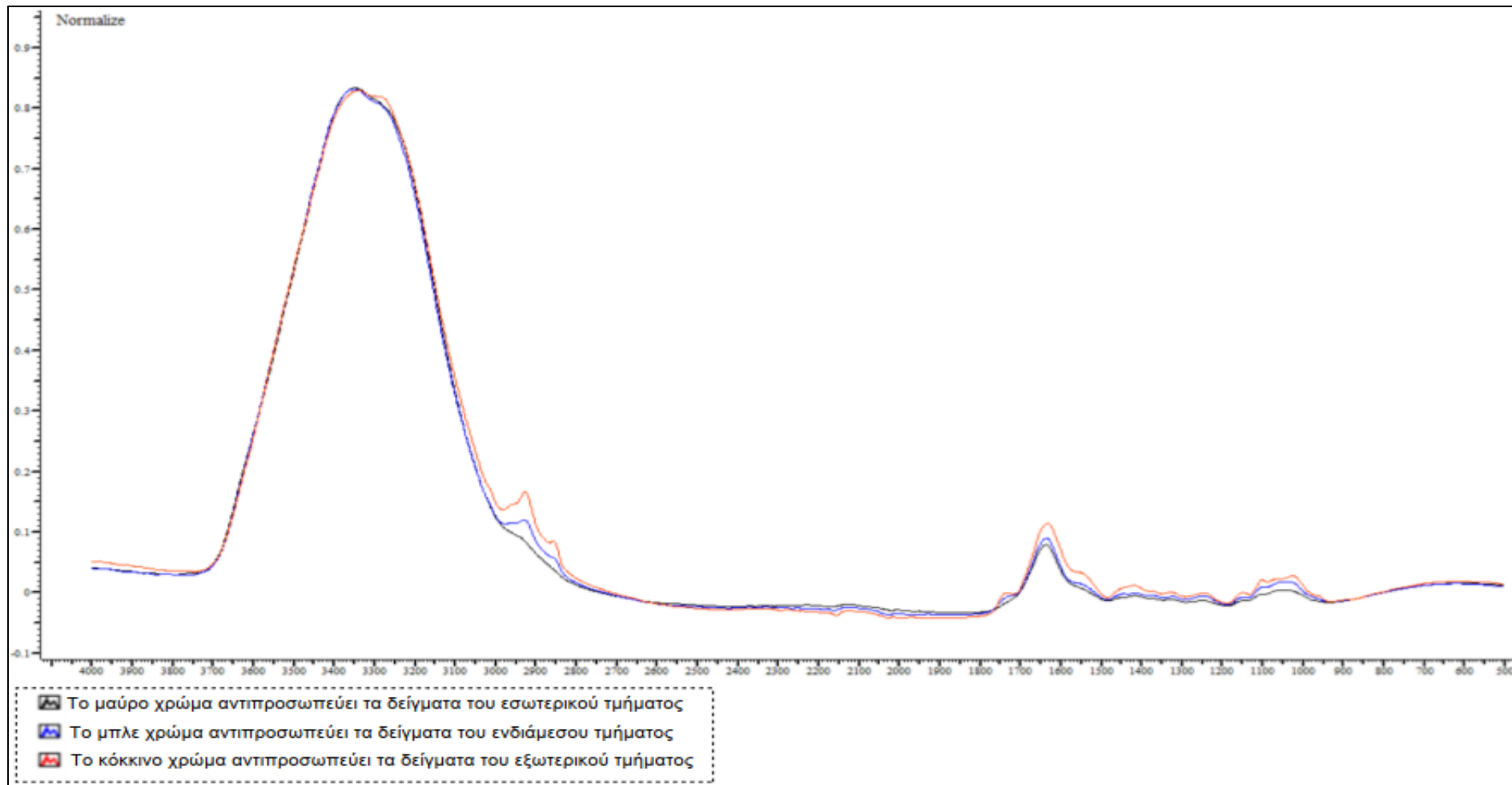
| Εύρος Απορρόφησης | 16 δείγματα από το ενδιάμεσο τμήμα του Λαχάνου Βρυξελλών | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 536-586 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0,008 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,003 | 0,005 | 0,004 |
| 1022-1024 | 0,077 | 0,094 | 0,084 | 0,077 | 0,072 | 0,076 | 0,075 | 0,045 | 0,072 | 0,072 | 0,078 | 0,089 | 0,080 | 0,074 | 0,078 | 0,091 |
| 1099-1101 | 0,012 | 0,011 | 0,016 | 0,012 | 0,013 | 0,011 | 0,012 | 0,021 | 0,013 | 0,011 | 0,012 | 0,013 | 0,016 | 0,013 | 0,013 | 0,013 |
| 1147-1149 | - | - | 0,012 | - | - | - | - | 0,014 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1238-1242 | 0,033 | 0,038 | 0,031 | 0,034 | 0,043 | 0,036 | 0,032 | 0,046 | 0,039 | 0,033 | 0,037 | 0,038 | 0,034 | 0,035 | 0,034 | 0,032 |
| 1319-1323 | 0,010 | 0,011 | 0,009 | 0,006 | 0,010 | 0,006 | 0,006 | 0,010 | 0,008 | | 0,008 | 0,009 | 0,010 | 0,008 | 0,009 | 0,010 |
| 1369-1373 | 0,006 | 0,008 | 0,008 | 0,005 | 0,007 | 0,006 | 0,006 | 0,012 | 0,009 | 0,007 | 0,010 | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,007 | 0,009 |
| 1415-1419 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,005 | 0,007 | 0,006 | 0,007 | 0,010 | 0,007 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,008 | 0,006 | 0,007 | 0,007 |
| 1629-1635 | 0,269 | 0,205 | 0,251 | 0,247 | 0,209 | 0,255 | 0,240 | 0,202 | 0,204 | 0,196 | 0,193 | 0,271 | 0,276 | 0,206 | 0,211 | 0,264 |
| 1732-1737 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2855 | 0,014 | 0,014 | 0,015 | 0,013 | 0,016 | 0,013 | 0,011 | 0,021 | 0,019 | 0,016 | 0,018 | 0,017 | 0,019 | 0,014 | 0,011 | 0,014 |
| 2922 | 0,050 | 0,049 | 0,045 | 0,052 | 0,058 | 0,049 | 0,051 | 0,071 | 0,082 | 0,060 | 0,050 | 0,076 | 0,071 | 0,062 | 0,063 | 0,067 |
| 3280-3340 | 0,096 | 0,099 | 0,086 | 0,097 | 0,071 | 0,076 | 0,084 | 0,086 | 0,078 | 0,112 | 0,087 | 0,094 | 0,082 | 0,085 | 0,083 | 0,089 |

| Εύρος Απορρόφησης | 16 δείγματα από το εξωτερικό τμήμα του Λαχάνου Βρυξελλών | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 536-586 | 0,007 | 0,009 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,005 |
| 1022-1024 | 0,108 | 0,096 | 0,099 | 0,099 | 0,098 | 0,088 | 0,091 | 0,088 | 0,089 | 0,087 | 0,088 | 0,098 | 0,095 | 0,098 | 0,091 | 0,091 |
| 1099-1101 | 0,038 | 0,034 | 0,044 | 0,037 | 0,035 | 0,033 | 0,033 | 0,044 | 0,030 | 0,034 | 0,031 | 0,037 | 0,039 | 0,044 | 0,033 | 0,035 |
| 1147-1149 | 0,025 | 0,026 | 0,035 | 0,024 | 0,026 | 0,025 | 0,028 | 0,029 | 0,022 | 0,025 | 0,020 | 0,022 | 0,023 | 0,029 | 0,022 | 0,027 |
| 1238-1242 | 0,043 | 0,039 | 0,040 | 0,034 | 0,036 | 0,036 | 0,035 | 0,036 | 0,033 | 0,035 | 0,036 | 0,034 | 0,034 | 0,044 | 0,036 | 0,039 |
| 1319-1323 | 0,014 | 0,014 | 0,013 | 0,013 | 0,012 | 0,012 | 0,012 | 0,013 | 0,012 | 0,011 | 0,012 | 0,013 | 0,011 | 0,012 | 0,011 | 0,011 |
| 1369-1373 | 0,009 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | 0,008 | 0,010 | 0,009 | 0,009 | 0,010 | 0,010 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | 0,010 | 0,011 | 0,009 |
| 1415-1419 | 0,039 | 0,039 | 0,035 | 0,036 | 0,039 | 0,037 | 0,031 | 0,033 | 0,034 | 0,038 | 0,033 | 0,031 | 0,035 | 0,035 | 0,031 | 0,031 |
| 1629-1635 | 0,250 | 0,233 | 0,263 | 0,250 | 0,254 | 0,235 | 0,229 | 0,242 | 0,223 | 0,228 | 0,238 | 0,250 | 0,237 | 0,239 | 0,224 | 0,233 |
| 1732-1737 | 0,078 | 0,070 | 0,078 | 0,076 | 0,078 | 0,070 | 0,078 | 0,080 | 0,079 | 0,070 | 0,072 | 0,073 | 0,072 | 0,080 | 0,072 | 0,078 |
| 2855 | 0,073 | 0,070 | 0,071 | 0,073 | 0,077 | 0,074 | 0,079 | 0,083 | 0,082 | 0,073 | 0,072 | 0,071 | 0,072 | 0,071 | 0,078 | 0,076 |
| 2922 | 0,201 | 0,178 | 0,199 | 0,203 | 0,184 | 0,190 | 0,182 | 0,217 | 0,194 | 0,194 | 0,191 | 0,189 | 0,182 | 0,205 | 0,186 | 0,185 |
| 3280-3340 | 0,116 | 0,096 | 0,118 | 0,110 | 0,102 | 0,102 | 0,092 | 0,103 | 0,094 | 0,099 | 0,116 | 0,100 | 0,108 | 0,104 | 0,117 | 0,129 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΤΙΜΩΝ

| Εύρος Απορρόφησης | Μέσος Όρος (Mean) ± Τυπική απόκλιση (SD) | | |
|---|--|-----------------|-----------------|
| | Εσωτερικό Τμήμα | Ενδιάμεσο Τμήμα | Εξωτερικό Τμήμα |
| 536-586 | 0,005±0,000α | 0,004±0,001β | 0,006±0,001γ |
| 1022-1024 | 0,076±0,009α | 0,077±0,011α | 0,094±0,006β |
| 1099-1101 | 0,009±0,001α | 0,013±0,003β | 0,036±0,004γ |
| 1147-1149 | - | - | 0,026±0,004 |
| 1238-1242 | 0,035±0,003α | 0,036±0,004α | 0,037±0,003α |
| 1319-1323 | 0,008±0,002α | 0,009±0,002α | 0,012±0,001β |
| 1369-1373 | 0,008±0,002α | 0,008±0,002α | 0,009±0,001β |
| 1415-1419 | 0,011±0,004α | 0,007±0,001β | 0,035±0,003γ |
| 1629-1635 | 0,225±0,019α | 0,231±0,030α | 0,239±0,011α |
| 1732-1737 | - | - | 0,075±0,004 |
| 2855 | - | 0,015±0,003 | 0,075±0,004 |
| 2922 | 0,034±0,008α | 0,060±0,011β | 0,193±0,010γ |
| 3280-3340 | 0,081±0,008α | 0,088±0,010α | 0,107±0,010β |
| <p>Διαφορετικά γράμματα (α, β, γ) κατά μήκος της ίδιας γραμμής υποδηλώνουν την ύπαρξη στατιστικά σημαντικής διαφοράς (p-value<0,05) μεταξύ των τιμών</p> | | | |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΛΗΦΘΕΝ ΦΑΣΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ATR-FTIR ΑΠΟ ΤΑ ΛΑΧΑΝΑΚΙΑ ΒΡΥΞΕΛΛΩΝ



BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Favela-González, K. M., Hernández-Almanza, A. Y., & De la Fuente-Salcido, N. M. (2020). The value of bioactive compounds of cruciferous vegetables (Brassica) as antimicrobials and antioxidants: A review. *Journal of Food Biochemistry*, 44(10), e13414.
2. Shanmugam, H., Jayaprakasha, G. K., & Patil, B. S. (2018). Extraction and identification of health-promoting phytochemicals from Brussels sprouts. In *Advances in plant phenolics: from chemistry to human health* (pp. 151-174). American Chemical Society.
3. Tanii, H., Higashi, T., Nishimura, F., Higuchi, Y., & Saijoh, K. (2008). Effects of cruciferous allyl nitrile on phase 2 antioxidant and detoxification enzymes. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, 14(10), BR189-92.
4. Hecht, S. S. (2000). Inhibition of carcinogenesis by isothiocyanates. *Drug metabolism reviews*, 32(3-4), 395-411.
5. Yang, G., Gao, Y. T., Shu, X. O., Cai, Q., Li, G. L., Li, H. L., ... & Zheng, W. (2010). Isothiocyanate exposure, glutathione S-transferase polymorphisms, and colorectal cancer risk. *The American journal of clinical nutrition*, 91(3), 704-711.
6. Higdon, J. V., Delage, B., Williams, D. E., & Dashwood, R. H. (2007). Cruciferous vegetables and human cancer risk: epidemiologic evidence and mechanistic basis. *Pharmacological research*, 55(3), 224-236.
7. Al-Shehbaz, I. A., Beilstein, M. A., & Kellogg, E. A. (2006). Systematics and phylogeny of the Brassicaceae (Cruciferae): an overview. *Plant systematics and evolution*, 259, 89-120.
8. Warwick, S. I. (2011). Brassicaceae in agriculture. *Genetics and Genomics of the Brassicaceae*, 33-65.
9. German, D. A., Hendriks, K. P., Koch, M. A., Lens, F., Lysak, M. A., Bailey, C. D., ... & Al-Shehbaz, I. A. (2023). An updated classification of the Brassicaceae (Cruciferae). *PhytoKeys*, 220, 127.
10. Raza, A., Hafeez, M. B., Zahra, N., Shaukat, K., Umbreen, S., Tabassum, J., ... & Hasanuzzaman, M. (2020). The plant family Brassicaceae: Introduction, biology, and importance. *The Plant Family Brassicaceae: Biology and Physiological Responses to Environmental Stresses*, 1-43.
11. Quiros, C. F., & Farnham, M. W. (2011). The genetics of Brassica oleracea. *Genetics and Genomics of the Brassicaceae*, 261-289.
12. <https://agrosimvoulos.gr/laxanakia-vrixellwn-kallierghtikes-texnikes/>
13. Nakilcioglu-Taş, E., & Otleş, S. (2017). Degradation kinetics of bioactive compounds and antioxidant capacity of Brussels sprouts during microwave processing. *International journal of food properties*, 20(sup3), S2798-S2809.

14. Elansari, A. M., Fenton, D. L., & Callahan, C. W. (2019). Precooling. In Postharvest technology of perishable horticultural commodities (pp. 161-207). Woodhead Publishing.
15. <https://www.isofruit.gr/proetoimasia-diacheirisi-ton-lachanon-vryxellon-prin-kai-kata-ti-diarkeia-tis-apothikeysis-se-psyktikoys-thalamoys-me-liga-logia/>
16. Π. Κοτζεκίδου Ρουκά, 2016. Μικροβιολογία τροφίμων & Μικροβιολογική ανάλυση τροφίμων, Εκδ Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη
17. Αναγνωστοπούλου Α., Ταλέλλη Α. 2008. Τεχνολογία & Ποιότητα Φρούτων & Λαχανικών, Εκδ. Νέων τεχνολογιών, Αθήνα
18. Νικόλαος Π. Ζόγκας, 2017. Βασικές αρχές μηχανικής τροφίμων, Εκδ τζιόλα, Θεσσαλονίκη
19. <https://www.mednutrition.gr/portal/efarmoges/leksiko-diatrofis/15934-laxanakia-vryksellon>
20. Janice L. Thompson, Melinda M. Manore, Linda A. Vaughan, 2021. *Η επιστήμη της διατροφής* τέταρτη έκδοση, Εκδ. Ιατρικές εκδόσεις Λαγός Δημήτριος, Αθήνα
21. Σφλώμος Κ., Βαρζάκας Θ. 2019. Εισαγωγή στην επιστήμη & την τεχνολογία τροφίμων, Εκδ τσότρας, Αθήνα
22. Aziz, A., Noreen, S., Khalid, W., Mubarik, F., Niazi, M. K., Koraqi, H., ... & Al-Farga, A. (2022). Extraction of bioactive compounds from different vegetable sprouts and their potential role in the formulation of functional foods against various disorders: A literature-based review. *Molecules*, 27(21), 7320.
23. Abbaoui, B., Lucas, C. R., Riedl, K. M., Clinton, S. K., & Mortazavi, A. (2018). Cruciferous vegetables, isothiocyanates, and bladder cancer prevention. *Molecular nutrition & food research*, 62(18), 1800079.
24. Melrose, J. (2019). The glucosinolates: a sulphur glucoside family of mustard anti-tumour and antimicrobial phytochemicals of potential therapeutic application. *Biomedicines*, 7(3), 62.
25. Vig, A. P., Rampal, G., Thind, T. S., & Arora, S. (2009). Bio-protective effects of glucosinolates—A review. *LWT-Food Science and Technology*, 42(10), 1561-1572.
26. Τμήμα φαρμακευτικής, «Φαρμακογνωσία Ι φαινολικά οξέα».
27. Rodríguez-García, C., Sánchez-Quesada, C., Toledo, E., Delgado-Rodríguez, M., & Gaforio, J. J. (2019). Naturally lignan-rich foods: A dietary tool for health promotion?. *Molecules*, 24(5), 917.
28. Frede, K., Schreiner, M., & Baldermann, S. (2019). Light quality-induced changes of carotenoid composition in pak choi *Brassica rapa ssp. chinensis*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 193, 18-30.

29. Sharma, A., Rai, P. K., & Prasad, S. (2018). GC–MS detection and determination of major volatile compounds in *Brassica juncea* L. leaves and seeds. *Microchemical Journal*, 138, 488-493.
30. Šamec, D., & Salopek-Sondi, B. (2019). Cruciferous (brassicaceae) vegetables. In *Nonvitamin and nonmineral nutritional supplements* (pp. 195-202). Academic Press.
31. Martínez, S., Armesto, J., Gómez-Limia, L., & Carballo, J. (2020). Impact of processing and storage on the nutritional and sensory properties and bioactive components of *Brassica* spp. A review. *Food Chemistry*, 313, 126065.
32. Salehi, B., Sharopov, F., Martorell, M., Rajkovic, J., Ademiluyi, A. O., Sharifi-Rad, M., ... & Sharifi-Rad, J. (2018). Phytochemicals in *Helicobacter pylori* infections: What are we doing now? *International journal of molecular sciences*, 19(8), 2361.
33. Burnett-Boothroyd, S. C., & McCarthy, B. J. (2011). Antimicrobial treatments of textiles for hygiene and infection control applications: An industrial perspective. In *Textiles for hygiene and infection control* (pp. 196-209). Woodhead Publishing.
34. Barbieri, R., Coppo, E., Marchese, A., Daglia, M., Sobarzo-Sánchez, E., Nabavi, S. F., & Nabavi, S. M. (2017). Phytochemicals for human disease: An update on plant-derived compounds antibacterial activity. *Microbiological research*, 196, 44-68.
35. Huang, D., Ou, B., & Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(6), 1841-1856.
36. <https://www.mistikakipou.gr/laxanakia-vrixellon-kalliergeia/>
37. http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/%CE%9B%CE%AC%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%BF_%CE%92%CF%81%CF%85%CE%BE%CE%B5%CE%BB%CE%BB%CF%8E%CE%BD_%CF%86%CF%85%CF%84%CF%8C
38. Imran, M., Salehi, B., Sharifi-Rad, J., Aslam Gondal, T., Saeed, F., Imran, A., ... & Estevinho, L. M. (2019). Kaempferol: A key emphasis to its anticancer potential. *Molecules*, 24(12), 2277.
39. Clarke, D. B. (2010). Glucosinolates, structures and analysis in food. *Analytical methods*, 2(4), 310-325.
40. Lorigooini, Z., Jamshidi-kia, F., & Hosseini, Z. (2020). Analysis of aromatic acids (phenolic acids and hydroxycinnamic acids). In *Recent Advances in Natural Products Analysis* (pp. 199-219). Elsevier.
41. Singh, P., Arif, Y., Bajguz, A., & Hayat, S. (2021). The role of quercetin in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 10-19.
42. Rho, H. S., Ghimeray, A. K., Yoo, D. S., Ahn, S. M., Kwon, S. S., Lee, K. H., ... & Cho, J. Y. (2011). Kaempferol and kaempferol rhamnosides with depigmenting and anti-inflammatory properties. *Molecules*, 16(4), 3338-3344.

43. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), Knutsen, H. K., Alexander, J., Barregård, L., Bignami, M., Brüschweiler, B., ... & Vleminckx, C. (2016). Erucic acid in feed and food. *EFSA Journal*, 14(11), e04593.
44. Mancini, A., Imperlini, E., Nigro, E., Montagnese, C., Daniele, A., Orrù, S., & Buono, P. (2015). Biological and nutritional properties of palm oil and palmitic acid: effects on health. *Molecules*, 20(9), 17339-17361.
45. Gong, M., Wei, W., Hu, Y., Jin, Q., & Wang, X. (2020). Structure determination of conjugated linoleic and linolenic acids. *Journal of Chromatography B*, 1153, 122292.
46. Mondloch, S., Scholl, C. D., Arscott, S. A., & Tanumihardjo, S. A. (2019). Glucosinolate and isothiocyanate contents of frozen broccoli, Brussels sprouts and a whole-food cruciferous supplement over time. *Journal of Food & Nutritional Sciences*, 1(1), Journal-of.
47. Mirecki, N. (2006). Influence of the planting dates on chemical composition and yield of Brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*).
48. Everaarts, A. P., Booij, R., & De Moel, C. P. (1998). Yield formation in Brussels sprouts. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 73(5), 711-721.
49. Verheij, E. W. M. (1970). Spacing experiments with Brussels sprouts grown for single-pick harvests. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 18(1), 89-104.
50. Everaarts, A. P., & Van Beusichem, M. L. (1998). The effect of planting date and plant density on nitrogen uptake and nitrogen harvest by Brussels sprouts. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 73(5), 704-710.
51. Jakopic, J., Weber, N., Cunja, V., Veberic, R., & Slatnar, A. (2016). Brussels sprout decapitation yields larger sprouts of superior quality. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(40), 7459-7465.
52. da Silva Dias, J. C., & Imai, S. (2017). Vegetables consumption and its benefits on diabetes. *Journal of Nutritional Therapeutics*, 6(1), 1-10.
53. Pachulicz, R. J., Yu, L., Jovcevski, B., Bulone, V., & Pukala, T. L. (2023). Structural Analysis and Identity Confirmation of Anthocyanins in *Brassica oleracea* Extracts by Direct Injection Ion Mobility-Mass Spectrometry. *ACS Measurement Science Au*, 3(3), 200-207.
54. Langston, F., Redha, A. A., Nash, G. R., Bows, J. R., Torquati, L., Gidley, M. J., & Cozzolino, D. (2023). Qualitative analysis of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) glucosinolates: Investigating the use of mid-infrared spectroscopy combined with chemometrics. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 105532.
55. Di Martino, L., Biancolillo, A., Scappaticci, C., Foschi, M., & D'Archivio, A. A. (2024). Non-Destructive Characterization of Italian Local Brassicaceae Cultivars Using ATR-FT-IR and Chemometrics. *Applied Sciences*, 14(3), 1277.

56. Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97-118.
57. Ghorbanzadeh, P., Aliniaiefard, S., Esmaeili, M., Mashal, M., Azadegan, B., & Seif, M. (2021). Dependency of growth, water use efficiency, chlorophyll fluorescence, and stomatal characteristics of lettuce plants to light intensity. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 2191-2207.
58. Μιχαήλ Σ. Μπρατάκος, 2021. *Ενόργανη χημική ανάλυση. Εφαρμογές σε τρόφιμα και ποτά*, Εκδ. Παπαζήση, Αθήνα
59. Vig, A. P., Rampal, G., Thind, T. S., & Arora, S. (2009). Bio-protective effects of glucosinolates—A review. *LWT-Food Science and Technology*, 42(10), 1561-1572.
60. Jackson, M. I. C. H. A. E. L., & Mantsch, H. H. (1996). Biomedical infrared spectroscopy. *Infrared spectroscopy of biomolecules*, 311-340.
61. Hong, T., Yin, J. Y., Nie, S. P., & Xie, M. Y. (2021). Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective. *Food chemistry: X*, 12, 100168.
62. Türker-Kaya, S., & Huck, C. W. (2017). A review of mid-infrared and near-infrared imaging: principles, concepts and applications in plant tissue analysis. *Molecules*, 22(1), 168.
63. Vo, Q. V., Trenerry, C., Rochfort, S., & Hughes, A. B. (2013). A total synthesis of (R, S) S-glucoraphanin. *Tetrahedron*, 69(41), 8731-8737.
64. Larkin, P. (2017). *Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation*. Elsevier.
65. Ma, Y., He, H., Wu, J., Wang, C., Chao, K., & Huang, Q. (2018). Assessment of polysaccharides from mycelia of genus *Ganoderma* by mid-infrared and near-infrared spectroscopy. *Scientific Reports*, 8(1), 10.
66. Coates, J. (2000). Interpretation of infrared spectra, a practical approach. *Encyclopedia of analytical chemistry*, 12, 10815-10837.
67. Vo, Q. V., Trenerry, C., Rochfort, S., Wadeson, J., Leyton, C., & Hughes, A. B. (2014). Synthesis and anti-inflammatory activity of indole glucosinolates. *Bioorganic & medicinal chemistry*, 22(2), 856-864.
68. Reale, S., Biancolillo, A., Foschi, M., Di Donato, F., Di Censo, E., & D'Archivio, A. A. (2023). Geographical discrimination of Italian carrot (*Daucus carota* L.) varieties: A comparison between ATR FT-IR fingerprinting and HS-SPME/GC-MS volatile profiling. *Food Control*, 146, 109508.
69. Foschi, M., Tozzi, L., Di Donato, F., Biancolillo, A., & D'Archivio, A. A. (2022). A Novel FTIR-based chemometric solution for the assessment of saffron adulteration with non-fresh stigmas. *Molecules*, 28(1), 33.

70. Sasidharan, S., Chen, Y., Saravanan, D., Sundram, K. M., & Latha, L. Y. (2011). Extraction, isolation and characterization of bioactive compounds from plants' extracts. *African journal of traditional, complementary and alternative medicines*, 8(1).
71. Martemucci, G., Costagliola, C., Mariano, M., D'andrea, L., Napolitano, P., & D'Alessandro, A. G. (2022). Free radical properties, source and targets, antioxidant consumption and health. *Oxygen*, 2(2), 48-78.
72. Chaudhary, P., Janmeda, P., Docea, A. O., Yeskaliyeva, B., Abdull Razis, A. F., Modu, B., ... & Sharifi-Rad, J. (2023). Oxidative stress, free radicals and antioxidants: Potential crosstalk in the pathophysiology of human diseases. *Frontiers in chemistry*, 11, 1158198.
73. Amirvaresi, A., Nikounezhad, N., Amirahmadi, M., Daraei, B., & Parastar, H. (2021). Comparison of near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy based on chemometrics for saffron authentication and adulteration detection. *Food Chemistry*, 344, 128647.
74. Di Gioia, F., & Petropoulos, S. A. (2021). Glucosinolates. *Food bioactives and health*, 41-77.
75. Ali Redha, A., Langston, F., Nash, G. R., Bows, J. R., Torquati, L., Gidley, M. J., & Cozzolino, D. (2023). Determination of glucosinolates in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) by combining mid-infrared (MIR) spectroscopy with chemometrics. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(11), 5679-5688.
76. Ali Redha, A., Torquati, L., Langston, F., Nash, G. R., Gidley, M. J., & Cozzolino, D. (2023). Determination of glucosinolates and isothiocyanates in glucosinolate-rich vegetables and oilseeds using infrared spectroscopy: A systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-17.
77. Bourdoux, S., Li, D., Rajkovic, A., Devlieghere, F., & Uyttendaele, M. (2016). Performance of drying technologies to ensure microbial safety of dried fruits and vegetables. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(6), 1056-1066.
78. El-Nakhel, C., Pannico, A., Graziani, G., Kyriacou, M. C., Gaspari, A., Ritieni, A., ... & Roupheal, Y. (2021). Nutrient supplementation configures the bioactive profile and production characteristics of three Brassica L. microgreens species grown in peat-based media. *Agronomy*, 11(2), 346.
79. Rahman, A. S. (2019). Genetic Analysis of Leaf and Sprout Traits of Cabbage and Brussels Sprout. [Netherlands]:[publisher not identified].
80. Knorr, D., & Augustin, M. A. (2021). Food processing needs, advantages and misconceptions. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 103-110.
81. Pandiselvam, R., Tak, Y., Olum, E., Sujayasree, O. J., Tekgöl, Y., Çalışkan Koç, G., ... & Kumar, M. (2022). Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. *Journal of Texture Studies*, 53(6), 737-762.
82. Filippini, T., Naska, A., Kasdagli, M. I., Torres, D., Lopes, C., Carvalho, C., ... & Vinceti, M. (2020). Potassium intake and blood pressure: a dose-response meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of the American Heart Association*, 9(12), e015719.
83. Dias, M. C., Pinto, D. C., & Silva, A. M. (2021). Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity. *Molecules*, 26(17), 5377.

84. Beć, K. B., Grabska, J., & Huck, C. W. (2020). Biomolecular and bioanalytical applications of infrared spectroscopy—A review. *Analytica chimica acta*, 1133, 150-177.
85. Ozaki, Y. (2021). Infrared spectroscopy—Mid-infrared, near-infrared, and far-infrared/terahertz spectroscopy. *Analytical Sciences*, 37(9), 1193-1212.
86. Castillejos-Mijangos, L. A., Acosta-Caudillo, A., Gallardo-Velázquez, T., Osorio-Revilla, G., & Jiménez-Martínez, C. (2022). Uses of FT-MIR spectroscopy and multivariate analysis in quality control of coffee, cocoa, and commercially important spices. *Foods*, 11(4), 579.
87. Campas-Baypoli, O. N., Sánchez-Machado, D. I., Bueno-Solano, C., Núñez-Gastélum, J. A., Reyes-Moreno, C., & López-Cervantes, J. (2009). Biochemical composition and physicochemical properties of broccoli flours. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(sup4), 163-173.
88. Miller, L. M., Bourassa, M. W., & Smith, R. J. (2013). FTIR spectroscopic imaging of protein aggregation in living cells. *Biochimica et biophysica acta (BBA)-biomembranes*, 1828(10), 2339-2346.
89. Abdullah, B. M., Salih, N., & Salimon, J. (2014). Optimization of the chemoenzymatic mono-epoxidation of linoleic acid using D-optimal design. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18(3), 276-287.
90. Campas-Baypoli, O. N., Sánchez-Machado, D. I., Bueno-Solano, C., Núñez-Gastélum, J. A., Reyes-Moreno, C., & López-Cervantes, J. (2009). Biochemical composition and physicochemical properties of broccoli flours. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(sup4), 163-173.